E-ISSN : 2807-5579
P-ISSN : 2807-5889

BOUWPLANK

Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan

VOLUME 06 NOMOR 02, OKTOBER 2026

Published by:
Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering,
University of Widyagama Malang, Indonesia

BOUWPLANK
Jl. Borobudur No. 35 Malang 65128
Telp. 0341-492282, 411291 Faks. 0341-496919
Email: sipil@widyagama.ac.id

E-ISSN : 2807-5579
P-ISSN : 2807-5889

BOUWPLANK

Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan

VOLUME 06, NOMOR 02, OKTOBER 2026

DEWAN REDAKSI

Penanggung Jawab : Dekan Fakultas Teknik
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Tim Editor :

Editor in Chief

Ir. Abdul Halim, M.T., (SINTA ID: 6660008, Scopus ID: 57225097679), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

Managing Editor

Dr. Candra Aditya, S.T., M.T., (SINTA ID: 5977179, Scopus ID: 57223180604), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

Dr. Rosyid Kholilur Rohman, S.T., M.T., (SINTA ID: 5974833, Scopus ID: 55560780400), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Merdeka Madiun, Indonesia

Dr. Ir. Riman, M.T., (SINTA ID: 5998828), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

Ir. Mohammad Cakrawala, M.T., (SINTA ID: 6666868), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

Anis Purwaningsih, S.T., MT., Indonesia (SINTA ID: 6980770, Scopus ID: 59176250700)
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

Tim Reviewer :

Dr. Ir. B. Sri Umniati, M.T., (SINTA ID: 5977842 , Scopus ID: 57196039961), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, State University of Malang, Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Ir. Bambang Sabariman, S.T., M.T. (SINTA ID: 5992523, Scopus ID: 57194648984), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Assoc. Prof. Dr. Nawir Rasidi, S.T., M.T., (SINTA ID: 6013639, Scopus ID: 57215038530), Indonesia
Department of Construction Engineering Management D-4, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Assoc. Prof. **Dr. Machsus, S.T., M.T.** (SINTA ID: 6066387 , Scopus ID: 57170645100), Indonesia
Department of Civil Infrastructure Engineering, Faculty of Vocations, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

E-ISSN : 2807-5579
P-ISSN : 2807-5889

Dr. Rosyid Kholilur Rohman, S.T., M.T., (SINTA ID: 5974833, Scopus ID: 55560780400), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Merdeka Madiun, Indonesia
Dr. Eng. Ir. Ming Narto Wijaya, S.T., M.T., M.Sc., (SINTA ID: 5992772, Scopus ID: 56465853100), Indonesia
Department of Civil Engineering Undergraduate, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, Indonesia
Assoc. Prof. Dr. Ir. Aji Suraji, M.Sc., (SINTA ID: 5986966, Scopus ID: 57225085090), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia
Prof. Dr. Agus Tugas Sudjianto, S.T., M.T., (SINTA ID: 5986025, Scopus ID: 57225188093), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia
Dr. Dafid Irawan, S.T., M.T., (SINTA ID: 6684776, Scopus ID: 57212384743), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia
Dr. Candra Aditya, S.T., M.T., (SINTA ID: 5977179, Scopus ID: 57223180604), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia
Ir. Abdul Halim, M.T., (SINTA ID: 6660008, Scopus ID: 57225097679), Indonesia
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Widyagama Malang, Indonesia

E-ISSN : 2807-5579
P-ISSN : 2807-5889

BOUWPLANK

Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan

VOLUME 06, NOMOR 02, OKTOBER 2026

PENGANTAR REDAKSI

BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan Volume 06 Nomor 02, Oktober 2026 ini terdiri atas 17 makalah ilmiah yang semuanya telah ditelaah oleh penelaah ahli. Redaktur mengucapkan terima kasih kepada para penulis dan semoga kerja kerasnya akan bermanfaat bagi ilmu pengetahuan dan kehidupan manusia. Partisipasi para ilmuwan khususnya dalam bidang teknik sipil dan lingkungan sangat diharapkan untuk memperkaya khasanah Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan, BOUWPLANK.

REDAKSI

E-ISSN : 2807-5579
P-ISSN : 2807-5889

BOUWPLANK

Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan

VOLUME 06, NOMOR 02, OKTOBER 2026

DAFTAR ISI

Dewan Redaksi i

Pengantar dari Redaksi iii

Daftar Isi iv

Evaluasi Pengelolaan Air Melalui PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti

Irma Suraya, Budijono, Ridwan Manda Putra 1-10

Alternatif Perencanaan Struktur Gedung Café 1912 UMY Geblangan Tamantirto Kasihan Kabupaten Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta

Suprapto, Seno Aji, Laily Fatmawati ..... (11-23)

Analisis Perbandingan Biaya Perkerasan Lentur Dan Kaku Pada Ruas Jalan Tajab – Adijaya Kabupaten Way Kanan

Anggi Duwi Setiadi, Yunita Mauliana ..... (24-34)

Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Asrama Terhadap Beban Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019

Moh Zulfa Muttaqin, M Arif Bakhtiar Efendi, Laily Fatmawati ..... (35-45)

Evaluasi Kinerja Dan Pengendalian Proyek Pada Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung

I Gede Yoginda Jessen Nugraha, Ida Ayu Cri Vinantya Laksmi, I Gusti Agung Putu Eryani ..... (46-55)

Evaluasi Pengendalian Mutu Pekerjaan Perkerasan Beton Pada Proyek Jalan Tirtayasa, Bandar Lampung

Rayu R Warganegara, Yunita Mauliana ..... (56-65)

Distribusi Spasial Amonia (NH_3-N) Pada Air Tambak di Kawasan TPA Griya Jabon Kabupaten Sidoarjo Menggunakan Metode Ordinary Kriging

Adi Supriyanto, Listin Fitrianah ..... (66-77)

Analisis Perubahan Perilaku Mobilitas Masyarakat Akibat Kenaikan Harga BBM (Studi Kasus : Perkotaan Yogyakarta)

Richa Dwi Yuliani, Nur Huda ..... (78-87)

E-ISSN : 2807-5579
P-ISSN : 2807-5889

Penilaian Kinerja Struktur Gedung Bertingkat 5 Dengan Analisis Pushover

Sully Hardina Putri, Candra Aditya, Dafid Irawan..... (88-96)

Analisis Hubungan Distribusi Ukuran Butir Material Timbunan Terhadap Nilai Kohesi dan Sudut Geser Dalam Menggunakan Uji Large Scale Direct Shear

Decandyo Risqi Ramadhana Putra, Agus Tugas Sudjianto, M. Cakrawala.....(97-106)

Studi Analisis Drainase Perkotaan Berbasis SWMM 5.1 Pada Saluran Primer Kedungbanteng – Banjarasri Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo

Moch. Fasya Alfarisi, Riman, Abdul Halim ..... (107-117)

Penerapan Metode Earned Value Management Pada Proyek Renovasi Rumah Skala Menengah

Jion Pridasari Eka Candra, Abdul Halim, Dafid Irawan ..... (118-126)

Analisis Pembebanan Jalan Tembus Rencana Soekarno Hatta – RSUD Dr. Soedomo Trenggalek Menggunakan CONTRAM

Anis Purwaningsih, Aji Suraji, M. Cakrawala ..... (127-137)

Uji Kuat Tekan dan Daya Serap Batako Dengan Penambahan Damdex

Immanuel Adrianus Ndolu Eoh, Abdul Halim, Candra Aditya..... (138-146)

Analisis Kinerja Struktur Gable frame Profil WF dan Castella Terhadap Elemen Kritis Pada Gudang Pupuk PT. Molindo Raya Industrial

Maulia Umi Nazhiroh, Candra Aditya, Dafid Irawan ..... (147-155)

Pengaruh Penggunaan Agregat Daur Ulang Dari Limbah Paving block Sebagai Pengganti Agregat Alami Terhadap Sifat Segar dan Kuat Tekan Beton Hibrida Berbasis Fly ash

Septian Bagus Perkasa, Abdul Halim, Dafid Irawan ..... (156-164)

Analisis Daktilitas dan Mekanisme Kegagalan Sambungan Balok-Kolom Pracetak Dengan Perkuatan Kombinasi Pelat BAJA-CFRP

Edo Prasetya Adi, I Kadek Adit Putra Igmas, Nika Devi Permata Wijaya, Muhammad Mahesa Ramadhan, Satrio Cancer Avendi..... (165-177)

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Bulan Tahun

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 1-10

Evaluasi Pengelolaan Air Melalui PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti

Irma Suraya[1]*, Budijono[2], Ridwan Manda Putra[3]

[1,2,3]Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana Universitas Riau, Pekanbaru
*Email Korespondensi: irma.suraya6605@grad.unri.ac.id

ABSTRAK

Kabupaten Kepulauan Meranti merupakan salah satu wilayah di Provinsi Riau yang secara ekologis merupakan kawasan gambut pesisir yang sangat rentan sehingga menimbulkan tantangan dalam penyediaan air bersih yang layak dan kontinu. Program Penyediaan air minum dan sanitasi berbasis masyarakat (PAMSIMAS) sebagai solusi penyediaan air berbasis masyarakat masih belum berfungsi optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi eksisting kualitas air PAMSIMAS dan tingkat partisipasi masyarakat dalam pengelolaannya. Penelitian ini merupakan studi deskriptif kuantitatif dengan menggunakan data primer dan sekunder. Kualitas air semua lokasi penelitian tidak memenuhi baku mutu air untuk keperluan higiene dan sanitasi. Partisipasi masyarakat dalam pengelolaan berada pada kategori tinggi yang menunjukkan masyarakat berperan aktif dalam pengelolaan PAMSIMAS. Pengelolaan PAMSIMAS memerlukan penguatan dalam pengolahan air yang adaptif agar kualitas air memenuhi baku mutu dan peningkatan perilaku sanitasi masyarakat guna menjamin akses air bersih yang aman, berkelanjutan dan berkeadilan.

Kata kunci : Evaluasi, Pengelolaan Air, PAMSIMAS, Kualitas Air dan Masyarakat.

ABSTRACT

Meranti Islands Regency is a region in Riau Province that, ecologically speaking, consists of highly vulnerable coastal peatlands, posing challenges to the provision of adequate and continuous clean water. The Community-Based Drinking Water and Sanitation Program (PAMSIMAS), designed as a community-based water supply solution, has yet to function optimally. This study aims to analyze the current state of PAMSIMAS water quality and the level of community participation in its management. This is a quantitative descriptive study using primary and secondary data. Water quality at all study sites does not meet water quality standards for hygiene and sanitation purposes. Community participation in management falls into the "high" category, indicating that the community plays an active role in managing PAMSIMAS. PAMSIMAS management requires strengthening in the form of adaptive water treatment to ensure water quality meets standards, as well as improvements in community sanitation practices to guarantee safe, sustainable, and equitable access to clean water.

Keywords **:** *Evaluation, Water Management, PAMSIMAS, Water Quality, and Community.*

1. PENDAHULUAN

Air bersih adalah prasyarat mutlak bagi kehidupan, kesehatan, dan pembangunan berkelanjutan. Namun di kawasan pesisir lahan gambut seperti Kabupaten Kepulauan Meranti, tantangan penyediaan air bersih semakin berat. Karakteristik hidrologis gambut di kepulauan Meranti menyebabkan air tanah cenderung berwarna gelap, asam, dan tinggi kandungan zat organik terlarut [1]. Kondisi ini mengakibatkan ketersediaan air permukaan sangat tergantung pada curah hujan, rentan kekeringan di musim kemarau, dan rentan terhadap pencemaran dan intrusi air laut. Di samping itu, infrastruktur penyediaan air masih terbatas, sementara tata kelola sumber daya air belum kuat. Salah satu pendekatan yang telah diterapkan secara nasional adalah pengembangan sistem air minum berbasis masyarakat melalui Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS). Tujuan dari program ini untuk memberdayakan masyarakat dalam proses perencanaan, pembangunan, pengoperasian, dan pemeliharaan infrastruktur air minum dan sanitasi. Kabupaten Kepulauan Meranti merupakan salah satu wilayah di Provinsi Riau yang secara ekologis merupakan kawasan gambut pesisir yang sangat

(Received: tgl Bulan 20xx / Revised: tgl Bulan 20xx / Accepted: tgl Bulan 20xx)

rentan. Lebih dari 60 % daratan Meranti ditutupi oleh lahan gambut yang memiliki kedalaman lebih dari 3 meter [2]. Lahan gambut di wilayah ini membentuk kubah gambut (peat domes) dan sistem hidrologi gambut ombrogenik artinya sistem air permukaan lahan gambut terutama bergantung pada curah hujan, bukan aliran sungai eksternal.

Karakteristik gambut pesisir menimbulkan sejumlah tantangan bagi penyediaan air bersih seperti air tanah yang terlarut organik tinggi asam, variabilitas ketersediaan air semakin tinggi, intrusi air laut, subsidensi, dan abrasi pesisir. Selain itu, aspek infrastruktur juga terbatas seperti jaringan air perpipaan masih jarang, transportasi logistik antarpulau sulit, serta anggaran penyediaan air sering terbatas. Kondisi ini memperparah kesulitan masyarakat dalam mendapatkan air bersih yang aman dan kontinu.

Dalam kondisi tersebut, intervensi teknis dan kelembagaan menjadi sangat penting. Program PAMSIMAS (Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat) muncul sebagai salah satu solusi strategis untuk memperkuat pelayanan air bersih berbasis masyarakat di kawasan yang rentan seperti Kepulauan Meranti. Namun, praktik penerapan PAMSIMAS di kawasan gambut seperti Kepulauan Meranti belum banyak dibahas secara sistematis, terutama dalam paparan ilmiah yang menggabungkan multi perspektif antara kondisi ekologi (lingkungan) dan sosial. Penelitian ini penting karena menghadirkan evaluasi sistem ketahanan air berbasis komunitas dalam konteks lahan gambut pesisir yang rentan terhadap perubahan iklim, intrusi air laut, dan vegetasi rusak. Dengan memfokuskan pada dimensi ekologi dan sosial penelitian ini bertujuan menganalisis kualitas air PAMSIMAS dan tingkat partisipasi masyarakat dalam pengelolaan PAMSIMAS sehingga dapat menjadi landasan bagi rekomendasi kebijakan dan desain program PAMSIMAS yang lebih adaptif dan berkelanjutan di Kepulauan Meranti serta kawasan pesisir gambut lainnya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Evaluasi

Evaluasi merupakan suatu proses sistematis untuk menilai keberhasilan suatu program atau kebijakan berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan. Evaluasi digunakan untuk mengetahui tingkat efektivitas, efisiensi, serta dampak dari suatu program terhadap masyarakat. Menurut Dunn, evaluasi kebijakan publik bertujuan menghasilkan informasi mengenai nilai atau manfaat suatu kebijakan dalam menyelesaikan masalah publik [3]. Dalam penelitian ini, evaluasi digunakan untuk menilai keberhasilan pengelolaan air melalui Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Kepulauan Meranti dalam memenuhi kebutuhan masyarakat terhadap air bersih dan sanitasi layak.

2.2 Pengelolaan Air Bersih

Pengelolaan air bersih merupakan serangkaian kegiatan yang meliputi perencanaan, penyediaan, distribusi, pemanfaatan, pemeliharaan, dan pengawasan sumber daya air agar dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan oleh masyarakat. Pengelolaan air bersih bertujuan untuk menjamin tersedianya air yang memenuhi standar kualitas, kuantitas, dan kontinuitas [4]. Air bersih merupakan kebutuhan dasar manusia yang sangat penting bagi kehidupan dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, pengelolaan air bersih harus dilakukan secara efektif melalui keterlibatan pemerintah dan masyarakat.

2.3 Program PAMSIMAS

Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) merupakan program pemerintah yang bertujuan meningkatkan akses masyarakat terhadap pelayanan air minum dan sanitasi layak melalui pendekatan berbasis masyarakat. Program ini menekankan partisipasi aktif masyarakat dalam setiap tahapan pelaksanaan program, mulai dari perencanaan hingga pemeliharaan sarana air bersih [4].

Pelaksanaan PAMSIMAS melibatkan berbagai pihak, seperti pemerintah daerah, pemerintah desa, Kelompok Keswadayaan Masyarakat (KKM), Satuan Pelaksana (SATLAK), dan Badan Pengelola Sistem Penyediaan Air Minum dan Sanitasi (BPSPAMS). Tujuan utama

program PAMSIMAS antara lain:

a. Meningkatkan akses masyarakat terhadap air minum layak.
b. Meningkatkan perilaku hidup bersih dan sehat (PHBS).
c. Mendorong partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sarana air bersih.
d. Menjamin keberlanjutan sarana air minum dan sanitasi [5].

2.4 Teori Evaluasi Kebijakan William N. Dunn

Teori evaluasi kebijakan William N. Dunn digunakan sebagai landasan untuk mengevaluasi program PAMSIMAS. Menurut Dunn, evaluasi kebijakan dapat dilakukan melalui enam indikator utama, yaitu efektivitas, efisiensi, kecukupan, pemerataan, responsivitas, dan ketepatan [3].

a. Efektivitas, menunjukkan sejauh mana program mampu mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Dalam penelitian ini, efektivitas dilihat dari keberhasilan PAMSIMAS menyediakan akses air bersih bagi masyarakat.
b. Efisiensi, berkaitan dengan perbandingan antara hasil yang diperoleh dengan sumber daya yang digunakan, seperti biaya, tenaga, dan waktu.
c. Kecukupan, menunjukkan sejauh mana program mampu memenuhi kebutuhan masyarakat terhadap air bersih dan sanitasi.
d. Pemerataan, berkaitan dengan distribusi manfaat program kepada masyarakat secara adil dan merata.
e. *Responsivitas,* menunjukkan kemampuan program dalam menjawab kebutuhan dan harapan masyarakat.
f. Ketepatan, berkaitan dengan kesesuaian program terhadap permasalahan yang dihadapi masyarakat. Teori Dunn dianggap relevan karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai keberhasilan dan hambatan pelaksanaan program PAMSIMAS.

2.5 Partisipasi Masyarakat dalam PAMSIMAS

Partisipasi masyarakat merupakan faktor penting dalam keberhasilan program PAMSIMAS. Dalam pendekatan berbasis masyarakat, masyarakat tidak hanya menjadi penerima manfaat, tetapi juga menjadi pelaku utama dalam pengelolaan dan pemeliharaan sarana air bersih. Partisipasi masyarakat dapat diwujudkan melalui:

a. Keikutsertaan dalam musyawarah program
b. Kontribusi tenaga dan biaya
c. Pemeliharaan fasilitas air bersih
d. Pengawasan pelaksanaan program

Rendahnya partisipasi masyarakat menjadi salah satu hambatan dalam pengelolaan PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti [3]. Kurangnya kesadaran masyarakat dalam menjaga fasilitas air bersih menyebabkan beberapa sarana tidak berfungsi secara optimal.

2.6 Keberlanjutan Program PAMSIMAS

Keberlanjutan program merupakan kemampuan program untuk tetap berjalan dan memberikan manfaat dalam jangka panjang. Keberlanjutan PAMSIMAS dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

a. Kinerja BPSPAMS
b. Dukungan pemerintah desa
c. Kesadaran masyarakat
d. Ketersediaan biaya operasional
e. Kondisi sarana dan prasarana

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa beberapa program PAMSIMAS mengalami kendala keberlanjutan akibat lemahnya koordinasi pengelola, minimnya dukungan anggaran, serta rendahnya partisipasi masyarakat dalam pemeliharaan fasilitas air bersih [4].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan campuran (*mixed methods*) untuk menganalisis pengelolaan ketahanan air dengan menggunakan dimensi lingkungan dan sosial. Jenis penelitian ini adalah deskriptif-kuantitatif, bertujuan menggambarkan kondisi eksisting dan mengeksplorasi hubungan antar faktor yang mempengaruhi efektivitas program PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti.

3.2 Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan di wilayah Kabupaten Kepulauan Meranti Provinsi Riau dan telah menjadi lokasi implementasi program PAMSIMAS. Adapun lokasi penelitian secara spesifik terletak pada; (1) Desa banglas; (2) Kelurahan Selatpanjang Kota; (3) Kelurahan Selatpanjang Selatan; (4) Kelurahan Selatpanjang Timur; (5) Desa Sendanu Darul Ihsan (SDI); dan (6) Desa Tanjung Gadai. Waktu penelitian dilaksanakan selama 6 bulan, dimulai dari persiapan (literatur dan instrumen), pengumpulan data, analisis, hingga penyusunan laporan.

3.3 Populasi dan Sampel

Populasi meliputi seluruh masyarakat Kabupaten Kepulauan Meranti. Sampel dalam penelitian ini adalah penerima manfaat program PAMSIMAS. Sampel untuk kualitas air yaitu dilakukan pengambilan sampel air masing-masing satu rumah tangga di tiap lokasi. Sampel untuk dimensi sosial melakukan wawancara dengan responden masyarakat berjumlah 30 orang penerima manfaat pada setiap lokasi penelitian yang dipilih secara *proportional sampling* berdasarkan distribusi jumlah kepala keluarga penerima manfaat di setiap desa pada wilayah penelitian.

Ukuran sampel yang layak dalam penelitian minimal 30 responden sudah dianggap memadai untuk dianalisis secara statistik [6]. Oleh karena itu, jumlah 30 responden pada setiap titik lokasi penelitian sudah cukup representatif untuk menggambarkan karakteristik populasi serta layak digunakan dalam analisis. Praktik serupa juga banyak digunakan dalam penelitian lapangan dengan pendekatan survei maupun evaluasi program berbasis komunitas [7].

3.4 Instrumen Penelitian

Parameter kualitas air yang dianalisis meliputi aspek fisik, kimia, dan mikrobiologis, sebagaimana ditetapkan dalam Lampiran Permen Kes No. 2 Tahun 2023 [8] parameter air untuk keperluan higiene dan sanitasi yang disesuaikan dengan kebutuhan, kriteria dan karakteristik lokasi penelitian. Untuk mengetahui adanya intrusi air laut, maka diperlukan parameter tambahan yaitu Salinitas. Parameter kualitas air secara lengkap disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Kualitas Air

No	Parameter	Satuan	Baku Mutu
A	**Fisik**		
	Suhu	^{0}C	Suhu udara ± 3
	Kekeruhan	NTU	<3
	Warna	TCU	10
	TDS	mg/L	<300
B	**Kimia**		
	pH		6.5-8.5
	Besi (Fe) (terlarut)	mg/l	0.2
C	**Mikrobiologi**		
	Total Coliform	CFU/100 ml	0

Sumber: Permenkes No 2 Tahun 2023

3.5 Proses Pengumpulan Data

Pengambilan data menggunakan data primer dan sekunder. Pengumpulan data kualitas air PAMSIMAS dilakukan dengan mengambil sampel menggunakan metode *grab sampling*. Untuk komponen sosial dilakukan secara *purposive* sampling dengan melakukan wawancara kepada masyarakat.

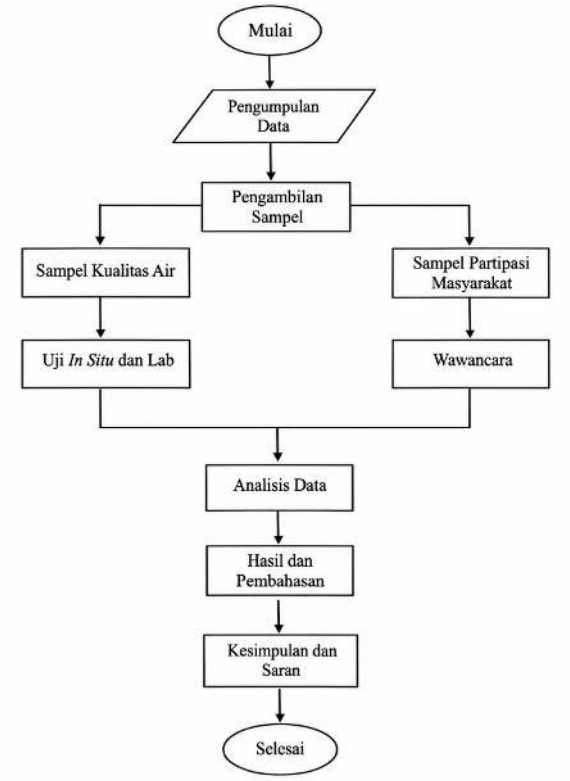
3.6 Analisis Data

Analisis data kualitas air berupa hasil pengujian in situ dan laboratorium terhadap kualitas air eksisting PAMSIMAS. Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk menilai kesesuaian setiap parameter terhadap ambang batas yang berlaku. Hasil analisis juga dikaitkan dengan instrusi air laut untuk mengetahui pengaruh lingkungan terhadap variasi kualitas air. Data sosial yang diambil berupa partisipasi masyarakat terhadap pengelolaan PAMSIMAS. Analisis data dilakukan secara deskriptif. Tingkat partisipasi masyarakat diperoleh melalui lembaran wawancara dengan menggunakan skala *likert* yang dianalisis secara deskriptif. Skala nilai persepsi masyarakat ditetapkan dengan 5 kriteria rentang penilaian. Interval penilaian selengkapnya disajikan pada Tabel 2 (Sudijono, 2009). Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 2. Interval Nilai dan Kriteria Partisipasi Masyarakat

Interval	Kriteria
4,70-5,00	Sangat Tinggi
3,70-4,69	Tinggi
2,70-3,69	Sedang
2,00-2,69	Rendah
≤ 1,99	Sangat Rendah

Sumber: Sudijono (2009)



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Eksisting Kualitas Air PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti

Sumber air yang digunakan oleh PAMSIMAS merupakan sumur bor dalam (air tanah dalam) yang dilakukan pengeboran dengan kedalaman 130 m. Kondisi eksisting kualitas air pada PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti menunjukkan tantangan yang cukup kompleks, baik dari aspek fisik, kimia, maupun biologi. Hasil pengamatan kualitas air yang dilakukan sesuai Gambar 1 menunjukkan kualitas fisik air pada lokasi penelitian menunjukkan variasi yang cukup signifikan antar lokasi. Suhu air berada pada kisaran 28–31 °C, yang masih sesuai dengan

karakteristik perairan tropis dan tidak menunjukkan tekanan termal yang berlebihan [9]. Namun demikian, parameter kekeruhan dan warna menunjukkan kondisi yang kurang menguntungkan pada sambungan rumah. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 baku mutu parameter kekeruhan air untuk keperluan higiene dan sanitasi adalah < 3 NTU). Hampir semua lokasi melewati baku mutu dengan nilai paling rendah 64,53 NTU yaitu di Kelurahan Selatpanjang Selatan dan nilai paling tinggi 218,63 NTU di Desa Banglas. Lokasi yang memenuhi baku mutu pada parameter kekeruhan yaitu Desa Sendanu Darul Ihsan 2,955 NTU.



Gambar 2. Pengujian Parameter in situ

Nilai warna juga menunjukkan pola serupa yang melebihi baku mutu (10 TCU). Semua lokasi melebihi baku mutu dengan warna sangat tinggi yaitu di Desa Tanjung Gadai (1080 TCU), yang mengindikasikan dominasi bahan organik terlarut khas perairan gambut pesisir [10]. Kondisi ini berpotensi menurunkan efektivitas proses desinfeksi dan kualitas estetika air [11]. Sedangkan nilai yang terendah berada di Kelurahan Selatpanjang Kota (67 TCU).

Aspek fisik seperti nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) menunjukkan rentang yang sangat luas. Nilai TDS terendah tercatat pada Desa Tanjung Gadai (283 mg/L), sedangkan nilai tertinggi ditemukan di Desa Banglas (2770 mg/L), yang jauh melampaui baku mutu (< 300 mg/L). Kondisi ini menunjukkan kemungkinan kuat pengaruh intrusi air laut dan akumulasi mineral terlarut pada wilayah pesisir gambut [12]. Nilai pH air juga bervariasi dari kondisi sangat asam (pH 4,4) hingga netral (pH 7,6), di mana pH rendah ditemukan di Desa Tanjung Gadai. Lingkungan asam ini berkorelasi dengan meningkatnya kelarutan logam, yang tercermin dari konsentrasi besi (Fe) relatif tinggi [13]. Konsentrasi besi (Fe) terlarut di Desa Tanjung Gadai memiliki nilai tertinggi (2.3258 mg/L) sedangkan yang memenuhi baku mutu (0,2 mg/L) untuk parameter Fe terlarut di Kelurahan Selatpanjang Kota (0,099 mg/L). Hal ini disebabkan air yang digunakan di Desa Tanjung Gadai merupakan air kanal/parit yang merupakan air gambut, bukan air pengeboran dari pembangunan PAMSIMAS. Air hasil pengeboran memiliki rasa asin, sehingga masyarakat memilih menggunakan air gambut untuk aktivitas sehari-hari dengan menggunakan sarana PAMSIMAS.

Parameter salinitas menunjukkan adanya gradien intrusi air laut yang cukup jelas antar lokasi PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti. Nilai tertinggi tercatat di Banglas (2700 ppm), diikuti Selatpanjang Timur (2200 ppm), Selatpanjang Selatan (2100 ppm), dan Selatpanjang Kota (2000 ppm), yang mengindikasikan sumber air telah berada pada kondisi payau dan sangat dipengaruhi dinamika pesisir. Desa Tanjung Gadai relatif lebih rendah (200 ppm) sehingga masih mendekati air tawar, sementara Desa SDI berada pada tingkat menengah (1100 ppm) yang menunjukkan mulai adanya tekanan salinitas. Secara mutu air bersih, nilai salinitas di atas ±1000 ppm berpotensi menurunkan kelayakan konsumsi [14], karena mempengaruhi rasa, meningkatkan korosifitas jaringan, serta kesehatan dalam jangka panjang [15]. Pola ini sangat konsisten dengan karakter wilayah gambut pesisir Kepulauan Meranti yang rentan intrusi air laut, terutama saat muka air tanah turun atau saat pengaruh pasang kuat [16]. Pengaturan jarak sumur dari garis pantai dan badan air pasang surut, serta pertimbangan teknologi pengolahan (misalnya *blending* atau desalinasi sederhana) disertai pemantauan berkala untuk

mengantisipasi peningkatan salinitas di masa mendatang menjadi hal yang sangat diperlukan.

Parameter mikrobiologi memperlihatkan *Total Coliform* yang sangat rendah hingga tidak terdeteksi, sehingga tergolong rendah dan aman berdasarkan baku mutu air minum (0 CFU/100 mL) [17]. Hampir semua lokasi menunjukkan *Total Coliform* dengan nilai 0, kecuali di Desa Tanjung Gadai (75 x 103). Kondisi ini menegaskan perlunya penguatan sistem pengolahan lanjutan, perlindungan jaringan distribusi, serta peningkatan sanitasi rumah tangga dalam sistem PAMSIMAS di wilayah gambut pesisir [18].

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa kualitas air pada sistem PAMSIMAS di wilayah penelitian masih menghadapi tantangan serius, yang secara konsisten berada pada kategori sedang hingga buruk untuk parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi. Beberapa lokasi masih dipengaruhi oleh kondisi geokimia alami lahan gambut dan intrusi air laut yang tercermin dari tingginya TDS, keasaman air, serta konsentrasi besi. Kondisi kualitas air yang tidak memenuhi baku mutu ini berimplikasi langsung terhadap kehidupan masyarakat, antara lain meningkatnya risiko penyakit berbasis air, penurunan kenyamanan dan kepercayaan masyarakat terhadap layanan PAMSIMAS, serta potensi peningkatan beban ekonomi rumah tangga akibat kebutuhan pengolahan tambahan atau pembelian air alternatif [19], [20], [21]. Temuan ini menegaskan bahwa keberlanjutan PAMSIMAS di wilayah gambut pesisir tidak hanya bergantung pada ketersediaan infrastruktur, tetapi juga pada penguatan pengolahan air yang adaptif terhadap karakteristik lingkungan lokal, perlindungan sistem distribusi, serta peningkatan perilaku sanitasi masyarakat guna menjamin akses air bersih yang aman, berkelanjutan, dan berkeadilan. Hasil analisis kualitas air PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kualitas air PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti

Lokasi	Fisik				Kimia			Mikrobiologi
	Suhu (°C)	Kekeruhan (NTU)	Warna (TCU)	TDS (mg/L)	pH	Besi (Fe)	Salinitas (ppm)	Total Coliform (CFU/100 ml)
Selat Panjang Kota	28	141,96	67	2021	7,12	0,099	2000	0
Selat Panjang Timur	30,5	91,71	316	2214	7,39	0,2	2200	0
Selat Panjang Selatan	30,3	64,53	97	2117	7,14	0,245	2100	0
Banglas	30	218,63	77	2770	7,17	0,2047	2700	0
Tg Gadai	31,2	21,727	1080	283	4,4	2,3258	200	75000
SDI	31	2,955	140	1179	7,66	0,6072	1100	0

Sumber : Hasil Penelitian, 2026

4.2 Tingkat Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti

Partisipasi masyarakat merupakan keterlibatan aktif masyarakat dalam proses pengenalan permasalahan dan potensi yang dimiliki, penentuan serta pengambilan keputusan, pelaksanaan upaya pemecahan masalah, hingga keikutsertaan dalam evaluasi terhadap perubahan yang terjadi [22]. Partisipasi masyarakat melalui Program PAMSIMAS menjadi hal yang penting dan utama sebagai keberhasilan program [23]. Partisipasi masyarakat dan dokumentasi dalam pengelolaan PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 2.

Berdasarkan pada semua indikator partisipasi masyarakat dalam pengelolaan PAMSIMAS mendapatkan nilai rata-rata keseluruhan sebesar 3,77 yang berada pada kategori tinggi. Indikator keterlibatan masyarakat dalam perencanaan dan pembangunan PAMSIMAS memperoleh nilai rata-rata nilai rata-rata sebesar 2,93 (kategori sedang) menunjukkan bahwa keterlibatan masyarakat dalam tahap perencanaan dan pembangunan masih bersifat terbatas. Kondisi ini mencerminkan bahwa partisipasi masyarakat cenderung lebih dominan pada tahap pelaksanaan, sementara peran dalam proses perencanaan dan pengambilan keputusan strategis belum optimal. Terdapat variasi antar wilayah, dengan nilai tertinggi di Desa Tanjung Gadai (4,06) dan terendah di Kelurahan Selatpanjang Kota (1,94). Hal ini mengindikasikan perlunya penguatan mekanisme partisipasi pada tahap awal program.

Tabel 4.Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan PAMSIMAS di Kabupaten Kepulauan Meranti

No	Indikator	Banglas	Kelurahan Selatpanjang Kota	Kelurahan Selatpanjang Selatan	Kelurahan Selatpanjang Timur	Desa Sendanu Darul Ihsan	Desa Tanjung Gadai	Rata-rata per Indikator
1	Masyarakat terlibat langsung dalam perencanaan dan pembangunan PAMSIMAS	3,09	1,94	3,40	2,23	2,89	4,06	**2,93**
2	Warga ikut berpartisipasi dalam kegiatan gotong royong atau perawatan sarana air	4,86	1,77	3,34	2,17	3,23	4,31	**3,28**
3	Informasi pengelolaan dan iuran air disampaikan secara terbuka	4,29	2,00	4,09	4,60	2,97	4,14	**3,68**
4	Masyarakat merasa memiliki PAMSIMAS dan ikut menjaga keberlangsunganya	4,54	4,57	4,60	4,74	3,83	4,46	**4,46**
5	Program PAMSIMAS mendorong kerjasama dana solidaritas antar warga	4,86	4,57	4,17	4,71	4,20	4,60	**4,52**
Rata-rata per Desa/Kelurahan		**4,33**	**2,97**	**3,92**	**3,69**	**3,42**	**4,31**	**3,77**

Sumber : Hasil Penelitian, 2026



Gambar 3. Wawancara Penerima PAMSIMAS

Partisipasi masyarakat dalam gotong royong atau perawatan sarana air rata-rata indikator ini sebesar 3,28 (kategori sedang). Masyarakat relatif bersedia terlibat dalam kegiatan operasional dan pemeliharaan, namun partisipasi tersebut belum merata di seluruh wilayah. Keterbukaan informasi pengelolaan dan iuran air disampaikan secara terbuka mendapat nilai rendah di beberapa kelurahan menunjukkan masih adanya ketergantungan pada pengelola inti atau pihak tertentu. Dengan nilai rata-rata 3,68 (kategori sedang), transparansi pengelolaan dinilai cukup baik, meskipun masih memerlukan peningkatan. Beberapa wilayah seperti Kelurahan Selatpanjang Timur (4,60) menunjukkan praktik keterbukaan yang lebih baik dibandingkan wilayah lain. Indikator rasa memiliki terhadap PAMSIMAS dan komitmen menjaga keberlanjutan ini memperoleh nilai rata-rata 4,46 (kategori tinggi), hasil ini menunjukkan bahwa masyarakat memiliki *sense of ownership* yang kuat terhadap sarana PAMSIMAS yang merupakan faktor penting dalam menjaga keberlanjutan program.

Indikator dorongan terhadap kerja sama dan solidaritas antar warga mendapat nilai tertinggi dengan rata-rata 4,52 (kategori tinggi) menunjukkan bahwa Program PAMSIMAS mampu memperkuat kohesi sosial, kerja sama, dan solidaritas antar warga dalam pengelolaan air bersih. Desa Banglas (4,33) dan Desa Tanjung Gadai (4,31) menunjukkan tingkat partisipasi masyarakat yang relatif tinggi dibandingkan wilayah lain. Sementara itu, Kelurahan Selatpanjang Kota (2,97) memiliki nilai rata-rata terendah, yang mengindikasikan perlunya pendekatan pemberdayaan masyarakat yang lebih intensif di wilayah perkotaan. Perbedaan ini

mengindikasikan bahwa karakteristik sosial wilayah, khususnya perbedaan antara desa dan kawasan perkotaan, memengaruhi intensitas partisipasi masyarakat. Wilayah perdesaan cenderung memiliki ikatan sosial yang lebih kuat, sehingga lebih mendukung partisipasi kolektif dalam pengelolaan lingkungan dibandingkan wilayah perkotaan [24]. Keberhasilan pengelolaan air bersih berbasis masyarakat tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh kualitas partisipasi masyarakat sebagai aktor utama dalam pengelolaan lingkungan [25].

5. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas air PAMSIMAS dan tingkat partisipasi masyarakat dalam pengelolaan PAMSIMAS. Hasil analisis menunjukkan bahwa kualitas air pada sistem PAMSIMAS di wilayah penelitian masih menghadapi tantangan serius untuk parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi. Beberapa lokasi masih dipengaruhi oleh kondisi geokimia alami lahan gambut dan intrusi air laut. Kondisi kualitas air yang tidak memenuhi baku mutu ini berimplikasi langsung terhadap kehidupan masyarakat, antara lain meningkatnya risiko penyakit berbasis air, penurunan kenyamanan dan kepercayaan masyarakat terhadap layanan PAMSIMAS. Hasil analisis pada partisipasi masyarakat dalam pengelolaan program PAMSIMAS secara keseluruhan pada kategori tinggi. Selanjutnya diperlukan peningkatan pengelolaan dalam hal teknologi yang sesuai dengan karakteristik dan kriteria daerah lokal untuk menghasilkan kualitas air yang sesuai dengan baku mutu dan melibatkan partisipasi masyarakat agar dapat menghasilkan air yang layak dan kontinu.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Ritung *et al.*, *Peta Lahan Gambut Indonesia Skala 1:250.000 (Indonesian peatland map at the scale 1:250,000)*. Bogor: Indonesian Center for Agricultural Land Resources Research and Development, 2011.

[2] N. A. Azuga, I. Effendi, B. Amin, M. Yunas, S. Rahayu, and L. N. Alfiah, "Analysis of River Water Quality Parameters in the Senepis Peat Forest Area, Riau, Indonesia," *International Journal of Peatland Research and Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 19–33, 2025.

[3] R. Sagita, "Evaluasi Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (Pamsimas) Desa Bagan Melibur Kecamatan Merbau Kebupaten Kepulauan Meranti Tahun 2020," Universitas Islam Riau, 2022.

[4] S. Sukarman and B. Wicaksono, "Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pengelolaan Pamsimas di Desa Banglas Barat Kecamatan Tebing Tinggi Kabupaten Kepulauan Meranti," *Nakhoda: Jurnal Ilmu Pemerintahan*, vol. 16, no. 28, pp. 7–17, 2018, doi: 10.35967/jipn.v16i28.5821.

[5] L. Raisa and R. Afrizal, "Evaluasi Pemanfaatan dan Pemeliharaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) Tahun 2017," *Jurnal Perencanaan, Sains, Teknologi, dan Komputer (JuPerSaTek)*, vol. 5, no. 2, pp. 94–101, 2022, doi: 10.36378/jupersatek.v5i2.2750.

[6] U. Sekaran and R. Bougie, *Research Methods For Business: A Skill Building Approach*. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2016.

[7] J. W. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Los Angeles: Sage Publication, 2014.

[8] Kementerian Kesehatan, *Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan*. Jakarta, 2023.

[9] R. A. Kidman, D. T. McKnight, L. Schwarzkopf, and E. J. Nordberg, "Too Cold is Better than too Hot: Preferred Temperatures and Basking Behaviour in a Tropical Freshwater Turtle," *Austral Ecology*, vol. 48, no. 8, pp. 1532–1546, 2023, doi: 10.1111/aec.13335.

[10] M. Qadafi, D. R. Wulan, S. Notodarmojo, and Y. Zevi, "Characteristics and Treatment Methods for Peat Water as Clean Water Sources: A Mini Review," *Water Cycle*, vol. 4, pp. 60–69, 2023, doi: 10.1016/j.watcyc.2023.02.005.

[11] M. W. LeChevallier and A. Kwok-Keung, *Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking-water*. London: IWA Publishing, 2004.

[12] G. E. Adjovu, H. Stephen, D. James, and S. Ahmad, "Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 14, p. 3534, 2023, doi: 10.3390/rs15143534.

[13] M. Sun *et al.*, "Investigation of a Haze-to-Dust and Dust Swing Process at a Coastal City in Northern China Part II: A Study on the Solubility of Iron and Manganese Across Aerosol Sources and Secondary Processes," *Atmospheric Environment*, vol. 328, p. 120532, 2024, doi: 10.1016/j.atmosenv.2024.120532.

[14] S. Mukate, V. Wagh, D. Panaskar, J. A. Jacobs, and A. Sawant, "Development of New Integrated Water Quality Index (IWQI) Model to Evaluate the Drinking Suitability of Water," *Ecological indicators*, vol. 101, pp. 348–354, 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.01.034.

[15] N. Badid and F. Hadji, "Health Risks from Desalinated Seawater Used for Human Consumption: The Case of Honaine Plant (Northwest Algeria)," *Electronic Physician*, vol. 15, no. 1, p. 7917, 2023, doi: 10.26415/2008-5842-vol15iss1p7917-7925.

[16] T. Turmudi, Y. Suwarno, S. L. Munajati, and J. Suryanta, "Spatial Modeling in Sustainable Peat Land Management Based on Peat Hydrological Units (KHG)," *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, vol. 11, no. 4, pp. 613–620, 2022, doi: 10.29244/jpsl.11.4.613-620.

[17] Y. E. K. Nggae, I. Supraba, R. Triatmadja, and C. Y. Sun, "Escherichia Coli and Total Coliform Contamination in Various Raw Water Sources in Ende Regency, Nusa Tenggara Timur Province, Indonesia," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 31, no. 1, pp. 37–48, 2025, doi: 10.5614/j.tl.2025.31.1.5.

[18] D. Herlinda, B. C. Utami, and Rusliyhardy, "Water Supply and Sanitation: Problems on Community Empowerment Based Program in Indragiri Hulu, Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, p. 12030. doi: 10.1088/1755-1315/469/1/012030.

[19] P. Li and J. Wu, "Drinking Water Quality and Public Health," *Exposure and Health*, vol. 11, no. 2, pp. 73–79, 2019, doi: 10.1007/s12403-019-00299-8.

[20] D. Lee, J. M. Gibson, J. Brown, J. Habtewold, and H. M. Murphy, "Burden of Disease from Contaminated Drinking Water in Countries with High Access to Safely Managed Water: A Systematic Review," *Water Research*, vol. 242, p. 120244, 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.120244.

[21] R. E. Hinna *et al.*, "Waterborne Diseases in a Rural Community in Pakistan: Awareness, Impact, and Corrective Measures," *Cureus*, vol. 17, no. 9, p. e93154, 2025, doi: 10.7759/cureus.93154.

[22] I. R. Adi, *Perencanaan Partisipatoris Berbasis Aset Komunitas: dari Pemikiran Menuju Penerapan*. Depok: FISIP UI Press, 2007.

[23] S. Damayanti, L. O. Alwi, A. Gafaruddin, W. Widayati, and A. Hamzah, "Analisis Pemetaan partisipasi Masyarakat dalam Perencanaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) (Studi Kasus Kabupaten Konawe)," *Jurnal Perencanaan Wilayah*, vol. 10, no. 1, pp. 30–40, 2025.

[24] J. N. Pretty, "Participatory Learning for Sustainable Agriculture," *World development*, vol. 23, no. 8, pp. 1247–1263, 1995, doi: 10.1016/0305-750X(95)00046-F.

[25] J. Jumadi, Y. Priyana, D. Danardono, and U. Umrotun, "Pemberdayaan Masyarakat dalam Pengelolaan Air Bersih Berkelanjutan melalui Program Air Minum Muhammadiyah (PAMMU) di Desa Kadipiro, Sambirejo, Sragen," *Jurnal Pengabdian Masyarakat: Pemberdayaan, Inovasi dan Perubahan*, vol. 5, no. 5, pp. 67–75, 2025, doi: 10.59818/jpm.v5i5.1933.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 11-23

Alternatif Perencanaan Struktur Gedung Café 1912 UMY Geblangan Tamantirto Kasihan Kabupaten Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta

Suprapto[1]*, Seno Aji[2], Laily Fatmawati[3]

[1,2,3]Progam Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Madiun, Madiun, Jawa Timur
*Email Korespondensi: praptobom310301@gmail.com

ABSTRAK

Gedung Café 1912 UMY di Geblangan, Tamantirto, Kasihan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta direncanakan mengalami perubahan dari bangunan tiga lantai menjadi empat lantai sehingga diperlukan perencanaan ulang struktur agar mampu menahan beban tambahan secara aman. Penelitian ini bertujuan memperoleh alternatif perencanaan struktur atas gedung yang meliputi pelat lantai, pelat atap, balok, kolom, dan struktur atap baja WF sesuai ketentuan SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1729:2020. Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 melalui pemodelan tiga dimensi dengan metode analisis statik ekuivalen terhadap beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa. Bangunan yang direncanakan memiliki dimensi 30 m × 13,2 m dengan struktur beton bertulang dan atap baja WF. Bangunan termasuk Kategori Risiko III dengan Kategori Desain Seismik (KDS) D, menggunakan parameter gempa Ss = 1,50 g, S1 = 0,70 g, faktor modifikasi respons R = 8, dan periode fundamental struktur Ta = 0,440 detik. Hasil analisis menunjukkan distribusi gaya lateral seismik total sebesar 204.464,44 kg, sedangkan hasil desain menghasilkan dimensi kolom K1 600×600 mm (tulangan utama 25D22) dan K2 600×300 mm (tulangan utama 12D19), balok B1 300×600 mm dan B2 250×500 mm dengan tulangan memanjang D19 dan sengkang Ø10-100, tulangan pelat atap Ø10-142 mm, serta tulangan pelat lantai Ø10-125 mm. Seluruh elemen struktur memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas berdasarkan SNI (φMn ≥ Mu dan φVn ≥ Vu pada seluruh elemen balok dan kolom) sehingga alternatif penambahan satu lantai pada Gedung Café 1912 UMY dinyatakan layak diterapkan.

Kata kunci : Struktur, Gedung Cafe dan Penambahan Lantai.

ABSTRACT

The Café 1912 UMY building in Geblangan, Tamantirto, Kasihan, Bantul Regency, Special Region of Yogyakarta, is planned to be expanded from a three-story to a four-story structure, requiring structural redesign to safely support the additional load. This study aims to develop alternative structural designs for the building, including floor slabs, roof slabs, beams, columns, and WF steel roof structures, in accordance with the provisions of SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, and SNI 1729:2020. Structural analysis was performed using SAP2000 software through three-dimensional modeling with the equivalent static analysis method for dead loads, live loads, wind loads, and seismic loads. The planned building has dimensions of 30 m × 13.2 m with a reinforced concrete structure and a WF steel roof. The building is classified as Risk Category III with Seismic Design Category (KDS) D, using the seismic parameters Ss = 1.50 g, S1 = 0.70 g, response modification factor R = 8, and structural fundamental period Ta = 0.440 seconds. The analysis results show a total seismic lateral force distribution of 204,464.44 kg, while the design results yield column dimensions of K1 600×600 mm (main reinforcement 25D22) and K2 600×300 mm (main reinforcement 12D19), beams B1 at 300×600 mm and B2 at 250×500 mm with longitudinal reinforcement D19 and stirrups Ø10–100, roof slab reinforcement Ø10–142 mm, and floor slab reinforcement Ø10–125 mm. All structural elements meet the strength, stiffness, and stability requirements based on SNI (φMn ≥ Mu and φVn ≥ Vu for all beam and column elements); therefore, the proposal to add one floor to the Café 1912 UMY building is deemed feasible.

Keywords **:** *Structure, Cafe Building, and Floor Addition.*

1. PENDAHULUAN

Cafe 1912 UMY terletak di Jalan Wawasan UMY, Geblangan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DIY. Cafe tersebut mengusung konsep "*Campus Without The Wall*" sebagai bentuk peningkatan fasilitas kampus yang menyesuaikan perkembangan era masa kini, dengan menyediakan ruang yang tenang, nyaman, serta memiliki kecepatan internet yang tinggi. Cafe ini menjadi fasilitas penunjang kampus yang dapat digunakan sebagai tempat berkumpul bagi mahasiswa, pegawai, dan masyarakat untuk melakukan berbagai kegiatan dengan suasana yang nyaman dan tenang. Seiring meningkatnya aktivitas mahasiswa, pegawai, dan masyarakat yang semakin ramai, diperlukan pengembangan gedung baru, terutama bagi mahasiswa yang membutuhkan ruang belajar dengan kapasitas yang lebih memadai [1]. Berdasarkan permasalahan tersebut, Gedung Cafe 1912 yang sebelumnya hanya memiliki 3 lantai dengan panjang bangunan 30 m dan lebar 13,2 m, serta menggunakan atap baja WF, direncanakan mengalami perubahan menjadi 4 lantai dengan penggunaan atap berupa pelat beton dan baja WF. Penambahan lantai ini akan difungsikan sebagai ruang pertemuan atau seminar yang dapat digunakan oleh dosen, mahasiswa, dan masyarakat sekitar [2]. Karena memiliki nilai penting, konstruksi bangunan Cafe 1912 perlu dikaji dari berbagai perspektif dan dimodifikasi agar sesuai dengan tujuan penggunaannya berdasarkan tingkat aktivitas serta kapasitas daya dukungnya. Selain itu, kelayakan konstruksi bangunan dari aspek keselamatan juga perlu diperhitungkan. Tingkat kenyamanan dan keamanan pengguna dalam memanfaatkan bangunan Cafe 1912 menjadi hal yang penting untuk diperhatikan [3].

Perencanaan konstruksi yang tepat dan akurat diperlukan untuk membangun struktur yang kuat dan aman [13], [14]. Struktur pelat, kolom, dan balok yang digunakan di Gedung Cafe 1912 harus mampu menahan beban bangunan sendiri, angin, dan gempa [4]. Berbagai elemen harus dipertimbangkan saat merencanakan struktur bangunan bertingkat. Salah satunya adalah kekuatan struktur yang berkaitan dengan keawetan dan keamanan bangunan dalam menerima beban. Oleh karena itu, diperlukan standar spesifikasi struktur bangunan, serta dalam proses perencanaannya harus ditentukan struktur bangunan yang kuat dan memenuhi persyaratan. Desain dan analisis struktur bangunan sebaiknya mengacu pada SNI, yaitu dokumen yang berisi ketentuan dan standar mengenai struktur bangunan di Indonesia [5]. Karena Indonesia adalah wilayah dengan aktivitas seismik yang tinggi, aturan bangunan harus sesuai dengan SNI untuk membuat bangunan yang kuat [6], [7]. Penggunaan struktur atap baja WF juga memerlukan perencanaan yang memenuhi persyaratan kekuatan dan stabilitas struktur sesuai ketentuan yang berlaku [8], [9], [10], [15]. Oleh karena itu, dalam jurnal ini, penulis mengangkat judul "Alternatif Perencanaan Struktur Gedung Cafe 1912 UMY, Geblangan, Tamantirto, Kasihan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta".

Perencanaan struktur gedung bertingkat merupakan salah satu tahapan penting untuk menjamin keamanan, kekuatan, dan kinerja bangunan terhadap beban gravitasi maupun beban gempa. Berbagai penelitian mengenai perencanaan struktur beton bertulang telah dilakukan dengan mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada perencanaan elemen beton bertulang atau evaluasi struktur secara umum, sedangkan integrasi perencanaan struktur beton bertulang dengan struktur atap baja dalam satu model analisis masih relatif terbatas. Selain itu, beberapa penelitian belum menyajikan parameter analisis gempa secara lengkap sebagai dasar proses perencanaan struktur. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan perencanaan struktur atas Gedung Café 1912 Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang meliputi pelat, balok, kolom, dan struktur atap baja WF menggunakan pemodelan tiga dimensi pada SAP2000 berdasarkan SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1729:2020. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyajian proses perencanaan struktur atas secara terpadu yang mengombinasikan elemen beton bertulang dan struktur atap baja WF dalam satu model analisis, serta menyajikan parameter analisis gempa dan hasil perencanaan elemen struktur sebagai dasar evaluasi desain. Adapun tujuan penulisan jurnal ini mencakup: menetapkan dimensi profil atap rangka baja WF dan CNP, menghitung dimensi serta penulangan pelat atap dan lantai, menghitung gaya yang diperoleh dari momen analisis struktur, serta menghitung dimensi dan penulangan pada balok dan kolom.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perencanaan Struktur Gedung Bertingkat

Proses membuat bangunan yang dapat menahan semua beban selama umur layanannya disebut dengan perencanaan struktur gedung bertingkat. Beban hidup, mati, angin, dan gempa adalah semua jenis bebannya. Dalam perencanaan struktur di Indonesia digunakan SNI sebagai acuan utama, yaitu SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, SNI 1729:2020, dan SNI 2847:2019. Penggunaan aturan tersebut bertujuan untuk menjamin keamanan, kekuatan, kekakuan, dan stabilitas bangunan [1], [5]. Pada penelitian ini, gedung Cafe 1912 UMY direncanakan ulang dari bangunan tiga lantai menjadi empat lantai sehingga seluruh elemen struktur harus dievaluasi kembali agar mampu memikul beban tambahan sesuai ketentuan SNI [2].

2.2 Struktur Baja WF sebagai Struktur Atap

Karena kekuatan tarik dan tekannya yang tinggi, stabilitasnya terhadap pembebanan, dan kemudahan pemasangannya, profil baja WF banyak digunakan untuk struktur atap [8], [9]. Menurut SNI 1729:2020, metode *LRFD* digunakan untuk merancang struktur baja [10]. Perancangan rangka atap termasuk dalam analisis mengenai beban angin, beban hidup, beban mati, kombinasi beban, lendutan, stabilisasi, serta fleksibilitas. Tahapan ini dilakukan untuk memastikan bahwa struktur atap memenuhi syarat secara teknis dan kekuatan [8].

2.3 Struktur Beton Bertulang

Beton bertulang terbuat dari baja tulangan dan beton, yang berfungsi untuk menahan gaya tekan dan tarik. Menurut SNI 2847:2019, setiap elemen struktur harus memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, serta daktilitas [4]. Tangga, balok, kolom, pelat lantai, pelat atap, dan balok adalah elemen beton bertulang yang dianalisis dalam struktur bertingkat. Perencanaan dilakukan melalui penentuan dimensi penampang, analisis gaya dalam, serta desain tulangan sehingga setiap elemen mampu memikul beban yang bekerja secara aman [4], [11].

2.4 Pembebanan Struktur Gedung

Pembebanan merupakan tahapan penting dalam analisis struktur karena menentukan besarnya gaya yang harus dipikul oleh setiap elemen. Beberapa contoh dari beban tersebut, yaitu beban hujan, beban angin, beban hidup, beban mati, dan juga beban gempa seperti yang terdapat pada SNI 1727:2020. Kondisi pembebanan yang paling penting digunakan sebagai dasar desain struktur setelah nilai pembebanan tersebut digabungkan dengan kombinasi beban yang telah ditetapkan sebelumnya [1].

2.5 Analisis Gempa

Gedung bertingkat harus dirancang untuk mengantisipasi gempa karena Indonesia adalah wilayah dengan aktivitas seismik yang tinggi [6]. SNI 1726:2019 adalah standar untuk perencanaan gempa, yang mengatur kategori risiko bangunan, klasifikasi lokasi, parameter percepatan spektrum, faktor respons gempa, distribusi gaya gempa, dan kombinasi pembebanan gempa. Hasil analisis gempa digunakan sebagai dasar dalam menentukan gaya lateral yang bekerja pada struktur [7], [12].

2.6 Analisis Struktur Menggunakan SAP2000

SAP2000 adalah program untuk analisis struktur yang berbasis *Finite Element Method/FEM.* Program ini memiliki kemampuan untuk menghitung berbagai gaya, termasuk momen, geser, aksial, lendutan, dan reaksi tumpuan [5]. Dalam penelitian ini SAP2000 digunakan untuk memodelkan struktur gedung empat lantai sehingga diperoleh gaya-gaya dalam yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perencanaan balok, kolom, pelat, dan elemen struktur lainnya [1].

2.7 Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian mengenai perencanaan struktur gedung telah dilakukan dengan menggunakan standar perencanaan yang berlaku di Indonesia, seperti SNI 2847:2019, SNI

1726:2019, SNI 1729:2020, serta SNI 1727:2020. Penelitian-penelitian tersebut membahas berbagai aspek, mulai dari perencanaan struktur beton bertulang, struktur baja, analisis beban gempa, evaluasi kinerja struktur, hingga pemanfaatan perangkat lunak analisis struktur seperti SAP2000 dan ETABS [1], [3], [7], [8]. Hasil penelitian terdahulu menjadi dasar dalam memahami metode analisis, peraturan yang digunakan, serta perkembangan perencanaan struktur bangunan. Ringkasan penelitian yang relevan dengan penelitian ini telah ditampilkan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Utama
1	Alifa Butsainah Nur Salsabila dkk. (2025)	Desain Struktur Baja Komposit Bangunan 4 Lantai di Indramayu, Jawa Barat	Bangunan kategori seismik C menggunakan SRPMM dan memenuhi ketentuan SNI.
2	Ariyanto & Adi Wicaksono (2024)	Perencanaan Gedung Bertingkat Asrama Putri Pondok Pesantren Hasyim Asy'ari Bangsri Jepara	Menghasilkan analisis momen, geser, dan aksial untuk desain struktur.
3	Intan Imrotuzzakiyah & Anggi Rahmat Zulfikar (2024)	Pekerjaan Struktur Atap pada Proyek Gedung Terpadu Psikologi Olahraga UNESA	Rangka atap baja memenuhi persyaratan kekuatan dan kestabilan.
4	Achmad Bagus Subakhi & Pujo Priyono (2025)	Studi Tebal Minimum Pelat Beton pada Lantai Atap Gedung Tipe Dua Lantai	Tulangan minimum 172,5 mm² memenuhi persyaratan SNI.
5	Azka Sabila & Maedewi Jamal (2024)	Analisis Struktur Penulangan Balok pada Proyek Rehabilitasi Gedung Kantor Dinsos Kota Samarinda	Dimensi dan jumlah tulangan berbeda dengan DED.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah Gedung Café 1912 UMY di Geblagan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DIY. Objek penelitian berupa alternatif perencanaan struktur gedung dengan penambahan satu lantai dari bangunan eksisting sehingga menjadi bangunan empat lantai. Perencanaan mencakup pemeriksaan struktur atap baja, pelat lantai, balok, dan kolom menggunakan SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI 1729:2020, serta SNI 1727:2020 [1], [5].

3.2 Data Penelitian

Data sekunder yang digunakan berasal dari dokumen perencanaan Gedung Cafe 1912 UMY. Data yang digunakan meliputi gambar rencana arsitektur dan struktur, dimensi bangunan, spesifikasi material, data pembebanan, serta parameter perencanaan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) pada Tabel 2. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam pemodelan dan analisis struktur [1], [5].

Tabel 2. Data Penelitian

Jenis Data	Sumber Data	Kegunaan
Gambar arsitektur	Dokumen proyek	Menentukan geometri bangunan
Gambar struktur	Dokumen proyek	Pemodelan SAP2000
Data material	Dokumen proyek	Menentukan mutu beton dan baja
Data pembebanan	SNI 1727:2020	Analisis beban
Data gempa	SNI 1726:2019	Analisis beban gempa
Peraturan struktur baja	SNI 1729:2020	Desain atap baja
Peraturan beton	SNI 2847:2019	Desain elemen beton

3.2.1 Parameter Perencanaan

Parameter utama yang digunakan dalam perencanaan struktur ditunjukkan pada Tabel 3. Selain data geometri bangunan, penelitian ini menggunakan mutu material dan sistem struktur sebagai dasar pemodelan pada SAP2000.

Tabel 3. Parameter Perencanaan Struktur

Parameter	Nilai
Fungsi bangunan	Gedung Café dan ruang seminar
Jumlah lantai	4 lantai
Panjang bangunan	30 m
Lebar bangunan	13,2 m
Sistem struktur	Beton bertulang (SRPMK) + atap baja WF
Mutu beton (fc')	25 MPa
Mutu baja tulangan ulir/D (balok, kolom) (fy)	400 MPa
Mutu baja tulangan polos/sengkang (fy)	240 MPa
Mutu baja profil WF (fy/fu)	240 MPa / 370 MPa
Software analisis	SAP2000 V14
Standar	SNI 1726:2019; SNI 1727:2020; SNI 2847:2019; SNI 1729:2020

3.3 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data menggunakan metode studi literatur dan dokumentasi. Metode dokumentasi dilakukan dengan melakukan pengumpulan gambar kerja, data dimensi bangunan, dan spesifikasi bahan yang digunakan di Gedung Café 1912 UMY. Setelah itu, studi literatur dilakukan untuk mendapatkan dasar teori dan standar rencana desain sesuai SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, SNI 1726:2019, serta SNI 1729:2020 [1], [5].

3.4 Metode Analisis

Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan *software* SAP2000 dan prosedur sebagai berikut: (1) Penentuan data geometris bangunan dari gambar rencana, (2) Penentuan mutu material beton, baja tulangan dan baja profil, (3) Sesuai dengan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa dihitung, (4) Pemrosesan model struktur tiga dimensi dengan menggunakan *software* SAP2000, (5) Analisis struktur guna mendapatkan gaya berupa momen, gaya geser, gaya aksial dan lenturan, (6) Perancangan dimensi dan penulangan elemen struktur seperti pelat, balok, kolom, dan struktur atap baja, dan (7) Evaluasi hasil perencanaan untuk memastikan bahwa seluruh komponen memenuhi persyaratan kekuatan dan stabilitas sesuai standar [1], [5]. Bangunan dimodelkan sebagai struktur beton bertulang dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang dikombinasikan dengan struktur atap baja profil WF. Mutu beton yang digunakan adalah fc' = 25 MPa. Tulangan ulir (D) pada balok dan kolom menggunakan fy = 400 MPa, sedangkan tulangan polos dan sengkang menggunakan fy = 240 MPa. Untuk struktur atap digunakan baja mutu fy = 240 MPa dengan fu = 370 MPa. Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dengan kombinasi pembebanan mengacu pada SNI 1727:2020 dan analisis gempa berdasarkan SNI 1726:2019.

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari pengumpulan data hingga penyusunan hasil perencanaan struktur. Diagram alir penelitian meliputi identifikasi permasalahan, pengumpulan data, studi literatur, pemodelan struktur menggunakan SAP2000, analisis pembebanan, perencanaan elemen struktur, evaluasi hasil, dan penarikan kesimpulan [1].

3.6 Tahapan Perencanaan Struktur

Langkah-langkah dalam perancangan struktur adalah: identifikasi data bangunan, penetapan nilai parameter material, kalkulasi beban, analisis struktur dengan SAP2000, perancangan struktur atap baja, perancangan pelat lantai, perancangan balok, desain kolom, desain tangga, desain pondasi, serta evaluasi hasil perencanaan sesuai SNI. Tahapan tersebut dilakukan secara berurutan sehingga diperoleh alternatif desain struktur yang aman, kuat, dan memenuhi persyaratan teknis [1], [8].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perencanaan Struktur Atap Baja WF

Berdasarkan SNI 1729:2020, profil baja WF digunakan untuk merencanakan struktur atap [8], [9]. SAP2000 digunakan untuk melakukan analisis untuk mengetahui reaksi struktur terhadap kombinasi beban yang bekerja [1], [5]. Hasil kombinasi pembebanan yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 4.

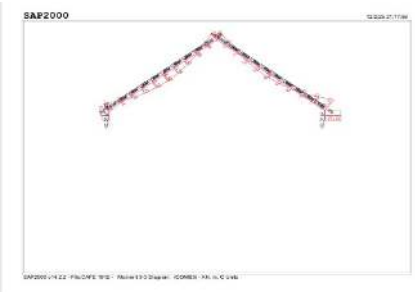
Tabel 4. Kombinasi Pembebanan Struktur

No	Kombinasi Beban	Keterangan
1	1,4D	Beban mati terfaktor
2	1,2D + 1,6L + 0,5 (Lr atau R)	Beban mati dan beban hidup
3	1,2D + 1,6 (Lr atau R) + 1,0L	Beban atap dan beban hidup
4	1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5 (Lr atau R)	Kombinasi beban angin
5	0,9D + 1,0W	Kombinasi stabilitas akibat angin
6	1,2D + 1,0E + 1,0L	Kombinasi beban gempa
7	0,9D + 1,0E	Kombinasi stabilitas akibat gempa

Keterangan:

D : Beban mati
L : Beban hidup
Lr : Beban hidup atap
R : Beban hujan
W : Beban angin
E : Beban gempa

Hasil pemodelan dan analisis struktur atap menggunakan SAP2000 ditunjukkan pada Gambar 1 [1], [5]. Berdasarkan hasil analisis tersebut, struktur atap mampu menahan kombinasi beban rencana tanpa melampaui kapasitas elemen yang direncanakan [8], [9].



Gambar 1. Hasil Analisa SAP2000 Struktur Atap WF

Struktur atap direncanakan menggunakan profil baja WF 300×150×6,5×9 sebagai elemen utama dan CNP 150×50×20×3,2 sebagai gording. Baja yang digunakan memiliki mutu fy = 240 MPa dan fu = 370 MPa (Tabel 5). Pemodelan dilakukan menggunakan SAP2000 untuk memperoleh gaya dalam akibat kombinasi beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa profil yang digunakan memenuhi persyaratan kekuatan dan stabilitas berdasarkan SNI 1729:2020. Struktur atap pada Gedung Café 1912 UMY direncanakan menggunakan rangka baja profil WF sebagai elemen utama dan baja ringan profil CNP sebagai elemen sekunder (gording). Perencanaan struktur baja mengacu pada SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi Bangunan Gedung Baja Struktural. Mutu baja yang digunakan memiliki tegangan leleh (fy) sebesar 240 MPa dan tegangan tarik minimum (fu) sebesar 370 MPa sesuai spesifikasi material baja struktural yang digunakan pada penelitian ini. Struktur atap dimodelkan menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk memperoleh gaya dalam akibat kombinasi beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa. Pemilihan profil baja dilakukan dengan mempertimbangkan kapasitas lentur, tekan, dan stabilitas elemen sesuai ketentuan SNI 1729:2020 yang sejalan dengan konsep perencanaan struktur baja dalam Steel Construction Manual [13]. Perilaku struktur baja terhadap kombinasi pembebanan harus memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas agar mampu memberikan kinerja struktur yang aman selama umur rencana bangunan [14].

Tabel 5. Rekapitulasi Struktur Atap Baja

Parameter	Nilai
Profil Kuda-kuda	WF 300.150.6,5.9
Profil Gording	CNP 150.50.20.3,2
Jarak Kuda-kuda	6 m
Jarak Gording	1,25 m
Bentang Kuda-kuda	19,2 m
Sudut Kemiringan Atap	35°
Modulus Elastisitas (E)	200.000 N/mm²
Mutu Baja (fy)	240 MPa
Mutu Baja (fu)	370 MPa

4.2 Analisis Beban Gempa

Parameter gempa ditentukan berdasarkan lokasi bangunan, kategori risiko, kelas situs, serta parameter spektrum respons gempa yang diperoleh dari aplikasi Desain Spektra Indonesia. Berdasarkan hasil analisis pada lokasi penelitian, bangunan termasuk Kategori Risiko III dengan Kelas Situs SD (tanah sedang). Nilai parameter spektrum yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Parameter Analisis Gempa

Parameter	Nilai
Kategori Risiko	III
Kelas Situs	SD
Ss	1,50 g
S1	0,70 g
Fa	0,929
Fv	2,156
SDS	0,92 g
SD1	0,67 g
Kategori Desain Seismik (KDS)	D
Faktor modifikasi respons (R)	8
Periode fundamental (Ta)	0,440 detik
Base shear (V)	204.464,44 kg

Analisis gempa dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen berdasarkan SNI 1726:2019. Parameter gempa yang digunakan meliputi S1 sebesar 0,70 g, SDS sebesar 0,92 g, R = 8, periode fundamental struktur Ta = 0,440 detik, serta gaya geser dasar (base shear) sebesar 204.464,44 kg. Nilai tersebut kemudian digunakan untuk menentukan distribusi gaya lateral pada setiap tingkat bangunan sebagai dasar perencanaan elemen struktur. Berdasarkan hasil analisis, distribusi gaya lateral terbesar terjadi pada lantai empat karena memiliki elevasi dan massa yang lebih besar dibandingkan lantai di bawahnya. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa pengaruh gempa meningkat seiring bertambahnya tinggi struktur sehingga elemen struktur pada lantai atas memerlukan kapasitas yang memadai terhadap gaya lateral. Berdasarkan parameter tersebut, struktur gedung termasuk dalam Kategori Desain Seismik (KDS) D, sehingga perencanaan struktur harus memenuhi ketentuan sistem struktur tahan gempa sesuai SNI 1726:2019. Analisis beban gempa dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen dengan bantuan perangkat lunak SAP2000. Beban gempa didistribusikan ke setiap tingkat bangunan berdasarkan berat seismik efektif dan elevasi masing-masing lantai.

Analisis beban gempa menggunakan metode statik ekuivalen merupakan metode yang umum diterapkan pada bangunan beraturan dengan tinggi tertentu dan didasarkan pada konsep respons dinamik struktur terhadap pembebanan gempa [15]. Metode tersebut juga menjadi dasar penyusunan ketentuan dalam SNI 1726:2019. Nilai percepatan spektrum desain yang digunakan dalam analisis terdiri atas SDS sebesar 0,92 g dan S1 sebesar 0,70 g, dengan koefisien situs Fa sebesar 0,929 dan Fv sebesar 2,156. Sistem struktur menggunakan faktor modifikasi respons R = 8. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh periode fundamental struktur minimum (Ta) sebesar 0,440 detik, sedangkan periode maksimum yang diizinkan sebesar 0,616 detik. Hasil analisis menghasilkan gaya geser dasar (*base shear*) sebesar 204.464,44 kg, yang selanjutnya digunakan dalam distribusi gaya lateral pada setiap tingkat bangunan sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi gaya lateral semakin besar pada lantai yang lebih tinggi.

Hal ini disebabkan oleh bertambahnya ketinggian struktur dan akumulasi berat bangunan sehingga gaya gempa yang diterima setiap lantai meningkat seiring bertambahnya elevasi. Distribusi gaya lateral pada masing-masing lantai disajikan pada Tabel 7.

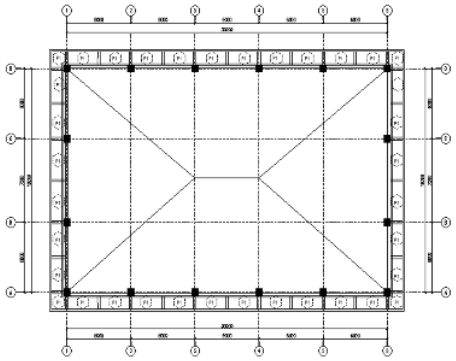
Tabel 7. Distribusi Gaya Lateral Seismik/Fx

Lantai	W (kg)	Tinggi(m)	$W_i h_x^{k}$(Kg.m)	C_{vx}	Fx=Fy (kg)	Sumbu y (kg)	Sumbu x (kg)
Atap	145.375.93	16	2.326.014,88	0,13	26.539,71	6.634,93	4.423,28
4	755.293,68	12	9.063.524,16	0,51	103.414,33	25.853,58	17.235,72
3	755.293,68	8	6.042.349,44	0,34	68.942,88	17.235,72	11.490,48
2	121.988.40	4	487.953,60	0,03	5.567,52	1.391,88	927,92
Total	**1.777.591,69**		**17.919.842,08**		**204.464,44**		

Berdasarkan Tabel 7, total gaya lateral gempa yang bekerja pada struktur sebesar 204.464,44 kg. Gaya terbesar terjadi pada lantai empat karena memiliki elevasi tertinggi sehingga menerima kontribusi gaya gempa paling besar. Distribusi gaya lateral tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis gaya dalam dan perencanaan elemen struktur seperti pelat, balok, kolom, dan struktur atap baja WF. Pemeriksaan simpangan antar lantai (story drift) menunjukkan bahwa simpangan yang terjadi pada setiap tingkat masih berada di bawah simpangan izin (Δa) sesuai SNI 1726:2019.

4.3 Perencanaan Pelat Lantai dan Pelat Atap

Menurut SNI 2847:2019, perencanaan pelat didasarkan pada beban mati, beban hidup, dan kombinasi beban ultimit [4], [11]. Gambar 2 menunjukkan geometri pelat yang menunjukkan denah pelat dan sistem pembebanan pada struktur bangunan.



Gambar 2. Denah Pelat dan Atap

Tabel 8. Perhitungan Momen Pelat Atap

Tipe Pelat	Lx (m)	Ly (m)	W_U (kg/m^2)	Kofisien Momen Pelat	Arah X		Arah Y	
					Mtx (kgm)	Mlx (kgm)	Mty (kgm)	Mly (kgm)
1	1,00	6,00	646,4	Ctx = 83; Clx = 42 Cty = 57; Cly = 11	-482,86	244,33	-331,60	64,99
2	2,00	4,00	848,8	Ctx = 83; Clx = 41 Cty = 57; Cly = 12	-281,8	139,20	-193,53	40,74
3	2,00	2,50	848,8	Ctx =69; Clx = 31 Cty = 57; Cly = 19	-234,3	105,25	-193,53	64,51
4	2,50	4,00	848,8	Ctx = 79; Clx = 37 Cty = 57; Cly = 16	-419,1	196,29	-302,39	84,88
5	1,25	400	848,8	Ctx = 83; Clx = 43 Cty = 57; Cly = 8	-110,1	55,70	-75,60	10,61

Berdasarkan hasil perhitungan momen pelat, diperoleh kebutuhan tulangan yang memenuhi persyaratan kekuatan dan lendutan [4], [11]. Perhitungan momen pelat atap dapat disimak dalam Tabel 8, sementara perhitungan penulangan pelat atap dapat dilihat dalam Tabel 9. Perencanaan pelat dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 dengan mempertimbangkan beban mati, beban hidup, dan kombinasi beban ultimit. Koefisien momen pelat dua arah mengacu pada tabel koefisien momen SNI 2847:2019. Selain penentuan kebutuhan

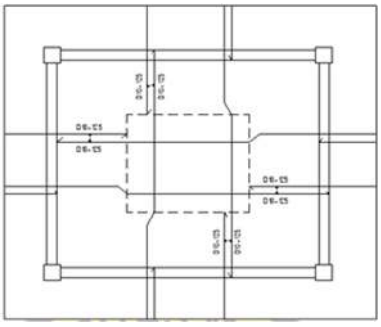
tulangan, dilakukan pula pemeriksaan terhadap luas tulangan minimum, lendutan, dan kapasitas geser untuk memastikan pelat memenuhi persyaratan kekuatan maupun kemampuan layan. Perencanaan pelat dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 dengan mempertimbangkan kebutuhan tulangan minimum, kapasitas lentur, kapasitas geser, dan batas lendutan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa luas tulangan yang digunakan telah memenuhi kebutuhan minimum sehingga mampu menahan momen ultimit yang bekerja. Pelat atap dan pelat lantai direncanakan menggunakan tebal 100 mm. Pemeriksaan lendutan menunjukkan bahwa tebal pelat tersebut masih berada dalam batas yang diizinkan, sedangkan pemeriksaan geser menunjukkan bahwa kapasitas geser nominal beton lebih besar daripada gaya geser ultimit sehingga pelat dinyatakan aman.

Tabel 9. Penulangan Pelat Atap

Tipe	Momen				Tulangan Lapangan		Tulangan Tumpuan	
	Mtx (kgm)	Mlx (kgm)	Mty (kgm)	Mly (kgm)	Arah X (mm)	Arah Y (mm)	Arah X (mm)	Arah Y (mm)
A	-482,86	244,33	-331.60	63,99	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142
B	-281,80	139,20	-193,53	40,74	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142
C	-234,27	105,25	-193,53	64,51	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142
D	-600,0	281,02	-432,92	121,52	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142
E	-157,6	79,75	-108,23	15,19	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142	Ø10-142

Tabel 10. Penulangan Pelat Lantai

Tipe	Momen				Tulangan Lapangan		Tulangan Tumpuan	
	Mtx (kgm)	Mlx (kgm)	Mty (kgm)	Mly (kgm)	Arah X (mm)	Arah Y (mm)	Arah X (mm)	Arah Y (mm)
A	*-529,93*	224,55	-485,02	188,62	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125
B	-281,80	139,20	-193,53	40,74	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125
C	-234,27	105,25	-193,53	64,51	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125
D	-600,0	281,02	-432,92	121,52	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125
E	-157,6	79,75	-108,23	15,19	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125	Ø10-125



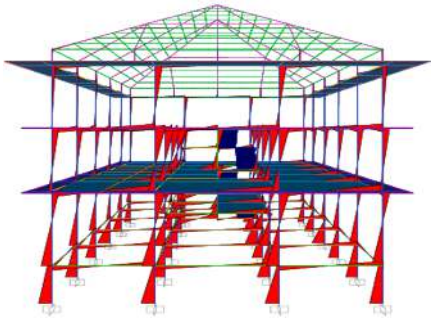
Gambar 3. Detail Penulangan Pelat Lantai

Hasil perencanaan menunjukkan bahwa tulangan yang digunakan telah memenuhi kebutuhan luas tulangan minimum menurut SNI 2847:2019. Tebal pelat yang direncanakan juga memenuhi persyaratan lendutan sehingga tidak diperlukan penambahan ketebalan. Pemeriksaan geser menunjukkan bahwa gaya geser ultimit yang bekerja masih lebih kecil dibanding kapasitas geser nominal beton sehingga pelat dinyatakan aman terhadap kegagalan geser. Selanjutnya, hasil perencanaan pelat lantai menunjukkan bahwa dimensi dan tulangan yang digunakan telah memenuhi ketentuan desain [4], [11]. Rekapitulasi kebutuhan tulangan pelat lantai disajikan pada Tabel 10.

4.4 Analisis Struktur Gedung

Pada SNI 1726:2019, model struktur bangunan tiga dimensi dihasilkan menggunakan software SAP2000 agar mampu mengalkulasi beban gempa dan beban gravitasi [1], [5]. Gambar 4 menunjukkan model struktur yang digunakan. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi gaya lateral akibat gempa telah tersebar pada setiap tingkat bangunan sesuai massa dan ketinggian lantai [6], [7]. Tabel 7 menunjukkan distribusi gaya gempa statik ekuivalen yang diperoleh dari analisis. Analisis gempa dilakukan menggunakan metode statik ekuivalen sesuai SNI 1726:2019. Beban gempa ditentukan berdasarkan parameter lokasi bangunan, kategori risiko, kelas situs, nilai

percepatan spektrum, faktor modifikasi respons, dan periode struktur. Parameter tersebut digunakan untuk menentukan gaya geser dasar (base shear) yang kemudian didistribusikan ke setiap tingkat bangunan sesuai berat seismik dan tinggi lantai. Berdasarkan hasil tersebut, struktur menunjukkan respons yang stabil terhadap pengaruh beban gempa dan memenuhi persyaratan analisis seismik yang berlaku [3], [7].



Gambar 4. Permodelan Struktur SAP2000

Berdasarkan hasil analisis diperoleh total distribusi gaya lateral sebesar 204.464,44 kg. Gaya terbesar terjadi pada lantai empat karena memiliki kontribusi berat dan elevasi yang lebih tinggi dibanding lantai di bawahnya. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa respons struktur terhadap pembebanan gempa telah mengikuti ketentuan distribusi gaya lateral statik ekuivalen pada SNI 1726:2019. Hasil analisis selanjutnya digunakan sebagai dasar perencanaan balok, kolom, pelat, dan elemen struktur lainnya. Pemodelan struktur tiga dimensi menggunakan SAP2000 memberikan distribusi gaya dalam yang digunakan sebagai dasar perencanaan balok, kolom, pelat, dan struktur atap baja. Analisis menunjukkan bahwa distribusi gaya lateral telah mengikuti distribusi massa dan tinggi bangunan sehingga respons struktur sesuai dengan asumsi metode statik ekuivalen.

4.5 Perencanaan Blok

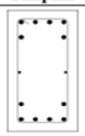
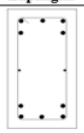
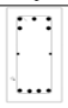
Perencanaan balok dilakukan berdasarkan gaya dalam hasil analisis SAP2000 [1], [4]. Tabel 11 menggambarkan nilai momen ultimit yang bekerja pada balok.

Tabel 11. Momen yang Bekerja pada Balok

Balok	Mu Tumpuan (Kg/m)	Mu Lapangan (Kg/m)	Vu Tumpuan (Kg)	Vu Lapangan (Kg)
B1	-50696,49	45759,23	-27975,67	24966,87
B2	-42472,17	35289,86	-34428,95	42465,03
B3	-8742,18	10071,62	-8069,75	10691,55

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tulangan longitudinal dan geser yang dapat menahan gaya dan momen geser diperlukan [4]. Hasil desain menunjukkan bahwa rasio tulangan yang digunakan masih berada dalam batas minimum dan maksimum yang dipersyaratkan oleh SNI 2847:2019 sehingga perilaku balok tetap daktail [4]. Perencanaan balok dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 dengan menggunakan gaya dalam hasil analisis SAP2000 berupa momen lentur dan gaya geser. Balok yang digunakan terdiri atas balok induk tipe B1 dan B2. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa balok B1 menggunakan dimensi 300 × 600 mm, sedangkan balok B2 menggunakan dimensi 250 × 500. Tulangan memanjang menggunakan diameter D19 pada daerah tumpuan dan lapangan sesuai kebutuhan momen positif maupun negatif, dengan tulangan geser (sengkang) Ø10-100 dengan jarak yang disesuaikan terhadap besarnya gaya geser pada masing-masing daerah balok.

Kapasitas lentur balok telah memenuhi persyaratan karena nilai momen nominal lebih besar daripada momen ultimit yang bekerja ($\varphi Mn \geq Mu$). Demikian pula kapasitas geser memenuhi ketentuan SNI 2847:2019 dengan nilai $\varphi Vn \geq Vu$, sehingga balok dinyatakan aman terhadap beban yang bekerja. Hasil kontrol penampang menunjukkan bahwa seluruh balok memenuhi persyaratan kekuatan struktur.

B1	Detail B1	
	300x600	
Notes	Tumpuan	Lapangan
Deskripsi		
Tulangan	6 D 19	5 D 19
Tulangan Bawah	6 D 19	5 D 19
Tulangan Sengkang	Ø10 – 100	Ø10 – 100
B2	Detaill B2	
	250x500	
Notes	Tumpuan	Lapangan
Potongan		
Tulangan	5 D 19	3 D 19
Tulangan Bawah	4 D 19	3 D 19
Tulangan Sengkang	Ø10 – 100	Ø10 – 100

Gambar 5. Detail Penulangan B1 dan B2

Berdasarkan hasil analisis menggunakan SAP2000, perencanaan balok dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi beban ultimit yang menghasilkan momen lentur dan gaya geser terbesar. Penentuan dimensi penampang serta kebutuhan tulangan mengacu pada SNI 2847:2019. Tulangan memanjang dipasang pada daerah tumpuan dan lapangan sesuai kebutuhan momen positif dan negatif, sedangkan tulangan geser ditentukan berdasarkan gaya geser yang bekerja. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa seluruh balok memenuhi persyaratan kekuatan lentur dan geser sehingga aman digunakan sebagai elemen struktur utama bangunan. Penentuan kebutuhan tulangan lentur dan tulangan geser dilakukan agar kapasitas penampang lebih besar dibandingkan gaya dalam yang bekerja. Konsep tersebut merupakan prinsip dasar desain beton bertulang sebagaimana dijelaskan dalam ACI 318-19 dan Nilson et al. (2010) [16], [17].

4.6 Perencanaan Kolom

Kolom dirancang untuk menahan kombinasi gaya aksial dan momen yang dihasilkan dari analisis struktur [12]. Tabel 12 menggambarkan hasil perhitungan kebutuhan tulangan kolom.

Tabel 12. Rekapitulasi Penulangan Kolom

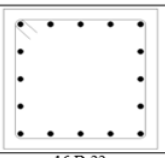
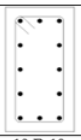
Kolom	Tulangan Utama		Tulangan geser	
	Tumpuan	Lapangan	Tumpuan	Lapangan
K1	25 D22	25 D22	Ø10-200	Ø10-200
K2	12 D19	12 D19	Ø10-150	Ø10-150

Kapasitas penampang dilakukan menggunakan diagram interaksi P-M. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas kolom masih lebih besar dibandingkan beban rencana yang bekerja sehingga elemen kolom memenuhi persyaratan kekuatan struktur. Selain itu, konfigurasi tulangan yang digunakan telah memenuhi ketentuan daktilitas [6], [12]. Perencanaan kolom dilakukan berdasarkan kombinasi beban terfaktor yang menghasilkan gaya aksial dan momen terbesar pada masing-masing kolom. Dimensi kolom ditentukan agar mampu menahan kombinasi pembebanan tersebut sesuai ketentuan SNI 2847:2019. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa kolom menggunakan dimensi sesuai kebutuhan struktur dengan tulangan utama berdiameter D19–D22 dan sengkang Ø10.

Perencanaan kolom mempertimbangkan kombinasi gaya aksial dan momen sehingga kapasitas penampang memenuhi persyaratan kekuatan beton bertulang. Prinsip tersebut sejalan dengan ketentuan ACI 318-19 serta teori desain beton bertulang yang dikemukakan oleh Nilson et al. (2010) [16], [17]. Pemeriksaan penampang kolom menunjukkan bahwa kapasitas penampang masih lebih besar dibanding gaya aksial dan momen yang bekerja sehingga kolom memenuhi persyaratan kekuatan. Rasio tulangan longitudinal juga masih berada dalam batas minimum dan maksimum yang dipersyaratkan oleh SNI 2847:2019 sehingga penampang kolom layak digunakan.

Tabel 13. Rekapitulasi Perencanaan Kolom

Tipe Kolom	Dimensi (mm)	Tulangan Utama	Tulangan Geser
K1	600 × 600	25D22	Ø10-200
K2	600 × 300	12D19	Ø10-150

K1	**Detail Kolom K1**
	600x600
Deskripsi	
Tul.Utama	16 D 22
Sengkang	Ø10 - 200
K2	**Detail Kolom K2**
	600x300
Deskripsi	
Tul.Utama	12 D 19
Sengkang	Ø8 – 150

Gambar 6. Detail Penulangan K1 dan K2

4.7 Evaluasi Hasil Perencanaan

Secara keseluruhan, hasil analisis dan perencanaan menunjukkan bahwa alternatif pengembangan Gedung Cafe 1912 UMY dari tiga lantai menjadi empat lantai masih memenuhi persyaratan kekuatan, akuan, dan stabilitas struktur [2], [3]. Sesuai dengan SNI 1729:2020, SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, serta SNI 1727:2020, struktur atap baja WF, pelat lantai, balok, dan kolom yang direncanakan dapat menahan beban gravitasi dan beban gempa [1], [7], [8].

4.8 Pembahasan

Dimensi elemen struktur diperoleh berdasarkan hasil analisis SAP2000 terhadap kombinasi beban sesuai SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019. Balok, kolom, dan pelat dirancang agar memenuhi persyaratan kekuatan lentur, geser, serta kekakuan struktur berdasarkan SNI 2847:2019. Pemilihan dimensi tidak hanya mempertimbangkan kapasitas struktur tetapi juga efisiensi penggunaan material sehingga diperoleh penampang yang aman dan ekonomis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan sistem beton bertulang yang dikombinasikan dengan struktur atap baja WF mampu memberikan kapasitas struktur yang memenuhi ketentuan perencanaan bangunan tahan gempa. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian-penelitian terdahulu [1], [7] yang menyatakan bahwa penggunaan analisis tiga dimensi menggunakan SAP2000 mampu menghasilkan perencanaan struktur yang memenuhi persyaratan kekuatan dan stabilitas sesuai standar nasional.

Hasil perencanaan menunjukkan bahwa dimensi elemen struktur yang diperoleh mampu memenuhi persyaratan kekuatan sesuai standar nasional. Pendekatan pemodelan menggunakan SAP2000 juga banyak digunakan dalam penelitian perencanaan struktur karena mampu memberikan hasil analisis gaya dalam yang representatif untuk perencanaan beton bertulang maupun struktur baja [14], [15]. Dibandingkan penelitian terdahulu yang hanya membahas perencanaan beton bertulang, penelitian ini juga mengintegrasikan perencanaan struktur atap baja WF dalam satu model analisis menggunakan SAP2000. Dengan demikian, proses perencanaan menjadi lebih komprehensif karena seluruh struktur atas dianalisis dalam satu sistem struktur yang sama.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan perencanaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa struktur atas Gedung Café 1912 UMY berhasil direncanakan menggunakan sistem beton bertulang dengan struktur atap baja WF sesuai ketentuan SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI

1727:2020, dan SNI 1729:2020. Hasil analisis menunjukkan distribusi gaya lateral gempa total sebesar 204.464,44 kg, yang digunakan sebagai dasar perencanaan elemen struktur. Perencanaan menghasilkan dimensi dan penulangan pelat, balok, kolom, serta struktur atap yang memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan standar yang digunakan. Hasil penelitian ini hanya berlaku pada struktur atas bangunan sehingga tidak mencakup evaluasi fondasi maupun kondisi struktur eksisting secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ariyanto, A. Wicaksono, N. Hidayati, Mochammad Qomaruddin, and T. Roesdiana, "Perencanaan Gedung Bertingkat 5 Lantai Asrama Putri Pondok Pesantren Hasyim Asy'ari Bangsri Jepara," *Basement : Jurnal Teknik Sipil*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2024, doi: 10.36873/basement.v2i1.10878.

[2] R. I. Asshidiqi, M. Sulton, and D. R. Sulaksitaningrum, "Perencanaan Ulang Gedung Malang Creative Center (MCC) dengan Penambahan Jumlah Lantai Serta Penambahan Sistem Penahan Gempa Berupa Shear Wall," 2024.

[3] F. S. Siadari, E. Desimaliana, and A. S. Arifin, "Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Café di Kabupaten Bandung dengan Time History Berdasarkan FEMA 356," *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, vol. 10, no. 3, p. 211, Feb. 2025, doi: 10.26760/rekaracana.v10i3.211.

[4] A. Sabila and M. Jamal, "Analisis Struktur Penulangan Balok pada Proyek Rehabilitasi Gedung Kantor Dinas Sosial Kota Samarinda," *Teknologi Sipil: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, vol. 8, no. 1, p. 8, Jun. 2024, doi: 10.30872/ts.v8i1.16020.

[5] T. M. I. Jaji, "Perencanaan Gedung Menggunakan Metode Statik Ekuivalen pada Bangunan Gedung Bertingkat," pp. 141–146, 2023.

[6] A. H. Afifuddin and K. Sunoko, "Penerapan Prinsip Bangunan Tanggap Bencana Gempa Bumi pada Desain Resort Hotel di Pantai Parangtritis Bantul," vol. 7, no. 3, pp. 1104–1113, 2024.

[7] I. Septhia Irawati, I. Heriawati, and A. F. Setiawan, "Evaluasi Seismik Gedung Perkuliahan 3 dan 6 Lantai Eksisting di Kota Yogyakarta," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 18, no. 1, pp. 39–50, Oct. 2024, doi: 10.24002/jts.v18i1.10168.

[8] L. Darmiyanti, A. P. Rodji, and A. Mumtaz, "Perencanaan Struktur Atap Profil Baja WF," *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, vol. 4, no. 02, Oct. 2022, doi: 10.47080/josce.v4i02.2258.

[9] I. Imroatuzzakiyah, "Pekerjaan Struktur Atap pada Proyek Gedung Terpadu Psikologi Olahraga Unesa," *Jurnal Vokasi Teknik Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 51–58, 2024.

[10] H. Mahdisra, Muhammad Aryya Saputra, and Sumirin, "Studi Analisis Variasi Dimensi Baut dan Pelat Sambungan Balok – Kolom Baja Prakualifikasi SNI 7279:2020," *Jurnal Teknik SILITEK*, vol. 5, no. 1, pp. 515–528, 2025.

[11] A. B. Subkhi, P. Priyono, and I. C. Dewi, "Studi Tebal Minimum Pelat Beton Bertulang Terletak pada Lantai Pelat Atap Gedung Type Dua Lantai," 2023. [Online]. Available: http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST

[12] M. Z. Khalfani and W. Wahiddin, "Pengaruh Rasio Tulangan Kolom Concrete Filled Steel Tubular (CFST) pada Bangunan Tahan Gempa," *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, vol. 6, no. 3, pp. 188–195, Sep. 2025, doi: 10.33795/jos-mrk.v6i3.7988.

[13] American Institute of Steel Construction, *Steel Construction Manual (15th Edition)*. 2016.

[14] C. G. Salmon, J. E. Johnson, and F. A. Malhas, *Steel Structures: Design and Behavior*. Pearson, 2009.

[15] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson.

[16] American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)," 2019.

[17] A. H. Nilson, D. Darwin, and C. W. Dolan, *Design of Concrete Structures*. McGraw-Hill, 2010.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 24-34

Analisis Perbandingan Biaya Perkerasan Lentur Dan Kaku Pada Ruas Jalan Tajab – Adijaya Kabupaten Way Kanan

Anggi Duwi Setiadi[1*], Yunita Mauliana[2]

[1,2]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Bandar Lampung
*Email Korespondensi: anggisetiadi030699@gmail.com

ABSTRAK

Satu di antara aspek krusial untuk menunjang aktivitas perekonomian, meningkatkan mobilitas masyarakat, serta mendorong pemerataan pembangunan antarwilayah adalah pembangunan jalan. Dalam pelaksanaan pembangunan jalan, pemilihan jenis perkerasan menjadi faktor yang perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap kebutuhan biaya konstruksi serta masa layan perkerasan. Umumnya, perkerasan jalan mencakup perkerasan lentur (*flexible pavement*) serta perkerasan kaku (*rigid pavement*), tiap-tiapnya ini mempunyai karakternya yang tidak sama baik dari aspek struktur, metode konstruksi, maupun kebutuhan anggaran. Ruas Jalan Tajab–Adi Jaya di Kabupaten Way Kanan merupakan jalan provinsi yang mengalami kondisi kerusakan berat sehingga memerlukan penanganan yang efektif dan ekonomis. Kajian ini mempunyai tujuannya guna dibandingkan suatu pembiayaan konstruksi dalam perkerasan lentur serta kakunya terhadap ruas jalan tersebut serta mengevaluasi tingkat efisiensi biaya yang dihasilkan. Penggunaan metodenya ialah secara pendekatan kuantitatif dan kualitatif melalui analisis Rencana Anggaran Biaya (RAB) didasarkan data perencanaan dan volume pekerjaan dari masing-masing jenis perkerasan. Hasil perhitungan memberikan adanya jumlah pembiayaan konstruksi untuk perkerasan lenturnya ialah Rp 10.425.599.514,00, sedangkan biaya konstruksi perkerasan kaku mencapai Rp 13.163.700.626,00. Berdasarkan perbandingan kedua nilai tersebut diperoleh tingkat efisiensi biaya sebesar 20,80%. Dengan demikian, dapat disimpulkan mengenai pembiayaan yang lebih efisien dari perkerasan lentur dibanding perkerasan kaku pada Ruas Jalan Tajab–Adi Jaya Kabupaten Way Kanan.

Kata kunci : Perkerasan Lentur, Perkerasan Kaku, Rencana Anggaran Biaya, Efisiensi Biaya dan Jalan Provinsi.

ABSTRACT

One of the crucial aspects for supporting economic activity, improving public mobility, and promoting equitable development across regions is road construction. In road construction, the selection of pavement type is a key factor to consider because it affects both construction costs and the pavement's service life. Generally, road pavements include flexible pavements and rigid pavements; each has distinct characteristics in terms of structure, construction methods, and budget requirements. The Tajab–Adi Jaya road section in Way Kanan Regency is a provincial road that has suffered severe damage, necessitating effective and cost-efficient remediation. The objective of this study is to compare the construction costs of flexible and rigid pavements for this road section and to evaluate the resulting cost-efficiency levels. The methodology employs both quantitative and qualitative approaches through an analysis of the Cost Estimate (RAB) based on planning data and the volume of work for each type of pavement. The calculations show that the total construction cost for the flexible pavement is Rp 10,425,599,514.00, while the construction cost for the rigid pavement is Rp 13,163,700,626.00. Based on a comparison of these two figures, a cost efficiency rate of 20.80% was obtained. Thus, it can be concluded that flexible pavement is more cost-efficient than rigid pavement on the Tajab–Adi Jaya Road Section in Way Kanan Regency.

Keywords **:** *Flexible Pavement, Rigid Pavement, Cost Budget Plan, Cost Efficiency, and Provincial Road.*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan mempunyai peran yang begitu krusial untuk mendukung perkembangan ekonomi serta memfasilitasi pergerakan masyarakat secara lebih efektif, serta pemerataan pembangunan wilayah. Dengan ini, pemilihan jenis perkerasan jalan menjadi keputusan strategis yang harus mempertimbangkan aspek teknis, dan ekonomi. Satu di antara Pembangunan transportasi darat dengan peranannya yang strategis untuk mendukung tumbuhnya perekonomian, dan pengembangan kawasan pariwisata. Peran tersebut mendukung pelaksanaan pembangunan nasional sebagaimana tercantum dalam UU 38/2004 *jo.* UU 34/2006 berkenaan atas Jalan, sebagai dasar hukum untuk membagi kewenangan di antara Pemerintah Pusat serta Pemda [1]. Dalam konstruksi jalan raya, jenis perkerasan yang umum diterapkan meliputi "perkerasan lentur (*flexible pavement*) serta perkerasan kaku (*rigid pavement*)."

Suatu tanah pada sifatnya yang alami, dengan belum disentuh manusia, atau tidak membebankan secara ulang dari kendaraan tanpa melalui deformasi besaran, yang terjadi di keadaan alam ialah perkerasan. Dengan ini perlu adanya perlindungan struktur dari tanah atas pembebanan roda kendaraannya, yang strukturnya ini diketahui sebagai *pavement* atau perkerasan. [2]. Dalam perkerasan lentur sendiri, lapisan perkerasannya disesuaikan terhadap deformasinya yang terjadi terhadap lapisan di bawahnya. Adapun terhadap kemampuan perkerasan yang baik guna menahan deformasi serta beban lalu lintasnya akibat kepemilikan sifat beton yang lebih kaku di banding aspal ialah perkerasan kaku [3]. Ruas Jalan Tajab – Adi Jaya yang merupakan salah satu ruas jalan provinsi, terletak pada Kabupaten Way Kanan Provinsi Lampung, sesuai data "Keputusan Gubernur Lampung" No. G/434/V.03/HK/2023 ruas jalan ini mempunyai total panjang 23,6 Km.

Pemilihan jenis perkerasan merupakan aspek penting dalam perencanaan jalan karena memengaruhi kebutuhan anggaran. Selain itu, pemeliharaan perkerasan diperlukan untuk menjaga umur layan dan kemampuannya menahan beban lalu lintas [4]. Analisis biaya konstruksi menjadi dasar penting dalam menentukan alternatif perkerasan yang sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan pendanaan suatu proyek jalan. Fokus penelitian dibatasi pembangunan jalan sepanjang 2 Km mulai dari STA. 6+350 ke STA. 8+350. Kondisi jalan ini mengalami kerusakan parah terdapat *existing* masih berupa lapis fondasi agregat kelas B, lubang, dan amblas.

Penelitian ini dibatasi pada analisis rasio pembiayaan tanpa memperhitungkan mutu dan umur layanan dalam perkerasan lentur beserta kaku pada Ruas Jalan Tajab – Adijaya Kabupaten Way Kanan. Analisis dilakukan berdasarkan perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) dari tiap-tiap jenis perkerasannya guna diketahuinya besaran kebutuhan pembiayaannya, dan tingkat efisiensi biaya yang dihasilkan. Analisis ini bertujuan untuk mempelajari komponen pembiayaan konstruksinya perkerasan lentur beserta kaku dan menghitung total biaya yang dibutuhkan terhadap tiap-tiap jenis perkerasannya berdasarkan penggunaan metode perencanaan pada ruas jalan Tajab – Adi Jaya serta efisiensi biaya dari kedua jenis perkerasan tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan lentur *(Flexible Pavement)*

"Pedoman Konstruksi Bangunan Desain Perkerasan Jalan Lentur (2011)" mencantumkan "perkerasan lentur adalah struktur perkerasan jalan yang dapat dibuat dengan menggunakan lapis fondasi agregat dan lapis permukaan dengan bahan pengikat aspal". Material penyusun perkerasan lentur tersusun atas bahan pengikat, seperti aspal dan tanah liat, serta agregat batuan. Kombinasi material tersebut memberikan sifat lentur pada perkerasan, sehingga setiap lapisannya mampu menahan serta menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar (*subgrade*). Pada umumnya, struktur *flexible pavement* tersusun atas tiga lapisan ataupun lebih, yakni lapis fondasi bawah serta permukaan, juga *subgrade* [5]. Dalam Tabel 1 dapat diketahui berbagai penggunaan istilah yang umum terhadap konstruksi *flexible pavement*.

Struktur perkerasan lentur disusun dari lapisan-lapisan yang pembangunannya dilakukan di atas tanah dasarnya yang sudah dipadatkannya itu sesuai persyaratan teknis. Setiap lapisan memiliki fungsi guna menankan pembebanan lalu lintas kendaraan serta mendistribusikannya

secara bertahap ke lapisan yang berada di bawahnya, yang membuat penerimaan tekanannya pada tanah dasarnya ini dapat diminimalkan. Pada perkerasan lentur, setiap lapisan berperan dalam menahan serta menyalurkan beban lalu lintas menuju *subgrade* yang sudah mengalami pemadatan [6].

Tabel 1. Istilah Perkerasan Lentur

Jenis Lapisan	USA	UK
Lapisan	*Surface Course*	*Surfacing*
Permukaan	- *Wearing Course* - *Binder course*	- *Wearing Course* - *Base Course*
Lapis Pondasi	- *Base Course* - *Subbasegrade*	- *Road Base* - *Subbase Course*
Tanah Dasar	*Subgrade*	*Subgrade*

2.2 Perkerasan kaku (*Rigid Pavement)*

Sebuah penggunaan jenis perkerasan jalan dengan bahan pengikat utamanya dalam kontraksinya berupa semen Portland ialah perkerasan kaku [7]. *Rigid Pavement* bekerja berdasarkan sifat mekanis beton yang memiliki modulus elastisitas tinggi. Contoh pada Tabel 2 dapat diketahui Tebal fondasi bawah minimal untuk perkerasan beton semen.

Tabel 2. Tebal fondasi bawah minimum untuk perkerasan beton semen [8]

Lalu Lintas Desain (JSKN)	**Jenis Lapis Fondasi**
Sampai dengan 10^6	BP 125 mm
10^6 Sampai dengan 5 x 10^6	BK 100 mm atau BP 150 mm
5 x 10^6 Sampai dengan 1 x 10^7	BK 125 mm
Lebih dari 1 x 10^7	BK 150 mm

Beton semen merupakan komponen utama dalam perkerasan kaku yang berfungsi sebagai lapisan struktural utama penahan beban lalu lintas.

2.3 Biaya

Biaya proyek pembangunan bisa dibagi menjadi 2 kategori: “biaya langsung serta biaya tidak langsung.” [9]. Tenaga kerja atau upah, bahan, serta peralatan adalah contoh biaya langsung. Biaya tak terduga, pendapatan, serta pajak adalah contoh biaya tidak langsung.

2.4 Rencana anggaran biaya (RAB)

Satu di antara proses pokok terhadap perencanaan proyek yang digunakan sebagai dasar guna menentukan besaran penawaran pekerjaan, menyusun sistem pembayaran, serta memperkirakan total biaya yang dibutuhkan dalam pelaksanaan proyek ialah Rencana Anggara Biaya (RAB) [10]. RAB disusun secara sistematis dengan mempertimbangkan kebutuhan material, tenaga kerja, peralatan, dan pembiayaan lainnya terkait atas keberlangsungan proyek, yang umumnya perhitungan RAB melalui persamaan 1.

$$RAB = V \times Hs \quad (1)$$

Dengan “RAB = rencana anggaran biaya, V = volume pekerjaan, Hs = harga satuan pekerjaan.”

Estimasi biaya merupakan tahapan yang bertujuan untuk memperoleh besaran anggaran yang dibutuhkan dalam suatu proyek konstruksi. [11]. Penentuan biaya konstruksi dilakukan berdasarkan kuantitas pekerjaan yang telah dihitung dari hasil perencanaan, di mana setiap volume pekerjaan dikalikan dengan harga satuan yang sesuai.

2.5 Volume pekerjaan

Volume pekerjaan dapat diartikan sebagai besaran pekerjaan yang dihitung sesuai dengan satuan pada masing-masing item pekerjaan [12], volume pekerjaan berperan sebagai komponen utama karena seluruh perhitungan biaya didasarkan pada jumlah pekerjaan yang hendak dilaksanakan.

2.6 Analisa harga satuan pekerjaan (AHSP)

Suatu proses menghitung biaya yang bertujuan guna memperoleh harga satuan dari suatu

item pekerjaan berdasarkan kebutuhan penggunaan peralatan, material, dan tenaga kerja ialah "Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP)" [13]. Penggunaan AHSP dalam kajian ini ialah yang diterbitkan "Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi (BMBK) Provinsi Lampung". Dalam AHSP, setiap item pekerjaan diuraikan menjadi komponen-komponen penyusunnya.

2.7 Harga satuan pekerjaan

Suatu kebutuhan pembiayaan guna terselesaikannya satu-satuan pekerjaan tertentu yang diperoleh melalui hasil AHSPnya ialah Harga Satuan Pekerjaan (HSP) [14]. Dalam penelitian kali ini penulis menggunakan harga satuan yang dikeluarkan BMBK Provinsi Lampung.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi penelitian

Pelaksanaan penelitian pada Gambar 1 berlokasi kan pada Ruas Jalan Tajab – Adi Jaya dengan kepemilikan panjangnya 2 km, dengan penelitian dimulai melalui STA. 6+350 s/d STA. 8+350. Lokasi ruang jalannya ada di Kec. Negara Batin Kab. Way Kanan yang dimulai dari Simpang tiga Tajab (SMP Negara Batin) dan berakhir di tugu batas desa Adi Jaya. Kondisi lalulintas pada jalan ini tidak terlalu ramai tetapi didominasi kendaraan berat bermuatan tebu, dikarenakan pada ruas jalan ini terdapat banyak perkebunan tebu dan pabrik pengolahan tebu.

Dalam menghitung analisis pembiayaan perkerasan lentur serta kakunya, diterapkan "Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2" yang menjadi pedoman utamanya. Selain itu, perhitungan juga mengacu pada "Keputusan Kepala BMBK Lampung" No. 031/KPTS/V.03/2025 yang mengatur besaran harga peralatan, harga satuan dasar rupiah, serta harga satuan pokok bahan guna pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan Tahun 2025.



Gambar 1. Lokasi penelitian

3.2 Metode pengumpulan data

Pada analisis ini peneliti menggunakan 2 metode pada pengumpulan data yakni metode pengambilan data primer serta pengambilan data sekunder. Data primernya diambil melalui data lewat meninjau langsung di lapangan selama melaksanakan penelitian dengan mengukur panjang dan lebar jalan di setiap jarak per 50 meter, kemudian dilakukan pengambilan foto dokumentasi.

Pengumpulan data sekunder dilaksanakan lewat pemanfaatan data yang diperoleh dari berbagai sumber pendukung penelitian, baik yang mempunyai asal dari instansi terkait ataupun sumber lainnya yang relevan. Data yang dikumpulkan melalui metode ini meliputi harga satuan bahan yang mengacu pada "Keputusan Kepala Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Lampung" No. 031/KPTS/V.03/2025, serta berbagai referensi pendukung seperti jurnal ilmiah, buku, serta peraturan undang-undang terkait atas topik penelitian.

3.3 Teknik pengumpulan data

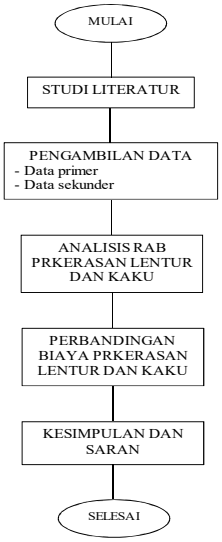
Data dihimpun pada kajian ini melalui dua pendekatan, yakni secara kuantitatif dan kualitatif. Kedua teknik tersebut digunakan untuk memperoleh informasi yang mendukung pelaksanaan analisis sesuai dengan tujuan penelitian. Teknik pengumpulan data kuantitatif merupakan metode penelitian memiliki fokus terhadap data yang dikumpulkan serta dianalisis berupa data statistik/angka/numerik, yang penggunaannya sebagai mendeskripsikan, menjelaskan, serta menguji hubungan antar variabel melalui penerapan analisis statistik [15].

Pengumpulan data kuantitatif pada analisis ini adalah menghitung volume pekerjaan dan RAB melalui aplikasi Microsoft Excel 2010.

Pengumpulan data kualitatif dilakukan dengan memperoleh data dengan sifat deskriptif, melalui penggambaran data atas suatu fenomena atau kondisi tertentu. Data tersebut dapat berupa hasil dokumentasi, foto, artefak, dokumen, maupun catatan lapangan yang diperoleh selama pelaksanaan penelitian [16]. Dalam pelaksanaan analisis ini, peneliti memperoleh data yang dibutuhkan untuk penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) secara langsung dari BMBK Lampung. Data yang dikumpulkan mencakup "Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2" serta informasi mengenai harga satuan yang berlaku pada instansi tersebut. Selain pengumpulan data dokumen, peneliti juga melakukan kegiatan observasi lapangan yang didukung dengan pengambilan foto dokumentasi sebagai bahan pendukung dalam proses penelitian.

3.4 Diagram alir penelitian

Diagram alir merupakan Suatu representasi visual yang menggambarkan tahap penelitian dengan runut, sistematis, dan terstruktur dimulai dengan tahapan awalnya hingga akhir penelitian. Dalam kajian ini, penggambaran berupa diagram alir akan keseluruhan tahapan penelitiannya tersaji di Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

3.5 Metode analisis

Dalam melakukan analisis untuk membandingkan pembiayaan dalam perkerasan lentur serta kaku ini, penulis menggunakan metode menilai volume pekerjaan serta harga satuan pada tiap item pekerjaan, yang untuk menghitung volume dilakukan terhadap seluruh komponen pekerjaan yang terdapat pada masing-masing jenis perkerasan, baik perkerasan lentur maupun perkerasan kaku, sebagai dasar dalam penyusunan dan perbandingan biaya konstruksi.

Untuk item pekerjaan "lapis fondasi beton kurus, perkerasan beton semen, serta lapis fondasi agregat kelas A" semuanya dapat dihitung dengan persamaan 2.

$$V = p \times l \times t \quad (2)$$

Dimana "V= volume pekerjaan, p= panjang jalan, l= lebar jalan, dan t= tebal hamparan."

Pekerjaan "laston lapis aus (AC-WC)" serta "laston lapis antara (AC-BC)" dapat dihitung dengan persamaan 3.

$$V = p \times l \times t \times Bj \quad (3)$$

Dimana "V= volume pekerjaan, p= panjang jalan, l= lebar jalan, dan t= tebal hamparan, Bj= berat jenis"

Pekerjaan lapis resap pengikat - aspal cair/emulsi, dan lapis perekat - aspal cair/emulsi dapat dihitung dengan persamaan 4.

$$V = p \times l \times Bj \quad \text{.....(4)}$$

Dimana "V= volume pekerjaan, p= panjang jalan, l= lebar jalan, dan Bj= berat jenis"

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil perhitungan volume pekerjaan

Pembahasan ini merupakan hasil dari perhitungan volume pada perkerasan lentur dan kaku dengan data-data yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan dan standar yang ada di Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Lampung.

a. Perkerasan lentur *(Flexible pavement)*

Tabel 3. Hasil perhitungan volume pekerjaan perkerasan lentur

Item pekerjaan	Satuan	Lebar (meter)	Panjang (meter)	Tebal (meter)	Berat jenis	Volume
Lapis pondasi agregat kelas A	M^3	6,00	2.000	0,30	-	3.600
Lapis resap pengikat	Liter	6,00	2.000	-	0,72	8.640
Lapis perekat	Liter	6,00	2.000	-	0,21	2.520
Laston lapis aus (AC—WC)	Ton	6,00	2.000	0,05	2,27	1.362
Laston lapis antara (AC-BC)	Ton	6,00	2.000	0,06	2,30	1.656

Sumber: data penelitian Anggi

b. Perkerasan kaku *(Rigid pavement)*

Tabel 4. Hasil perhitungan volume pekerjaan perkerasan kaku

Item pekerjaan	Satuan	Lebar (meter)	Panjang (meter)	Tebal (meter)	Volume
Lapis pondasi agregat kelas A	M^3	6,00	2.000	0,15	1.800
Perkerasan beton semen	M^3	6,00	2.000	0,30	3.600
Lapis pondasi baah beton kurus	M^3	6,50	2.000	0,10	1.300

Sumber: data penelitian Anggi

4.2 Hasil perhitungan harga satuan pekerjaan

Pembahasan ini merupakan hasil dari analisis perhitungan harga satuan untuk masing-masing item pekerjaan perkerasan lentur dan kaku yang bersumber dari Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 dan Keputusan Kepala Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Lampung" No. 031/KPTS/V.03/2025.

a. Perkerasan lentur *(Flexible pavement)*

Tabel 5. Perhitungan harga satuan pekerjaan lapis resap pengikat

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,0015	17.558,00	25,72
2	Mandor	L03	Jam	0,0007	31.604,00	23,15
	Total harga					48,87
B.	**Bahan**					
1	Aspal Emulsi CSS-1 atau SS-1	M31a	Liter	1,7167	14.414,41	24.744,74
	Total harga					24.744,74
C.	**Peralatan**					
1	Asp. Distributor	E41	Jam	0,00020	480.586,00	96,50
2	Compressor	E05	Jam	0,00073	229.220,00	167,88
	Total harga					264,39
D.	**Total harga (A + B + C)**					**25.059,00**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**3.758,70**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**28.816,70**

Tabel 6. Perhitungan harga satuan pekerjaan lapis perekat

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,0016	17.558,00	28,49
2	Mandor	L03	Jam	0,0008	31.604,00	25,64
	Total harga					54,13
B.	**Bahan**					
1	Aspal Emulsi CRS-1 atau RS-1	M31a	Liter	1,7167	13.513,51	23.198,20
	Total harga					23.198,20
C.	**Peralatan**					
1	Asp. Distributor	E41	Jam	0,00020	480.586,00	96,50
2	Compressor	E05	Jam	0,0010	229.220,00	238,11
	Total harga					335,61
D.	**Total harga (A + B + C)**					**23.587,94**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**3.538,19**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**27.126,13**

Tabel 7. Perhitungan harga satuan pekerjaan laston lapis aus (AC-WC)

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,2008	17.558,00	3.525,70
2	Mandor	L03	Jam	0,0201	31.604,00	634,62
	Total harga					4.160,32
B.	**Bahan**					
1	Agr Pch Mesin 5-10 & 10-15	M92	m^3	0,3206	942.600,00	302.167,57
2	Agr Pch Mesin 0 - 5	M91	m^3	0,4193	932.900,00	391.150,13
3	Semen	M12	kg	9,6820	1.279,28	12.385,98
4	Aspal	M10	kg	62,3150	15.315,32	956.373,87
	Total harga					1.660.077,55
C.	**Peralatan**					
1	Wheel Loader	E15	Jam	0,0054	674.607,00	3.622,01
2	AMP	E01	Jam	0,0201	13.570.123,00	272.492,43
3	Genset	E12	Jam	0,0201	611.414,00	12.277,39
4	Dump Truck	E09	Jam	0,0389	972.269,00	37.832,06
5	Asp. Finisher	E02	Jam	0,0125	1.005.493,00	12.595,52
6	Tandem Roller	E17a	Jam	0,0128	420.038,00	5.358,08
7	Tyre Roller	E18	Jam	0,0084	578.283,00	4.862,40
	Total harga					349.039,90
D.	**Total harga (A + B + C)**					**2.013.277,77**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**301.991,67**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**2.315.269,44**

Tabel 8. Perhitungan harga satuan pekerjaan laston lapis antara (AC-BC)

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,2008	17.558,00	3.525,70
2	Mandor	L03	Jam	0,0201	31.604,00	634,62
	Total harga					4.160,32
B.	**Bahan**					
1	Agr Pch Mesin 5-10	M92	m^3	0,3720	942.600,00	350.604,35
2	Agr Pch Mesin 0 - 5	M91	m^3	0,3791	932.900,00	346.922,19
3	Semen	M12	kg	9,6820	1.279,28	12.385,98
4	Aspal	M10	kg	57,1650	15.315,32	875.500,00
	Total harga					1.585.412,52
C.	**Peralatan**					
1	Wheel Loader	E15	Jam	0,0054	674.607,00	3.622,01
2	AMP	E01	Jam	0,0201	13.570.123,00	272.492,43
3	Genset	E12	Jam	0,0201	611.414,00	12.277,39
4	Dump Truck	E09	Jam	0,0389	972.269,00	37.832,06
5	Asp. Finisher	E02	Jam	0,0084	1.005.493,00	8.387,01

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
6	Tandem Roller	E17a	Jam	0,0085	420.038,00	3.572,06
7	Tyre Roller	E18	Jam	0,0056	578.283,00	3.241,60
	Total harga					341.434,56
D.	**Total harga (A + B + C)**					**1.931.007,41**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**289.651,11**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**2.220.658,52**

Tabel 9. Perhitungan harga satuan lapis pondasi agregat kelas A

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,0779	17.558,00	1.367,73
2	Tukang	L03	Jam	0,0097	34.581,00	239,35
	Total harga					1.607,08
B.	**Bahan**					
1	Agregat A	M92	m^3	1,2890	607.700,00	783.304,34
	Total harga					783.304,34
C.	**Peralatan**					
1	Wheel Loader	E15	Jam	0,0087	-	
2	Dump Truck	E09	Jam	0,0844	-	
3	Motor Grader	E13	Jam	0,0009	952.927,00	879,18
4	Vibratory Roller	E19a	Jam	0,0097	602.419,00	5.865,89
5	Alat bantu		Ls	1,0000	-	-
	Total harga					6.745,07
D.	**Total harga (A + B + C)**					**791.656,49**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**118.748,47**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**910.404,97**

b. Perkerasan kaku *(Rigid pavement)*

Tabel 10. Perhitungan harga satuan pekerjaan perkerasan beton semen

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,5020	17.558,00	8.814,26
2	Mandor	L03	Jam	0,1004	31.604,00	3.173,09
	Jumlah harga tenaga					11.987,35
B.	**Bahan**					
1	Semen	M12	kg	468,65	1.279,28	599.534,23
2	Pasir	M01a	m^3	0,4939	303.000,00	149.640,21
3	Agregat kasar	M03	m^3	0,7574	942.600,00	713.970,74
4	Air	M170	m^3	163,77	180,18	29.508,11
5	Plasticizer	M67a	m^3	1,4060	85.585,59	120.329,05
6	Baja Tulangan (U39)	M39a	kg	15,875	14.414,41	228.828,83
7	Joint Sealent	M94	kg	0,9900	30.730,72	30.413,51
8	Cat Anti Karat	M95	kg	0,0200	88.288,29	1.765,77
9	Expansion Cap	M96	m^2	0,1700	7.252,25	1.232,88
10	Polytene 125 mikron	M97	kg	0,4375	17.567,57	7.685,81
11	Curing Compound	M98	liter	0,8700	35.585,59	30.959,46
12	Formwork Plate	M195	m^2	0,5700	58.558,56	33.378,38
13	Crack Inducer		m^1	0,7000	30.000,00	21.000,00
	Total harga					1.968.246,99
C.	**Peralatan**					
1	Wheel Loader	E15	jam	0,0071	674.607,00	4.781,06
2	Concrete Mixing Plant	E43	jam	0,0502	1.318.296,00	66.179,52
3	Truck Mixer Agitator	E49	jam	0,2432	549.438,00	133.630,91
4	Concrete Vibrator	E20	jam	0,3012	43.178,00	13.005,42
	Total harga					217.596,91
D.	**Total harga (A + B + C)**					**2.197.831,25**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**329.674,69**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**2.527.505,93**

Tabel 11. Perhitungan harga satuan Pekerjaan Lapis Pondasi Bawah Beton Kurus

Nomor	Item		Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
A.	**Tenaga**					
1	Pekerja	L01	Jam	0,4016	17.558,00	7.051,41
2	Mandor	L03	Jam	0,1004	31.604,00	3.173,09
	Total harga					10.224,50
B.	**Bahan**					
1	Semen	M12	kg	284,2800	1.279,28	363.673,51
2	Pasir	M01a	m^3	0,5996	303.000,00	181.674,62
3	Agregat kasar	M03	m^3	0,7238	942.600,00	690.763,28
4	Air	M170	m^3	221,4500	180,18	39.900,90
5	Plasticizer	M67a	m^3	0,8528	85.585,59	72.990,81
6	Formwork Plate	M195	m^2	0,1900	58.558,56	11.126,13
C.	**Peralatan**					
1	Wheel Loader	E15	jam	0,0071	674.607,00	4.781,06
2	Batching Plant (Concrete Pan Mixer)	E80	jam	0,0502	1.318.296,00	66.179,52
3	Concrete Truck Mixer	E49	jam	0,1709	985.168,00	168.389,51
4	Concrete Vibrator	E20	jam	0,3012	43.178,00	13.005,42
	Total harga					252.355,50
D.	**Total harga (A + B + C)**					**1.622.709,26**
E.	**Overhead & profit 15% × D**					**243.406,39**
F.	**Total Harga satuan pekerjaan D + E**					**1.866.115,64**

4.3 Hasil perhitungan rencana anggaran biaya (RAB)

Setelah volume dan harga satuan dari masing-masing item pekerjaan perkerasan lentur dan kaku telah diperoleh maka langkah selanjutnya yaitu menghitung Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk perkerasan lentur dan kaku yang akan dijabarkan pada tabel 12 dan tabel 13.

a. Perkerasan lentur *(flexible pavement)*

Tabel 12. Hasil perhitungan RAB pekerasan lentur

Nomor	Item	Satuan	Kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
1	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	m^3	3.600	910.404,97	3.277.457.892,00
2	Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi	liter	8.640	28.816,70	248.976.288,00
3	Lapis Perekat - Aspal Cair/Emulsi	liter	2.520	27.126,13	68.357.847,60
4	Laston Lapis Aus (AC-WC)	ton	1.362	2.315.269,44	3.153.396.977,28
5	Laston Lapis Antara (AC-BC)	ton	1.656	2.20.658,52	3.677.410.509,12
	Jumlah harga pekerjaan perkerasan lentur *(flexible pavement)*				**10.425.599.514,00**

Sumber: data penelitian Anggi

b. Perkerasan kaku *(rigid pavement)*

Tabel 13. Hasil perhitungan RAB perkerasan kaku

No	Uraian	Satuan	Perkiraan kuantitas	Harga satuan (Rupiah)	Total harga (Rupiah)
1	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	m^3	1.800	910.404,97	1.638.728.946,00
2	Perkerasan Beton Semen	m^3	3.600	2.527.505,93	9.099.021.348,00
3	Lapis Pondasi bawah Beton Kurus	m^3	1.300	1.866.115,64	2.425.950.332,00
	Jumlah harga pekerjaan perkerasan kaku *(rigid pavement)*				**13.163.700.626,00**

Sumber: data penelitian Anggi

Hasil dari tabel 12 didapat bahwa hasil perhitungan RAB perkerasan lentur Rp. 10.425.599.514,00 dan tabel 13 didapat hasil perhitungan RAB perkerasan kaku Rp. 13.163.700.626,00.

Analisis efisiensi biaya antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku dilakukan dengan menerapkan formula yang disajikan pada Persamaan 5. Persamaan tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan besarnya tingkat efisiensi biaya dari kedua jenis perkerasan yang dibandingkan.

$$E = \frac{Bac - Baf}{Bac} \times 100\% \quad \text{.....(5)}$$

Dimana E = efisiensi biaya, Bac = biaya acuan, Baf = biaya alternatif.
Perhitungan efisiensi biaya perkerasan lentur dan pekerasan kaku.
Diketahui:
Nilai Bac = Rp. 13.163.700.626,00

Nilai Baf = Rp. 10.425.599.514,00

$$E = \frac{13.163.700.626 - 10.425.599.514}{13.163.700.626} \times 100\% = 20{,}80\%$$

Setelah dilakukan perhitungan maka diketahui bahwa dari aspek biaya perkerasan lentur lebih efisien sebesar 20,80% dibandingkan dengan perkerasan kaku.

5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian yang diperoleh melalui analisis Rencana Anggaran Biaya (RAB) menunjukkan adanya perbedaan biaya konstruksi antara "perkerasan lentur (*flexible pavement*) serta perkerasan kaku (*rigid pavement*)" pada ruas Jalan Tajab–Adijaya. Berdasarkan hasil perhitungan, kebutuhan biaya untuk pelaksanaan konstruksi perkerasan lentur tercatat sebesar Rp. 10.425.599.514,00 dan biaya konstruksi perkerasan kaku Rp. 13.163.700.626,00 dari hasil perbandingan kedua perkerasan tersebut diperoleh nilai efisiensi biaya perkerasan lentur terhadap perkerasan kaku sebesar 20,80%.

Perbandingan biaya yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa perkerasan lentur memerlukan anggaran konstruksi yang lebih rendah daripada perkerasan kaku. Berdasarkan hasil tersebut, perkerasan lentur dapat dinyatakan sebagai jenis perkerasan yang lebih efisien secara ekonomis pada ruas jalan yang diteliti. Oleh sebab itu, penggunaan perkerasan lentur berpotensi menjadi solusi yang lebih hemat biaya dalam pelaksanaan pembangunan jalan, dengan tetap mempertimbangkan aspek teknis dan kebutuhan pelayanan jalan yang direncanakan.

Ruang lingkup kajian ini terbatas pada analisis membandingkan pembiayaan konstruksi perkerasan jalan sehingga tidak mencakup aspek lain, meliputi perhitungan berdasarkan "Manual Desain Perkerasan (MDP)", analisis "Lalu Lintas Harian Rata-Rata (LHR)", penilaian mutu perkerasan, maupun evaluasi waktu pelaksanaan pekerjaan. Selain itu, penggunaan sampelnya ini melihat acuan terhadap jenis perkerasan yang lazim diterapkan di Provinsi Lampung. Walaupun memiliki keterbatasan tersebut, hasil penelitian ini tetap bisa membagikan gambaran terkait perbedaan pembiayaan konstruksi pada perkerasan lentur beserta kaku serta dapat dijadikan sebagai referensi awal dalam pengambilan keputusan terkait pemilihan jenis perkerasan dari aspek biaya.

5.2 Saran

Harga satuan penelitian ini merupakan harga satuan yang berlaku untuk pekerjaan proyek jalan dilingkup dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi (BMBK) provisi Lampung sehingga tidak disarankan digunakan di kabupaten/kota atau provinsi lain. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis yang lebih mendalam terhadap biaya pemeliharaan, umur layanan pelaksanaan, kondisi lalu lintas, serta kondisi tanah dasar agar diperoleh hasil evaluasi yang lebih komprehensif dalam menentukan jenis perkerasan paling efektif dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Maharani and S. B. Wasono, "Perbandingan perkerasan kaku dan perkerasan lentur (Studi kasus ruas jalan Raya Pantai Prigi-Popoh Kab. Tulungagung)," *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil*, vol. 1, no. 2, pp. 89–94, 2018.

[2] M. Wisman, I. Sulistyo, Y. Juansyah, Y. Mauliana, and M. Cambodia, "Analisa Kerusakan Perkerasan Jalan Berdasarkan Metode Pavement Condition Index (PCI)," *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, vol. 9, no. 1, pp. 34–49, 2024.

[3] H. Annisa, Yunus Ilham, M. Syahrul, and A. J. D. Guna, "Perbandingan Rencana Anggaran Biaya Pada Perkerasan Lentur Dan Perkerasan Kaku (Studi Kasus Ruas Jalan Malaka –MariMari)," *Jurnal Teknik Sipil Universitas Lamappapoleonro (JTEKSIL)*, vol. 3, no. 2, pp. 65–79, 2025.

[4] R. Ardiansyah and T. Sudibyo, "Analisis Perencanaan Tebal Perkerasan Kaku Lajur Pengganti pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Elevated," *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, vol. 5, no. 1, pp. 17–30, 2020.

[5] D. R. Zain, "Perbandingan Biaya Pelaksanaan Konstruksi Pada Pekerjaan Jalan Perkerasan Lentur Dengan Perkerasan Kaku (Studi Kasus: Jalan Jalur Lintas Selatan Desa Arjosari Kabupaten Pacitan)," 2019.

[6] V. A. Putri, "Identifikasi jenis kerusakan pada perkerasan lentur," 2016.

[7] F. A. Lopes, J. H. Frans, P. H. Simatupang, P. Kaku, and R. Anggaran, "Analisis Perbandingan Biaya Konstruksi Perencanaan Perkerasan Lentur Dan Kaku Dengan Metode Bina Marga," vol. 14, no. 2, pp. 159–170, 2025.

[8] K. P. Umum and D. J. B. Marga, "Manual Desain Perkerasan Jalan," *Jakarta: Binamarga*, 2013.

[9] A. Nurdiana, "Analisis biaya tidak langsung pada proyek pembangunan best western star hotel & star apartement semarang," *Teknik*, vol. 36, no. 2, pp. 105–109, 2015.

[10] K. P. Sari, U. D. Arman, and M. Ridwan, "Analisis Perbandingan Rencana Anggaran Biaya Berdasarkan Metode Sni Dengan Perhitungan Kontraktor," *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 3, no. 1, pp. 240–246, 2021.

[11] N. Rifhan and B. H. Susilo, "Comparison Of Costs And Constructions Method Of Flexural Pavement And Rigid Pavement," no. Pradana 2019, pp. 162–167, 2021.

[12] R. Jonathan and B. Anondho, "Perbandingan Perhitungan Volume Pekerjaan dak beton bertulang antara metode BIM dengan Konvensional," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, pp. 271–280, 2021.

[13] E. K. Friatmojo, "Perhitungan Analisa Harga Satuan Biaya K3 Konstruksi Menggunakan Basis Perhitungan Analisa Harga Satuan Pekerjaan," *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial*, vol. 16, no. 3, pp. 154–160, 2020.

[14] N. Alami, U. A. Aziz, and D. Margiarti, "Studi komparasi perbandingan rencana anggaran biaya antara metode analisa harga satuan pekerjaan (AHSP) dan standar nasional indonesia (SNI)," *Surya Beton: Jurnal Ilmu Teknik Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 10–19, 2021.

[15] M. I. Syahroni, "Prosedur penelitian kuantitatif," *EJurnal Al Musthafa*, vol. 2, no. 3, pp. 43–56, 2022.

[16] & Z. Ischak, W. I., Badjuka, B. Y., "Teknik pengumpulan data," *Jurnal Pendidikan Mipa Susunan Redaksi*, vol. 4, 2014.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 35-45

Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Asrama Terhadap Beban Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019

Moh Zulfa Muttaqin[1*], M Arif Bakhtiar Efendi[2], Laily Fatmawati[3]

[1,2,3]Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Madiun, Jawa Timur
*Email Korespondensi: zulpunokawan133@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan Gedung Asrama Putri Pondok Pesantren Karang Kadempel di Kabupaten Madiun memerlukan perencanaan struktur yang memenuhi ketentuan ketahanan gempa karena Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat aktivitas seismik yang tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja struktur gedung berdasarkan SNI 1726:2019 menggunakan metode Statik Ekuivalen. Data penelitian berupa data sekunder yang meliputi gambar *Detail Engineering Design* (DED), spesifikasi teknis bangunan, serta standar perencanaan yang relevan. Objek penelitian adalah gedung asrama tiga lantai berukuran 36 × 20 m dengan tinggi 19,40 m yang menggunakan struktur beton bertulang dan atap baja. Analisis dilakukan menggunakan SAP2000 melalui pemodelan tiga dimensi. Hasil analisis menunjukkan periode fundamental struktur sebesar 0,672 detik, masih berada di bawah batas maksimum sebesar 0,941 detik, dengan gaya geser dasar (*base shear*) sebesar 202.069 kg yang terdistribusi sesuai ketentuan metode Statik Ekuivalen. Evaluasi kapasitas elemen struktur menunjukkan bahwa pelat, tangga, balok, kolom, struktur atap baja, dan sambungan baut memiliki rasio kapasitas di bawah batas izin. Nilai rasio terbesar diperoleh pada kolom baja sebesar 0,932 dan stabilitas kuda-kuda sebesar 0,913, yang masih memenuhi persyaratan SNI 1729:2020. Namun, hasil pemeriksaan *story drift* menunjukkan bahwa lantai 2 pada arah Y memiliki rasio simpangan sebesar 1,01, sedikit melebihi batas yang diizinkan sehingga memerlukan evaluasi lebih lanjut terhadap distribusi kekakuan struktur. Secara umum, struktur gedung memiliki kapasitas yang memadai terhadap kombinasi beban gravitasi dan gempa, meskipun diperlukan perbaikan lokal pada respons lateral arah Y.

Kata kunci : Kinerja Struktur, Ketahanan Gempa, Metode Statik Ekuivalen, SAP2000, SNI 1726:2019 dan *Story Drift*.

ABSTRACT

The construction of the women's dormitory building at the Karang Kadempel Islamic Boarding School in Madiun Regency requires structural design that meets earthquake-resistance requirements, as Indonesia is a region with a high level of seismic activity. This study aims to evaluate the structural performance of the building based on SNI 1726:2019 using the Equivalent Static Method. The research data consists of secondary data, including Detailed Engineering Design (DED) drawings, technical building specifications, and relevant design standards. The subject of the study is a three-story dormitory building measuring 36 × 20 m with a height of 19.40 m, featuring a reinforced concrete structure and a steel roof. The analysis was performed using SAP2000 through three-dimensional modeling. The analysis results show a fundamental period of 0.672 seconds, which remains below the maximum limit of 0.941 seconds, with a base shear of 202,069 kg distributed in accordance with the Equivalent Statics method. An evaluation of the structural elements' capacity showed that the slabs, stairs, beams, columns, steel roof structure, and bolted connections all had capacity ratios below the allowable limits. The highest ratio values were obtained for the steel columns at 0.932 and the truss stability at 0.913, which still meet the requirements of SNI 1729:2020. However, the story drift analysis results show that the second floor in the Y-direction has a drift ratio of 1.01, slightly exceeding the allowable limit, thus requiring further evaluation of the structural stiffness distribution. Overall, the building structure has adequate capacity to withstand a combination of gravity and seismic loads, although localized improvements are needed for the lateral response in the Y-direction.

Keywords **:** *Structural Performance, Earthquake-Resistant Design, Equivalent Static Method, SAP2000, SNI 1726:2019, and Story Drift.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena berada pada pertemuan Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi tektonik tersebut menyebabkan tingginya potensi gempa bumi yang dapat mengakibatkan kerusakan infrastruktur, khususnya bangunan gedung bertingkat. Tingkat kerusakan bangunan dipengaruhi tidak hanya oleh besarnya magnitudo gempa, tetapi juga oleh kualitas perencanaan struktur, karakteristik tanah, sistem struktur, serta kemampuan bangunan dalam menahan beban lateral. Oleh karena itu, penerapan konsep perencanaan struktur tahan gempa menjadi aspek penting untuk menjamin keselamatan penghuni, meminimalkan risiko kerusakan, serta meningkatkan ketahanan bangunan terhadap beban gempa [1], [2].

Sebagai upaya meningkatkan keandalan struktur terhadap gempa bumi, perencanaan bangunan gedung di Indonesia mengacu pada SNI 1726:2019 yang mengatur tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Standar ini memperbarui parameter bahaya gempa berdasarkan data kegempaan terbaru sehingga menghasilkan perencanaan yang lebih representatif terhadap kondisi seismik Indonesia. Dalam penelitian ini, parameter bahaya gempa diperoleh melalui aplikasi RSA Puskim berdasarkan koordinat lokasi penelitian, sedangkan analisis struktur dilakukan menggunakan metode Statik Ekuivalen. Evaluasi kinerja struktur dilakukan melalui parameter periode fundamental, gaya geser dasar (*base shear*), perpindahan, dan simpangan antar lantai (*story drift*) sesuai ketentuan SNI 1726:2019 [3], [4].

Berbagai penelitian telah mengevaluasi kinerja struktur bangunan terhadap beban gempa menggunakan perangkat lunak SAP2000 maupun ETABS berdasarkan SNI 1726:2019. Hilmi dkk. [5], Andika dan Roesdiana [6], Felny [7], serta Jaya dkk. [8] menunjukkan bahwa analisis struktur mampu menggambarkan respons seismik bangunan melalui parameter periode fundamental, gaya geser dasar (*base shear*), perpindahan struktur, dan simpangan antar lantai (*story drift*). Panjaitan [9] dan Hukama dan Erizal [10] juga melaporkan bahwa evaluasi parameter tersebut berperan penting dalam menilai kinerja struktur terhadap beban gempa serta memastikan pemenuhan persyaratan perencanaan berdasarkan SNI 1726:2019. Selain itu, Prayoga dkk. [3] dan Suwondo dkk. [11] menunjukkan bahwa metode Statik Ekuivalen dapat memberikan hasil evaluasi yang andal pada bangunan beraturan dengan ketinggian yang memenuhi ketentuan standar, sehingga metode tersebut masih relevan digunakan dalam evaluasi struktur bangunan gedung.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas evaluasi kinerja struktur terhadap beban gempa, sebagian besar masih berfokus pada analisis respons global struktur menggunakan metode Respons Spektrum atau membandingkan beberapa metode analisis gempa [3] -[11]-[12]. Kajian yang mengintegrasikan analisis menggunakan metode Statik Ekuivalen dengan evaluasi kapasitas seluruh elemen struktur, meliputi pelat, tangga, balok, kolom, dan struktur atap baja pada bangunan asrama bertingkat berdasarkan SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, dan SNI 1729:2020 masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mampu menghubungkan hasil analisis respons struktur dengan pemeriksaan kapasitas setiap elemen sehingga memberikan evaluasi struktur yang lebih komprehensif.

Penelitian ini menggunakan pendekatan evaluasi yang mengintegrasikan analisis respons struktur menggunakan metode Statik Ekuivalen dengan pemeriksaan kapasitas seluruh elemen utama bangunan dalam satu kerangka evaluasi. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya mengevaluasi respons global struktur atau elemen tertentu [5]-[10] penelitian ini menghubungkan hasil analisis berupa periode fundamental, *base shear*, perpindahan, dan *story drift* dengan evaluasi kapasitas pelat, tangga, balok, kolom, serta struktur atap baja berdasarkan SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, dan SNI 1729:2020. Pendekatan tersebut diharapkan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara respons global struktur dan kapasitas elemen dalam mendukung keamanan bangunan terhadap pembebanan gravitasi dan gempa.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja struktur Gedung Asrama Putri Pondok Pesantren Karang Kadempel terhadap pembebanan gravitasi dan gempa

menggunakan metode Statik Ekuivalen sesuai SNI 1726:2019. Evaluasi dilakukan melalui analisis respons struktur menggunakan SAP2000 serta pemeriksaan kapasitas pelat, tangga, balok, kolom, dan struktur atap baja berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 1729:2020. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam mengevaluasi keamanan struktur bangunan bertingkat dengan pendekatan yang komprehensif dan sesuai dengan standar perencanaan yang berlaku.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Struktur beton bertulang merupakan sistem struktur yang banyak digunakan pada bangunan gedung bertingkat karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi, kekakuan yang baik, serta mampu bekerja secara efektif bersama tulangan baja dalam menahan gaya tarik dan tekan. Pada bangunan yang berada di wilayah rawan gempa, sistem beton bertulang harus direncanakan agar memiliki kekuatan, kekakuan, dan daktilitas yang memadai sehingga mampu menahan pembebanan gravitasi maupun beban lateral akibat gempa. Oleh karena itu, perencanaan elemen beton bertulang harus memenuhi ketentuan SNI 2847:2019 untuk menjamin keamanan dan kinerja struktur selama umur layan bangunan [12], [13].

Perencanaan struktur gedung harus mempertimbangkan kombinasi pembebanan yang bekerja selama umur layan bangunan, meliputi beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban mati berasal dari berat sendiri elemen struktur maupun beban permanen lainnya, sedangkan beban hidup ditentukan berdasarkan fungsi ruang. Pada bangunan di wilayah rawan gempa, kombinasi pembebanan harus direncanakan agar mampu merepresentasikan kondisi pembebanan yang paling kritis sehingga evaluasi kekuatan dan stabilitas struktur dapat dilakukan secara akurat [13], [14].

Metode Statik Ekuivalen merupakan salah satu prosedur analisis gempa yang mengubah pengaruh dinamis gempa menjadi gaya lateral statik ekuivalen yang bekerja pada setiap tingkat bangunan sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Metode ini umumnya diterapkan pada bangunan beraturan dengan tinggi dan karakteristik struktur yang memenuhi persyaratan standar. Analisis menghasilkan parameter penting berupa periode fundamental, gaya geser dasar (*base shear*), distribusi gaya gempa, perpindahan struktur, dan simpangan antar lantai (*story drift*) yang digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktur terhadap beban gempa [3], [11].

Evaluasi kinerja struktur dilakukan untuk mengetahui kemampuan bangunan dalam menahan pembebanan gravitasi dan gempa sesuai persyaratan perencanaan. Parameter yang umum digunakan meliputi periode fundamental, gaya geser dasar (*base shear*), perpindahan struktur, dan simpangan antar lantai (*story drift*). Nilai parameter tersebut dibandingkan dengan ketentuan SNI 1726:2019 untuk menentukan apakah respons struktur masih berada dalam batas yang diizinkan serta memenuhi aspek kekuatan, kekakuan, dan stabilitas bangunan [5], [6], [3], [11].

Selain mengevaluasi respons global struktur, pemeriksaan kapasitas setiap elemen struktur diperlukan untuk memastikan seluruh komponen mampu menahan gaya dalam hasil analisis. Evaluasi dilakukan terhadap pelat, tangga, balok, kolom, dan struktur atap baja dengan membandingkan gaya dalam hasil analisis terhadap kapasitas rencana berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 untuk struktur beton bertulang dan SNI 1729:2020 untuk struktur baja. Pendekatan ini memberikan penilaian yang lebih komprehensif karena menghubungkan respons global struktur dengan kapasitas masing-masing elemen penyusun bangunan [12], [13], [14], [15].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis perencanaan struktur untuk mengevaluasi kinerja Gedung Asrama Putri Pondok Pesantren Karang Kadempel terhadap pembebanan gravitasi dan gempa sesuai SNI 1726:2019. Objek penelitian berupa bangunan beton bertulang tiga lantai berukuran 36 m × 20 m dengan tinggi 19,40 m yang berlokasi di Kecamatan Jiwan, Kabupaten Madiun, Jawa Timur. Analisis dilakukan menggunakan SAP2000 melalui pemodelan tiga dimensi (3D), sedangkan pembebanan gempa dianalisis

menggunakan metode Statik Ekuivalen berdasarkan parameter bahaya gempa dari aplikasi RSA Puskim sesuai koordinat lokasi penelitian di Kabupaten Madiun (111,488926° BT; 7,618287° LS).

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan untuk mengidentifikasi kondisi eksisting bangunan, sedangkan data sekunder meliputi gambar *Detail Engineering Design* (DED), spesifikasi material, dimensi struktur, serta parameter bahaya gempa. Material yang digunakan terdiri atas beton dengan kuat tekan rencana (f'c) 22 MPa, baja tulangan BJTS 420 MPa, baja tulangan BJTP 280 MPa, dan baja struktural BJ37 dengan kuat leleh 240 MPa serta kuat tarik 370 MPa sebagai parameter dalam pemodelan struktur.

Tahapan analisis diawali dengan penyusunan model struktur tiga dimensi pada SAP2000 berdasarkan data geometri, material, dan penampang elemen struktur. Selanjutnya ditentukan massa struktur serta kombinasi pembebanan yang terdiri atas beban mati, beban hidup, dan beban gempa menggunakan metode Statik Ekuivalen sesuai SNI 1726:2019. Parameter bahaya gempa diperoleh melalui aplikasi RSA Puskim berdasarkan koordinat lokasi penelitian. Analisis menghasilkan reaksi perletakan dan gaya dalam elemen struktur. Hasil analisis kemudian digunakan untuk mengevaluasi kapasitas pelat, tangga, balok, kolom, dan struktur atap baja berdasarkan SNI 2847:2019 dan SNI 1729:2020.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

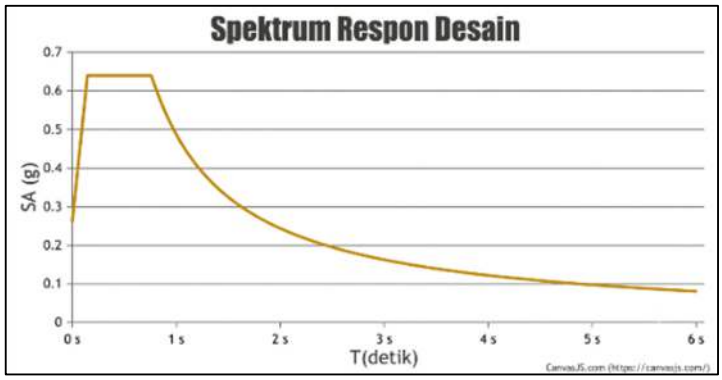
4.1 Parameter Gempa Rencana Berdasarkan SNI 1726:2019

Parameter gempa rencana ditentukan berdasarkan SNI 1726:2019 menggunakan aplikasi RSA Puskim dengan koordinat lokasi Gedung Asrama Putri Pondok Pesantren Karang Kadempel, Kabupaten Madiun, yaitu 111,488926° BT dan 7,618287° LS. Berdasarkan koordinat tersebut diperoleh parameter bahaya gempa yang meliputi percepatan spektral periode pendek (Ss), percepatan spektral periode 1 detik (S1), koefisien situs (Fa dan Fv), serta parameter spektrum respons desain (SMS, SM1, SDS, dan SD1). Parameter-parameter tersebut menjadi dasar dalam penentuan beban gempa rencana menggunakan metode Statik Ekuivalen sesuai ketentuan SNI 1726:2019.

Tabel 1. Parameter Gempa Rencana Gedung

Parameter	Nilai
Kordinat	111,488926° BT dan 7,618287° LS
Kategori Risiko	III
Faktor Keutamaan (Ie)	1,25
Kelas Situs	SD
Ss	0,8192 g
S1	0,3814 g
SMS	0,960 g
SM1	0,732 g
SDS	0,640 g
SD1	0,488 g
T0	0,152 detik
TS	0,762 detik
KDS	D

Nilai parameter gempa pada Tabel 1 menunjukkan karakteristik bahaya gempa di lokasi penelitian yang selanjutnya digunakan dalam penyusunan spektrum respons desain. Parameter SDS merepresentasikan percepatan spektral desain pada periode pendek, sedangkan SD1 menunjukkan percepatan spektral desain pada periode 1 detik. Kedua parameter tersebut menjadi acuan dalam penentuan gaya gempa rencana yang bekerja pada struktur melalui metode Statik Ekuivalen. Dengan demikian, pembebanan gempa yang digunakan dalam analisis telah disesuaikan dengan tingkat bahaya seismik di lokasi penelitian sesuai ketentuan SNI 1726:2019.

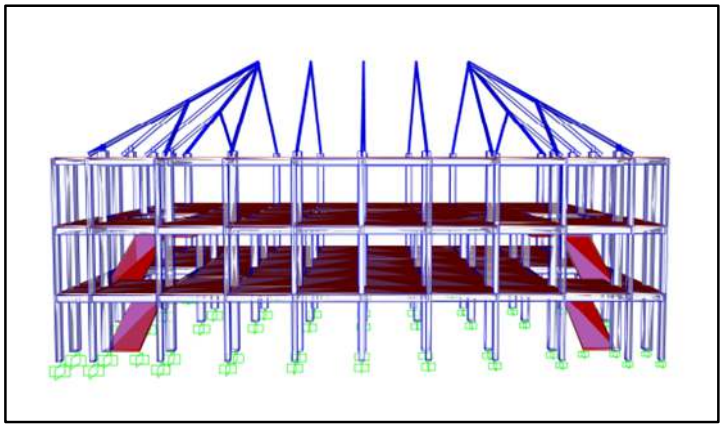


Gambar 1. Grafik Respon Spektrum Desain Gempa Kabupaten Madiun

Spektrum respons desain pada Gambar 1 menunjukkan hubungan antara percepatan spektral dan periode getar struktur yang digunakan sebagai dasar analisis gempa. Kurva spektrum tersebut menggambarkan besarnya respons struktur terhadap variasi periode getar sehingga mampu merepresentasikan karakteristik bahaya gempa pada lokasi penelitian. Parameter spektrum ini selanjutnya diimplementasikan dalam SAP2000 untuk memperoleh respons struktur sesuai ketentuan SNI 1726:2019 dan sejalan dengan pendekatan yang digunakan oleh Prayoga dkk. [3] serta Suwondo dkk. [11].

4.2 Evaluasi Respons Struktur Terhadap Beban Gempa

Evaluasi respons struktur terhadap beban gempa dilakukan untuk menilai perilaku seismik Gedung Asrama Putri Pondok Pesantren Karang Kadempel berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019. Analisis dilakukan menggunakan metode Statik Ekuivalen melalui pemodelan tiga dimensi pada SAP2000. Parameter yang dievaluasi periode fundamental, gaya geser dasar (*base shear*), perpindahan (*displacement*), dan simpangan antar lantai (*story drift*) sebagai indikator kinerja struktur terhadap pembebanan gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa koefisien respons seismik (Cs) sebesar 0,10 dengan berat seismik total struktur sebesar 2.019,925 kg, sehingga diperoleh gaya geser dasar (*base shear*) sebesar 202.069 kg. Nilai tersebut merupakan gaya lateral minimum akibat gempa rencana yang digunakan sebagai dasar distribusi beban gempa pada seluruh tingkat bangunan sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Pemodelan numerik struktur dilakukan dalam bentuk tiga dimensi yang terdiri atas elemen balok, kolom, pelat, tangga, dan struktur atap baja sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan Tiga Dimensi (3D) Elemen Struktur Gedung Asrama Putri

Model tiga dimensi tersebut digunakan untuk memperoleh karakteristik dinamis struktur yang meliputi periode fundamental, gaya geser dasar (*base shear*), perpindahan struktur, simpangan antar lantai (*story drift*), serta gaya dalam elemen struktur. Rekapitulasi parameter respons struktur hasil analisis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Respons Gempa

Parameter	**Nilai**
Tinggi Bangunan	19,40 m
Periode Fundamental (Ta)	0,672 detik
Tmax	0,941 detik
Faktor R	8
Cd	5,5
Ω_0	3
Cs	0,10
Berat Seismik Total	2.019,925 kg
Base Shear (V)	202.069 kg

Berdasarkan Tabel 2, periode fundamental struktur diperoleh sebesar 0,672 detik, lebih kecil dibandingkan periode maksimum yang diizinkan (Tmax) sebesar 0,941 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik dinamis struktur memenuhi persyaratan SNI 1726:2019 sehingga kekakuan global bangunan masih memadai dalam mengendalikan respons terhadap pembebanan gempa. Gedung direncanakan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan faktor modifikasi respons (R) sebesar 8, faktor kuat lebih (Ω_0) sebesar 3, dan faktor amplifikasi defleksi (Cd) sebesar 5,5 sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Parameter tersebut digunakan dalam penentuan gaya gempa rencana dan evaluasi deformasi struktur. Hasil ini sejalan dengan penelitian Pham dkk. [4] yang menyatakan bahwa kekakuan struktur beton bertulang berpengaruh langsung terhadap periode alami dan perilaku seismik bangunan.

Nilai *base shear* sebesar 202.069 kg menunjukkan besarnya gaya lateral gempa yang harus dipikul oleh sistem struktur berdasarkan berat seismik total bangunan dan parameter bahaya gempa lokasi penelitian. Nilai tersebut menjadi dasar dalam evaluasi distribusi gaya gempa pada setiap lantai serta penentuan gaya dalam elemen struktur. Hasil ini juga mendukung penelitian Santana dkk. [2] yang menyatakan bahwa bangunan dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) mampu memberikan respons struktur yang memenuhi persyaratan apabila parameter desain seismik ditentukan sesuai standar yang berlaku.

Evaluasi deformasi struktur selanjutnya dilakukan melalui pemeriksaan *displacement* dan *story drift* pada arah X dan Y. Nilai *story drift* dihitung berdasarkan simpangan elastis hasil analisis SAP2000 (δe) yang dikoreksi menggunakan faktor amplifikasi defleksi (Cd = 5,5) dan faktor keutamaan gempa (Ie = 1,25) sehingga diperoleh simpangan desain (Δd). Nilai Δd kemudian dibandingkan dengan simpangan izin (Δa) untuk memperoleh rasio drift ($\Delta d/\Delta a$) sebagai dasar penilaian terhadap persyaratan SNI 1726:2019.

Tabel 3. Displacement Arah X

Lantai	Elevasi	Displacement X	Drift Aktual	Drift Desain	Drift Ijin	$\Delta d/\Delta a$	Kriteria	Status
	Hsx (mm)	δe (mm)	Δ	Δd	Δa	Rasio	(< 1,0)	
3	4000	16,955	6,499	28,60	80	0,36	Memenuhi	Aman
2	4000	10,456	6,426	28,27	80	0,35	Memenuhi	Aman
1	4000	4,03	4,03	17,73	80	0,22	Memenuhi	Aman

Berdasarkan Tabel 3, rasio *story drift* pada arah X berturut-turut sebesar 0,22, 0,35, dan 0,36 untuk lantai 1 hingga lantai 3. Seluruh nilai rasio berada di bawah batas maksimum 1,00, sehingga memenuhi persyaratan SNI 1726:2019. Hasil tersebut menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan lateral yang memadai untuk mengendalikan deformasi akibat pembebanan gempa pada arah X.

Tabel 4. Displacement Arah Y

Lantai	Elevasi	Displacement Y	Drift Aktual	Drift Desain	Drift Ijin	$\Delta d/\Delta a$	Kriteria	Status
	Hsx (mm)	δe (mm)	Δ	Δd	Δa	Rasio	(< 1,0)	
3	4000	51,419	17,728	78,00	80	0,98	Memenuhi	Aman
2	4000	33,691	18,307	80,55	80	1,01	Tidak Memenuhi	Tidak Aman
1	4000	15,384	15,384	67,69	80	0,85	Memenuhi	Aman

Hasil evaluasi pada arah Y menunjukkan rasio *story drift* sebesar 0,85 pada lantai 1, 1,01 pada lantai 2, dan 0,98 pada lantai 3. Lantai 1 dan lantai 3 masih memenuhi batas simpangan yang diizinkan, sedangkan lantai 2 memiliki rasio sedikit melebihi batas maksimum yang dipersyaratkan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa deformasi lateral pada lantai 2 arah Y relatif lebih besar dibandingkan lantai lainnya sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap distribusi kekakuan struktur maupun elemen-elemen yang memengaruhi respons pada arah tersebut.

Secara keseluruhan, evaluasi respons struktur menunjukkan bahwa parameter desain seismik, periode fundamental, dan gaya geser dasar telah memenuhi ketentuan SNI 1726:2019. Hasil pemeriksaan *story drift* juga menunjukkan bahwa struktur memenuhi persyaratan pada seluruh lantai arah X dan sebagian besar lantai arah Y, meskipun masih terdapat satu lantai yang sedikit melampaui batas simpangan yang diizinkan. Oleh karena itu, hasil evaluasi ini menjadi dasar untuk menganalisis distribusi gaya gempa pada setiap tingkat bangunan yang dibahas pada subbab berikutnya.

4.3 Distribusi Gaya Gempa pada Struktur

Distribusi gaya gempa pada struktur dievaluasi untuk mengetahui besarnya gaya lateral yang diterima setiap lantai akibat pembebanan gempa rencana. Berdasarkan metode Statik Ekuivalen sesuai SNI 1726:2019, gaya geser dasar (*base shear*) didistribusikan ke setiap tingkat bangunan berdasarkan berat seismik dan elevasi lantai. Hasil distribusi gaya gempa pada masing-masing lantai disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Distribusi Gaya Gempa Tiap Lantai

Lantai	Berat Seismik (kg)	Tinggi (m)	Fx (kg)
3	501.067	12	80542
2	759.429	8	81150
1	759.429	4	40378
Total	2.019.925	-	202069

Berdasarkan Tabel 5, total *base shear* sebesar 202.069 kg terdistribusi menjadi 40.378 kg pada lantai 1, 81.150 kg pada lantai 2, dan 80.542 kg pada lantai 3. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa gaya lateral terbesar bekerja pada lantai 2 dan lantai 3 karena kedua lantai memiliki kombinasi berat seismik dan elevasi yang lebih besar dibandingkan lantai 1. Hasil ini sesuai dengan SNI 1726:2019 yang menyatakan bahwa distribusi gaya gempa dipengaruhi oleh berat seismik dan ketinggian struktur. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian Hilmi dkk. [5] dan Suwondo dkk. [11] yang menunjukkan bahwa gaya lateral pada bangunan bertingkat cenderung meningkat pada lantai atas akibat pengaruh distribusi massa dan karakteristik struktur.

4.4 Evaluasi Kapasitas Elemen Struktur

Evaluasi kapasitas elemen struktur dilakukan untuk mengetahui kemampuan setiap komponen bangunan dalam menahan kombinasi beban gravitasi dan beban gempa sesuai SNI 2847:2019 dan SNI 1729:2020. Evaluasi meliputi pelat atap, pelat lantai, pelat tangga, balok, kolom, struktur atap baja, dan sambungan baut. Parameter yang diperiksa meliputi kapasitas lentur, geser, tekan, stabilitas, kelenturan, serta kecukupan tulangan atau profil terhadap beban rencana:

Tabel 6. Pelat Atap

Pelat	Tebal (mm)	f`c MPa	fy MPa	As perlu (mm^2)	Tulangan terpasang (mm)	As terpasang (mm)	Rasio Lentur Mu/ϕMn	Rasio Geser Vu/ϕVu	Lendutan Δ<Δizin	Status
Atap A	100	22	280	162,500	Ø10 - 125	628,319	0,207	0,261	0,006	Aman
Atap B	100	22	280	162,500	Ø10 - 125	628,319	0,209	0,299	0,006	Aman
Atap C	100	22	280	162,500	Ø10 - 125	628,319	0,131	0,145	0,006	Aman
Atap D	100	22	280	162,500	Ø10 - 125	628,319	0,128	0,299	0,006	Aman

Berdasarkan Tabel 6, seluruh atap pelat memiliki rasio ketahanan antara 0,128–0,209 dan rasio geser sebesar 0,145–0,299. Seluruh nilai rasio berada di bawah batas 1,00 sehingga memenuhi persyaratan kekuatan menurut SNI 2847:2019. Selain itu, nilai lendutan sebesar 0,006 juga jauh lebih kecil dibandingkan izin lendutan sehingga pelat atap dinyatakan aman terhadap aspek maupun kekuatan kemampuan layan. Berdasarkan Tabel 4, seluruh atap pelat memiliki rasio ketahanan antara 0,128–0,209 dan rasio geser sebesar 0,145–0,299. Seluruh nilai rasio berada di bawah batas 1,00 sehingga memenuhi persyaratan kekuatan menurut SNI 2847:2019. Selain itu, nilai lendutan sebesar 0,006 juga jauh lebih kecil dibandingkan izin lendutan sehingga pelat atap dinyatakan aman.

Tabel 7. Pelat Lantai

Pelat	Tebal (mm)	f`c MPa	fy MPa	As perlu (mm^2)	Tulangan terpasang (mm)	As terpasang (mm)	Rasio Lentur Mu/ϕMn	Rasio Geser Vu/ϕVu	Lendutan Δ<Δizin	Status
Lantai A	130	22	280	540,970	Ø13 - 120	1106,102	0,456	0,386	0,997	Aman
Lantai B	130	22	280	540,970	Ø13 - 120	1106,102	0,456	0,444	0,997	Aman
Lantai C	130	22	280	233,750	Ø13 - 120	1106,102	0,180	0,386	0,011	Aman
Lantai D	130	22	280	233,750	Ø13 - 120	1106,102	0,182	0,444	0,011	Aman
Lantai E	130	22	280	540,970	Ø13 - 120	1106,102	0,456	0,262	0,997	Aman
Lantai F	130	22	280	237,500	Ø13 - 120	654,498	0,182	0,208	0,009	Aman
Lantai G	130	22	280	540,970	Ø13 - 120	1106,102	0,456	0,211	0,997	Aman

Hasil evaluasi pada Tabel 7 menunjukkan bahwa seluruh pelat lantai memiliki rasio ketahanan lentur antara 0,180–0,456 dan rasio geser antara 0,208–0,444. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapasitas penampang masih lebih besar dibandingkan beban yang bekerja. Pemeriksaan lendutan juga menunjukkan seluruh pelat memenuhi batas lendutan, sehingga struktur pelat lantai dinyatakan aman.

Tabel 8. Pelat Tangga

Pelat	Tebal (mm)	f`c MPa	fy MPa	As perlu (mm^2)	Tulangan terpasang (mm)	As terpasang (mm)	Rasio Lentur Mu/ϕMn	Rasio Geser Vu/ϕVu	Lendutan Δ<Δizin	Status
Tangga	150	22	280	459	Ø13 - 120	1062	0,530	0,207	0,593	Aman

Berdasarkan Tabel 8, pelat tangga memiliki rasio lentur sebesar 0,530 dan rasio geser sebesar 0,207. Nilai lendutan sebesar 0,593 masih berada di bawah izin lendutan sehingga elemen tangga memenuhi persyaratan kekuatan dan kemampuan layan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Faradiela dkk. [14]

Tabel 9. Balok

Elemen	Dimensi (cm)	f`c (MPa)	fy (MPa)	Tulangan Atas	Tulangan Bawah	Sengkang
Balok 1	30 x 60	22	420	7D19	4D19	Ø10 - 100
Balok 2	25 x 45	22	420	5D19	3D19	Ø10 - 100
Balok 3	20 x 35	22	420	3D19	2D19	Ø10 - 100
Balok 4	15 x 25	22	420	3D12	2D12	Ø10 - 100

Tabel 9. Balok (lanjutan)

Elemen	Dimensi (cm)	Mu (kN)	Vu (kN)	ϕ.Mn (kN)	ϕ.Vn (kN)	Rasio Lentur	Rasio Geser	Status
Balok 1	30 x 60	314,006	112,403	357,379	164,871	0,879	0,682	Aman
Balok 2	25 x 45	151,018	41,020	180,550	72,830	0,836	0,563	Aman
Balok 3	20 x 35	65,434	29,271	180,550	48,365	0,362	0,605	Aman
Balok 4	15 x 25	17,652	8,639	23,170	18,456	0,762	0,468	Aman

Tabel 9 menunjukkan bahwa seluruh balok memiliki rasio ketahanan antara 0,362–0,879 dan rasio geser sebesar 0,468–0,682. Seluruh rasio lebih kecil dari 1,00 sehingga kapasitas lentur maupun geser balok masih mampu menahan gaya dalam akibat kombinasi pembebanan. Dengan demikian, dimensi penampang dan tulangan yang digunakan telah memenuhi persyaratan SNI 2847:2019.

Tabel 10. Kolom

Elemen	Dimensi (cm)	f'c (MPa)	fy (MPa)	Tulangan	Sengkang
Kolom 1	50 x 50	22	420	5D19	Ø10 - 100
Kolom 2	30 x 30	22	420	3D19	Ø10 - 100

Tabel 10. Kolom (lanjutan)

Elemen	Pu kNm	Mu kNm	Vu kNm	ϕ.Pn kNm	ϕ.Mn kNm	ϕ.Vn kNm	Rasio PM	Rasio Geser	Status
Kolom 1	913,305	435,057	105,015	3073,703	8934,302	195,251	0,346	0,538	Aman
Kolom 2	399,502	58,138	12,871	1194,644	11366,423	51,016	0,340	0,252	Aman

Berdasarkan Tabel 10, rasio interaksi tekan-lentur kolom berada pada rentang 0,340–0,346, sedangkan rasio geser berkisar antara 0,252–0,538. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapasitas kolom masih lebih besar dibandingkan beban aksial, momen, dan gaya geser yang bekerja sehingga kolom dinyatakan aman. Temuan ini konsisten dengan penelitian Agussalim dkk. [13].

Tabel 11. Struktur Rangka Baja

Elemen Baja	Profil	Rasio Lentur Mu/ϕMn	Rasio Geser Vu/ϕVu	Rasio Tekan Pu/ϕPu	Stabilitas	Lendutan izin Δizin	Lendutan Δ<Δizin	Status
Gording	CNP 150.65.20.3,2	0,397	0,090	-	0,014	1,67	0,505	Aman
Kuda-Kuda	IWF 250.125.6.9	0,008	0,118	-	0,913	7,50	1,401	Aman
Kolom	IWF 250.125.6.9	0,932	0,690	0,005	0,093		-	Aman

Hasil evaluasi struktur atap baja pada Tabel 11 menunjukkan bahwa seluruh elemen memenuhi persyaratan kuat lentur, kuat geser, stabilitas, dan lendutan sesuai SNI 1729:2020. Nilai rasio seluruh elemen berada di bawah 1,00, sedangkan lendutan gording sebesar 0,505 cm masih lebih kecil dibandingkan izin lendutan sebesar 1,667 cm. Dengan demikian, struktur atap baja memiliki kapasitas yang mampu menahan terhadap rencana pembebanan.

Tabel 12. Sambungan Baut

Elemen	Mutu Baut	fy Mpa	fu Mpa	Geser Ruv/ϕRnv	Tarik tu/ϕRnt	Status
Sambungan baut	A325	240	370	0,132	0,090	Aman

Berdasarkan Tabel 12, rasio geser sambungan baut sebesar 0,132 dan rasio tarik sebesar 0,090. Kedua nilai tersebut berada di bawah batas maksimum sehingga sambungan baut memenuhi persyaratan kekuatan menurut SNI 1729:2020. Hasil ini sejalan dengan penelitian Darmiyanti dkk. [15].

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa pelat, tangga, balok, kolom, struktur atap baja, dan sambungan baut memiliki rasio kapasitas di bawah batas yang dipersyaratkan sehingga memenuhi ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 1729:2020. Meskipun pada evaluasi respon struktur masih ditemukan simpangan antar lantai arah Y pada lantai 2 yang sedikit melampaui batas izin, kapasitas masing-masing elemen struktur masih mampu menahan kombinasi beban gravitasi dan beban gempa yang diterapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa secara umum struktur memiliki tingkat keamanan yang baik terhadap pembebanan rencana, namun evaluasi lebih terhadap distribusi kekakuan arah Y tetap diperlukan untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode Statik Ekuivalen sesuai SNI 1726:2019, dapat disimpulkan bahwa parameter gempa rencana dan karakteristik Gedung Asrama Putri Pondok Pesantren Karang Kadempel telah memenuhi ketentuan perencanaan, yang ditunjukkan oleh nilai periode fundamental struktur yang masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan. Distribusi gaya gempa pada setiap lantai juga telah mengikuti ketentuan SNI 1726:2019, di mana gaya lateral meningkat seiring bertambahnya berat seismik dan elevasi bangunan.

Evaluasi kapasitas elemen struktur menunjukkan bahwa pelat, tangga, balok, kolom, struktur atap baja, dan sambungan baut memiliki rasio kapasitas di bawah batas yang dipersyaratkan, sehingga memenuhi ketentuan SNI 2847:2019 dan SNI 1729:2020 dalam aspek kekuatan, geser, stabilitas, dan lendutan. Namun, hasil evaluasi simpangan antar lantai (*story drift*) menunjukkan bahwa masih terdapat satu lantai pada arah Y yang sedikit melampaui batas simpangan yang diizinkan menurut SNI 1726:2019. Oleh karena itu, meskipun kapasitas elemen struktur secara umum telah memenuhi persyaratan desain, diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap distribusi kekakuan struktur pada arah tersebut untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa metode Statik Ekuivalen berbasis SNI 1726:2019 dapat digunakan untuk mengevaluasi respons seismik dan kapasitas elemen struktur secara komprehensif, sehingga hasil analisis dapat menjadi dasar dalam penilaian keamanan struktur gedung terhadap pembebanan gravitasi dan gempa.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. Karyanto, D. Rosidi, and P. Pudjisuryadi, “Seismic Responses of Concrete Building Subjected to Out-of-phase Ground Motions,” *Civil Engineering Dimension*, vol. 25, no. 2, pp. 96–105, 2023, doi: 10.9744/ced.25.2.96-105.

[2] F. R. Santana, G. S. Budi, and M. Yusuf, “Seismic Performance Evaluation of an Eight-Story Reinforced Concrete Apartment Building with Special Moment-Resisting Frame in Kubu Raya Regency,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 26, no. 1, pp. 2631–2649, 2026, doi: 10.26418/jts.v26i1.97408.

[3] M. H. Prayoga, I. B. P. Bhisama, and P. A. Yasa, “Comparative analysis of the behavior of reinforced concrete buildings using static equivalent, response spectrum, and time history methods,” *Priviet Social Sciences Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 615–626, 2026, doi: 10.55942/pssj.v6i2.1616.

[4] P. A. H. Pham, T. P. Nguyen, and N. H. Nguyen, “Stiffness Degradation Effects on Seismic Behavior of RC Frame Structures,” *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 12, no. 2, pp. 609–626, 2026, doi: 10.28991/CEJ-2026-012-02-011.

[5] M. Hilmi, Erizal, and J. Febrita, “Analisis Kinerja Struktur pada Bangunan Bertingkat dengan Metode Analisis Respon Spektrum Berdasarkan SNI 1726:2019,” *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 6, no. 3, pp. 143–158, 2021, doi: 10.29244/jsil.6.3.143-158.

[6] R. Andika and T. Roesdiana, “Interpretation of SAP2000 Analysis Results Using the Design Response Spectrum Method in Earthquake Resistance in the Structural Performance of High-Story Buildings According to SNI 1726:2019,” *Journal of World Science*, vol. 4, no. 2, pp. 196–213, 2025, doi: 10.58344/jws.v4i2.1294.

[7] F. Felny, “Structural Performance Analysis of The BPJN Bengkulu Office Building Using The Response Spectrum Method Based on SNI 1726:2019,” *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 6, no. 2, pp. 188–199, 2025, doi: 10.37253/jcep.v6i2.11292.

[8] P. Jaya, Y. Defiana, and T. Martha, “Analisis Respons Struktur Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus Dengan Gempa Dinamik Respons Spektrum Menggunakan Sap2000,” *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 99–106, 2025, doi: 10.25157/jiteks.v2i2.5375.

[9] J. Panjaitan, "Analisis Kinerja Struktur Apartemen 16 Lantai di Jakarta Terhadap Beban Gempa dengan Metode Respon Spektrum menggunakan ETABS V9.7.0 Berdasarkan SNI 1726 : 2019," *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, vol. 23, no. 2, p. 127, 2025, doi: 10.12962/j2579-891x.v23i2.22089.

[10] Raihan Daffa Hukama and Erizal, "Analisis Kekuatan Struktur Pada Bangunan 8 Lantai Berdasarkan Respon Spektrum SNI 03-1726-2019 Menggunakan SAP2000," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 8, no. 03, pp. 127–136, 2023, doi: 10.29244/jsil.8.03.127-136.

[11] R. Suwondo, M. Keintjem, M. Suangga, and M. S. Alama, "Comparative Seismic Analysis of Multi-Story RC Buildings under the Indonesian Seismic Code Using Static Equivalent and Response Spectrum Methods," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 15, no. 5, pp. 26317–26322, 2025, doi: 10.48084/etasr.11865.

[12] A. Sobah, N. Sodik, and R. Andayani, "Desain Struktur Rangka Momen Beton," vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 2021.

[13] A. M. Agussalim, I. A. AL Kahfi, and E. Darma, "Perencanaan Struktur Balok Bangunan 6 Lantai Di Jln . Cut Meutia Bekasi," *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, vol. 05, no. 02, pp. 119–133, 2023.

[14] M. Faradiela, S. Darham, A. Nurdin, and D. Khairinnisa, "Perencanaan Struktur Atas Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Universitas Jambi," vol. 02, no. 1, pp. 163–171, 2025.

[15] L. Darmiyanti, A. P. Rodji, and A. Mumtaz, "Perencanaan Struktur Atap Frofil Baja Wf," *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, vol. 4, no. 02, pp. 99–121, 2022, doi: 10.47080/josce.v4i02.2258.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Perencanaan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 46-55

Evaluasi Kinerja Dan Pengendalian Proyek Pada Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung

I Gede Yoginda Jessen Nugraha[1], Ida Ayu Cri Vinantya Laksmi[2*], I Gusti Agung Putu Eryani[3]

[1,2,3]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa Kota Denpasar, Provinsi Bali
*Email Korespondensi: vinantya.laksmi@warmadewa.ac.id

ABSTRAK

Keterlambatan pelaksanaan proyek konstruksi merupakan salah satu permasalahan utama yang dapat menurunkan kinerja proyek karena berdampak pada pencapaian target waktu, efisiensi biaya, dan produktivitas pelaksanaan. Oleh karena itu, diperlukan metode evaluasi yang mampu mengintegrasikan pengendalian biaya dan waktu secara simultan sehingga kondisi proyek dapat dipantau secara akurat dan tindakan korektif dapat dilakukan secara tepat. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Earned Value Method* (EVM). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja biaya dan waktu pada Proyek Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung serta menentukan alternatif pengendalian yang efektif untuk meminimalkan keterlambatan proyek. Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder berupa Rencana Anggaran Biaya (RAB), time schedule, dan laporan kemajuan mingguan proyek. Analisis dilakukan menggunakan *Earned Value Method* (EVM) melalui indikator *Schedule Performance Index* (SPI), *Cost Performance Index* (CPI), *Estimate at Completion* (EAC), dan *Estimate All Schedule* (EAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada minggu ke-26 proyek mengalami keterlambatan dengan nilai SPI sebesar 0,80, sedangkan kinerja biaya masih efisien dengan nilai CPI sebesar 1,067. Estimasi biaya akhir proyek (*Estimate at Completion*/EAC) sebesar Rp4.471.863.337,00, sedangkan estimasi waktu penyelesaian proyek (*Estimate at Schedule*/EAS) mencapai 225 hari atau terlambat 45 hari dari jadwal. Berdasarkan perhitungan *Estimate to Complete* (ETC), biaya yang diperlukan untuk menyelesaikan sisa pekerjaan serta biaya pengendalian dapat disesuaikan dengan kondisi aktual proyek. Dengan demikian, penambahan tenaga kerja menjadi salah satu alternatif pengendalian yang dapat diterapkan untuk mempercepat penyelesaian pekerjaan dan meminimalkan keterlambatan proyek, dengan tetap mempertimbangkan ketersediaan anggaran dan efisiensi biaya.

Kata kunci : Biaya, *Earned Value Method (EVM),* Evaluasi Kinerja, Pengendalian Proyek dan Waktu.

ABSTRACT

Delays in construction projects are one of the main issues that can undermine project performance, as they affect the achievement of time targets, cost efficiency, and implementation productivity. Therefore, an evaluation method is needed that can simultaneously integrate cost and time control so that project conditions can be accurately monitored and corrective actions can be taken promptly. One method that can be used is the Earned Value Method (EVM). This study aims to evaluate cost and schedule performance in the Construction Project for the Development of the Surgical Care Building at the Klungkung Regency General Hospital and to determine effective control alternatives to minimize project delays. The study employed a quantitative descriptive method using secondary data in the form of the Cost Budget Plan (RAB), the time schedule, and weekly project progress reports. Analysis was conducted using the Earned Value Method (EVM) through the following indicators: Schedule Performance Index (SPI), Cost Performance Index (CPI), Estimate at Completion (EAC), and Estimate at Schedule (EAS). The results of the study indicate that by week 26, the project was experiencing a delay with an SPI value of 0.80, while cost performance remained efficient with a CPI value of 1.067. The estimated final project cost (Estimate at Completion/EAC) is Rp4,471,863,337.00, while the estimated project completion time (Estimate at Schedule/EAS) is 225 days—45 days behind schedule. Based on the Estimate to Complete (ETC) calculation, the costs required to complete the remaining work, as well as control costs, can be adjusted to reflect the project's actual conditions. Thus, increasing the workforce is one control measure that can be implemented to accelerate project completion and minimize delays, while still taking budget availability and cost efficiency into account.

Keywords **:** *Cost, Earned Value Method (EVM), Project Performance Evaluation, Project Control, and Schedule.*

1. PENDAHULUAN

Proyek merupakan kegiatan yang dilaksanakan secara terencana untuk mencapai tujuan tertentu dalam batas waktu dan biaya yang telah ditetapkan. Keberhasilan proyek memerlukan manajemen yang efektif serta metode pengendalian yang tepat. Berbagai metode pengendalian telah dikembangkan, seperti *Earned Value Method* (EVM), *Critical Path Method* (CPM*), Lean Construction, Critical Chain Project Management* (CCPM), dan *Diagram Gantt*. Metode EVM mampu mengevaluasi kinerja proyek secara terpadu dari aspek biaya dan waktu sekaligus memprediksi kebutuhan biaya serta waktu penyelesaian proyek [1], sedangkan CPM berfokus pada jalur kritis [2], *Lean Construction* pada pengurangan pemborosan [3], CCPM pada optimalisasi waktu dan sumber daya [4], serta *Diagram Gantt* pada pemantauan jadwal pelaksanaan [5]. Ketidaktepatan dalam memilih metode pengendalian dapat menyebabkan keterlambatan dan menurunkan kinerja proyek [6]. Keterlambatan proyek umumnya dipengaruhi oleh lemahnya manajemen, keterbatasan tenaga kerja, material, peralatan, pendanaan, maupun faktor lingkungan, sehingga berdampak pada penurunan keuntungan kontraktor dan hilangnya peluang memperoleh proyek lain [7]. Oleh karena itu, EVM dipilih dalam penelitian ini karena mampu mengintegrasikan pengendalian biaya dan waktu secara kuantitatif.

Objek penelitian dipilih pada Proyek Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung karena ditemukan kondisi ketidaksesuaian antara progres rencana dan realisasi. Pada minggu ke-8, progres rencana mencapai 12,289%, sedangkan realisasi hanya 9,564%, sehingga terjadi deviasi keterlambatan sebesar 2,724% yang disebabkan oleh kekurangan tenaga kerja dan keterlambatan pasokan material. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya evaluasi kinerja proyek secara lebih komprehensif untuk menentukan tindakan pengendalian yang tepat. Penelitian ini menerapkan *Earned Value Method* (EVM) melalui indikator SPI, CPI, EAC, ETC, SV, dan CV sebagai dasar evaluasi kinerja biaya dan waktu [8]. Kontribusi penelitian ini dibandingkan penelitian EVM sebelumnya terletak pada penerapan analisis EVM pada proyek pembangunan fasilitas pelayanan kesehatan yang mengalami keterlambatan akibat permasalahan tenaga kerja dan material, serta penggunaan hasil analisis untuk menentukan alternatif pengendalian yang dapat meminimalkan keterlambatan tanpa mengabaikan efisiensi biaya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Earned Value Method* (EVM)

Proyek merupakan kegiatan sementara yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan dengan batasan biaya, waktu, dan mutu (*triple constraint*) [9]. Keberhasilan proyek dipengaruhi oleh pengelolaan sumber daya 5M (*man, material, method, machine, dan money*) serta penerapan manajemen proyek yang meliputi perencanaan, pelaksanaan, pengendalian, evaluasi, dan penutupan proyek [10]. Keterlambatan proyek umumnya disebabkan oleh faktor tenaga kerja, material, peralatan, biaya, manajemen, cuaca, dan kondisi lapangan yang dapat menyebabkan pembengkakan biaya serta penurunan kinerja proyek [11]. Oleh karena itu, diperlukan metode pengendalian seperti *Critical Path Method* (CPM) [12], *Lean Construction, Critical Chain Project Management* (CCPM), *Diagram Gantt*, dan *Earned Value Method* (EVM) [8]. EVM dipilih karena mampu mengintegrasikan pengendalian biaya dan waktu melalui BCWS, BCWP, dan ACWP yang digunakan untuk menghitung CV, SV, CPI, dan SPI, serta memprediksi kondisi akhir proyek melalui ETC, EAC, ETS, dan EAS [13]. Dengan indikator tersebut, kinerja proyek dan penyimpangan biaya maupun waktu dapat diketahui lebih dini sebagai dasar pengambilan tindakan pengendalian.

Proyek Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung dipilih sebagai objek penelitian karena mengalami ketidaksesuaian antara progres rencana dan realisasi. Pada minggu ke-8, progres rencana mencapai 12,289%, sedangkan realisasi hanya 9,564%, sehingga terjadi deviasi keterlambatan sebesar 2,724% yang disebabkan oleh kekurangan tenaga kerja dan keterlambatan pasokan material. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya evaluasi kinerja biaya dan waktu secara komprehensif. Penelitian ini menerapkan EVM melalui indikator CV, SV, CPI, SPI, ETC, EAC, ETS, dan EAS untuk mengetahui kondisi aktual

serta memproyeksikan biaya dan waktu penyelesaian proyek. Kontribusi penelitian ini terletak pada penerapan EVM pada proyek pembangunan fasilitas pelayanan kesehatan yang mengalami keterlambatan akibat faktor tenaga kerja dan material serta penggunaan hasil evaluasi untuk menentukan alternatif pengendalian yang efektif dalam meminimalkan keterlambatan tanpa melampaui anggaran yang tersedia.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan data sekunder yang bersumber dari dokumen pelaksanaan Proyek Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung. Data yang digunakan meliputi Rencana Anggaran Biaya (RAB), *time schedule*, laporan kemajuan pekerjaan mingguan, serta data biaya aktual proyek. Periode pengamatan dilakukan selama pelaksanaan proyek sampai dengan minggu ke-26 sebagai periode evaluasi kinerja. Analisis diawali dengan menentukan nilai *Budgeted Cost of Work Scheduled* (BCWS), *Budgeted Cost of Work Performed* (BCWP), dan *Actual Cost of Work Performed* (ACWP) berdasarkan bobot rencana, bobot realisasi pekerjaan, dan biaya aktual setiap periode [14].

Selanjutnya dihitung *Cost Variance* (CV) dan *Schedule Variance* (SV) untuk mengetahui penyimpangan biaya dan waktu, kemudian *Cost Performance Index* (CPI) dan *Schedule Performance Index* (SPI) untuk menilai efisiensi biaya dan kinerja jadwal proyek. Estimasi penyelesaian proyek dilakukan melalui *Estimate to Complete* (ETC), *Estimate at Completion* (EAC), *Estimate Time to Schedule* (ETS), dan *Estimate All Schedule* (EAS). Dalam analisis diasumsikan bahwa data RAB dan *time schedule* merupakan dasar rencana proyek, data laporan mingguan merepresentasikan kemajuan aktual, serta pola kinerja pada periode pengamatan dapat digunakan untuk memperkirakan kondisi penyelesaian proyek [15]. Apabila hasil perhitungan menunjukkan adanya keterlambatan, dilakukan analisis alternatif pengendalian berupa penambahan tenaga kerja dengan mempertimbangkan kebutuhan biaya dan sisa waktu pekerjaan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Indikator Nilai Hasil

Perhitungan indikator konsep nilai hasil, dibagi menjadi 3 yaitu *Budget Cost of Work Schedule* (BCWS), *Budget Cost of Work Performance* (BCWP) dan *Actual Cost of Work Performance* (ACWP).

a. *Budget Cost of Work Schedule* (BCWS)

Budget Cost of Work Schedule (BCWS) sangat penting karena berfungsi sebagai dasar untuk membandingkan biaya yang sebenarnya telah dikeluarkan (*Actual Cost*/AC) dan nilai pekerjaan yang sebenarnya telah diselesaikan (*Earned Value*/EV). Rumus BCWS dapat dilihat sebagai berikut:

Bobot minggu I = 0,085 %
BAC = Rp. 4.770.137.000
BCWS = (%Rencana) x BAC
= Rp. 4.041.802

b. *Budget Cost of Work Performance* (BCWP)

Dalam EVM, BCWP sangat penting karena memberikan informasi tentang nilai pekerjaan yang telah diselesaikan pada waktu tertentu, yang kemudian dapat dibandingkan dengan biaya yang seharusnya dikeluarkan untuk pekerjaan tersebut (*Budgeted Cost of Work Scheduled*/BCWS) dan biaya yang sebenarnya dikeluarkan (*Actual Cost*/AC). Rumus BCWP dapat dilihat sebagai berikut:

Bobot minggu I = 0,085 %
BAC = Rp. 4.770.137.000
BCWS = (%Realisasi) x BAC
= Rp 4.041.802

c. *Actual Cost of Work Performance* (ACWP)

ACWP sangat penting dalam EVM karena memberikan informasi tentang biaya yang telah dikeluarkan untuk pekerjaan yang telah diselesaikan, yang kemudian dapat dibandingkan dengan biaya yang seharusnya dikeluarkan (*Budgeted Cost of Work Scheduled*/BCWS) dan nilai pekerjaan yang sebenarnya telah diselesaikan (*Earned Value*/EV).

Untuk rekapitulasi perhitungan BCWS, BCWP dan ACWP dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Perhitungan BCWS, BCWP dan ACWP

Minggu ke-	Bobot Rencana Komulatif (%)	Bobot Realisasi Komulatif (%)	Nilai Komulatif BCWS (Rp.)	Nilai Komulatif BCWP (Rp.)	Nilai Komulatif ACWP (Rp.)
1	3	3	2	3	4
1	0,085	0,085	4.041.802	4.041.802	5.479.040
2	0,302	0,490	14.397.361	23.352.581	23.979.078
3	0,885	1,494	42.230.820	71.283.236	67.649.852
4	2,514	2,608	119.930.198	124.403.940	118.924.395
5	4,131	3,895	197.031.655	185.785.239	177.640.916
6	5,540	5,550	264.282.875	264.759.123	250.993.565
7	8,263	8,490	394.142.910	404.997.898	379.294.814
8	12,289	9,564	586.188.634	456.231.933	426.419.660
9	15,812	9,980	754.270.462	476.039.158	451.139.171
10	18,905	11,000	901.782.733	524.722.169	496.983.031
11	22,118	12,211	1.055.042.274	582.484.055	553.083.367
12	26,076	16,372	1.243.847.091	780.983.002	739.430.971
13	22,438	19,645	1.070.340.837	937.113.009	884.855.254
14	27,259	20,527	1.300.302.804	979.184.408	927.236.507
15	33,441	24,131	1.595.174.843	1.151.063.366	1.086.460.509
16	39,988	29,180	1.907.500.809	1.391.931.298	1.308.398.312
17	46,977	31,545	2.240.881.033	1.504.718.771	1.421.200.456
18	53,953	38,527	2.573.609.327	1.837.786.376	1.765.368.501
19	60,187	46,205	2.871.010.207	2.204.020.606	2.103.720.090
20	67,098	55,873	3.200.667.561	2.665.198.165	2.515.575.154
21	74,134	60,424	3.536.290.270	2.882.323.059	2.715.362.785
22	81,891	68,326	3.906.312.689	3.259.228.445	3.059.552.295
23	89,415	71,265	4.265.194.842	3.399.417.154	3.188.348.487
24	93,422	74,160	4.456.339.670	3.537.544.172	3.314.107.534
25	98,215	78,255	4.685.003.861	3.732.861.006	3.491.366.196
26	100,000	80,082	4.770.137.000	3.820.035.965	3.581.171.521

Sumber : analisa, 2026

Tabel 1 menunjukkan hasil perkembangan proyek dari minggu ke-1 hingga minggu ke-26 menunjukkan bahwa pada awal pelaksanaan progres masih mendekati rencana. Mulai minggu ke-8 terjadi keterlambatan, ditandai dengan bobot realisasi kumulatif sebesar 9,564% yang lebih rendah dari bobot rencana 12,289%. Minggu ke-26 bobot rencana telah mencapai 100%, sementara realisasi baru 80,082%. Nilai BCWP sebesar Rp3.820.035.965 masih lebih rendah dibandingkan BCWS sebesar Rp4.770.137.000, yang menunjukkan keterlambatan penyelesaian pekerjaan. Sementara itu, ACWP sebesar Rp3.581.171.521 lebih kecil dari BCWP, sehingga dari sisi biaya proyek masih tergolong efisien meskipun mengalami keterlambatan dari sisi waktu.

4.2 Analisis Varian

Analisis varian digunakan untuk mengevaluasi kinerja proyek dengan membandingkan kondisi aktual terhadap rencana. Dalam metode *Earned Value Method* (EVM), analisis ini dilakukan melalui perhitungan *Cost Variance* (CV), *Schedule Variance* (SV), *Cost Performance Index* (CPI), dan *Schedule Performance Index* (SPI).

a. *Cost Variance* (CV)

Cost Variance (CV) merupakan perhitungan yang digunakan untuk mencari perbedaan antara nilai pekerjaan dengan pengeluaran yang telah digunakan selama proyek berlangsung. Rumus CV dapat dilihat sebagai berikut:

BCWP = Rp. 3.820.035.964,98
ACWP = Rp. 3.581.171.521,13
CV = BCWP – ACWP
= Rp 238.864.443,85

b. *Schedule Variance* (SV)

Schedule Variance (SV) adalah metrik yang digunakan dalam metode Earned Value Method (EVM) untuk mengukur perbedaan antara pekerjaan yang direncanakan dan pekerjaan yang benar-benar telah diselesaikan pada suatu titik waktu dalam proyek. Schedule Variance membantu manajer proyek mengetahui apakah proyek berjalan sesuai rencana, lebih cepat, atau lebih lambat. Rumus SV dapat dilihat sebagai berikut:

BCWP = Rp. 3.820.035.964,98
BCWS = Rp. 4.770.137.000,00
SV = BCWP - BCWS
= Rp. - 950.101.035,02

c. *Cost Performance Index* (CPI)

*Cost Performance Index (*CPI) merupakan indikator yang digunakan untuk mengukur efisiensi biaya proyek dengan membandingkan nilai pekerjaan yang telah diselesaikan terhadap biaya aktual yang dikeluarkan. Nilai CPI = 1 menunjukkan biaya sesuai rencana, CPI > 1 menunjukkan biaya lebih hemat, sedangkan CPI < 1 menunjukkan biaya melebihi anggaran yang direncanakan. Rumus CPI dapat dilihat seperti berikut:

BCWP = Rp. 3.820.035.964,98
ACWP = Rp. 3.581.171.521,13
CPI = BCWP/ACWP
= 1,067

d. *Schedule Variance Index* (SPI)

Schedule Performance Index (SPI) merupakan indikator yang digunakan untuk mengukur efisiensi waktu proyek dengan membandingkan nilai pekerjaan yang telah diselesaikan terhadap nilai pekerjaan yang direncanakan. Nilai SPI = 1 menunjukkan proyek sesuai jadwal, SPI > 1 menunjukkan proyek lebih cepat, sedangkan SPI < 1 menunjukkan proyek mengalami keterlambatan. Rumus SPI dapat dilihat sebagai berikut:

BCWP = Rp. 3.820.035.964,98
BCWS = Rp. 4.770.137.000,00
SPI = BCWP/BCWS
= 0,80

Untuk rekapitulasi perhitungan CV, SV, CPI, dan SPI dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Perhitungan CV, SV, CPI, dan SPI

Minggu ke-	Nilai CV	Nilai SV	Nilai CPI	Nilai SPI
1	2	3	4	5
1	-1.437.237,92	0	0,738	1,00
2	-626.496,56)	8.955.219,71	0,974	1,62
3	3.633.384,72	29.052.416,33	1,054	1,69
4	5.479.545,03	4.473.742,37	1,046	1,04
5	8.144.322,27	-11.246.416,08	1,046	0,94
6	13.765.557,32	476.247,23	1,055	1,00
7	25.703.083,42	10.854.987,63	1,068	1,03
8	29.812.273,37	-129.956.701,07	1,070	0,78
9	24.899.987,23	-278.231.304,07	1,055	0,63
10	27.739.137,78	-377.060.564,46	1,056	0,58

Minggu ke-	Nilai CV	Nilai SV	Nilai CPI	Nilai SPI
1	2	3	4	5
11	29.400.688,28	-472.558.219,17	1,053	0,55
12	41.552.031,38	-462.864.088,88	1,056	0,63
13	52.257.754,80	-133.227.827,34	1,059	0,88
14	51.947.900,86	-321.118.395,47	1,056	0,75
15	64.602.856,77	-444.111.477,22	1,059	0,72
16	83.532.986,33	-515.569.510,79	1,064	0,73
17	83.518.314,27	-736.162.261,96	1,059	0,67
18	72.417.874,22	-735.822.951,34	1,041	0,71
19	100.300.515,87	-666.989.601,58	1,048	0,77
20	149.623.011,17	-535.469.396,29	1,059	0,83
21	166.960.273,60	-653.967.210,75	1,061	0,82
22	199.676.149,85	-647.084.244,59	1,065	0,83
23	211.068.666,72	-865.777.688,26	1,066	0,80
24	223.436.638,42	-918.795.497,75	1,067	0,79
25	241.494.810,21	-952.142.854,50	1,069	0,80
26	238.864.443,85	-950.101.035,02	1,067	0,80

Sumber : analisa, 2026

Tabel 2 menunjukkan asil analisis CV, SV, CPI, dan SPI, pada minggu pertama dan kedua proyek mengalami kerugian sebesar Rp2.063.734,48 dengan nilai CPI < 1. Mulai minggu berikutnya biaya proyek menjadi lebih efisien (CPI > 1), sehingga hingga minggu ke-26 pada progres 80,082% diperoleh penghematan sebesar Rp238.864.443,85. Dari aspek waktu, proyek berjalan sesuai rencana pada minggu pertama hingga keempat, kembali sesuai jadwal pada minggu keenam dan ketujuh, sedangkan mulai minggu kelima serta minggu kedelapan hingga akhir proyek mengalami keterlambatan yang ditunjukkan oleh nilai SV dan SPI < 1.

4.3 Perkiraan Biaya Penyelesaian Proyek

Perkiraan biaya penyelesaian proyek dilakukan untuk memprediksi total biaya hingga proyek selesai berdasarkan kinerja saat ini. Dalam metode *Earned Value Method* (EVM), estimasi tersebut dihitung menggunakan *Estimate to Complete* (ETC) dan *Estimate at Completion* (EAC).

a. *Estimated to Complete* (ETC)

Estimate to Complete (ETC) adalah estimasi jumlah biaya tambahan yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan tambahan proyek. ETC membantu manajer proyek memahami berapa banyak biaya tambahan yang diperlukan untuk menyelesaikan proyek dari sekarang hingga akhir. Rumus ETC dapat dilihat sebagai berikut:

BAC = Rp. 4.770.137.000
BCWP = Rp. 3.820.035.965
CPI = 1,07
ETC = (BAC-BCWP)/CPI
= Rp. 890.691.815

b. *Estimate at Completion (EAC)*

Estimate at Completion (EAC) merupakan perkiraan total biaya yang dibutuhkan hingga proyek selesai berdasarkan kinerja biaya yang telah dicapai. Nilai EAC digunakan untuk memproyeksikan biaya akhir proyek apabila kinerja saat ini tetap berlangsung. Rumus SV dapat dilihat sebagai berikut:

ACWP = Rp. 3.581.171.521
ETC = Rp. 890.691.815,47
EAC = ACWP + ETC
= Rp. 4.471.863.337

Untuk rekapitulasi perhitungan ETC dan EAC dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Perhitungan ETC dan EAC

Minggu ke-	Nilai ETC (Rp.)	Nilai EAC (Rp.)
1	2	3
1	6.460.886.831	6.466.365.871
2	4.874.129.832	4.898.108.910
3	4.459.348.035	4.526.997.887
4	4.441.105.268	4.560.029.663
5	4.383.386.182	4.561.027.098
6	4.271.130.850	4.522.124.415
7	4.088.106.715	4.467.401.529
8	4.032.014.853	4.458.434.513
9	4.069.488.207	4.520.627.378
10	4.020.983.401	4.517.966.432
11	3.976.282.560	4.529.365.927
12	3.776.911.924	4.516.342.895
13	3.619.276.848	4.504.132.103
14	3.589.834.163	4.517.070.671
15	3.415.954.933	4.502.415.442
16	3.175.471.837	4.483.870.150
17	3.084.173.580	4.505.374.036
18	2.816.801.504	4.582.170.006
19	2.449.337.632	4.553.057.722
20	1.986.768.528	4.502.343.681
21	1.778.461.198	4.493.823.984
22	1.418.342.966	4.477.895.260
23	1.285.612.312	4.473.960.799
24	1.154.740.401	4.468.847.935
25	970.170.155	4.461.536.351
26	890.691.815	4.471.863.337

Sumber : analisa, 2026

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan, nilai *Estimate to Complete* (ETC) menunjukkan biaya yang masih diperlukan untuk menyelesaikan proyek sebesar Rp890.691.815 nilai ini hingga minggu ke-26, sedangkan *Estimate at Completion* (EAC) memperkirakan total biaya proyek hingga selesai sebesar Rp4.471.863.337.

4.4 Perkiraan Waktu Penyelesaian Proyek

Perkiraan waktu penyelesaian proyek digunakan untuk memprediksi waktu yang dibutuhkan hingga seluruh pekerjaan selesai. Estimasi ini dilakukan menggunakan dua indikator, yaitu *Estimated Temporary Schedule* (ETS) dan *Estimated all Schedule* (EAS).

a. *Estimated Temporary Schedule* (ETS)

Estimated Temporary Schedule (ETS) digunakan untuk menghitung perkiraan waktu pekerjaan yang tersisa pada proyek, perhitungan ETS dapat dilihat sebagai berikut:

Sisa Waktu = 176 (Hari)
SPI = 1.00
ETS = Sisa waktu/SPI
= 176/1,00
=176 Hari

b. *Estimated all Schedule* (EAS).

Estimated all Schedule (EAS) digunakan untuk memperkirakan waktu penyelesaian proyek, perhitungan EAS dapat dilihat sebagai berikut:

Waktu Selesai = 4 (hari)
ETS = 176
EAS =Waktu selesai + ETS
= 4+176
EAS =180 (hari)

Untuk rekapitulasi perhitungan ETS dan EAS dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Perhitungan ETS dan EAS

Minggu ke-	Nilai ETS	Nilai EAS
1	2	3
1	176,0	180,0
2	104,2	115,2
3	96,0	114,0
4	149,4	174,4
5	157,0	189,0
6	140,7	179,7
7	130,4	176,4
8	163,2	216,2
9	190,1	250,1
10	194,2	261,2
11	192,0	266,0
12	157,7	238,7
13	105,1	193,1
14	112,9	207,9
15	108,1	210,1
16	97,3	206,3
17	95,3	211,3
18	79,8	202,8
19	65,1	195,1
20	51,6	188,6
21	44,2	188,2
22	34,8	185,8
23	27,6	185,6
24	18,9	183,9
25	10,0	182,0
26	0	180,0

Sumber : analisa, 2026

Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan ETS dan EAS, hingga minggu ke-26 proyek telah mencapai durasi kontrak 180 hari namun dengan progres 80,08%**.** Dengan nilai SPI 0,80, estimasi waktu penyelesaian proyek adalah 225 hari, sehingga proyek diperkirakan mengalami keterlambatan selama 45 hari dari jadwal rencana.

4.5 Penambahan Tenaga Kerja

Keterlambatan sering menjadi kendala dalam pelaksanaan proyek konstruksi karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain keterlambatan pengadaan material, keterbatasan tenaga kerja, kondisi cuaca, maupun hambatan yang muncul selama proses pelaksanaan di lapangan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mempercepat penyelesaian pekerjaan adalah menambah jumlah tenaga kerja agar produktivitas meningkat, sehingga durasi pelaksanaan dapat dipersingkat dan target penyelesaian proyek kembali sesuai dengan jadwal yang telah direncanakan. Kebutuhan penambahan tenaga kerja dihitung mulai dari minggu ke-8 sampai dengan minggu ke-26, dapat menggunakan persamaan berikut:

Tenaga kerja di perlukan = (Waktu penyelesaian x Pekerja awal mulai) / Waktu target penyelesaian

Minggu ke-9 = (127 x 28)/163
= 35,98 orang
= 36 (setelah di bulatkan)

Untuk rekapitulasi perhitungan tambahan tenaga kerja dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Perhitungan Tambahan Tenaga Kerja

Minggu	Waktu Penyelesaian	Target Penyelesaian	Pekerja Awal	Tenaga Kerja Diperlukan	Tambahan Tenaga Kerja
1	2	3	4	5	6
8	134	130	17	16,5	0
9	127	163	28	35,98	8
10	120	190	22	34,9	13
11	113	194	22	37,8	16
12	106	192	22	39,8	18
13	99	158	29	46,2	18
14	92	105	19	21,7	3
15	85	113	19	25,2	7
16	78	108	19	26,3	8
17	71	97	36	49,3	14
18	64	95	36	53,6	18
19	57	80	148	207,3	60
20	50	65	33	43,0	11
21	43	52	32	38,4	7
22	36	44	57	69,9	13
23	29	35	71	85,1	15
24	22	28	57	71,5	15
25	15	19	48	60,5	13
26	8	10	42	52,7	11

Sumber : analisa, 2026

Hasil analisis pada Tabel 5 di atas merupakan hasil kebutuhan penambahan tenaga kerja yang diperlukan untuk mempercepat dan menyelesaikan pekerjaan pada Proyek Pembangunan Pengembangan Gedung Perawatan Bedah RSUD Kabupaten Klungkung mulai minggu ke-8 sampai dengan minggu ke-26. Penambahan tenaga kerja tersebut mengakibatkan adanya biaya tambahan sebesar Rp. 88.095.163,88 dengan perhitungan tambahan tenaga kerja dikalikan dengan upah tenaga kerja per hari, dikalikan 7 hari (1minggu), yang harus dikeluarkan hingga proyek selesai. Berdasarkan dari hasil perhitungan *Estimate to Complete* (ETC) biaya yang perlu dikeluarkan untuk kekurangan persentase (19,92%) sebesar Rp. 890.691.815,47 ditambah dengan biaya penambahan tenaga kerja sebesar Rp. 88.095.163,88 total dari biaya yang harus dikeluarkan sebesar Rp 978.786.979. Nilai tersebut masih berada di bawah sisa anggaran proyek, sehingga kontraktor diperkirakan tetap memperoleh keuntungan sebesar Rp. 210.178.500.

5. KESIMPULAN

Hasil analisis menggunakan metode *Earned Value Method* (EVM), hingga akhir pengamatan minggu ke-26 proyek masih mengalami keterlambatan dengan nilai SPI sebesar 0,80. Meskipun demikian, kinerja biaya tergolong baik karena nilai CPI sebesar 1,07 dan CV sebesar Rp238.864.443,85 menunjukkan biaya aktual lebih rendah dari anggaran. Estimasi biaya akhir proyek (EAC) sebesar Rp4.471.863.337 masih berada di bawah nilai kontrak, sedangkan estimasi waktu penyelesaian (EAS) menjadi 225 hari atau lebih lama dari durasi kontrak 180 hari. Pengendalian keterlambatan dilakukan dengan menambah tenaga kerja pada pekerjaan yang terlambat, sehingga memerlukan biaya tambahan sebesar Rp. 890.691.815,47. Hasil perhitungan *Estimate to Complete* (ETC) biaya yang perlu dikeluarkan untuk kekurangan persentase (19,92%) sebesar Rp. 890.691.815,47 ditambah dengan biaya penambahan tenaga kerja sebesar Rp. 88.095.163,88 total dari biaya yang harus dikeluarkan sebesar Rp 978.786.979. sedangkan sisa anggaran yang tersedia mencapai Rp1.188.965.479,00. Dengan demikian, proyek masih memberikan keuntungan bagi kontraktor sebesar Rp. 210.178.500.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. A. Saputra, D. A. Nugroho, R. Yulianto, and R. B. Jakaria, "Analisis Biaya Proyek dengan Metode Earned Value pada Pengerjaan Proyek Pembangunan Gudang Finishgood PT. Landkrone," *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, vol. 1, no. 9, 2023.

[2] A. Dahlan, I. T. H. Nainggolan, and M. S. L. A. R. Winanda, "Evaluasi Pengendalian Waktu Dan Biaya Menggunakan Metode Critical Path Method (CPM) Dan Fast Track," *SONDIR*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2019.

[3] M. G. Tamallo and A. Nursin, "Evaluasi Non-Physical Waste Dengan Lean Construction Pada Proyek Gedung Sanggala," *PROKONS : Jurusan Teknik Sipil*, vol. 14, no. 2, 2020, doi: 10.33795/prokons.v14i2.294.

[4] W. Utama and B. Syairudin, "Perencanaan dan Pengendalian Proyek Konstruksi dengan Metode Critical Chain Project Management dan Root Cause Analysis (Studi Kasus: Proyek Pengadaan Material dan Jasa Konstruksi GI 150 kV Arjasa)," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. 9, no. 2, 2020.

[5] I. M. Tapa Yasa, I. M. A. Santiana, I. G. S. Wibawa, and I. W. Suasira, "The Cost Obtained By Applying Precedence Diagram Method Toward The Time Optimization On Building Development Projects," *LOGIC Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, vol. 18, no. 2, 2018, doi: 10.31940/logic.v18i2.973.

[6] Y. Malifa, A. K. T. Dundu, and G. Y. Malingkas, "Analisis Percepatan Waktu Dan Biaya Proyek Konstruksi Menggunakan Metode Crashing (Studi Kasus: Pembangunan Rusun IAIN Manado)," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 7, no. Juni, 2019.

[7] L. A. M. dan LIRAWATI, "Analisis Faktor Keterlambatan Proyek Konstruksi Bangunan Gedung," *Jurnal Teknik | Majalah Ilmiah Fakultas Teknik UNPAK*, vol. 21, no. 2, 2021, doi: 10.33751/teknik.v21i2.3282.

[8] R. M. Rizqy, N. Martina, and H. Purwanto, "Perbandingan Metode Konvensional Dengan BIM Terhadap Efisiensi Biaya, Mutu, Waktu," *Construction and Material Journal*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.32722/cmj.v3i1.3506.

[9] A. Wahyuningtyas and J. P. H. Waskito, "Analisa Faktor Faktor Penyebab Keterlambatan Proyek Pembangunan Jembatan Joyoboyo," *axial : jurnal rekayasa dan manajemen konstruksi*, vol. 9, no. 2, 2021, doi: 10.30742/axial.v9i2.1746.

[10] Irianto dkk, "Analisis Waste Material Dengan Penerapan Lean Construction," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 18, no. 2, 2022.

[11] E. Syakhertra, M. D. F. Sudarsa, and P. D. Saputra, "Identifikasi Faktor Penyebab Keterlambatan Proyek Konstruksi : Studi Literatur," *Menara Ilmu*, vol. 19, no. 2, 2025, doi: 10.31869/mi.v19i2.6632.

[12] A. W. Simanungkalit, M. Lubis, and R. H. Simbolon, "Evaluasi Penjadwalan Proyek Dengan Menggunakan Metode CPM (Critical Path Methode) Pada Proyek Pembangunan Mall Suzuya Jln. Karya Wisata Medan Johor," *Buletin Utama Teknik*, vol. 18, no. 1, 2022, doi: 10.30743/but.v18i1.5843.

[13] I. Agustiar and R. Handrianto, "Evaluasi Penjadwalan Proyek Menggunakan Metode CPM Dan Kurva S (Studi Kasus : Pembangunan Gedung Perpustakaan SMK N 1 'XX', Gresik)," *Wahana Teknik*, vol. 07, no. 02, 2018.

[14] B. Aditama, Rian;Witjaksana, "Analisis Biaya Dan Waktu Menggunakan Metode EVM (Earned Value Method) (Studi Kasus Pada Proyek Pembangunan Gedung Laundry RSUD Sidoarjo)," *Jurnal Teknik Sipil Untag*, no. 45, 2021.

[15] T. Rahmanto and S. Janizar, "Pengendalian Biaya Dan Waktu Dengan Metode Earned Value Proyek Familia Urban Bekasi," *JURNAL TEKNIK SIPIL CENDEKIA (JTSC)*, vol. 3, no. 2, 2022, doi: 10.51988/jtsc.v3i2.48.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 56-65

Evaluasi Pengendalian Mutu Pekerjaan Perkerasan Beton Pada Proyek Jalan Tirtayasa, Bandar Lampung

Rayu R Warganegara[1*], Yunita Mauliana[2]

[1,2]Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Bandarlampung, Lampung
* Email Korespondensi: ray.hotwheels1807@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengendalian mutu perkerasan beton pada Proyek Peningkatan Jalan Tirtayasa, Bandar Lampung, dengan mutu rencana (fs' = 45) kg/cm². Evaluasi dilakukan berdasarkan hasil pengujian slump, kuat lentur, kuat tekan beton inti (*core drill*), serta analisis statistik deskriptif pada segmen STA 3+500–STA 4+200. Hasil penelitian menunjukkan nilai *slump* berkisar antara 6,0–7,5 cm dengan rata-rata 6,83 cm dan memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Nilai kuat lentur berkisar antara 4,19–5,62 MPa dengan rata-rata 4,58 MPa, yang melampaui persyaratan minimum 4,50 MPa. Namun, beberapa hasil pengujian individual masih berada di bawah batas minimum tersebut. Pengujian *core drill* menghasilkan kuat tekan berkisar antara 27,39–37,26 MPa dengan rata-rata 34,50 MPa, yang setara dengan kuat lentur teoritis sebesar 4,41 MPa berdasarkan persamaan empiris Pd T-14-2003. Selisih sebesar 3,71% terhadap hasil pengujian kuat lentur menunjukkan kedekatan nilai secara deskriptif. Analisis statistik deskriptif menghasilkan standar deviasi sebesar 0,35 MPa dan koefisien variasi sebesar 7,39%, yang berdasarkan kriteria pengujian di lapangan menunjukkan bahwa konsistensi mutu beton antar sampel masih perlu ditingkatkan. Secara keseluruhan, hasil pengujian pada segmen penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata parameter utama telah memenuhi persyaratan, namun variasi hasil antar sampel menunjukkan perlunya peningkatan pengendalian mutu pada tahap *batching*, pengecoran, *curing*, dan pengawasan. Hasil penelitian ini terbatas pada segmen STA 3+500–STA 4+200 dan tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi mutu seluruh ruas Jalan Tirtayasa.

Kata kunci : Perkerasan Kaku, Kuat Lentur, *Core Drill*, *Slump*, dan Pengendalian Mutu Beton.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the quality control of concrete pavement on the Tirtayasa Road Improvement Project in Bandar Lampung, with a design strength (fs' = 45) kg/cm². The evaluation was based on the results of slump tests, flexural strength tests, and core drill compressive strength tests, as well as descriptive statistical analysis for the segment from STA 3+500 to STA 4+200. The results showed that slump values ranged from 6.0 to 7.5 cm with an average of 6.83 cm, meeting the requirements of the 2018 General Specifications for Public Works, Revision 2. Flexural strength values ranged from 4.19 to 5.62 MPa with an average of 4.58 MPa, exceeding the minimum requirement of 4.50 MPa. However, some individual test results still fell below this minimum threshold. Core drill testing yielded compressive strengths ranging from 27.39 to 37.26 MPa, with an average of 34.50 MPa, which is equivalent to a theoretical flexural strength of 4.41 MPa based on the empirical equation Pd T-14-2003. The 3.71% difference in flexural strength test results indicates a close match in values from a descriptive perspective. Descriptive statistical analysis yielded a standard deviation of 0.35 MPa and a coefficient of variation of 7.39%, which—based on field testing criteria—indicates that the consistency of concrete quality across samples still needs to be improved. Overall, the test results for the study segment indicate that the average values of the key parameters meet the requirements; however, the variation in results among samples highlights the need for improved quality control during the batching, casting, curing, and monitoring stages. The findings of this study are limited to the segment between STA 3+500 and STA 4+200 and are not intended to represent the quality conditions of the entire Tirtayasa Road.

Keywords **:** *Rigid Pavement, Flexural Strength, Core Drill, Slump, and Concrete Quality Control.*

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur jalan berperan penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, pemerataan pembangunan, serta kelancaran mobilitas masyarakat dan distribusi barang maupun jasa. Jalan yang berkualitas mampu meningkatkan konektivitas antar wilayah sehingga mendorong aktivitas ekonomi dan kesejahteraan masyarakat [1]. Oleh karena itu, pembangunan jalan memerlukan perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian mutu yang baik agar umur layan perkerasan sesuai dengan yang direncanakan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan [2]. Keberhasilan proyek konstruksi sangat dipengaruhi oleh penerapan manajemen konstruksi yang efektif dalam mengendalikan mutu, biaya, dan waktu pelaksanaan. Menurut Hafnidar A. [3], manajemen konstruksi mencakup proses perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian proyek melalui pemanfaatan sumber daya secara efektif dan efisien. Penerapan manajemen proyek yang baik turut menjamin mutu pekerjaan melalui pengendalian metode kerja, penggunaan material yang memenuhi spesifikasi, serta pelaksanaan *quality control* secara berkelanjutan [4]. Perkerasan beton semen (*rigid pavement*) banyak diterapkan pada jalan dengan volume lalu lintas tinggi karena memiliki kapasitas struktur yang besar dan umur layan yang lebih panjang dibandingkan perkerasan lentur [5]. Kinerja perkerasan kaku sangat dipengaruhi oleh mutu beton, yang umumnya dievaluasi berdasarkan kuat lentur (*flexural strength*) sebagai parameter utama. Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2[6] menetapkan kuat lentur minimum beton umur 28 hari sebesar 4,50 MPa. Dalam penelitian ini seluruh hasil pengujian disajikan dalam satuan MPa agar sesuai dengan Sistem Internasional (SI) dan ketentuan spesifikasi tersebut.

Selain kuat lentur, mutu beton dapat dievaluasi melalui pengujian kuat tekan beton inti (*core drill*) untuk menggambarkan kondisi beton aktual di lapangan. Evaluasi mutu juga perlu didukung oleh analisis statistik menggunakan nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi sehingga tingkat keseragaman mutu beton dapat dinilai secara lebih objektif [7]. Proyek Peningkatan Jalan Tirtayasa di Kota Bandar Lampung dipilih sebagai objek penelitian karena menerapkan pengendalian mutu melalui pengujian *slump*, kuat lentur, dan *core drill*. Ketersediaan data tersebut memungkinkan evaluasi kesesuaian mutu beton terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Penelitian terdahulu telah mengevaluasi mutu perkerasan beton berdasarkan parameter seperti *slump*, kuat lentur, dan kuat tekan. Namun, kajian yang mengintegrasikan pengujian beton inti (*core drill*) dengan analisis statistik untuk menilai kesesuaian dan keseragaman mutu beton masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengendalian mutu perkerasan beton pada Proyek Peningkatan Jalan Tirtayasa, Bandar Lampung, melalui analisis hasil pengujian *slump*, kuat lentur beton umur 28 hari, kuat tekan beton inti (*core drill*), serta analisis statistik berupa nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi untuk menilai kesesuaian mutu beton terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perkerasan Beton Semen (Rigid Pavement)

Perkerasan beton semen (*rigid pavement*) merupakan jenis konstruksi perkerasan jalan yang menggunakan beton semen sebagai lapisan utama penahan beban lalu lintas. Jenis perkerasan ini banyak diterapkan pada ruas jalan dengan volume lalu lintas tinggi karena memiliki kapasitas struktur yang tinggi, mampu menahan beban berulang, serta memiliki umur layan yang lebih panjang dibandingkan perkerasan lentur. Kinerja perkerasan kaku sangat dipengaruhi oleh mutu beton yang digunakan, sehingga pengendalian mutu selama proses konstruksi menjadi faktor penting untuk menjamin kekuatan, ketahanan, dan umur layan sesuai dengan spesifikasi yang diprasyaratkan [8]. Pada pekerjaan perkerasan beton semen, mutu beton umumnya dievaluasi berdasarkan kuat lentur karena pelat beton menerima tegangan lentur akibat beban lalu lintas. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, kuat lentur minimum beton umur 28 hari untuk pengendalian mutu produksi adalah sebesar 4,50. Spesifikasi standar kualitas beton kelas P yang digunakan pada pekerjaan perkerasan beton semen mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2. Parameter yang diprasyaratkan meliputi ukuran maksimum agregat kasar, nilai *slump*, rasio air-semen (W/C), kadar air, kadar semen, agregat halus, agregat kasar, serta kekuatan minimum beton umur 28 hari, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Standar Kualitas Beton [6]

Standar Kualitas	Beton Kelas P
Ukuran Maksimum Agregat Kasar (mm)	25
Slump (cm)[2]	5 ± 2
Perbandingan semen/air W/C (%)	40
Kadar Air C (kg/cm^3)	153
Kadar Semen C (kg/cm^3)	340
Agregat Halus S (kg/cm^3)	817
Agregat Kasar G (kg/cm^3)	1090
Kekuatan Minimun 28 hari (kg/cm^2)	450

2.2. Pengendalian Mutu Beton

Pengendalian mutu merupakan rangkaian kegiatan yang bertujuan untuk memastikan bahwa mutu beton yang dihasilkan memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Pada pekerjaan perkerasan beton semen, pengendalian mutu dilakukan sejak tahap produksi beton segar hingga beton mengeras melalui serangkaian pengujian, antara lain *slump test*, pengujian kuat lentur, dan pengujian beton inti (*core drill*). Selain itu, analisis statistik juga digunakan untuk mengevaluasi tingkat keseragaman mutu beton sehingga kualitas pelaksanaan pekerjaan dapat dinilai secara lebih objektif [9].

2.3. Pengujian Slump

Pengujian *slump* dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) beton segar. Nilai *slump* mencerminkan kemudahan beton dalam proses pengangkutan, penempatan, dan pemadatan tanpa mengalami segregasi maupun *bleeding* [10]. Pengujian dilakukan sesuai dengan SNI 03-1972-1990 menggunakan kerucut Abrams. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *slump* yang diprasyaratkan untuk beton kelas P berada pada rentang 5 ± 2 cm [11].

2.4. Kuat Lentur Beton

Kuat lentur (*flexural strength*) merupakan kemampuan beton dalam menahan tegangan tarik akibat pembebanan lentur hingga terjadi keruntuhan. Pada perkerasan beton semen, parameter ini digunakan sebagai dasar penerimaan mutu karena pelat beton bekerja dominan menerima beban lentur akibat lalu lintas kendaraan. Pengujian kuat lentur dilakukan berdasarkan SNI 4431:2011 [12] menggunakan metode pembebanan dua titik (*two-point loading*). Nilai kuat lentur yang memenuhi persyaratan menunjukkan bahwa beton memiliki kemampuan yang memadai dalam menahan beban lalu lintas dan mengurangi potensi retak dini pada perkerasan. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, kuat lentur beton umur 28 hari untuk percobaan campuran ditetapkan minimum 4,7 MPa, sedangkan untuk pengendalian produksi pada perkerasan beton semen ditetapkan minimum 4,5 MPa. Persyaratan tersebut menjadi acuan penerimaan mutu beton dalam penelitian ini, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Standar Minimum Kuat Lentur Beton Semen Pada Usia 28 Hari Untuk Aplikasi Perkerasan Jalan [6]

Uraian	Metode Pengujian	Nilai
Kuat Lentur pada umur 28 hari untuk percobaan campuran min (MPa)	SNI 4431:2011	4,7
Kuat lentur pada umur 28 hari untuk pada perkerasan beton semen (pengendalian produksi) min (MPa)	SNI 4431:2011	4,5

Perhitungan kuat lentur beton dilakukan berdasarkan SNI 4431:2011 dengan rumus persamaan 1

$$\sigma = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad \text{..... (1)}$$

Dimana: σ adalah Kuat lentur (MPa) , P adalah Beban maksimum (N), L adalah Panjang bentang (mm), b adalah Lebar benda uji (mm), h adalah Tinggi benda uji (mm).

2.5. Pengujian Beton Inti (*Core Drill*)

Pengujian beton inti (*core drill*) merupakan metode pengambilan sampel beton silinder secara langsung dari struktur atau perkerasan yang telah mengeras. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui mutu beton aktual di lapangan serta memverifikasi kesesuaiannya dengan mutu rencana. Menurut SNI 2492:2018 [13], hasil pengujian beton inti dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas pelaksanaan konstruksi serta dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium guna mengetahui tingkat kesesuaian mutu beton yang telah terpasang.

Perhitungan kuat tekan beton inti dilakukan menggunakan Persamaan (2).

$$fc' = \frac{p\ x\ k}{(\frac{3,14}{4})\emptyset^2} \quad \text{..... (2)}$$

Dimana fc' adalah Kuat tekan dalam Mpa, P adalah beban maksimum yang diterima benda uji (N), ∅ adalah diameter rata-rata dalam mm, k adalah adalah faktor koreksi rasio panjang terhadap diameter. Faktor koreksi kuat tekan beton inti ditentukan berdasarkan rasio panjang terhadap diameter (L/D) benda uji. Pada penelitian ini, benda uji memiliki rasio L/D sebesar 2,00 sehingga digunakan faktor koreksi sebesar 1,04. Faktor koreksi berdasarkan variasi rasio L/D disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Faktor Koreksi Rasio Panjang Terhadap Diameter (L/D) [13]

Rasio L/D	Faktor Koreksi
2,00	1,04
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87

2.6. Hubungan Antara Kuat Tekan (fc') dan Kuat Lentur (fs') Beton

Hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur beton ini suatu cara bertujuan untuk mengonversi antara dua jenis pengujian dengan ketentuan jenis mutu beton yang berbeda [14]. Dalam Pd T-14-2003 untuk korelasi antara kuat lentur dengan kuat tekan beton dapat dihitung dengan persamaan (3) :

$$fs = \mathrm{k}\sqrt{fc'} \quad \text{..... (3)}$$

Dimana fc' adalah Kuat tekan beton karakteristik 28 hari (kg/cm2), fs adalah kuat lentur 28 (kg/cm2), k adalah konstanta, 0,7 untuk agregat tidak dipecah dan 0,75 untuk agregat dipecah

2.7. Analisis Statistik Mutu Beton

Evaluasi mutu beton tidak hanya dilakukan berdasarkan hasil pengujian mekanis, tetapi juga melalui analisis statistik deskriptif untuk menggambarkan karakteristik dan tingkat keseragaman mutu beton. Parameter yang digunakan meliputi nilai rata-rata (*mean*), standar deviasi, dan koefisien variasi (CV). Nilai rata-rata menunjukkan kecenderungan mutu beton secara umum, standar deviasi menggambarkan tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-rata, sedangkan koefisien variasi digunakan untuk menilai tingkat keseragaman mutu beton. Penilaian koefisien variasi mengacu pada SNI 03-6815-2002, dengan semakin kecil nilai koefisien variasi menunjukkan konsistensi mutu beton yang semakin baik [7]. Perhitungan nilai rata-rata mengacu pada [15] dan dinyatakan menggunakan Persamaan (4):

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{n} \quad \text{..... (4)}$$

Dimana $\bar{x}$ adalah rata-rata, x_i Adalah nilai data, n adalah jumlah data. Perhitungan standar deviasi dihitung menggunakan Persamaan (5):

$$\mathrm{s} = \sqrt{\frac{\Sigma(xi-\bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{..... (5)}$$

Dimana xi adalah data pada sub grup atau sampel yang diamati, n adalah banyaknya sampel dalam tiap observasi, $\bar{x}$ adalah rata-rata.

Nilai koefisien variasi dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{..... (6)}$$

Dimana V adalah Koefisien variasi, $\bar{X}$ adalah rata-rata, S adalah simpangan baku.

Terdapat beberapa kriteria standar control beton untuk koefisien variasi [16]. Standar tersebut pada penelitian ini, meliputi nilai koefisien variasi yang digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi tingkat keseragaman mutu beton perkerasan kaku berdasarkan hasil pengujian kuat lentur beton umur 28 hari dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Standar Kontrol beton untuk koefisien variasi [16]

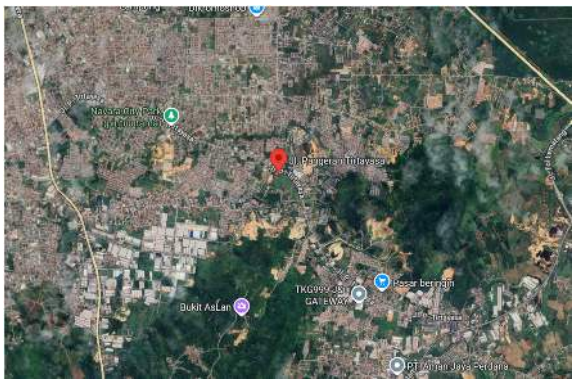
Variasi keseluruhan					
Kelas Operasi	**Koefisien variasi untuk control yang berbeda, persen**				
	Terbaik	**Sangat Baik**	**Baik**	**Cukup**	**Kurang**
Pengujian di lapangan	Dibawah 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	5,0 – 6,0	Di atas 6,0
Percobaan laboratorium	Dibawah 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	Di atas 5,0

3. METODE PENELITIAN

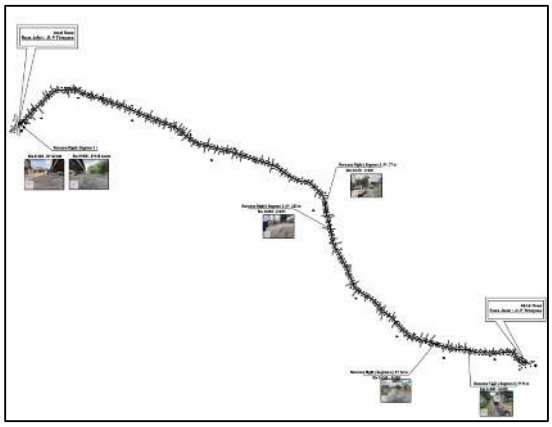
Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan evaluatif untuk menilai pengendalian mutu perkerasan beton berdasarkan hasil pengujian lapangan dan laboratorium. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap persyaratan teknis yang berlaku saat pelaksanaan, yaitu Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, sebagai acuan pada Proyek Peningkatan Jalan Tirtayasa yang dimulai Mei 2025. Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 tidak digunakan karena diterbitkan setelah pelaksanaan pekerjaan. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan, pengolahan, analisis data, dan evaluasi mutu beton.

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada Proyek Peningkatan Jalan Tirtayasa yang berlokasi di Kelurahan Sukabumi, Kecamatan Sukabumi, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung. Ruas jalan yang dikerjakan memiliki panjang sekitar 6.582 m (STA 0+000–STA 6+582), sedangkan objek penelitian dibatasi pada segmen STA 3+500–STA 4+200 dengan panjang 700 m. Segmen tersebut dipilih berdasarkan ketersediaan data hasil pengujian mutu beton yang lengkap dan terdokumentasi dengan baik selama pelaksanaan pekerjaan, sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan analisis pengendalian mutu beton. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dibatasi pada kondisi mutu beton pada segmen STA 3+500–STA 4+200 dan tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan secara statistik kondisi mutu keseluruhan ruas Jalan Tirtayasa sepanjang 6.582 m. Konstruksi pada segmen penelitian menggunakan perkerasan beton semen (*rigid pavement*) dengan tebal pelat beton 30 cm di atas lapis pondasi beton kurus (*lean concrete*) setebal 10 cm. Berdasarkan dokumen kontrak, mutu rencana beton ditetapkan sebesar fs = 45 kg/cm² atau setara dengan 4,41 MPa. Seluruh hasil pengujian dalam penelitian ini disajikan dalam satuan MPa untuk menjaga konsistensi penyajian dan analisis data. Lokasi penelitian dan *Site Plan* penelitian terdapat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi Pekerjaan



Gambar 2. *Site Plan* Pekerjaan

3.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari hasil pengujian lapangan dan laboratorium selama pelaksanaan pekerjaan konstruksi pada segmen STA 3+500–STA 4+200. Data tersebut dipilih karena memiliki kelengkapan hasil pengujian dan dokumentasi yang mendukung analisis pengendalian mutu beton. Data penelitian meliputi hasil pengujian *slump*, kuat lentur beton umur 28 hari, serta kuat tekan beton inti (*core drill*). Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis secara statistik deskriptif untuk mengevaluasi kesesuaian dan tingkat keseragaman mutu beton terhadap persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

a) hasil pengujian *slump* beton segar;
b) 15 sampel hasil pengujian kuat lentur beton umur 28 hari;
c) 15 sampel hasil pengujian kuat tekan beton inti (*core drill*).

Sebanyak 15 sampel kuat lentur dan 15 sampel *core drill* merupakan data hasil pengujian yang tersedia dan digunakan dalam analisis pada segmen STA 3+500–STA 4+200. Jumlah sampel tersebut tidak ditentukan melalui metode pengambilan sampel acak, tetapi didasarkan pada ketersediaan data hasil pengujian yang lengkap pada segmen penelitian. Oleh karena itu, data yang dianalisis digunakan untuk mengevaluasi mutu beton pada segmen penelitian dan tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan secara statistik kondisi mutu keseluruhan ruas Jalan Tirtayasa sepanjang 6.582 m.

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis melalui beberapa langkah, dimulai dari identifikasi permasalahan dan studi literatur, pengumpulan data sekunder, pengolahan dan analisis data, hingga evaluasi dan penarikan kesimpulan. Data yang terkumpul kemudian diverifikasi, direkapitulasi berdasarkan jenis pengujian, dan disusun dalam format analisis. Data hasil pengujian *slump*, kuat lentur, dan kuat tekan beton inti (*core drill*) selanjutnya dianalisis secara komparatif dengan membandingkan hasil pengujian terhadap persyaratan teknis yang berlaku [17]. Analisis statistik deskriptif dilakukan menggunakan nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi untuk menilai tingkat keseragaman mutu beton. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian mutu beton terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 serta menarik Kesimpulan. Penelitian dilakukan secara sistematis melalui beberapa langkah sebagai berikut :

a) Studi literatur mengenai pengendalian mutu perkerasan beton semen.
b) Pengumpulan data hasil pengujian *slump*, kuat lentur, dan beton inti (*core drill*) dari proyek.
c) Pengolahan data hasil pengujian.
d) Analisis nilai rata-rata (*mean*), standar deviasi, dan koefisien variasi.
e) Evaluasi hasil pengujian berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.
f) Penyusunan kesimpulan penelitian.

3.4 Metode Analisis.

Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Parameter yang dianalisis meliputi:

a) nilai *slump* untuk mengevaluasi *workability* beton segar;
b) kuat lentur beton umur 28 hari sebagai dasar penerimaan mutu;
c) kuat tekan beton inti (*core drill*) untuk mengevaluasi mutu beton aktual di lapangan;
d) nilai rata-rata (*mean*), standar deviasi, dan koefisien variasi untuk mengetahui tingkat keseragaman mutu beton.

Selanjutnya dilakukan perbandingan antara hasil pengujian kuat lentur dan hasil konversi kuat tekan beton inti menggunakan persamaan empiris Pd T-14-2003 [14] sehingga dapat diketahui kesesuaian mutu beton rencana dengan mutu beton aktual di lapangan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian *Slump*

Pengujian *slump* dilakukan sesuai SNI 1972:2008 untuk mengevaluasi *workability* beton segar. Hasil pengujian menunjukkan nilai *slump* sebesar 6,0 cm, 7,5 cm, dan 7,0 cm, dengan nilai rata-rata 6,83 cm dan FAS sebesar 0,31. Nilai *slump* tersebut berada dalam rentang persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu 5–7,5 cm, sehingga beton segar memiliki *workability* yang memenuhi persyaratan untuk pelaksanaan pengecoran.

4.2 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

Pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan metode *two-point loading* sesuai standar SNI 4431:2011 di laboratorium. Hasil pengujian laboratorium terhadap 15 benda uji menunjukkan nilai yang bervariasi antara 4,19 hingga 5,62 MPa. Secara umum, sebagian besar hasil pengujian tersebut telah memenuhi batas spesifikasi minimum sebesar 4,50 MPa yang ditetapkan untuk pengendalian mutu produksi. Rincian lengkap dari hasil pengujian kuat lentur ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Lentur Beton

Nomor Sampel	Tanggal cor	Dimensi Benda Uji			Panjang Bentang (L')	Beban Maksimum (P')	Jarak Retak Dari Tumpuan Terdekat (a)	Kuat lentur Balok (σ)
		b_{rerata}	h_{rerata}	L				
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(mm)	(MPa)
Sampel 1	13/07/2025	152	151	600	450	38	201,5	5,01
Sampel 2	11/07/2025	151	151	600,7	450	34	183,8	4,52
Sampel 3	09/07/2025	152	151	600	450	33	187,5	4,29
Sampel 4	29/07/2025	151	151	600,7	450	33,4	208,3	4,37
Sampel 5	17/06/2025	150	151	601	450	34,6	196,5	4,56
Sampel 6	18/06/2025	151,7	151	600,7	450	36,2	218,8	4,71
Sampel 7	14/06/2025	151	151	600	450	34	209,8	4,45
Sampel 8	27/07/2025	151,3	151,7	600	450	35	173,8	4,53
Sampel 9	31/07/2025	150,3	151	600	450	32,7	184	4,29
Sampel 10	22/07/2025	151	151	600	450	32	206,3	4,19
Sampel 11	14/06/2025	152	151	600	450	43,3	166	5,62
Sampel 12	20/06/2025	152	151	600	450	34	177,9	4,50
Sampel 13	22/06/2025	151	151	600	450	34	182	4,39
Sampel 14	27/06/2025	152	151	600	450	34	175,2	4,63
Sampel 15	08/07/2025	151	151	600,7	450	34	191,1	4,68
Rata Rata								4,58

Sumber : Hasil Uji Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bandar Lampung (2025)

Nilai kuat lentur berkisar antara 4,19–5,62 MPa dengan rata-rata 4,58 MPa, di atas batas minimum 4,50 MPa berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Namun, enam sampel (3, 4, 7, 9, 10, dan 13) di bawah batas minimum, menunjukkan variasi mutu dan perlunya peningkatan pengendalian pengecoran serta perawatan beton. Hasil statistik menunjukkan standar deviasi 0,35 MPa dan koefisien variasi 7,39%. Berdasarkan Tabel 4, nilai ini termasuk kelas

operasi kurang untuk pengujian lapangan karena melebihi 6,0%, sehingga keseragaman mutu beton perlu ditingkatkan.

4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Inti Beton (*Core drill*)

Pengujian kuat tekan beton inti (*core drill*) dilakukan sesuai SNI 2492:2018 tentang Metode Pengambilan dan Pengujian Inti Beton Hasil Pemboran dan Balok Beton Hasil Pemotongan. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi mutu beton aktual yang telah terpasang di lapangan. Hasil pengujian terhadap 15 sampel disajikan pada Tabel 6, dengan nilai kuat tekan berkisar antara 27,39–37,26 MPa dan rata-rata 34,50 MPa.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Inti Beton (*Core drill*)

No	Nama Benda Uji	Tanggal Pengujian	Berat Benda Uji	Tinggi (L)	Diameter (D)	Rasio (L/D)	Faktor Koreksi Tinggi	Beban Tekan Maksimun Terkoreksi Mesin	Kuat Tekan Beton Inti
			(Gram)	(mm)	(mm)			(N)	(Mpa)
1	3+500	07-Nov-25	3684,7	200	100	2	1,04	270424,8	35,76
2	3+550	07-Nov-25	3679,4	200	100	2	1,04	269889,2	35,83
3	3+600	07-Nov-25	3689,2	200	100	2	1,04	246002,4	32,59
4	3+650	07-Nov-25	3598,4	200	100	2	1,04	269907,4	35,76
5	3+700	07-Nov-25	3686,9	200	100	2	1,04	241815,7	32,04
6	3+750	07-Nov-25	3597,4	200	100	2	1,04	281022,6	37,23
7	3+800	07-Nov-25	3637,5	200	100	2	1,04	276465,9	36,63
8	3+850	07-Nov-25	3571,9	200	100	2	1,04	262550,4	34,78
9	3+900	07-Nov-25	3636,5	200	100	2	1,04	281264,4	37,26
10	3+950	07-Nov-25	3469,6	200	100	2	1,04	271576,7	35,98
11	4+000	07-Nov-25	3618	200	100	2	1,04	206705,1	27,39
12	4+050	07-Nov-25	3597,4	200	100	2	1,04	258601,7	34,26
13	4+100	07-Nov-25	3650,6	200	100	2	1,04	237693,6	31,49
14	4+150	07-Nov-25	3686,3	200	100	2	1,04	240986,9	31,93
15	4+200	07-Nov-25	3678,5	200	100	2	1,04	256505,2	33,98
	Rata Rata								34,5

Sumber : Hasil Uji Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bandar Lampung (2025)

Nilai kuat tekan beton inti (*core drill*) berkisar antara 27,39–37,26 MPa dengan rata-rata 34,50 MPa. Nilai rata-rata tersebut digunakan untuk menggambarkan mutu beton pada lokasi pengambilan sampel dan dikonversi menjadi kuat lentur teoritis menggunakan hubungan empiris Pd T-14-2003. Nilai minimum 27,39 MPa ditemukan pada STA 4+000 dan menunjukkan adanya variasi mutu antar lokasi. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi pengecoran, pemadatan, perawatan beton, maupun kemungkinan kerusakan mikro akibat proses pengeboran. Namun, karena penelitian tidak melakukan pemeriksaan khusus pada lokasi tersebut, penyebab spesifik nilai rendah tidak dapat dipastikan. Analisis statistik menghasilkan standar deviasi 2,55 MPa dan koefisien variasi 7,39%, yang menunjukkan adanya penyebaran hasil kuat tekan antar lokasi. Dengan demikian, meskipun nilai rata-rata menggambarkan mutu beton pada segmen penelitian, nilai minimum menunjukkan bahwa konsistensi mutu aktual masih perlu diperhatikan.

4.4 Hubungan Kuat Lentur dan Core Drill

Pengujian kuat lentur dan kuat tekan beton inti (*core drill*) digunakan untuk mengevaluasi mutu perkerasan beton dari parameter yang berbeda. Kuat lentur digunakan sebagai parameter utama dalam evaluasi mutu perkerasan beton semen, sedangkan pengujian *core drill* memberikan informasi mengenai kondisi kuat tekan beton yang telah terpasang di lapangan. Untuk membandingkan kedua hasil pengujian dalam satu parameter, nilai kuat tekan beton inti rata-rata dikonversi menjadi kuat lentur teoritis menggunakan persamaan empiris Pd T-14-2003 untuk agregat pecah (*crushed aggregate*) dengan konstanta k = 0,75. Berdasarkan perhitungan tersebut, kuat tekan rata-rata sebesar 34,50 MPa menghasilkan kuat lentur teoritis sebesar 4,41 MPa.

$f_s = \text{k} \sqrt{fc'}$,maka hasil $f_s = 0{,}75 \sqrt{34{,}19} = 4{,}41$ Mpa.

Perbandingan antara kuat lentur hasil pengujian dan kuat lentur teoritis hasil konversi *core drill* disajikan pada Tabel 7. Hasil pengujian menunjukkan kuat lentur rata-rata sebesar 4,58 MPa,

sedangkan kuat lentur teoritis hasil konversi core drill sebesar 4,41 MPa. Kedua nilai tersebut memiliki selisih sebesar 0,17 MPa atau 3,71%. Perbandingan antara kuat lentur hasil pengujian dan kuat lentur hasil konversi dari kuat tekan beton inti disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Kuat Lentur dan Hasil Konversi *Core drill*

Parameter	Nilai (Mpa)
Kuat Lentur Hasil Pengujian	4,58
Kuat Lentur Hasil Konversi *Core drill*	4,41
Selisih	0,17
Persentase Selisih	3,71%

Sumber : Data Hasil Perhitungan

Selisih sebesar 3,71% menunjukkan adanya kedekatan nilai secara deskriptif antara hasil kuat lentur rata-rata dan kuat lentur teoritis hasil konversi core drill. Namun, perbandingan nilai rata-rata tersebut belum dapat digunakan untuk membuktikan adanya hubungan statistik antara kedua metode pengujian. Analisis mengenai hubungan antara kuat lentur dan core drill memerlukan pengujian statistik lebih lanjut, seperti analisis korelasi atau regresi, yang tidak dilakukan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, hasil perbandingan dalam penelitian ini hanya digunakan untuk menggambarkan kedekatan hasil kedua parameter secara deskriptif. [18]. Hasil pengujian core drill tetap memberikan informasi tambahan mengenai kondisi beton yang telah terpasang di lapangan. Oleh karena itu, penggunaan pengujian slump, kuat lentur, dan core drill, yang dilengkapi dengan analisis statistik, memberikan gambaran pengendalian mutu beton yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu parameter pengujian.

4.5 Evaluasi Penerimaan Mutu Beton

Evaluasi penerimaan mutu beton pada segmen STA 3+500–STA 4+200 dilakukan berdasarkan hasil pengujian *slump*, kuat lentur, *core drill*, dan analisis statistik. Nilai *slump* berada dalam rentang yang diprasyaratkan dengan rata-rata 6,83 cm, sedangkan kuat lentur rata-rata 4,58 MPa berada di atas batas minimum 4,50 MPa. Namun, enam dari lima belas sampel memiliki kuat lentur di bawah batas minimum, yang menunjukkan adanya variasi mutu antar sampel. Koefisien variasi sebesar 7,39% termasuk kategori kurang berdasarkan kriteria pengujian lapangan pada Tabel 4 karena melebihi 6,0%, sehingga keseragaman mutu masih perlu ditingkatkan. Hasil *core drill* menunjukkan kuat tekan 27,39–37,26 MPa, dengan nilai minimum 27,39 MPa pada STA 4+000, yang menunjukkan adanya variasi mutu antar lokasi. Dengan demikian, mutu beton pada segmen tersebut memenuhi persyaratan secara rata-rata berdasarkan parameter slump dan kuat lentur, tetapi belum menunjukkan keseragaman mutu yang optimal. Hasil ini tidak dapat digeneralisasikan untuk seluruh ruas Jalan Tirtayasa sepanjang 6.582 m dan hanya berlaku pada data serta sampel segmen STA 3+500–STA 4+200. Oleh karena itu, pengendalian mutu pada proses produksi, pengecoran, pemadatan, dan perawatan beton perlu ditingkatkan untuk memperoleh mutu yang lebih konsisten.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pada segmen STA 3+500–STA 4+200, mutu perkerasan beton secara rata-rata telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Nilai *slump* rata-rata 6,83 cm memenuhi persyaratan *workability*, sedangkan kuat lentur rata-rata 4,58 MPa melampaui batas minimum 4,50 MPa. Namun, beberapa hasil individual berada di bawah batas minimum, menunjukkan adanya variasi mutu antar sampel sehingga nilai rata-rata belum sepenuhnya mencerminkan keseragaman mutu. Hasil *core drill* menunjukkan kuat tekan rata-rata 34,50 MPa dengan rentang 27,39–37,26 MPa, yang setara dengan kuat lentur teoritis 4,41 MPa. Selisih 3,71% terhadap hasil kuat lentur menunjukkan kedekatan nilai secara deskriptif, tetapi belum membuktikan hubungan statistik kedua metode. Koefisien variasi sebesar 7,39% termasuk kategori kurang berdasarkan Tabel 4, sehingga konsistensi mutu beton masih perlu ditingkatkan melalui pengendalian pada tahap produksi dan pelaksanaan. Kesimpulan penelitian terbatas pada data dan sampel segmen STA 3+500–STA 4+200 dan tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi mutu seluruh ruas Jalan Tirtayasa sepanjang 6.582 m.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Novelia, J. Purnomo, and N. Aida, "Tinjauan Ulang Struktur Pelat Lantai Jembatan Girder di Desa Kepuluk Kecamatan Sungai Melayu Rayak," *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipi*, pp. 53–67, 2025.

[2] Pemerintah Republik Indonesia., *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan*. indonesia, 2004.

[3] R. Hafnidar A, *Manajemen Proyek Konstruksi*, vol. 99. Yogyakarta: Deepublish, 2016.

[4] Y. Mauliana, M. Cambodia, and S. Farlianti, *Manajemen Konstruksi*, vol. 57. Sumatra Barat: Yayasan Pendidikan Cendekia Muslim, 2023.

[5] S. Sukirman, *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*, vol. 244. Bandung: Nova, 2010.

[6] Direktorat Jenderal Bina Marga, "Spesifikasi Umum 2018 Untuk Perkerjaan Kontruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)," Jakarta, Indonesia, NOMOR 16.1/SE/Db/2020, Oct. 2018.

[7] T. Mulyono, *Teknologi Beton*, vol. 342. Yogyakarta: Andi, 2004.

[8] S. Subagyo and D. Nur Wijaya, "Pengendalian Pekerjaan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Interchange Bandara Adi Soemarmo Solo," *CivETech*, vol. 3, pp. 66–81, 2021, [Online]. Available: https://jurnal.ucy.ac.id/index.php/CivETech/issue/archive

[9] I. Triando Bago, Suprayogi, and G. Christado Purba, "Pengendalian Mutu Struktur Lapis Perkerasan Kaku Jalan Tol Jakarta-Cikampek Ii Selatan Paket 2a," *Jurnal Teknik SILITEK*, vol. 05, no. 03, pp. 1780–1792, 2025.

[10] J. Abdillah and S. P. Ayuni, "Analisis Pengendalian Mutu, Waktu, Dan Metode Pelaksanaan Pekerjaan Beton Pada Proyek Jalan Tol Medan-Binjai," *Technopex-2025 Institut Teknologi Indonesia*, vol. ISSN: 2654-489X, pp. 741–745, 2025.

[11] O. : Nurokhman, I. Suharyanto, and U. Rochmawati, "Evaluasi Mutu Beton Dari Berbagai Ready Mix Pada Gedung Parkir Yogyakarta International Airport," *CivETech*, vol. 3(2), pp. 55–65, 2021, [Online]. Available: https://jurnal.ucy.ac.id/index.php/CivETech/issue/archive

[12] Badan Standardisasi Nasional, *Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan*. Indonesia, 2011. [Online]. Available: www.bsn.go.id

[13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2492:2018 Metode pengambilan dan pengujian inti beton hasil pemboran dan balok beton hasil pemotongan*. Indonesia, 2018. [Online]. Available: www.bsn.go.id

[14] Departemen Permukiman dab Prasarana Wilayah, *Perencanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*. Indonesia, 2003.

[15] D. H. Irwan, *Pengendalian Kualitas Statistik (Pendekatan Teoritis dan Aplikatif)*, vol. 307. Bandung: Penerbit Alfabeta Bandung , 2015.

[16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-6815-2002 Tata cara mengevaluasi hasil uji kekuatan beton*. Bandung, 2002, pp. 8–16.

[17] A. N. Wulandari and S. Wacono, "Pengendalian Mutu Beton Pada Pekerjaan Rigid Pavement Proyek Peningkatan Jalan," 2025.

[18] A. M. Neville, *Properties of concrete.*, 5th ed. Pearson Education Limited, 2011.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 66-77

Distribusi Spasial Amonia (NH_3-N) Pada Air Tambak di Kawasan TPA Griya Jabon Kabupaten Sidoarjo Menggunakan Metode *Ordinary Kriging*

Adi Supriyanto[1*], Listin Fitrianah[2]

[1,2]Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Nahdlatul Ulama Sidoarjo
*Email Korespondensi: adisupri443@gmail.com

ABSTRAK

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan salah satu sumber pencemar lingkungan yang berpotensi menghasilkan lindi dengan kandungan senyawa kimia kompleks, salah satunya nitrogen amonia (NH_3-N). Keberadaan lindi yang masuk ke lingkungan sekitar dapat mencemari perairan tambak dan menurunkan kualitas air, sehingga berdampak negatif terhadap ekosistem akuatik dan kegiatan budidaya perikanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial konsentrasi amonia (NH_3-N) pada air tambak di kawasan sekitar TPA Griya Jabon, Sidoarjo, serta mengidentifikasi arah gradien dan zona konsentrasi tinggi pencemaran. Metode yang digunakan adalah pendekatan geostatistik dengan teknik interpolasi *Ordinary Kriging* yang diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Data yang digunakan berupa hasil uji laboratorium kadar NH_3-N dari 10 sampel air tambak pada beberapa titik pengambilan yang telah ditentukan secara spasial menggunakan *Global Positioning System* (GPS). Analisis laboratorium dilakukan sesuai standar SNI 06-6989.30-2005 menggunakan metode fenat secara spektrofotometri. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi NH_3-N pada seluruh titik sampel berada pada rentang 0,50 ppm hingga 7,30 ppm, di mana 9 dari 10 titik sampel telah melampaui baku mutu lingkungan berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 sebesar 0,5 mg/L. Pola distribusi spasial menunjukkan zona konsentrasi tertinggi (5,22–7,30 ppm) terkonsentrasi di wilayah Semambung dengan gradasi warna merah hingga jingga, sedangkan zona konsentrasi terendah (0,44–1,81 ppm) berada di wilayah Balongtani dan Tambakkalisogo dengan gradasi warna hijau. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran pola distribusi spasial NH_3-N dalam bentuk peta tematik yang informatif, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi area yang berpotensi tercemar dan melebihi baku mutu lingkungan.

Kata kunci : Amonia (NH_3-N), Distribusi Spasial, *Ordinary Kriging*, Lindi dan Tambak.

ABSTRACT

Landfills are a source of environmental pollution that can generate leachate containing complex chemical compounds, one of which is ammonia nitrogen (NH_3-N). Leachate entering the surrounding environment can contaminate pond waters and degrade water quality, thereby negatively impacting aquatic ecosystems and aquaculture activities. This study aims to analyze the spatial distribution of ammonia (NH_3-N) concentrations in pond water in the area surrounding the Griya Jabon Landfill in Sidoarjo, as well as to identify the direction of the gradient and zones of high pollution concentrations. The method used is a geostatistical approach employing the Ordinary Kriging interpolation technique, processed using ArcGIS software. The data consisted of laboratory test results for NH_3-N levels from 10 pond water samples collected at sampling points that were spatially determined using the Global Positioning System (GPS). Laboratory analysis was conducted in accordance with SNI 06-6989.30-2005 standards using the phenate method via spectrophotometry. The results showed that NH_3-N concentrations at all sampling points ranged from 0.50 ppm to 7.30 ppm, with 9 out of 10 sampling points exceeding the environmental quality standard of 0.5 mg/L as stipulated in Government Regulation No. 22 of 2021. The spatial distribution pattern shows that the zone with the highest concentrations (5.22–7.30 ppm) is concentrated in the Semambung area, depicted in shades of red to orange, while the zone with the lowest concentrations (0.44–1.81 ppm) is located in the Balongtani and Tambakkalisogo areas, depicted in shades of green. This study is expected to provide an overview of the spatial distribution pattern of NH_3-N in the form of informative thematic maps, which can then be used to identify areas with potential pollution that exceed environmental quality standards.

***Keywords* :** *Ammonia (NH_3-N), Spatial Distribution, Ordinary Kriging, Leachate, and Ponds.*

1. PENDAHULUAN

Pencemaran air merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk dan intensifikasi aktivitas antropogenik di berbagai wilayah. Perubahan penggunaan lahan, peningkatan volume limbah domestik, serta aktivitas industri dan pengelolaan sampah berkontribusi terhadap penurunan kualitas badan air permukaan maupun air tanah. Badan Pusat Statistik Indonesia menunjukkan bahwa kualitas air di beberapa wilayah di Indonesia masih berada pada kondisi tercemar ringan hingga berat akibat tekanan aktivitas manusia [1]. Sumber pencemar air berasal dari berbagai aktivitas, salah satunya dari pengelolaan sampah pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) yang menghasilkan residu dalam bentuk cair maupun padat. Air lindi yang dihasilkan dari timbunan sampah mengandung berbagai senyawa pencemar yang berpotensi masuk ke lingkungan perairan di sekitarnya. Kandungan senyawa meliputi bahan organik, logam berat, serta senyawa nitrogen yang dapat mempengaruhi kualitas air dalam konsentrasi tertentu. Keberadaan senyawa nitrogen dalam lindi, khususnya dalam bentuk amonia (NH_3-N), sering digunakan sebagai indikator pencemaran karena mencerminkan tingkat dekomposisi bahan organik serta beban limbah yang masuk ke dalam sistem perairan [2]. Kawasan di sekitar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) umumnya memiliki karakteristik penggunaan lahan yang beragam, termasuk aktivitas budidaya perikanan seperti tambak yang dikelola oleh masyarakat. Interaksi antara aktivitas pengelolaan persampahan dan lingkungan sekitarnya berpotensi mempengaruhi kualitas air, terutama melalui proses pergerakan air dalam tanah maupun aliran permukaan [3]. Air lindi dapat mengalami pergerakan secara alami mengikuti gradien hidrologi lingkungan sehingga memungkinkan terjadinya distribusi senyawa terlarut ke area sekitar [4]. Proses tersebut dapat menyebabkan masuknya zat terlarut ke badan air permukaan seperti tambak yang berada di sekitar kawasan TPA. Keberadaan senyawa kimia dalam lindi, apabila berada dalam konsentrasi tertentu, berpotensi mempengaruhi kualitas air tambak serta keseimbangan ekosistem perairan [2].

Lindi atau *leachate* didefinisikan sebagai cairan yang terbentuk akibat masuknya air eksternal, seperti air hujan ke dalam timbunan sampah yang kemudian melarutkan dan membilas materi terlarut termasuk produk hasil dekomposisi biologis sampah. Cairan ini memiliki karakteristik yang sangat kompleks karena mengandung konsentrasi polutan organik dan anorganik yang tinggi, sehingga menjadikannya salah satu limbah cair yang paling sulit ditangani dalam sistem pengelolaan persampahan. Konsentrasi amonia yang tinggi bersifat toksik yang menyebabkan penurunan pasokan oksigen dalam jumlah besar dan perubahan yang tidak diinginkan dalam ekosistem perairan. Amonia beracun bagi ikan yang dibudidayakan secara komersial pada konsentrasi di atas 1,5 mg N/L, dan pada beberapa kasus konsentrasi yang dapat diterima hanya 0,025 mg N/L. Ikan memiliki beberapa mekanisme untuk mentoleransi kelebihan amonia dan mengurangi toksisitas amonia termasuk ekskresi dan konversi. Namun, paparan amonia pada tingkat berlebihan menyebabkan ekskresi amonia terganggu, sehingga terjadi peningkatan penyerapan amonia dan bahkan kematian [5]. Peningkatan konsentrasi nitrogen amonia (NH_3-N) di lingkungan perairan akibat rembesan lindi secara signifikan memperburuk kualitas ekosistem tambak melalui penurunan kadar oksigen terlarut dan gangguan metabolisme biota budidaya. Penelitian Baorong dkk, [6] menyimpulkan terdapat korelasi positif yang sangat signifikan antara tingginya konsentrasi amonia dan nitrit dengan tingkat prevalensi infeksi parasit *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP) pada tambak udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) di Pasuruan, Lamongan, dan Tuban. Hasil analisis menunjukkan udang yang terinfeksi EHP ditemukan pada tambak dengan kualitas air yang buruk, di mana konsentrasi amonia dan nitrit yang melebihi 1 mg/L secara langsung dapat memicu dan meningkatkan risiko penyebaran infeksi parasit yang menghambat pertumbuhan udang.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji dampak lindi terhadap kualitas lingkungan perairan. Penelitian Khan dkk, [7] menunjukkan adanya pencemaran COD dan BOD dengan konsentrasi di atas ambang baku mutu pada air sumur warga di sekitar TPA Kupang Sidoarjo. Sebagian besar studi yang ada masih terbatas pada pengujian titik sampel tunggal secara periodik tanpa memetakan pola persebaran spasialnya secara kontinu. Penggunaan teknik interpolasi geostatistik seperti *Ordinary Kriging* telah terbukti efektif dalam memetakan distribusi logam berat pada tanah sawah di Sidoarjo [8], tetapi aplikasinya untuk memantau sebaran spesifik amonia pada media air tambak yang berbatasan dengan TPA masih sangat

terbatas. Terdapat celah informasi (*gap*) mengenai bagaimana arah gradien sebaran amonia secara spasial di area budidaya kawasan Kupang, Sidoarjo. Metode *Ordinary Kriging* merupakan pendekatan geostatistik yang banyak digunakan dalam analisis spasial untuk mengestimasi nilai suatu parameter pada lokasi yang tidak terukur berdasarkan hubungan spasial antar titik sampel. Metode *Ordinary Kriging* bekerja dengan memanfaatkan model semivariogram untuk menggambarkan tingkat kemiripan atau korelasi antar data berdasarkan jarak dan arah, sehingga mampu menghasilkan estimasi yang lebih akurat [6]. Penerapan *Ordinary Kriging* dalam bidang lingkungan telah digunakan untuk memetakan distribusi berbagai parameter kualitas air, termasuk pencemar berbasis nitrogen, karena kemampuannya dalam mengidentifikasi pola sebaran dan zona konsentrasi tinggi. Keunggulan metode *Ordinary Kriging* terletak pada kemampuannya dalam meminimalkan kesalahan estimasi serta memberikan bobot yang optimal pada setiap titik data berdasarkan struktur spasialnya [7]. Penggunaan metode *Ordinary Kriging* dinilai relevan dalam penelitian kualitas air karena dapat menggambarkan distribusi pencemar secara kontinu dalam suatu wilayah. Pendekatan ini memungkinkan visualisasi sebaran konsentrasi NH_3-N dalam bentuk peta tematik yang informatif. Pemanfaatan *Ordinary Kriging* dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran distribusi spasial amonia secara lebih komprehensif pada kawasan tambak di sekitar TPA.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial konsentrasi NH_3-N pada air tambak di sekitar TPA Griya Jabon Sidoarjo menggunakan metode *Ordinary Kriging*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pola sebaran pencemaran serta menjadi dasar dalam pengelolaan lingkungan tambak secara berkelanjutan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan fasilitas teknis yang menjadi tahap akhir dari sistem manajemen persampahan, berfungsi menampung serta mengolah residu limbah secara aman untuk mencegah degradasi lingkungan [9]. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008, TPA didefinisikan sebagai tempat untuk memproses dan mengembalikan sampah ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan [10]. Komponen utama TPA meliputi sistem pelapisan dasar (*liner*), sistem pengumpulan lindi, sistem pengelolaan gas, dan sistem penutup harian [11]. Dalam konteks lingkungan, TPA berpotensi menghasilkan lindi sebagai hasil perkolasi air melalui timbunan sampah, sehingga pengelolaan TPA harus memperhatikan sistem pengendalian lindi secara optimal sesuai baku mutu lingkungan [4].

2.2 Perairan Tambak

Tambak merupakan ekosistem perairan buatan di kawasan pesisir yang dirancang sebagai media budidaya organisme akuatik. Stabilitas ekosistem ini sangat bergantung pada kondisi parameter fisika dan kimia air yang terjaga, terutama alkalinitas untuk menjaga keseimbangan pH dan metabolisme biota [12]. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 28 Tahun 2017, perairan tambak sebagai bagian dari lingkungan sumber daya ikan dilindungi secara hukum dan wajib dijaga kelestariannya. Standar kualitas air untuk budidaya mengacu pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 yang menetapkan baku mutu parameter fisik dan kimia, termasuk batas maksimum amonia (NH_3-N) sebesar 0,5 mg/L untuk kegiatan budidaya perikanan [13]. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 menjadi landasan utama yang memuat pedoman perlindungan serta pengelolaan lingkungan tersebut [14]. Nilai ambang batas yang ditetapkan dalam regulasi ini berfungsi sebagai acuan baku mutu yang sangat krusial. Keseimbangan ekosistem perairan tambak dapat terjaga secara berkelanjutan melalui kepatuhan terhadap standar parameter tersebut. Pengelola wajib memastikan setiap unsur kualitas air berada dalam batas konsentrasi yang telah ditentukan pemerintah. Rincian mengenai parameter dan batas konsentrasi yang ditetapkan disajikan pada Tabel 1.

Penetapan standar angka baku mutu memiliki tujuan utama untuk menjamin perairan tetap berada dalam kondisi ideal. Kelestarian sumber daya ikan serta pencegahan degradasi lingkungan menjadi fokus utama dari penerapan standar. Setiap parameter kualitas air memiliki

ambang batas spesifik yang harus dipatuhi oleh seluruh pengelola tambak. Pemantauan berkala wajib dilaksanakan melalui mekanisme pengujian laboratorium yang akurat dan terukur. Amanat mengenai prosedur pengujian ini tertuang secara jelas di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 28 Tahun 2017 [15]. Munculnya ketidaksesuaian angka parameter dengan baku mutu menjadi indikator kuat adanya pencemaran di lingkungan perairan. Kondisi tersebut membawa risiko besar bagi stabilitas siklus biologis yang berlangsung di dalam seluruh ekosistem tambak.

Tabel 1. Baku Mutu Kualitas Air

Parameter	Baku Mutu (Satua)	Peran dalam Tambak
Suhu	Deviasi 3 dari alami (°C)	Mempengaruhi laju metabolisme biota
Derajat Keasaman (pH)	6,5–8,5	Menjaga keseimbangan kimiawi air
Oksigen Terlarut (DO)	> 5 (mg/L)	Kebutuhan vital respirasi di dalam air
Salinitas	Sesuai peruntukan (‰)	Menjaga tekanan osmotik tubuh biota
Amonia (NH_3-N)	≤ 0,5 (mg/L)	Mencegah toksisitas yang merusak jaringan

2.3 Lindi

Lindi atau *leachate* merupakan cairan polutan yang timbul dari proses degradasi biokimia sampah organik di area TPA, terbentuk ketika air hujan meresap ke dalam timbunan sampah dan melarutkan berbagai materi organik, unsur hara, serta logam berat [4]. Secara kimiawi, lindi cenderung bersifat basa akibat akumulasi senyawa amonia, dengan volume yang sangat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan dan komposisi sampah [4]. Kandungan lindi meliputi parameter pencemar utama seperti COD, BOD_5, amonia nitrogen (NH_3-N), serta logam berat seperti arsenik (As), kadmium (Cd), nikel (Ni), dan mangan (Mn). Mekanisme persebaran lindi berlangsung melalui infiltrasi vertikal menuju akuifer dan aliran lateral di atas permukaan tanah, dengan radius dampak yang mampu menyebar hingga beberapa kilometer dari sumber pencemaran [15]. Proses pengolahan lindi dilakukan melalui berbagai teknologi seperti UASB, *constructed wetland*, koagulasi-flokulasi, dan klorinasi untuk mereduksi beban cemaran organik sebelum dibuang ke lingkungan [3].

2.4 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan infrastruktur teknologi berbasis komputer untuk mengelola, memanipulasi, dan menganalisis data yang memiliki referensi koordinat spasial terhadap permukaan bumi [16]. SIG mengintegrasikan manajemen basis data dengan kapabilitas visualisasi kartografis tingkat lanjut untuk merepresentasikan fenomena geografis secara dinamis [29]. Data dalam SIG terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu data spasial (titik koordinat, jalan, sungai, batas wilayah) dan data atribut (informasi non-spasial seperti nama pemilik atau jenis material) [17]. Dalam bidang lingkungan, SIG dimanfaatkan untuk analisis *buffer*, *weighted overlay*, interpolasi spasial, dan pemodelan hidrologi guna mendukung pengambilan keputusan berbasis keruangan [13].

2.5 ArcGIS

ArcGIS merupakan platform Web GIS yang berfungsi mengelola dan mengimplementasikan informasi spasial secara global melalui integrasi aplikasi cerdas, teknik analisis data tingkat lanjut, dan layanan berbasis awan. Perangkat lunak ini mencakup ArcMap untuk pemrosesan data spasial, ArcCatalog untuk pengelolaan berkas, dan ArcToolbox untuk instrumen analisis seperti *buffer*, *overlay*, dan *intersect* . ArcGIS telah banyak diterapkan dalam penelitian lingkungan, termasuk pemetaan kualitas air tanah, analisis kerawanan bencana, dan pemodelan sebaran polutan. Kemampuan ArcGIS dalam memvisualisasikan data secara dinamis menjadikannya instrumen strategis untuk mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data spasial [18].

2.6 *Kriging*

Kriging merupakan teknik interpolasi geostatistik yang digunakan untuk memprediksi nilai parameter di lokasi yang belum diukur berdasarkan data titik sampel yang tersedia, dengan memanfaatkan analisis semivariogram untuk menghasilkan estimasi varians kesalahan minimum. Jenis-jenis *kriging* yang umum diterapkan meliputi *Ordinary Kriging*, *Universal Kriging*, *Co-Kriging*, dan *Block Kriging*, di mana *Ordinary Kriging* menjadi yang paling sering digunakan

karena mengasumsikan rata-rata populasi konstan dalam area studi [15]. Metode ini bekerja melalui pembuatan model semivariogram (sferis, eksponensial, atau Gaussian) untuk menggambarkan ketergantungan spasial antar titik sampel, kemudian menghitung bobot optimal untuk estimasi nilai pada lokasi yang tidak tersampling. Validasi hasil *kriging* dilakukan melalui metode *cross-validation* untuk memastikan akurasi prediksi mendekati nilai lapangan [19].

2.7 *Ordinary Kriging*

Ordinary Kriging (OK) merupakan metode estimasi geostatistika yang menganggap data lapangan sebagai representasi variabel acak terintegrasi, dengan model variogram sebagai komponen kunci yang menghubungkan titik-titik data dalam analisis keruangan [8]. Metode ini mengaplikasikan sistem pembobotan rata-rata bergerak (*weighted moving average*) untuk menekan potensi kesalahan serta meminimalkan varians pada hasil prediksi akhir. Keunggulan utama OK terletak pada kemampuannya menghasilkan prediksi yang akurat dan tidak bias terhadap data observasi asli, dengan memanfaatkan korelasi antar lokasi geografis untuk memperkirakan nilai pada titik yang tidak memiliki data sampel. Penelitian terdahulu menunjukkan OK memiliki performa lebih baik dibandingkan metode deterministik seperti IDW (*Inverse Distance Weighting*) dalam pemetaan distribusi kadar mineral dan kualitas air [20]. Penerapan OK dalam penelitian lingkungan, termasuk pemetaan sebaran amonia di air tambak, memiliki landasan teoritis dan praktis yang kuat karena kemampuannya menghasilkan peta kontur distribusi yang kontinu dan representatif [21].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan geostatistik spasial yang bertujuan memetakan distribusi konsentrasi amonia (NH_3-N) pada air tambak di sekitar TPA Griya Jabon, Sidoarjo, menggunakan metode *Ordinary Kriging* berbasis ArcGIS.

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di kawasan tambak sekitar TPA Jabon, Kecamatan Jabon, Kabupaten Sidoarjo, yang mencakup Desa Tambak Kalisogo, Desa Semambung, dan Desa Balongtani. Penelitian dilaksanakan selama tiga bulan, meliputi tahap persiapan, pengambilan sampel, analisis laboratorium, dan pengolahan data.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel utama penelitian adalah konsentrasi amonia (NH_3-N) dalam air tambak (mg/L) sebagai variabel dependen. Variabel independen berupa koordinat geografis (X, Y) titik sampling. Variabel kontrol meliputi pH, suhu, dan DO yang diukur secara *in-situ* sebagai data pendukung.

3.3 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi GPS, botol sampel steril 600 mL, *cool box*, pH meter, DO meter, termometer, serta perangkat lunak ArcGIS dan Microsoft Excel. Bahan yang digunakan adalah sampel air tambak, data spasial (citra satelit dan peta RTRW Sidoarjo), serta reagen laboratorium untuk uji amonia.

3.4 Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian terdiri atas empat fase:

1. Tahap Persiapan. Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan referensi terkait karakteristik amonia, lindi TPA, dan metode Ordinary Kriging. Observasi lapangan dilakukan untuk menentukan batas area dan titik sampling secara purposive sampling berdasarkan jarak dari TPA.
2. Tahap Pengumpulan Data. Koordinat setiap titik sampling ditentukan menggunakan GPS. Pengambilan sampel air tambak mengacu pada SNI 8995:2021, disertai pengukuran parameter in-situ (pH, suhu, DO). Sampel disimpan dalam cool box untuk menjaga integritas selama transportasi ke laboratorium. Sepuluh titik sampel dikelompokkan menjadi tiga kategori berdasarkan jarak dari TPA, seperti disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Koordinat Titik Sampel

Kode Samper	Titik Koordinat	Jarak dari TPA (m)
ST-1	-7,550413, 112,762041	235
ST-2	-7,552859, 112,766406	528
ST-3	-7,554197, 112,762144	600
ST-4	-7,547611, 112,758046	635
ST-5	-7,546219, 112,768689	639
ST-6	-7,554013, 112,769975	897
ST-7	-7,551796, 112,779003	1.728
ST-8	-7,544674, 112,746248	1.976
ST-9	-7,561582, 112,751644	1.921
ST-10	-7,564706, 112,768220	1.812

3. Tahap Analisis Laboratorium. Pengujian kadar amonia (NH_3-N) dilakukan di Laboratorium DLHK Kabupaten Sidoarjo menggunakan metode fenat secara spektrofotometri sesuai SNI 06-6989.30-2005 dengan pengujian ganda (*duplo test*). Hasil uji ditabulasi bersama data koordinat menggunakan Microsoft Excel.
4. Tahap Pengolahan Data dan Pemetaan. Data koordinat dan konsentrasi amonia diolah dalam ArcGIS menjadi *point shapefile*. Analisis geostatistik dilakukan melalui pembuatan model semivariogram untuk menentukan parameter interpolasi *Ordinary Kriging*. Proses interpolasi menghasilkan peta distribusi spasial konsentrasi amonia secara kontinu. Validasi dan interpretasi hasil dilakukan dengan membandingkan terhadap baku mutu PP No. 22 Tahun 2021.

3.5 Metode Analisis Data

Data dianalisis secara kuantitatif menggunakan metode geostatistik *Ordinary Kriging* yang mampu memberikan estimasi nilai pada lokasi tidak ter sampel dengan mempertimbangkan hubungan spasial antar titik melalui analisis semivariogram. Analisis diawali dengan pembuatan semivariogram eksperimental untuk mengukur tingkat ketergantungan spasial antar titik sampel berdasarkan jarak (lag distance). Semivariogram dihitung menggunakan persamaan:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h]^2 \quad \text{.....(1)}$$

di mana γ(h) adalah nilai semivarians pada jarak h, N(h) adalah jumlah pasangan titik pada jarak h, $Z(x_i)$ adalah nilai konsentrasi amonia pada titik x_i, dan $Z(x_i + h)$ adalah nilai pada titik yang berjarak h dari x_i. Model teoritis semivariogram terbaik dipilih melalui uji coba tiga model umum, yaitu sferis, eksponensial, dan Gaussian, dengan kriteria pemilihan berdasarkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) terkecil. Dari model semivariogram terpilih diperoleh tiga parameter utama yang menggambarkan struktur spasial data:

1. Nugget (C_0) : menggambarkan varians pada jarak sangat dekat ($h \rightarrow 0$), yang merepresentasikan efek mikro-variabilitas atau kesalahan pengukuran pada skala yang lebih kecil dari jarak sampling. Nilai nugget yang mendekati nol menunjukkan konsistensi pengukuran yang baik.
2. Sill (C) : merupakan nilai varians maksimum yang dicapai pada saat semivariogram mendatar (plateau), mencerminkan varians total data. Semakin tinggi nilai sill, semakin besar variabilitas konsentrasi amonia di wilayah studi.
3. Range (a) : menunjukkan jarak maksimum di mana data masih memiliki ketergantungan spasial (autokorelasi). Di luar jarak range, nilai antar titik dianggap tidak berkorelasi. Range yang pendek mengindikasikan perubahan spasial yang cepat, sedangkan range yang panjang menunjukkan pola sebaran yang lebih seragam.

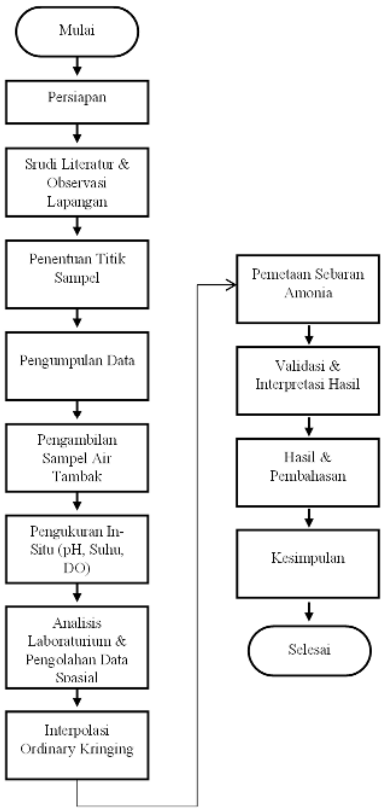
Setelah model semivariogram dan ketiga parameter tersebut ditentukan, interpolasi *Ordinary Kriging* dilakukan untuk menghitung bobot optimal setiap titik sampel dengan meminimalkan varians estimasi. Nilai estimasi pada lokasi tidak tersampel ($\hat{z}(x_0)$) dihitung menggunakan persamaan:

$$\widehat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \tau_i \; Z(x_i) \quad \text{..... (2)}$$

di mana λ_i adalah bobot kriging yang diperoleh dari solusi sistem persamaan kriging berdasarkan model semivariogram, dan $Z(x_i)$ adalah nilai konsentrasi amonia pada titik sampel di sekitar lokasi estimasi. Hasil interpolasi divisualisasikan dalam peta distribusi spasial untuk mengidentifikasi pola sebaran dan zona konsentrasi amonia yang melebihi baku mutu lingkungan. Validasi hasil dilakukan melalui metode *cross-validation* dengan membandingkan nilai estimasi terhadap data aktual untuk memastikan akurasi prediksi.

3.6 Diagram Alur Penelitian

Alur pelaksanaan penelitian disajikan pada Gambar 1 sebagai panduan sistematis dari tahap persiapan hingga luaran akhir berupa peta sebaran amonia.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Konsentrasi Amonia (NH_3-N) pada Air Tambak

Berdasarkan hasil analisis laboratorium menggunakan metode fenat secara spektrofotometri sesuai SNI 06-6989.30-2005, diperoleh data konsentrasi amonia (NH_3-N) pada 10 sampel air tambak di sekitar TPA Jabon, Sidoarjo. Data disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis Konsentrasi Amonia (NH_3-N) Air Tambak

No	Kode Sampel	Konsentrasi (ppm)	Baku Mutu ^#^ (mg/L)	Keterangan
1	SL-1	2,09	0,5	Melebihi Mutu
2	SL-2	5,22	0,5	Melebihi Mutu
3	SL-3	5,48	0,5	Melebihi Mutu
4	SM-4	0,50	0,5	Sesuai Mutu
5	SM-5	1,41	0,5	Melebihi Mutu
6	SM-6	2,29	0,5	Melebihi Mutu
7	ST-7	1,00	0,5	Melebihi Mutu
8	ST-8	0,71	0,5	Melebihi Mutu
9	ST-9	0,92	0,5	Melebihi Mutu
10	ST-10	7,30	0,5	Melebihi Mutu

Keterangan: ^#^ Baku mutu berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 Kelas III untuk Budidaya Perikanan

Berdasarkan Tabel 3, konsentrasi amonia tertinggi terdapat pada titik ST-10 (7,30 ppm) di Desa Semambung, sedangkan terendah pada titik SM-04 (0,50 ppm) di Desa Balongtani. Dari 10 titik sampel, hanya 1 titik (SM-04) yang memenuhi baku mutu, sedangkan 9 titik lainnya telah melampaui batas maksimum 0,5 mg/L berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Kondisi ini mengindikasikan telah terjadi pencemaran amonia yang signifikan pada perairan tambak di sekitar TPA Griya Jabon. Tingginya konsentrasi amonia pada air tambak berpotensi mengganggu ekosistem perairan. Amonia bersifat toksik bagi ikan budidaya pada konsentrasi di atas 1,5 mg N/L, bahkan pada jenis tertentu batas toleransi hanya 0,025 mg N/L [2]. Paparan amonia berlebih mengganggu mekanisme ekskresi pada ikan, meningkatkan penyerapan racun, dan berisiko menyebabkan kematian massal [8].

4.2 Parameter Pendukung Kualitas

Pengukuran parameter pendukung dilakukan secara *in-situ* untuk mengetahui kondisi perairan saat pengambilan sampel. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Parameter Pendukung

Parameter	Baku Mutu ^#^ (mg/L)	Kisaran Hasil	Keterangan
pH	6,5-8,5	7,42-8,78	Sesuai baku Mutu
Suhu	Deviasi ±3°C dari alami	28–35°C	Sesuai baku Mutu
DO	> 3 mg/L	5,40–6,00 mg/L	Sesuai baku Mutu

Keterangan: ^#^ Baku mutu berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 Kelas III untuk Budidaya Perikanan

Nilai pH di seluruh titik berkisar 7,42–8,78 yang masih dalam rentang optimal (6,5–8,5) untuk kehidupan biota akuatik. Suhu air berkisar 28–35°C, masih dalam toleransi untuk budidaya ikan bandeng dan udang. Konsentrasi DO berkisar 5,40–6,00 mg/L, berada di atas ambang batas minimum 3 mg/L dan mendukung respirasi biota. Meskipun parameter pendukung masih dalam batas aman, tingginya konsentrasi amonia menunjukkan adanya beban pencemaran yang tidak dapat direduksi oleh kondisi perairan yang ada.

4.3 Peta Distribusi Spasial Amonia (NH_3-N)

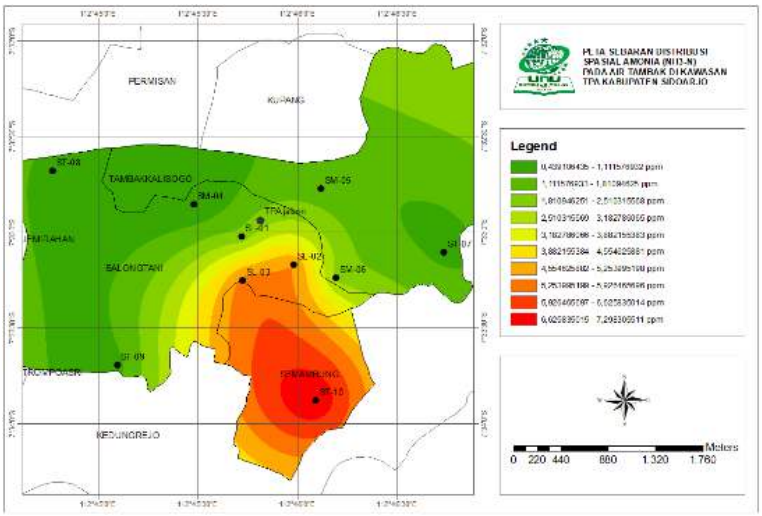
Analisis distribusi spasial konsentrasi amonia dilakukan menggunakan metode interpolasi *Ordinary Kriging* dalam ArcGIS. Metode ini memanfaatkan model semivariogram untuk menggambarkan korelasi spasial antar titik sampel, sehingga menghasilkan estimasi nilai pada lokasi yang tidak terukur secara kontinu [9]. Pemilihan model semivariogram terbaik dilakukan melalui uji coba tiga model teoritis, yaitu sferis, eksponensial, dan Gaussian. Berdasarkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) terkecil, model spherical terpilih sebagai model terbaik dengan karakteristik parameter semivariogram sebagai berikut: nilai *nugget* (C_0) sebesar 0,042, nilai *sill* (C) sebesar 3,851, dan *range* (a) sebesar 1.206 meter. Nilai *nugget* yang relatif kecil mengindikasikan tingkat kesalahan pengukuran yang rendah dan konsistensi data yang baik. Nilai *range* sebesar 1.206 meter menunjukkan bahwa ketergantungan spasial konsentrasi amonia masih berlaku hingga jarak tersebut, di mana nilai di luar jarak tersebut dianggap tidak memiliki korelasi spasial yang signifikan.

Validasi model interpolasi dilakukan menggunakan metode cross-validation, yaitu dengan menghilangkan satu titik sampel secara bergantian dari proses interpolasi, kemudian membandingkan nilai estimasi dengan nilai aktual untuk setiap titik. Hasil cross-validation menunjukkan nilai RMSE sebesar 0,742, yang mengindikasikan bahwa rata-rata kesalahan estimasi relatif kecil dibandingkan rentang konsentrasi amonia yang diamati (0,50-7,30 ppm). Nilai koefisien korelasi (R^2) antara data aktual dan hasil estimasi diperoleh sebesar 0,873, yang menunjukkan adanya hubungan linier yang sangat kuat antara nilai prediksi dan data observasi. Hal ini menegaskan bahwa metode Ordinary Kriging dengan model semivariogram *spherical* memiliki tingkat akurasi yang baik dan dapat diandalkan dalam memprediksi sebaran konsentrasi amonia di lokasi yang tidak tersampel [9]. Hasil interpolasi disajikan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, pola sebaran konsentrasi amonia membentuk gradasi dari merah (konsentrasi tinggi), jingga-kuning (konsentrasi sedang), hingga hijau (konsentrasi rendah). Wilayah studi terbagi menjadi tiga zona utama sebagai berikut:

1 Zona Konsentrasi Tinggi (Merah–Jingga; 5,22–7,30 ppm). Terkonsentrasi di wilayah Semambung (titik ST-10, SL-02, SL-03). Faktor penyebab tingginya konsentrasi adalah kedekatan dengan pemukiman dan area pertanian yang berkontribusi terhadap beban organik, serta aktivitas budidaya itu sendiri berupa sisa pakan dan feses ikan yang membusuk di dasar tambak.
2 Zona Konsentrasi Sedang (Kuning; 1,81–3,18 ppm). Meliputi titik ST-07 (1,00 ppm), SM-05 (1,41 ppm), SL-01 (2,09 ppm), dan SM-06 (2,29 ppm). Zona ini berdekatan dengan TPA sehingga berpeluang menerima pencemar dari rembesan lindi [6].
3 Zona Konsentrasi Rendah (Hijau; 0,44–1,81 ppm). Meliputi titik SM-04 (0,50 ppm), ST-08 (0,71 ppm), dan ST-09 (0,92 ppm). Rendahnya konsentrasi disebabkan oleh efektivitas pertukaran air dan sirkulasi pasang-surut yang mendorong proses pembilasan alami (*flushing*) dan pengenceran (*dilution effect*).

4.4 Analisis Hubungan NH_3-N dengan Jarak terhadap TPA

Untuk memperkuat interpretasi distribusi spasial, dilakukan analisis korelasi antara konsentrasi amonia (NH_3-N) dengan jarak titik sampel terhadap TPA Griya Jabon. Hasil analisis disajikan pada Tabel 5.



Gambar 2. Peta Distribusi Spasial Amonia (NH_3-N)

Tabel 5. Hubungan Jarak Titik Sampel terhadap Konsentrasi NH_3-N

Kode Sampel	Jarak dari TPA (m)	Konsentrasi NH_3-N (ppm)	Kategori
SL-01	235	2,09	Dekat
SL-02	528	5,22	Dekat
SL-03	600	5,48	Dekat
SM-04	635	0,50	Sedang
SM-05	639	1,41	Sedang
SM-06	899	2,29	Sedang
ST0-07	1.728	1,00	Jauh
ST-08	1.976	0,71	Jauh
ST-09	1.921	0,92	Jauh
ST-10	1.812	7,30	Jauh

Berdasarkan Tabel 5 terlihat bahwa tidak terdapat korelasi linier yang sederhana antara jarak titik sampel terhadap TPA dengan konsentrasi amonia. Titik dengan jarak terdekat dari TPA (SL-01, 235 m) memiliki konsentrasi 2,09 ppm, sedangkan titik dengan jarak terjauh (ST-08, 1.976 m) memiliki konsentrasi 0,71 ppm. Namun, titik ST-10 yang berjarak 1.812 m justru mencatat konsentrasi tertinggi (7,30 ppm), sementara titik ST-04 yang berjarak 635 m mencatat konsentrasi terendah (0,50 ppm). Fenomena ini mengindikasikan bahwa sebaran amonia tidak semata-mata dikendalikan oleh jarak dari TPA, melainkan dipengaruhi oleh faktor-faktor lain yang lebih kompleks, antara lain:

1. Arah aliran air permukaan dan hidrologi. Pergerakan lindi dari TPA mengikuti gradien hidrologi dan arah aliran sungai, sehingga konsentrasi tinggi tidak selalu terjadi pada titik terdekat, melainkan pada area yang menjadi reseptor aliran air dari TPA.
2. Aktivitas antropogenik lokal. Wilayah Semambung (ST-10) yang memiliki konsentrasi tertinggi merupakan area dengan aktivitas pemukiman dan pertanian yang padat, berkontribusi terhadap beban organik dari limbah domestik dan pertanian yang terbawa ke perairan tambak.
3. Dinamika pasang-surut dan sirkulasi air. Efek pembilasan alami (*flushing*) dan pengenceran (*dilution effect*) pada titik-titik tertentu (SM-04, ST-08, ST-09) mampu menurunkan konsentrasi amonia meskipun lokasinya relatif dekat dengan TPA [4].
4. Kondisi oseanografi dan morfologi tambak. Perbedaan kedalaman, sirkulasi air, dan karakteristik sedimen dasar antar lokasi tambak mempengaruhi laju akumulasi dan degradasi bahan organik.

Hasil ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa pencemaran amonia di kawasan tambak merupakan hasil interaksi multifaktor antara rembesan lindi TPA, aktivitas antropogenik lokal, dan dinamika hidrologi perairan, bukan semata-mata fungsi jarak linier dari sumber pencemar. Pendekatan geostatistik *Ordinary Kriging* terbukti mampu menangkap kompleksitas ini melalui model semivariogram yang mempertimbangkan korelasi spasial antar titik secara lebih komprehensif dibandingkan analisis jarak sederhana [6].

4.5 Analisis Keterkaitan Parameter Pendukung terhadap Dinamika Amonia

Secara biokimia, dinamika amonia sangat dipengaruhi oleh pH dan suhu. Pada titik ST-10 yang menjadi pusat zona merah, tercatat suhu tertinggi 35°C, yang mempercepat laju dekomposisi bahan organik (amonifikasi). Pada titik SL-01 di zona transisi, nilai pH mencapai 8,78. Kombinasi suhu >30°C dan pH >8,0 mendorong konversi ion amonium (NH_4^+) yang relatif tidak berbahaya menjadi molekul amonia bebas (NH_3) yang bersifat toksik akut. Sementara itu, konsentrasi DO yang stabil di atas 5 mg/L di seluruh titik tidak efektif mereduksi amonia karena proses amonifikasi berlangsung secara anaerobik di sedimen dasar tambak yang kaya material organik sisa pakan [22]. Hal ini menunjukkan bahwa kecukupan oksigen di permukaan air tidak cukup untuk mengeliminasi senyawa toksik selama sedimen dasar dalam kondisi jenuh bahan organik dan didukung suhu serta pH tinggi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis laboratorium terhadap 10 sampel air tambak di sekitar TPA Griya Jabon, Sidoarjo, konsentrasi amonia (NH_3-N) berada pada rentang 0,50 ppm hingga 7,30 ppm, di mana 9 dari 10 titik sampel telah melampaui baku mutu berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 sebesar 0,5 mg/L. Hasil ini mengindikasikan bahwa perairan tambak di kawasan tersebut telah mengalami pencemaran amonia yang signifikan. Pola distribusi spasial yang dihasilkan melalui metode *Ordinary Kriging* menunjukkan sebaran konsentrasi amonia membentuk gradien dari selatan menuju utara, barat, dan timur. Zona konsentrasi tertinggi (5,22–7,30 ppm) terkonsentrasi di wilayah Semambung dengan gradasi merah hingga jingga, sedangkan zona konsentrasi terendah (0,44–1,81 ppm) berada di wilayah Balongtani dan Tambakkalisogo dengan gradasi hijau. Analisis hubungan antara konsentrasi amonia dengan jarak terhadap TPA menunjukkan bahwa sebaran tidak semata-mata dikendalikan oleh jarak, melainkan dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti arah aliran air, aktivitas antropogenik, dan dinamika hidrologi. Validasi model interpolasi melalui *cross-validation* menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,742 dan koefisien korelasi (R^2) sebesar 0,873, yang menunjukkan bahwa metode *Ordinary Kriging* memiliki tingkat keandalan yang baik dalam memprediksi sebaran konsentrasi amonia di lokasi yang tidak tersampel.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Akhirul, Y. Witra, I. Umar, and Erianjoni, "Dampak Negatif Pertumbuhan Penduduk Terhadap Lingkungan Dan Upaya Mengatasinya," *Jurnal Kependudukan dan Pembangunan Ligkungan*, vol. 1, no. 3, 2020.

[2] Sri Royani and Adita Silvia Fitriana, "Ammoniacal Nitrogen Contaminant in Water of Kaliori Landfill Area in Banyumas," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 3, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i3.1885.

[3] S. Rachmawati, P. Bernadetta, M. B. Mardiyanto, N. U. Fil'ardiani, S. Khoirunnisa, and Y. P. A. Arta, "Kandungan logam berat besi (Fe) dan timbal (Pb) pada air lindi TPA Putri Cempo, Surakarta," *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, 2024, doi: 10.36813/jplb.8.2.219-232.

[4] A. Febrianto and Buchari, "Studi Cemaran Logam Berat (Fe , Pb, Cd, Cu, dan Zn) dalam Umbi Singkong di Sekitar Area Eks Tempat Pemrosesan Akhir Leuwi Gajah," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. IX, no. 2, 2024.

[5] S. Wahyuningsih, I. Andriyani, D. Purbasari, and T. R. Nurcahyo, "Interpolation of Total Dissolved Solids (TDS) Concentration in A River Using Ordinary Kriging Method," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, vol. 14, no. 3, 2025, doi: 10.23960/jtep-l.v14i3.858-865.

[6] Y. Li, Z. Baorong, X. Xiaohong, and L. Zijun, "Application of a semivariogram based on a deep neural network to Ordinary Kriging interpolation of elevation data," *PLoS One*, vol. 17, no. 4 April, 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0266942.

[7] M. Khan, M. M. A. Almazah, A. EIlahi, R. Niaz, A. Y. Al-Rezami, and B. Zaman, "Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: 10.1080/19475705.2023.2190853.

[8] L. Fitrianah *et al.*, "Distribution Mapping of Cadmium on Water and Soil in Rice Fields Around the Industrial Area of Sidoarjo Regency," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1030/1/012015.

[9] Merry N. M. Kosakoy, Steenie E. Wallah, and Herawaty Riogilang, "Analisis Pemilihan Lokasi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) di Kabupaten Minahasa Tenggara," *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, vol. 11, no. 1, 2022, doi: 10.22225/pd.11.1.4194.57-72.

[10] K. Kasam, S. Sarto, S. Syamsiah, and A. Prasetyo, "Pengaruh Ukuran dan Fraksi Organik Terhadap Kuantitas dan Kualitas Timbulan Lindi," *Jurnal Sains &Teknologi Lingkungan*, vol. 5, no. 1, 2013, doi: 10.20885/jstl.vol5.iss1.art3.

[11] F. Meilasari, H. Sutrisno, and B. Purwoko, "Analisis Sebaran Lindi di Sekitar Kawasan TPA Batu Layang Berdasarkan Nilai Resistivitas," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 24, no. 1, 2023, doi: 10.55981/jtl.2023.247.

[12] A. Listriyana, C. Handayani, and A. Diah Pahlewi, "Analisis Kualitas Air Alkalinitas pada Perairan Tambak Intensif Situbondo," *Zona Laut Jurnal Inovasi Sains Dan Teknologi Kelautan*, 2023, doi: 10.62012/zl.v4i2.27456.

[13] N. I. Putri and M. N. K. Amrullah, "Penggunaan Sistem Informasi Geografis (SIG) Berbasis Dusun Untuk Meningkatkan Efisiensi Pengelolaan Lahan," *Widya Bhumi*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.31292/wb.v4i1.93.

[14] S. Linggasari, A. Mawardi, and D. J. Rianto, "Pengaruh Penambangan Pasir terhadap Kualitas Air Sungai Progo," *Jurnal Teknologi Pertambangan*, vol. 11, no. 1, 2025, doi: 10.31315/jtp.v11i1.14919.

[15] B. L. P. J. Timur, "Database Peraturan JDIH BPK," 2022.

[16] E. K. Hendarwati, P. Lepong, and S. Suyitno, "Pemilihan Semivariogram Terbaik Berdasarkan Root Mean Square Error (RMSE) pada Data Spasial Eksplorasi Emas Awak Mas," *GEOSAINS KUTAI BASIN*, vol. 6, no. 1, 2023, doi: 10.30872/geofisunmul.v6i1.1072.

[17] A. Aini, "Sistem Informasi Geografis Pengertian dan Aplikasinya," *Diakses Dari http://stmik. amikom. ac. id/[Diakses 24 Maret 2013]*, 2007.

[18] M. Arifin, Anwari, and Bakir, "Sistem Informasi Geografis (SIG) Penentuan Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) Kabupaten Pamekasan Menggunakan Metode

Composite Performance Index …," *Seminar Nasional Humaniora dan Aplikasi Teknologi Informasi (SSEHATI) 2022*, vol. 8, no. 1, 2022.

[19] D. Sabriyati and M. P. Hadi, "Penilaian Bahaya Banjir Bandang Berdasarkan Skenario Genangan Menggunakan Analisis Spasial dan Pemodelan Hidrodinamik," *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, vol. 14, no. 1, 2023.

[20] N. Nur Rohma, "Pendugaan Metode Ordinary Kriging," *Jurnal Penelitian Ilmu Sosial dan Eksakta*, vol. 2, no. 1, 2022, doi: 10.47134/trilogi.v2i1.33.

[21] H. Yimit, M. Eziz, M. Mamat, and G. Tohti, "Variations in groundwater levels and salinity in the Ili River Irrigation Area, Xinjiang, northwest China: A geostatistical approach," *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 18, no. 1, 2011, doi: 10.1080/13504509.2011.544871.

[22] H. Purnomo and R. A. E. Wijaya, "Pemetaan Sebaran Kadar Al2O3 dan RSiO2 Pada Endapan Laterit Bauksit Menggunakan Pendekatan Metode Interpolasi Ordinary Kriging Dan Inverse Distance Weighting," *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: 10.28989/angkasa.v14i1.1227.

[23] H. S. Suwoyo, K. Nirmala, D. Djokosetiyanto, and S. R. Mulyaningrum, "Faktor Dominan Yang Berpengaruh Pada Tingkat Konsumsi Oksigen Sedimen di Tambak Intensif Udang Vaname (Litopenaeus vannamei)," *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, vol. 7, no. 2, 2015.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 78-87

Analisis Perubahan Perilaku Mobilitas Masyarakat Akibat Kenaikan Harga BBM (Studi Kasus : Perkotaan Yogyakarta)

Richa Dwi Yuliani[1*], Nur Huda[2]

[1,2]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Madiun, Kota Madiun
*Email Korespondensi: richadwi@unmer-madiun.ac.id

ABSTRAK

Dalam melakukan mobilitas masyarakat banyak menggunakan kendaraan pribadi seperti motor dan mobil. Saat ini terjadi kenaikan harga minyak karena beberapa alasan seperti lonjakan minyak mentah dunia akibat ketegangan geopolitik di kawasan timur tengah, pelemahan nilai tukar rupiah, dan masih tingginya ketergantungan Indonesia terhadap impor. Penelitian ini bertujuan untuk melihat perubahan perilaku masyarakat dalam melakukan mobilitas di kawasan perkotaan Yogyakarta setelah kenaikan harga BBM. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis deskriptif berdasarkan data kuesioner dari 218 responden. Kondisi sebelum dan sesudah kenaikan harga BBM diukur secara retrospektif dalam satu kali survei berdasarkan jawaban responden mengenai kondisi sebelum dan setelah periode kenaikan harga BBM yang menjadi acuan penelitian. Hasil menunjukkan adanya perubahan terutama pada perjalanan sekunder, pilihan jenis kendaraan, serta strategi penghematan perjalanan. Perjalanan primer menunjukkan distribusi frekuensi yang tetap, sedangkan perjalanan sekunder cenderung bergeser dari beberapa kali dalam seminggu menjadi beberapa kali dalam sebulan. Harga merupakan pertimbangan utama dalam pemilihan jenis BBM, dan strategi yang paling banyak dilaporkan adalah mengurangi jumlah perjalanan. Secara deskriptif, hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan harga BBM berkaitan dengan penyesuaian perilaku mobilitas, khususnya pada perjalanan non-esensial dan pengelolaan biaya transportasi. Temuan ini memberikan gambaran mengenai respons masyarakat perkotaan terhadap peningkatan biaya energi dan dapat menjadi masukan bagi perumusan kebijakan transportasi dan perlindungan kelompok pengguna yang rentan terhadap kenaikan biaya perjalanan.

Kata kunci : Kenaikan harga BBM, Mobilitas dan Perilaku masyarakat.

ABSTRACT

People rely heavily on private vehicles, such as motorcycles and cars, for their daily mobility. Currently, fuel prices have risen due to several factors, including a surge in global crude oil prices caused by geopolitical tensions in the Middle East, the weakening of the rupiah, and Indonesia's continued heavy reliance on imports. This study aims to examine changes in people's mobility behavior in the urban area of Yogyakarta following the increase in fuel prices. The study employs a quantitative approach with descriptive analysis based on questionnaire data from 218 respondents. Conditions before and after the fuel price hike were measured retrospectively in a single survey based on respondents' answers regarding conditions before and after the price hike period, which served as the study's reference. The results indicate changes primarily in secondary trips, vehicle type choices, and travel cost-saving strategies. Primary trips showed a consistent frequency distribution, while secondary trips tended to shift from several times a week to several times a month. Price is the primary consideration in choosing a type of fuel, and the most commonly reported strategy is reducing the number of trips. Descriptively, the study results show that fuel price increases are associated with adjustments in mobility behavior, particularly regarding non-essential trips and the management of transportation costs. These findings provide insight into how urban residents respond to rising energy costs and can inform the formulation of transportation policies and the protection of user groups that are vulnerable to rising travel costs.

Keywords **:** *Fuel Price Increase, Mobility, and Community Behavior.*

1. PENDAHULUAN

Kenaikan harga bahan bakar minyak (BBM) merupakan perubahan ekonomi yang dapat memengaruhi biaya perjalanan dan keputusan masyarakat dalam melakukan mobilitas. Pada sektor transportasi, perubahan harga energi dapat mendorong penyesuaian penggunaan kendaraan, pilihan moda, frekuensi perjalanan, dan strategi penghematan biaya [1], [2], [3]. Dalam konteks perkotaan, respons tersebut penting dikaji karena mobilitas harian berkaitan dengan aktivitas ekonomi, pendidikan, dan sosial yang tetap harus dipenuhi [4], [5]. Perkotaan Yogyakarta memiliki karakter mobilitas yang dinamis sebagai pusat pendidikan, pariwisata, pemerintahan, dan kegiatan ekonomi. Data statistik menunjukkan besarnya peran kendaraan bermotor dalam sistem mobilitas wilayah DIY dan Kota Yogyakarta [1], [5], [6]. Ketergantungan terhadap kendaraan pribadi menyebabkan perubahan harga BBM berpotensi memengaruhi pengeluaran perjalanan dan mendorong masyarakat menyesuaikan perilaku mobilitas, misalnya dengan mengurangi perjalanan, memperpendek jarak, atau mempertimbangkan alternatif moda yang lebih hemat [7], [8]. Penelitian terdahulu telah membahas dampak kenaikan harga BBM terhadap permintaan transportasi, biaya operasional, transportasi umum, dan pemilihan moda [2], [3], [8], [9], [10], [11], [12]. Namun, respons terhadap kenaikan harga BBM tidak hanya berupa perpindahan moda. Perilaku mobilitas juga dapat mencakup perubahan frekuensi perjalanan, jarak perjalanan, perjalanan sekunder, penggunaan BBM, dan strategi pengelolaan biaya. Kajian perilaku perjalanan juga menunjukkan bahwa keputusan transportasi dipengaruhi oleh karakteristik individu, kebiasaan, kondisi sistem transportasi, dan faktor subjektif [13], [14].

Kebaruan penelitian ini terletak pada perluasan fokus dari pemilihan moda menuju perubahan perilaku mobilitas secara lebih komprehensif. Penelitian sebelumnya pada Perkotaan Yogyakarta oleh Yuliani et al. [15] secara khusus mengkaji pengaruh kenaikan harga BBM terhadap pemilihan moda transportasi. Sebaliknya, penelitian ini membandingkan secara retrospektif kondisi mobilitas sebelum dan setelah kenaikan harga BBM melalui beberapa indikator, yaitu frekuensi perjalanan, intensitas perjalanan sekunder, jarak perjalanan, bentuk adaptasi mobilitas, serta pertimbangan dalam pemilihan jenis BBM. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini adalah memberikan gambaran yang lebih luas mengenai strategi adaptasi mobilitas masyarakat Perkotaan Yogyakarta, bukan hanya perubahan pilihan moda. Berdasarkan fenomena tersebut, diperlukan penelitian yang mengkaji perilaku masyarakat dalam melakukan mobilitas ketika terjadi kenaikan harga BBM di kawasan perkotaan Yogyakarta sebagai upaya untuk memahami perubahan pola perjalanan dan respons masyarakat terhadap peningkatan biaya transportasi. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis perubahan perilaku mobilitas yang dilakukan oleh masyarakat sebagai bentuk adaptasi terhadap kenaikan harga BBM, mengidentifikasi faktor yang memengaruhi perubahan tersebut, serta mengetahui strategi yang dapat dilakukan dalam mempertahankan aktivitas sehari-hari di tengah meningkatnya biaya transportasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai respons masyarakat terhadap kebijakan kenaikan harga BBM serta menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dalam merumuskan kebijakan transportasi yang lebih efektif, berkelanjutan, dan berorientasi pada kebutuhan masyarakat.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transportasi

Manusia akan selalu melakukan pergerakan atau perpindahan untuk memenuhi kebutuhan hidupnya, baik itu bergerak untuk berpindah tempat, bekerja, sekolah, rekreasi, mendapatkan barang atau pelayanan yang diperlukan, atau bersosialisasi dengan orang lain. Dalam melakukan aktivitas tersebut manusia memerlukan alat atau moda transportasi untuk mempermudah dalam proses pindahan tempat. Transportasi merupakan kegiatan pemindahan orang dan barang dari suatu tempat ke tempat lain yang melibatkan unsur muatan, kendaraan sebagai alat angkut, serta prasarana atau jalan yang digunakan dalam proses perjalanan [13]. Transportasi tidak hanya berkaitan dengan bidang teknik sipil, tetapi juga memiliki hubungan dengan berbagai bidang ilmu lainnya, seperti ekonomi, sosial, hukum, dan geografi. Penyelenggaraan transportasi memerlukan sistem transportasi yang mampu mengatur dan mengoordinasikan pergerakan orang dan barang secara efektif. Sistem transportasi mencakup

berbagai unsur yang saling berkaitan dalam mendukung kelancaran proses perpindahan dari satu lokasi ke lokasi lainnya [13].Dalam kegiatan transportasi, terdapat beberapa komponen yang saling mendukung, antara lain manusia atau pengguna transportasi, barang atau muatan, kendaraan sebagai sarana angkut, jalan sebagai prasarana pergerakan, serta organisasi atau kelembagaan yang berperan dalam pengaturan sistem transportasi [5]. Keterkaitan antar-komponen tersebut menentukan kelancaran dan efektivitas proses transportasi.

2.2 Preferensi

Preferensi perjalanan merupakan kecenderungan individu dalam memilih alternatif berdasarkan pertimbangan biaya, waktu, kemudahan, kebiasaan, dan ketersediaan pilihan. Dalam konteks kenaikan harga BBM, biaya menjadi salah satu pertimbangan penting, tetapi respons setiap individu dapat berbeda sesuai karakteristik dan pilihan transportasi yang tersedia [8], [13], [14]. Pemilihan moda merupakan salah satu bagian dalam pemodelan permintaan perjalanan untuk mengetahui kecenderungan seseorang dalam memilih alternatif moda transportasi yang ada. Model pemilihan moda transportasi dapat digunakan untuk mengetahui jumlah atau proporsi orang dalam memilih menggunakan moda transportasi tertentu, dengan jumlah perjalanan tertentu, sehingga dapat dijadikan acuan untuk perencanaan transportasi di waktu yang akan datang. Dalam pemilihan moda transportasi biasanya kriteria yang dipilih atau dipertimbangkan adalah moda transportasi dengan rute terpendek, tercepat, termurah atau kombinasi dari beberapa faktor tersebut. Namun, terdapat beberapa orang yang *captive* terhadap moda, *captive* dalam hal ini diartikan sebagai orang tersebut hanya memiliki satu pilihan penggunaan moda transportasi tanpa memiliki pilihan moda transportasi yang lainnya.

2.3 Mobilisasi

Mobilitas merupakan ukuran kemampuan seseorang dalam melakukan perpindahan, baik perpindahan diri maupun barang yang dimilikinya [5]. Mobilitas dipengaruhi oleh dua komponen utama. Komponen pertama berkaitan dengan kinerja sistem transportasi, seperti lokasi seseorang dan letak tujuan perjalanan. Komponen kedua berkaitan dengan karakteristik individu, meliputi kepemilikan kendaraan pribadi, kemampuan membayar biaya perjalanan, ketersediaan transportasi umum, serta tingkat pengetahuan terhadap pilihan moda transportasi yang tersedia [12]. Dalam bidang transportasi, mobilitas memiliki hubungan yang erat dengan aksesibilitas. Mobilitas dapat dipahami sebagai kemampuan seseorang untuk melakukan pergerakan atau perpindahan dari satu tempat ke tempat lainnya, yang salah satunya dipengaruhi oleh kemampuan dalam menanggung biaya transportasi [13]. Dengan demikian, kemampuan ekonomi menjadi salah satu faktor yang dapat memengaruhi tingkat mobilitas seseorang. Indikator mobilitas dapat dilihat melalui jumlah perjalanan, jarak perjalanan, dan intensitas pergerakan yang dilakukan seseorang dalam suatu wilayah [11]. Kemudahan seseorang dalam melakukan mobilitas tidak hanya dipengaruhi oleh keinginan individu untuk melakukan perjalanan, tetapi juga oleh ketersediaan sarana dan prasarana transportasi yang mendukung pergerakan tersebut. Mobilitas dalam penelitian ini dioperasionalkan melalui beberapa indikator yang dapat diamati dari jawaban responden, yaitu frekuensi perjalanan primer, frekuensi perjalanan sekunder, jarak perjalanan, penggunaan moda, penggunaan dan pemilihan jenis BBM, serta bentuk adaptasi terhadap kenaikan harga BBM. Indikator tersebut digunakan untuk menggambarkan perubahan perilaku secara deskriptif sebelum dan setelah kenaikan harga BBM yang menjadi acuan penelitian.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain survei potong lintang (*cross-sectional*) dan analisis deskriptif. Perbandingan kondisi sebelum dan sesudah kenaikan harga BBM tidak diperoleh melalui dua kali pengukuran pada waktu yang berbeda, melainkan melalui satu kali survei dengan pertanyaan retrospektif. Responden diminta membandingkan kondisi mobilitas yang mereka alami sebelum dan setelah kenaikan harga BBM yang menjadi acuan penelitian. Dengan desain tersebut, istilah “sebelum” dan “sesudah” dalam hasil penelitian merepresentasikan laporan persepsi dan ingatan responden pada saat survei, sehingga hasil penelitian ditafsirkan sebagai gambaran perubahan yang dilaporkan responden dan bukan sebagai pengukuran longitudinal langsung. Populasi penelitian adalah masyarakat pengguna kendaraan

pribadi yang berdomisili dan melakukan perjalanan rutin di kawasan perkotaan Yogyakarta. Sampel terdiri atas 218 responden yang memenuhi kriteria inklusi, yaitu: (1) berdomisili atau melakukan aktivitas rutin di wilayah penelitian; (2) menggunakan sepeda motor dan/atau mobil pribadi; (3) melakukan perjalanan secara rutin; dan (4) bersedia mengisi kuesioner secara lengkap. Pengambilan sampel dilakukan secara *nonprobability* dengan teknik *purposive* sampling sesuai kriteria tersebut. Kuesioner disebarkan secara langsung dan daring menggunakan Google Forms. Batas administratif kawasan perkotaan yang digunakan dalam penelitian serta periode kenaikan harga BBM dan waktu pelaksanaan survei perlu dicantumkan secara eksplisit sesuai dengan pelaksanaan penelitian asli.

3.1 Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian berupa kuesioner terstruktur yang disusun berdasarkan tujuan penelitian dan indikator perilaku mobilitas. Bagian kuesioner mencakup: (1) karakteristik responden; (2) jenis moda transportasi sebelum dan setelah kenaikan harga BBM; (3) frekuensi perjalanan primer dan sekunder sebelum dan setelah kenaikan; (4) pertimbangan pemilihan jenis BBM; (5) bentuk penyesuaian perilaku ketika harga BBM meningkat; dan (6) persepsi tingkat pengaruh kenaikan harga BBM terhadap sejumlah aspek mobilitas. Pertanyaan karakteristik dan pilihan perilaku menggunakan kategori nominal/ordinal, sedangkan penilaian tingkat pengaruh menggunakan skala bertingkat sebagaimana disajikan pada Gambar 3. Proses uji validitas dan reliabilitas instrumen perlu dijelaskan berdasarkan prosedur yang benar-benar dilakukan pada penelitian ini. Apabila pengujian telah dilakukan, cantumkan jenis uji, jumlah responden uji, kriteria keputusan, dan hasilnya; apabila belum dilakukan, klaim mengenai validitas dan reliabilitas tidak boleh ditambahkan tanpa pengujian.

3.2 Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif menggunakan distribusi frekuensi dan persentase untuk menggambarkan karakteristik responden serta pola jawaban sebelum dan setelah kenaikan harga BBM. Karena penelitian ini tidak melakukan uji statistik inferensial, istilah “signifikan” dalam pengertian statistik tidak digunakan. Perbedaan antar periode dilaporkan sebagai perubahan distribusi atau kecenderungan jawaban responden. Analisis juga tidak dimaksudkan untuk membuktikan hubungan sebab-akibat atau melakukan generalisasi probabilistik kepada seluruh penduduk Perkotaan Yogyakarta, mengingat penggunaan teknik *purposive sampling* dan komposisi sampel yang tidak merata.

3.2.1 Data Primer

Data primer yang diperlukan untuk penelitian ini adalah data perubahan perilaku mobilitas masyarakat akibat terjadinya kenaikan harga BBM. Data tersebut diperoleh melalui observasi langsung di lapangan dengan cara membagikan kuesioner secara langsung kepada responden dan secara daring melalui Google Form. Responden dalam penelitian ini dipilih berdasarkan kriteria sebagai pengguna kendaraan pribadi seperti sepeda motor dan mobil yang melakukan perjalanan secara rutin setiap hari di wilayah perkotaan Yogyakarta.

3.2.2 Data Sekunder

Pengumpulan data sekunder dalam penelitian ini dilakukan melalui kegiatan observasi, pengumpulan, dan pencatatan data yang bersumber dari laporan statistik yang telah dipublikasikan oleh instansi pemerintah melalui situs web resmi masing-masing. Data sekunder yang digunakan diperoleh dari berbagai lembaga terkait, seperti Badan Pusat Statistik (BPS) dan instansi pemerintah daerah yang ada di wilayah perkotaan Yogyakarta.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil survei diperoleh dari hasil penyebaran kuesioner secara langsung dan daring melalui Google Form. Responden dalam penelitian ini adalah pengendara sepeda motor dan mobil pribadi yang melakukan perjalanan sehari-hari di wilayah perkotaan Yogyakarta. Analisis hasil survei ini terdari dari profil responden, jumlah moda transportasi yang digunakan, frekuensi melakukan perjalanan, prioritas pemilihan BBM, prioritas pemilihan jenis BBM, perilaku saat

BBM mengalami kenaikan dan pengaruh kenaikan harga BBM.

4.1 Profil Responden

Profil responden menunjukkan gambaran tentang kondisi atau identitas dari responden pada saat pengambilan data dilakukan. Profil responden meliputi jenis kelamin, usia, jenis pekerjaan, dan tingkat pendapatan responden.

Tabel 1. Profil Responden

No	Profil Responden	Keterangan	Jumlah (Orang)	Persentase (%)
1	Jenis Kelamin	Laki-laki	104	47,70%
		Perempuan	114	52,30%
2	Usia	17 – 25 tahun	99	45,41%
		26 – 35 tahun	75	34,40%
		36 – 45 tahun	39	17,89%
		≥ 46 tahun	5	2,29%
3	Pekerjaan	PNS	42	19,27%
		Swasta	47	21,56%
		Wirausaha	33	15,14%
		POLRI/TNI	3	1,38%
		BUMN	6	2,75%
		Pelajar/Mahasiswa	72	33,03%
		IRT	9	4,13%
		PPNPN	6	2,75%
4	Tingkat Pendapatan	< 2 juta /bulan	77	35,32%
		2 – 4 juta /bulan	83	38,07%
		4 – 6 juta /bulan	38	17,43%
		6 – 8 juta /bulan	14	6,42%
		> 8 juta /bulan	6	2,75%

Dari Tabel 1 di atas menunjukkan bahwa penelitian didominasi oleh masyarakat usia produktif, dengan komposisi jenis kelamin yang relatif seimbang, mayoritas berstatus pelajar/mahasiswa, dan sebagian besar memiliki tingkat pendapatan di bawah Rp 4.000.000 per bulan. Karakteristik ini mengindikasikan bahwa responden merupakan kelompok yang aktif melakukan mobilitas harian sekaligus cukup rentan terhadap perubahan biaya transportasi akibat kenaikan harga BBM. Dengan demikian, karakteristik responden dinilai relevan untuk mendukung analisis mengenai perubahan perilaku mobilitas masyarakat di kawasan perkotaan Yogyakarta.

4.2 Jenis Moda Transportasi yang digunakan

Dari Tabel 2 di bawah dapat dilihat bahwa terlihat adanya perubahan dalam penggunaan moda transportasi oleh masyarakat sebelum dan setelah terjadi kenaikan harga BBM. Secara umum, sepeda motor tetap menjadi moda transportasi yang paling banyak digunakan, baik sebelum maupun sesudah kenaikan harga BBM. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan harga BBM tidak mengurangi dominasi penggunaan kendaraan pribadi, khususnya sepeda motor. Sebaliknya, masyarakat cenderung melakukan penyesuaian dengan beralih dari mobil ke sepeda motor sebagai strategi untuk menekan pengeluaran transportasi. Temuan ini menunjukkan bahwa masyarakat perkotaan Yogyakarta lebih memilih melakukan perubahan jenis kendaraan dibandingkan mengurangi mobilitas secara signifikan. Hal tersebut juga mengindikasikan bahwa aktivitas sehari-hari seperti bekerja, belajar, dan kegiatan sosial tetap harus dilakukan meskipun biaya transportasi meningkat, sehingga masyarakat memilih moda transportasi yang dinilai lebih efisien dan ekonomis.

Tabel 2 Jenis Moda Transportasi yang digunakan

Moda Transportasi	Sebelum Kenaikan Harga BBM		Setelah Kenaikan Harga BBM	
	Jumlah (orang)	Persentase (%)	Jumlah (orang)	Persentase (%)
Sepeda Motor	183	83,9%	191	87,6%
Mobil	28	12,8%	23	10,6%
Sepeda Motor & Mobil	7	3,2%	4	1,8%

4.3 Frekuensi Melakukan Perjalanan

Tabel 3. Frekuensi perjalanan primer.

Biaya Transportasi	Sebelum Kenaikan Harga BBM		Setelah Kenaikan Harga BBM	
	Jumlah (orang)	Persentase (%)	Jumlah (orang)	Persentase (%)
Hampir setiap hari	193	88,5%	190	87,2%
Beberapa kali dalam seminggu	25	11,5%	28	12,8%
1 – 2 kali dalam seminggu	0	0,0%	0	0,0%
Satu kali dalam seminggu	0	0,0%	0	0,0%

Dari Tabel 3 di atas dapat dilihat bahwa frekuensi perjalanan primer masyarakat sebelum dan setelah kenaikan harga BBM menunjukkan terjadi sedikit perubahan pada pola perjalanan responden. Sebelum maupun setelah kenaikan harga BBM, sebanyak 193 responden (88,5%) melakukan perjalanan primer hampir setiap hari, sedangkan 25 responden (11,5%) melakukan perjalanan primer beberapa kali dalam seminggu. Sementara itu, tidak terdapat responden yang melakukan perjalanan primer sebanyak 1–2 kali dalam seminggu maupun satu kali dalam seminggu, baik sebelum maupun setelah kenaikan harga BBM. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kenaikan harga BBM tidak memberikan pengaruh terhadap frekuensi perjalanan primer masyarakat perkotaan Yogyakarta. Perjalanan primer merupakan perjalanan yang dilakukan untuk memenuhi kebutuhan utama, seperti bekerja, bersekolah, kuliah, menjalankan usaha, atau aktivitas penting lainnya yang bersifat rutin dan tidak mudah untuk dikurangi. Oleh karena itu, meskipun biaya transportasi meningkat akibat kenaikan harga BBM, responden tetap mempertahankan intensitas perjalanan mereka.

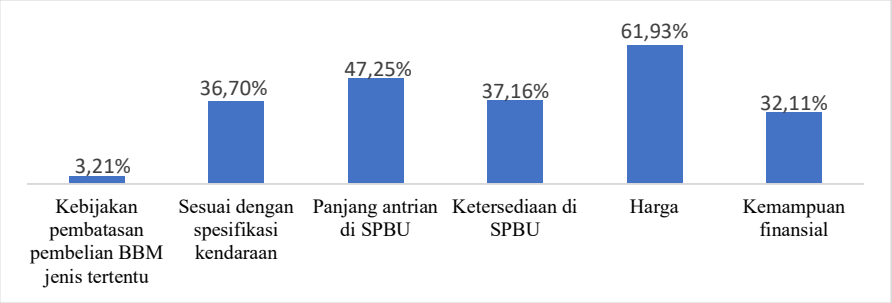
Dominasi responden yang melakukan perjalanan hampir setiap hari mengindikasikan bahwa mobilitas masyarakat di kawasan perkotaan Yogyakarta masih sangat tinggi. Kondisi ini mencerminkan bahwa kebutuhan untuk melakukan perjalanan primer memiliki tingkat kepentingan yang tinggi sehingga masyarakat cenderung tetap melakukan perjalanan meskipun menghadapi peningkatan biaya transportasi. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perjalanan primer memiliki karakteristik bersifat wajib (*mandatory travel*) sehingga relatif tidak elastis terhadap perubahan harga BBM. Masyarakat tetap mempertahankan frekuensi perjalanan untuk memenuhi kebutuhan pokok sehari-hari. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa terlihat adanya perubahan frekuensi perjalanan masyarakat sebelum dan setelah kenaikan harga BBM. Secara umum, kenaikan harga BBM menyebabkan masyarakat mengurangi intensitas perjalanan sekunder seperti *shopping, traveling* dan rekreasi karena meningkatnya biaya transportasi.

Tabel 4. Frekuensi Perjalanan Sekunder.

Biaya Transportasi	Sebelum Kenaikan Harga BBM		Setelah Kenaikan Harga BBM	
	Jumlah (orang)	Persentase (%)	Jumlah (orang)	Persentase (%)
Beberapa kali dalam seminggu	87	39,9%	40	18,3%
Hampir setiap minggu	76	34,9%	64	29,4%
Beberapa kali dalam sebulan	35	16,1%	80	36,7%
Satu kali dalam sebulan	20	9,2%	34	15,6%

Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa kenaikan harga BBM berdampak pada penurunan frekuensi perjalanan sekunder. Masyarakat cenderung mengurangi perjalanan yang sebelumnya dilakukan secara rutin setiap minggu menjadi hanya beberapa kali dalam sebulan atau bahkan satu kali dalam sebulan. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya biaya transportasi akibat kenaikan harga BBM mendorong masyarakat untuk lebih menghemat pengeluaran dan membatasi perjalanan yang bersifat non-prioritas.

4.4 Prioritas pemilihan jenis BBM

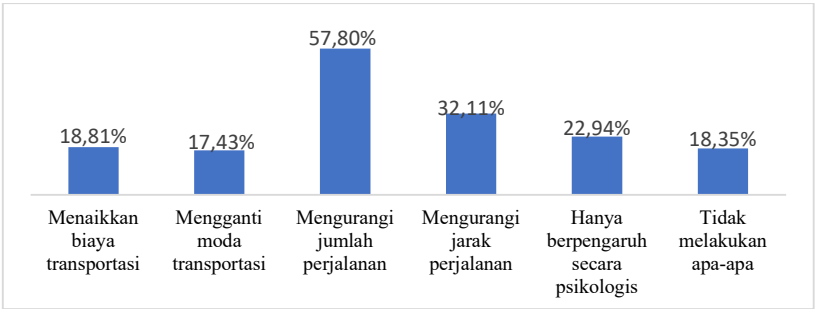


Gambar 1. Prioritas Pemilihan Jenis BBM

Dari Gambar 1 di atas dapat disimpulkan bahwa harga merupakan faktor utama yang dipertimbangkan masyarakat dalam memilih jenis BBM, dengan persentase mencapai 61,93%. Hal ini menunjukkan bahwa masyarakat cenderung lebih sensitif terhadap perubahan harga BBM dan berupaya memilih jenis bahan bakar yang paling sesuai dengan kemampuan ekonominya. Faktor berikutnya yang cukup berpengaruh adalah panjang antrean di SPBU sebesar 47,25%, yang mengindikasikan bahwa efisiensi waktu dan kemudahan memperoleh BBM juga menjadi pertimbangan penting. Selain itu, ketersediaan BBM di SPBU (37,16%) dan kesesuaian dengan spesifikasi kendaraan (36,70%) turut memengaruhi keputusan masyarakat dalam menentukan jenis BBM yang digunakan.

Sementara itu, kemampuan finansial memperoleh persentase 32,11%, menunjukkan bahwa kondisi ekonomi rumah tangga juga menjadi faktor yang dipertimbangkan, meskipun tidak sebesar pengaruh harga secara langsung. Adapun kebijakan pembatasan pembelian BBM jenis tertentu hanya dipilih oleh 3,21% responden, sehingga dapat diindikasikan bahwa kebijakan tersebut belum menjadi pertimbangan utama dalam menentukan pilihan jenis BBM. Secara keseluruhan, pemilihan jenis BBM oleh masyarakat di perkotaan Yogyakarta lebih didominasi oleh pertimbangan ekonomi dan kemudahan akses, terutama faktor harga. Temuan ini menunjukkan bahwa ketika terjadi kenaikan harga BBM, masyarakat cenderung menyesuaikan pilihan bahan bakarnya berdasarkan aspek yang dapat membantu menekan pengeluaran dan meningkatkan efisiensi dalam memperoleh BBM, sementara faktor regulasi pemerintah memiliki pengaruh yang relatif kecil terhadap preferensi masyarakat dalam memilih jenis BBM.

4.5 Perilaku saat BBM Mengalami Kenaikan



Gambar 2. Perilaku saat BBM Mengalami Kenaikan

Dari Gambar 2 di atas dapat dilihat bahwa masyarakat menunjukkan berbagai bentuk respons terhadap kenaikan harga BBM. Persentase pada setiap pilihan menggambarkan kecenderungan perilaku responden dalam menyesuaikan aktivitas perjalanan yang dilakukan saat BBM mengalami kenaikan. Mayoritas masyarakat melakukan penyesuaian mobilitas dengan mengurangi jumlah perjalanan ketika terjadi kenaikan harga BBM. Hal ini ditunjukkan oleh 57,80% responden yang memilih mengurangi jumlah perjalanan, menjadikannya respons yang paling dominan. Selain itu, 32,11% responden menyatakan mengurangi jarak perjalanan, yang menunjukkan bahwa masyarakat juga berupaya menekan pengeluaran transportasi dengan membatasi jarak tempuh. Sebanyak 18,81% responden menyatakan bahwa kenaikan harga BBM

berdampak pada meningkatnya biaya transportasi yang harus mereka keluarkan.

Di sisi lain, 17,43% responden memilih mengganti moda transportasi yang digunakan sebagai bentuk adaptasi terhadap kenaikan harga BBM. Namun, persentase ini relatif lebih kecil dibandingkan responden yang mengurangi jumlah dan jarak perjalanan, sehingga dapat diindikasikan bahwa perubahan moda transportasi bukanlah pilihan utama masyarakat. Sementara itu, 22,94% responden menyatakan bahwa kenaikan harga BBM hanya memberikan pengaruh secara psikologis, dan 18,35% responden mengaku tidak melakukan perubahan apa pun terhadap perilaku mobilitasnya. Secara keseluruhan, kenaikan harga BBM mendorong masyarakat untuk melakukan strategi penyesuaian mobilitas yang berorientasi pada penghematan biaya, terutama dengan mengurangi frekuensi dan jarak perjalanan. Sebaliknya, perubahan moda transportasi masih relatif rendah, menunjukkan bahwa masyarakat di perkotaan Yogyakarta masih memiliki ketergantungan yang cukup tinggi terhadap moda transportasi yang selama ini digunakan dan cenderung memilih mengurangi aktivitas perjalanan daripada beralih ke moda transportasi lain.

4.6 Pengaruh Kenaikan Harga BBM

No	Aspek	Sangat Berpengaruh (>30%)	Berpengaruh (20%-29,9%)	Ragu-ragu (10%-19,9%)	Sedikit Berpengaruh (5%-9,9%)	Tidak Berpengaruh (<5%)
1	Intensitas perjalanan sekunder	17,4%	40,8%	9,6%	18,8%	13,3%
2	Tingkat konsumsi BBM	32,1%	36,7%	6,4%	14,7%	10,1%
3	Pengeluaran per bulan	45,9%	39,0%	3,7%	9,6%	1,8%
4	Jenis moda transportasi yang digunakan	8,7%	27,5%	18,8%	9,6%	35,3%
5	Kebutuhan konsumsi BBM	27,5%	44,5%	9,6%	9,2%	9,2%
6	Biaya transportasi	44,0%	37,6%	6,4%	6,9%	5,0%
7	Jumlah jarak perjalanan setiap hari	21,1%	40,8%	3,7%	11,5%	22,9%
8	Jumlah perjalanan setiap hari	38,5%	27,1%	3,7%	12,8%	17,9%



Gambar 3. Pengaruh Kenaikan Harga BBM

Kenaikan harga BBM tentunya sangat berpengaruh terhadap bidang transportasi, salah satu pengaruhnya adalah terhadap perilaku masyarakat dalam melakukan mobilitas. Dari Gambar 3 di atas dapat dilihat bahwa pengeluaran per bulan dan jumlah alokasi biaya yang dikeluarkan untuk kebutuhan transportasi sangat berpengaruh, hal ini karena harga BBM naik, jadi biaya yang dikeluarkan untuk kebutuhan transportasi tentunya juga mengalami kenaikan. Pengeluaran per bulan menjadi aspek yang paling terdampak, dengan 45,9% responden menyatakan sangat berpengaruh, 39,0% menyatakan berpengaruh. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan harga BBM secara langsung meningkatkan beban pengeluaran masyarakat. Biaya transportasi juga mengalami dampak yang signifikan, di mana 44,0% responden menyatakan sangat berpengaruh dan 37,6% menyatakan berpengaruh. Kondisi ini mengindikasikan bahwa masyarakat merasakan peningkatan biaya perjalanan akibat kenaikan harga BBM.

Kebutuhan konsumsi BBM dipengaruhi oleh kenaikan harga BBM, dengan 27,5% responden menyatakan sangat berpengaruh dan 44,5% menyatakan berpengaruh. Hal ini menunjukkan adanya upaya masyarakat untuk menyesuaikan penggunaan BBM agar lebih efisien. Dari segi frekuensi dan jarak perjalanan, sebanyak 65,6% responden menyatakan bahwa jumlah perjalanan setiap hari dipengaruhi oleh kenaikan harga BBM, sedangkan 61,9% responden menyatakan jumlah jarak perjalanan setiap hari juga terpengaruh. Temuan ini mengindikasikan bahwa masyarakat cenderung mengurangi mobilitasnya sebagai bentuk adaptasi terhadap meningkatnya biaya transportasi. Pada intensitas perjalanan sekunder, sebanyak 58,2% responden menyatakan berpengaruh dan sangat berpengaruh. Hal ini menunjukkan bahwa perjalanan yang bersifat non-esensial atau tidak mendesak menjadi jenis perjalanan yang paling mudah dikurangi ketika harga BBM meningkat. Sebaliknya, jenis moda transportasi yang digunakan merupakan aspek yang paling sedikit mengalami perubahan. Sebanyak 35,3% responden menyatakan tidak berpengaruh dan 18,8% menyatakan ragu-ragu. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun harga

BBM meningkat, sebagian besar masyarakat masih mempertahankan moda transportasi yang biasa digunakan, kemungkinan karena keterbatasan alternatif transportasi yang tersedia.

Secara keseluruhan, kenaikan harga BBM mendorong masyarakat untuk melakukan penyesuaian perilaku mobilitas, terutama melalui pengurangan frekuensi dan jarak perjalanan, penurunan intensitas perjalanan sekunder, serta peningkatan perhatian terhadap efisiensi penggunaan BBM dan pengeluaran transportasi. Namun, kenaikan harga BBM belum mampu mendorong perubahan yang signifikan dalam pemilihan moda transportasi, sehingga ketergantungan masyarakat terhadap moda transportasi yang selama ini digunakan masih relatif tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa kenaikan harga BBM tidak hanya berdampak pada aspek ekonomi rumah tangga, tetapi juga memengaruhi pola mobilitas dan strategi adaptasi masyarakat dalam memenuhi kebutuhan perjalanannya.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa, kenaikan harga BBM diikuti oleh perubahan perilaku mobilitas responden di Perkotaan Yogyakarta. Dampak utama yang terlihat adalah perubahan pola perjalanan dan penyesuaian dalam penggunaan transportasi sebagai upaya untuk mengurangi beban pengeluaran akibat meningkatnya biaya BBM. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kenaikan harga BBM tidak hanya meningkatkan biaya transportasi, tetapi juga mendorong perubahan perilaku mobilitas masyarakat Perkotaan Yogyakarta. Masyarakat menjadi lebih adaptif dalam mengelola aktivitas perjalanan dengan mengurangi frekuensi dan jarak perjalanan, serta mempertimbangkan efisiensi biaya dalam penggunaan transportasi dan pemilihan jenis BBM. Temuan ini mengindikasikan bahwa kebijakan kenaikan harga BBM memiliki implikasi yang luas terhadap pola mobilitas masyarakat perkotaan dan perlu menjadi pertimbangan dalam perumusan kebijakan transportasi dan perlindungan sosial di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

[1] BPS, “Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta Dalam Angka 2024,” *Yogyakarta.Bps.Go.Id*, vol. 46, no. 2657–1218, 2024.

[2] A. A. Hidayat, L. Rahmawati, and A. M. Arlina, “Analisis Permintaan Transportasi Umum Modern Saat Kenaikan Harga BBM Perspektif Permintaan Islam: Indonesia,” *Al-Iqtishod Jurnal Ekonomi Syariah*, vol. 5, no. 1, 2023.

[3] F. R. Pohan and C. W. Al-Farizi, “Dampak Implementasi Kebijakan Kenaikan Harga Bahan Bakar Minyak (BBM) Pada Sektor Transportasi,” *Jurnal Administrasi Karya Dharma*, vol. 2, no. 2, 2023.

[4] B. P. S. BPS, “Perkembangan Pariwisata Daerah Istimewa Yogyakarta 2024,” *Badan Pusat Statistik Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta*, no. 11, 2025.

[5] S. Chuadinata and I. Basuki, “Konsep Transportasi Umum Berkelanjutan : Studi Kasus Bus Listrik di Yogyakarta,” *JURNAL SIPIL SAINS*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.33387/sipilsains.v14i1.8305.

[6] D. A. Nugroho and S. Malkhamah, “Manajemen Sistem Transportasi Perkotaan Yogyakarta,” *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, vol. 20, no. 1, 2018, doi: 10.25104/jptd.v20i1.640.

[7] P. P. Kartia, N. P. Hapsari, A. G. Nuswantoro, and H. B. Pamungkas, “Analisis Dampak Kenaikan BBM Terhadap Biaya Transportasi Perdagangan Internasional,” *Digital Bisnis: Jurnal Publikasi Ilmu Manajemen dan E-Commerce*, vol. 2, no. 4, 2023.

[8] A. N. Kurniawan, A. I. Rifai, and M. Rizal S., “Phenomena of Transportation to Work Mode Choice, Due to The Increase of Oil Prices in Indonesia: A Case Light Rail Transit Depot Project Office-Jakarta,” *Citizen : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, vol. 2, no. 5, 2022, doi: 10.53866/jimi.v2i5.193.

[9] Malik M. Z. Fathurahman, Razak Abd Rahman, and Sabir, "Kajian Determinasi Kenaikan Harga BBM pada Penghasilan Pengemudi Transportasi Online," *Jurnal Ekonomika dan Dinamika Sosial*, vol. 4, no. 1, 2025.

[10] Y. Yosritzal, Z. Anisa, and E. E. Putri, "The effect of rising prices of subsidized fuel on the use of private cars," *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.51662/jiae.v4i1.125.

[11] M. Ardian, K. B. I. Maha, J. A. Saragih, and L. P. Pakpahan, "The Impact of Government Policy to Raise Subsidized Fuel Oil Prices on City Transportation in the City of Medan," *Journal of Sumatera Sociological Indicators*, vol. 2, no. 1, 2023, doi: 10.32734/jssi.v2i1.10271.

[12] M. W. Bhagat-Conway, L. Mirtich, D. Salon, N. Harness, A. Consalvo, and S. Hong, "Subjective variables in travel behavior models: a critical review and Standardized Transport Attitude Measurement Protocol (STAMP)," *Transportation (Amst).*, vol. 51, no. 1, 2024, doi: 10.1007/s11116-022-10323-7.

[13] S. Luh, R. Kannan, T. J. Schmidt, and T. Kober, "Behavior matters: A systematic review of representing consumer mobility choices in energy models," 2022. doi: 10.1016/j.erss.2022.102596.

[14] M. Simaremare, F. Wardani, and ..., "Implications of the Increase in Public Transport Tariffs Due to the Increase in Fuel Prices on the Social Conditions of Public Transport Drivers," *Hasanuddin Journal of …*, 2023.

[15] R. D. Yuliani, S. Priyanto, and S. H. T. Utomo, "Pengaruh Kenaikan Harga Bahan Bakar Minyak terhadap Pemilihan Moda Transportasi (Studi Kasus: Perkotaan Yogyakarta)," *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, vol. 20, no. 2, 2023, doi: 10.30630/jirs.v20i2.1092.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 88-96

Penilaian Kinerja Struktur Gedung Bertingkat 5 Dengan Analisis *Pushover*

Sully Hardina Putri[1*], Candra Aditya[2], Dafid Irawan[3]

[1,2,3] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: sullyhardina@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu pendekatan evaluasi kinerja struktur yang banyak digunakan dalam perencanaan berbasis kinerja adalah metode analisis *pushover*. Penelitian ini bertujuan untuk menilai kinerja struktur bangunan rumah sakit lima lantai dari beton bertulang kategori risiko IV terhadap beban gempa, berdasarkan pedoman ATC-40 dan FEMA 356. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi numerik berbasis analisis statik non linear. Data teknis bangunan diperoleh dari gambar kerja dan spesifikasi material, kemudian dimodelkan menggunakan perangkat lunak SAP2000. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada arah X, struktur memiliki *drift* maksimum sebesar 0,00524 dan tergolong dalam kriteria *Immediate Occupancy* hingga *Damage Control*. Sementara pada arah Y, nilai *drift* mencapai 0,02176 dan termasuk dalam kategori *Damage Control*. Distribusi sendi plastis menunjukkan bahwa arah Y mengalami penyebaran plastis yang lebih cepat, menandakan arah ini lebih fleksibel namun lebih rentan terhadap kerusakan struktural. Kurva kapasitas mengungkapkan bahwa kapasitas gaya geser dasar arah Y lebih tinggi, tetapi disertai dengan deformasi lateral yang lebih besar.

Kata kunci : Analisis *Pushover*, *Displacement*, Kurva Kapasitas, And Sendi Plastis.

ABSTRACT

One of the most widely used approaches for evaluating structural performance in performance-based design is the pushover analysis method. This study aims to assess the seismic performance of a five-story reinforced concrete hospital building classified as Risk Category IV, based on the ATC-40 and FEMA 356 guidelines. This study employs a quantitative approach using numerical simulation based on nonlinear static analysis. Technical data on the building were obtained from construction drawings and material specifications, then modeled using SAP2000 software. The analysis results show that in the X-direction, the structure has a maximum drift of 0.00524 and falls within the Immediate Occupancy to Damage Control criteria. Meanwhile, in the Y-direction, the drift value reached 0.02176 and fell within the "Damage Control" category. The distribution of plastic hinges showed that the Y-direction experienced faster plastic deformation, indicating that this direction is more flexible but more vulnerable to structural damage. The capacity curves revealed that the base shear capacity in the Y-direction was higher, but it was accompanied by greater lateral deformation.

Keywords **:** *Pushover Analysis, Displacement, Capacity Curve, And Plastic Hinge.*

1. PENDAHULUAN

Indonesia yang berada di kawasan seismik aktif memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi, sehingga perencanaan struktur tahan gempa menjadi sangat penting. Beton bertulang, karena kekuatan tekan dan tariknya yang memadai, menjadi salah satu material struktur yang banyak digunakan dalam bangunan bertingkat, termasuk rumah sakit yang tergolong dalam kategori risiko tinggi (kategori IV) [1]. Salah satu penyebab utama jatuhnya korban jiwa dalam bencana gempa adalah keruntuhan struktur bangunan, bukan gempa itu sendiri[2]. Oleh karena itu, penting bagi perencana struktur untuk memastikan bahwa bangunan, terutama yang bersifat vital seperti rumah sakit, mampu mempertahankan fungsinya selama dan sesudah kejadian gempa [3]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan rumah sakit bertingkat dari beton bertulang dengan metode *pushover* [4], menilai penyebaran sendi plastis yang terjadi saat struktur mengalami deformasi ekstrem, serta mengkaji kurva kapasitas bangunan terhadap gempa, mengevaluasi kinerja struktur rumah sakit bertingkat dari beton bertulang, menilai penyebaran dan pengaruh sendi plastis terhadap kestabilan struktur,

serta menghasilkan kurva kapasitas bangunan berdasarkan pendekatan FEMA 356 [5]. Hasil analisis diharapkan dapat memberi gambaran komprehensif tentang tingkat keamanan struktur dan potensi keruntuhannya. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan metode evaluasi kinerja struktur bangunan terhadap gempa secara lebih praktis dan akurat [6]. Dengan mengadopsi pendekatan analisis statik non linear, studi ini menjembatani kesenjangan antara perencanaan berbasis peraturan (*code-based*) dan perencanaan berbasis kinerja (*performance-based*) [7], yang masih terbatas penerapannya di Indonesia. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi referensi teknis dalam desain atau rehabilitasi bangunan penting seperti rumah sakit di wilayah rawan gempa.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Bertulang

Beton bertulang adalah material komposit yang terbentuk dari kombinasi beton dan baja tulangan [8], di mana beton berfungsi menahan gaya tekan sedangkan baja tulangan menahan gaya tarik. Kombinasi ini memanfaatkan keunggulan masing-masing material sehingga menghasilkan elemen struktur yang kuat dan tahan lama [9]. Beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi, namun lemah terhadap gaya tarik, sehingga diperlukan baja tulangan untuk meningkatkan kapasitas tariknya. Menurut SNI 2847:2019, perencanaan beton bertulang harus mempertimbangkan kekuatan bahan, dimensi elemen, dan penulangan yang sesuai agar dapat menahan beban yang bekerja, termasuk beban gravitasi dan beban lateral akibat gempa [10].

2.2 Kinerja Struktur

Kinerja struktur adalah kemampuan suatu bangunan dalam menahan beban yang bekerja [10], terutama beban lateral akibat gempa, sehingga tetap memenuhi persyaratan keselamatan, kenyamanan, dan fungsi sesuai dengan tujuan perencanaan. Berdasarkan ATC-40 (1996) [4], tingkat kinerja struktur diklasifikasikan menjadi beberapa kategori, antara lain *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP) [11]. Penilaian kinerja dilakukan dengan mempertimbangkan besarnya perpindahan, tingkat kerusakan elemen struktur, serta kemampuan bangunan untuk tetap berfungsi pasca-gempa[10]. Dalam konteks penelitian ini, kinerja struktur dievaluasi melalui analisis *pushover* untuk mengetahui sejauh mana struktur mampu berdeformasi sebelum mencapai kondisi batas. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan kriteria kinerja yang tercantum dalam FEMA 356 (2000) [2], sehingga dapat diketahui apakah struktur telah memenuhi standar atau memerlukan perkuatan pada elemen-elemen tertentu. Evaluasi ini penting terutama untuk bangunan dengan fungsi vital seperti rumah sakit, yang dituntut tetap operasional setelah terjadinya gempa.

2.3 Analisis *Pushover*

Analisis *pushover* merupakan metode analisis statik non linear yang digunakan untuk memprediksi perilaku struktur bangunan terhadap beban lateral [10], seperti gempa bumi. Metode ini dilakukan dengan memberikan beban lateral secara bertahap pada model struktur hingga mencapai batas kegagalan. Analisis ini mampu menggambarkan distribusi deformasi, pembentukan sendi plastis, serta memprediksi kapasitas maksimum struktur [12]. Dibandingkan analisis dinamik non linear, metode *pushover* relatif lebih sederhana namun cukup akurat untuk bangunan dengan ketinggian dan konfigurasi umum [13]. Sesuai penjelasan Dewobroto [2], jika disesuaikan dengan batasan saat ini, analisis *pushover* bisa dipergunakan untuk menjadi bantuan dalam perencanaan tahan gempa. Namun, sementara sifat pembebanan dari analisis *pushover* yaitu statik monoton, perilaku gempa yang sebetulnya merupakan bolak-balik dalam siklus tertentu. Akibatnya, hasil analisis *pushover* masih berupa pendekatan. Pilihan pola beban lateral yang akan dipergunakan untuk analisis penting sekali. Tahapan utama dari analisis *pushover* yaitu:

a. Menyusun kurva *pushover* dengan menetapkan titik kontrol guna mengawasi besar dari perpindahannya struktur. Rekaman besar perpindahan titik kontrol serta gaya geser dasar dipergunakan.
b. Dikarenakan gempa memiliki sifat tidak pasti, harus dibentuk sejumlah pola pembebanan

lateral. Kurva *pushover* dari beragam pola distribusi gaya lateral harus ekivalen terhadap distribusi gaya inersia, agar deformasi yang diharapkan hampir serupa terhadap gempa sebetulnya.

c. Estimasi seberapa besar target perpindahan titik kontrol didorong hingga perpindahan maksimal yang ditentukan intensitas gempa rencana.

Hal penting dalam perencanaan berbasis kinerja adalah evaluasi tingkat kinerja struktur saat titik kendali berada tepat di target perpindahan [4]. Jika komponen struktur memenuhi persyaratan deformasi dan kekuatan, komponen akan dinyatakan memuaskan. Karena komponen yang dievaluasi banyak sekali, prosesnya perlu dilakukan mempergunakan komputer melalui fitur *pushover* serta evaluasi kinerja di program SAP2000 [2].

2.4 Target Perpindahan

Target perpindahan dalam analisis *pushover* merujuk pada nilai maksimum perpindahan lateral yang diharapkan terjadi di titik kontrol, biasanya di puncak struktur, saat struktur tersebut mengalami beban gempa yang telah direncanakan [10]. Nilai ini berfungsi sebagai acuan untuk menilai kinerja struktur dalam menghadapi gempa dan untuk menentukan apakah struktur tersebut memenuhi standar kinerja yang diinginkan [12]. Salah satu metode yang digunakan untuk analisis ini adalah Metode Koefisien Perpindahan, atau yang lebih dikenal dengan *Displacement Coefficient Method* (DCM), yang dijelaskan dalam FEMA 273/356 sebagai bagian dari prosedur analisis statik non-linier [11]. Proses penyelesaian dilakukan dengan mengubah respons elastis linier dari sistem satu derajat kebebasan (SDOF) yang setara menggunakan faktor koefisien C0, C1, C2, dan C3. Dengan cara ini, kita dapat menghitung target perpindahan (δ) [2]. Metode ini memungkinkan insinyur untuk memperkirakan perilaku struktur di bawah kondisi gempa yang berbeda, sehingga dapat diambil langkah-langkah perbaikan atau penguatan yang diperlukan untuk memastikan keselamatan dan kinerja struktur. Selain itu, analisis *pushover* juga memberikan wawasan tentang distribusi gaya dan momen dalam struktur, yang penting untuk desain yang lebih baik dan lebih aman [12].

2.5 Sendi Plastis

Dalam suatu struktur, ketika beban yang bekerja melebihi kapasitas elastis elemen, akan terjadi deformasi permanen yang memicu terbentuknya sendi plastis [14]. Kondisi ini umum terjadi pada struktur yang mengalami gaya lateral besar, seperti akibat gempa bumi. Saat elemen struktural baik balok maupun kolom mencapai batas elastisnya, material akan mengalami perilaku plastis yang ditandai dengan ketidakmampuan elemen untuk kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan. Meskipun demikian, elemen tersebut masih mampu menyalurkan beban ke bagian lain dari struktur melalui sendi plastis yang terbentuk. Posisi dan jumlah sendi plastis yang muncul selama proses analisis menjadi indikator penting untuk menilai sejauh mana struktur dapat mempertahankan kinerjanya sebelum mencapai kondisi kegagalan. Identifikasi lokasi kritis ini memungkinkan perencana untuk mengetahui elemen yang paling rentan, sehingga dapat dilakukan strategi perkuatan atau perbaikan yang tepat. Selain itu, distribusi sendi plastis juga berhubungan erat dengan konsep *strong column–weak beam*, di mana diharapkan sendi plastis terbentuk pada balok terlebih dahulu guna mencegah kegagalan kolom yang dapat memicu keruntuhan total.

2.6 Kinerja Seismik

Kinerja seismik merujuk pada respons suatu struktur ketika terkena beban gempa, yang mencakup kapasitas deformasi, tingkat kerusakan, dan stabilitas keseluruhan [10]. Penilaian kinerja seismik melalui analisis *pushover* memberikan pemahaman yang lebih realistis mengenai kemampuan struktur dalam menghadapi gempa yang telah direncanakan. Dengan membandingkan hasil analisis tersebut dengan kriteria yang ditetapkan dalam ATC-40 atau FEMA 356, kita dapat menentukan apakah struktur tersebut memenuhi tingkat kinerja yang diharapkan atau jika diperlukan tindakan perkuatan. Analisis *pushover* tidak hanya membantu dalam menilai kinerja seismik, tetapi juga memberikan informasi penting tentang perilaku struktur di luar batas elastis. Metode ini memungkinkan insinyur untuk mengidentifikasi titik lemah dalam desain struktur dan merencanakan perbaikan yang diperlukan. Selain itu, analisis

ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak dari berbagai skenario gempa, sehingga memungkinkan perencanaan mitigasi risiko yang lebih efektif. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang kinerja seismik sangat penting untuk memastikan keselamatan dan keberlanjutan bangunan di daerah rawan gempa.

2.7 Penelitian Terdahulu

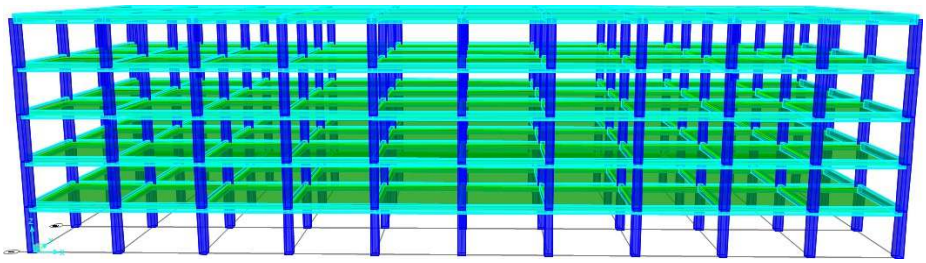
Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Wardhani dkk. [15] dan Kukuh dkk. [7], yang menunjukkan bahwa analisis *pushover* efektif dalam memetakan kapasitas struktur dan mendeteksi titik kritis keruntuhan. Penelitian ini memperkuat bukti bahwa pendekatan *performance-based seismic design* dapat memberikan evaluasi yang lebih realistis terhadap respons bangunan dibandingkan pendekatan konvensional berbasis peraturan. Dengan fokus pada bangunan rumah sakit, kontribusi akademik utama dari studi ini adalah menyediakan acuan evaluatif untuk bangunan fungsi vital di zona rawan gempa, serta menunjukkan pentingnya pemahaman arah dominan deformasi dalam strategi desain struktur. Penelitian terdahulu oleh [15] menunjukkan bahwa analisis *pushover* dapat memprediksi kapasitas struktur dan titik kinerja bangunan secara akurat, sedangkan penelitian [7] menegaskan efektivitas metode ini dalam mengevaluasi distribusi sendi plastis dan menentukan tingkat kinerja seismik bangunan beton bertulang.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis numerik berbasis simulasi untuk mengevaluasi kinerja struktur bangunan terhadap beban gempa. Metode yang digunakan adalah *pushover* analysis, yaitu metode analisis statik non linear yang bertujuan untuk melihat bagaimana struktur beton bertulang merespons beban lateral secara bertahap hingga mencapai batas kekuatan maksimum [11]. Metode ini memungkinkan peneliti untuk mengamati pembentukan sendi plastis, menganalisis pola deformasi, serta mengidentifikasi potensi keruntuhan struktur pada kondisi gempa. Data yang dikumpulkan meliputi dimensi elemen struktural (balok, kolom, pelat), jenis dan mutu bahan (beton dan baja tulangan), serta jenis beban yang bekerja pada struktur (beban mati, beban hidup, dan beban gempa). Semua data ini kemudian di input ke dalam perangkat lunak SAP2000 untuk membentuk model struktur tiga dimensi. Proses analisis dilakukan dengan menerapkan beban lateral secara bertahap pada struktur, menggunakan kombinasi beban sesuai ketentuan SNI 1726-2019 dan pedoman FEMA 356. Analisis data dilakukan dengan mengevaluasi hasil output berupa kurva kapasitas (hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap), distribusi sendi plastis, serta titik kinerja struktur. Hasil-hasil ini digunakan untuk menilai tingkat deformasi maksimum, kapasitas dukung struktur, dan keandalan bangunan dalam mempertahankan stabilitas saat gempa. Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan membandingkan hasil analisis terhadap kriteria tingkat kinerja dalam pedoman ATC-40 dan FEMA 356.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gedung pada Gambar 1 terdiri atas lima lantai dengan tinggi masing-masing lantai sekitar 4 meter, sehingga total tinggi gedung mencapai 20 meter. Dimensi struktur bangunan ini memiliki panjang bentang 80 meter untuk arah X serta 24 meter untuk Y. Material yang dipergunakan yakni beton bertulang dengan mutu K300 dengan tulangan baja BJTS 240.



Gambar 1. Permodelan Struktur Bangunan dengan SAP2000

4.1 Evaluasi Perpindahan dan Kinerja Seismik

1. *Pushover* arah x

   a. Maksimal *Drift*

$$\frac{Dt}{H\ Total} = \frac{0{,}1048}{20} = 0{,}00524$$

   b. Maksimum *In-Elastic- Drift*

$$\frac{Dt - D1}{H\ Total} = \frac{0{,}1048 - 0{,}0098}{20} = 0{,}0055$$

2. *Pushover* arah y

   a. Maksimal *Drift*

$$\frac{Dt}{H\ Total} = \frac{0{,}4352}{20} = 0{,}02176$$

   b. Maksimum *In-Elastic- Drift*

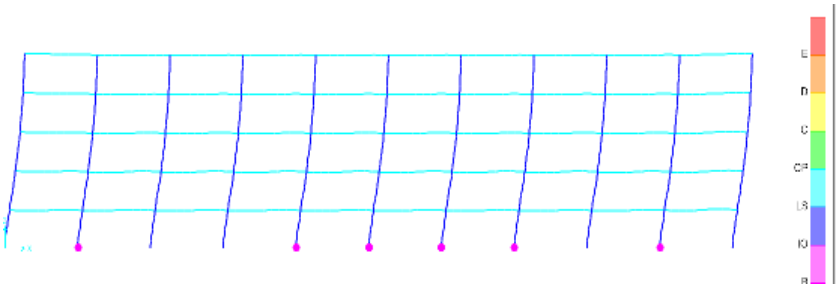
$$\frac{Dt - D1}{H\ Total} = \frac{0{,}4352 - 0{,}0398}{20} = 0{,}01979$$

Analisis *pushover* menunjukkan bahwa pada arah X, gedung memiliki *total drift* maksimum sebesar 0,00524 dan *in-elastic drift* sebesar 0,0055. Berdasarkan kriteria FEMA 356, nilai ini mengindikasikan bahwa struktur berada pada tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO) hingga *Damage Control* (DC). Sementara itu, pada arah Y, nilai *total drift* mencapai 0,02176 dan *in- elastic drift* sebesar 0,01979, keduanya termasuk dalam kategori *Damage Control*. Temuan ini menunjukkan bahwa struktur masih mampu menjaga kestabilan pasca-gempa ringan hingga sedang, terutama pada arah X yang lebih kaku. Namun, arah Y lebih rentan karena deformasi lateralnya yang lebih besar, mencerminkan perbedaan kekakuan antar arah utama struktur.

4.2 Distribusi Sendi Plastis dan Level Kerusakan

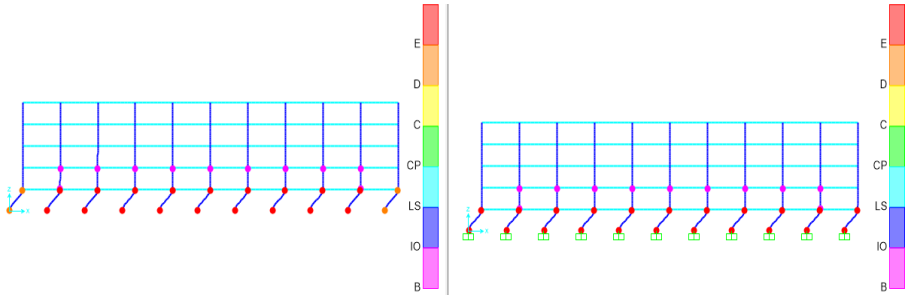
1. Sendi Plastis Arah X

Sendi plastis yang berorientasi pada arah X pada Gambar 2 mulai terbentuk di dalam kolom sejak tahap awal proses, yang dapat dikenali melalui kemunculan titik-titik plastis berwarna ungu di beberapa lokasi. Fenomena ini menandakan bahwa sendi plastis tersebut telah mencapai kondisi kinerja yang ditandai sebagai titik kinerja B.



Gambar 2. Step 1 sendi plastis arah x

Pelelehan sendi plastis pertama di *pushover* arah X terjadi pada step pertama, dengan besar perpindahannya sejumlah 0,017906 m melalui gaya geser dasar sejumlah 9321,75 kN. Pada langkah ke-26, perangkat lunak analisis struktural SAP2000 menghentikan proses iterasi, yang berarti bahwa akses ke sendi plastis terbatas hanya hingga tahap tersebut.

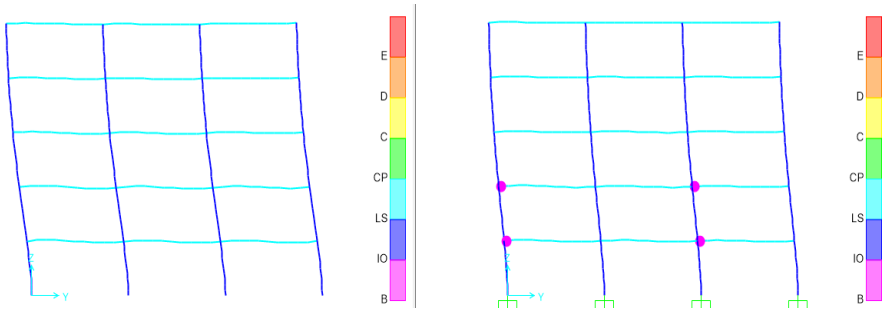


Gambar 3. Step 11 dan step 26 sendi plastis arah x

Step 11 sampai dengan step ke 26 pada Gambar 3 menunjukkan distribusi sendi plastis yang sama, step 26 merupakan kondisi pelelehan sendi plastis maksimum dengan perpindahan sejumlah 1,000012 m melalui gaya geser dasar sejumlah 30,046 kN.

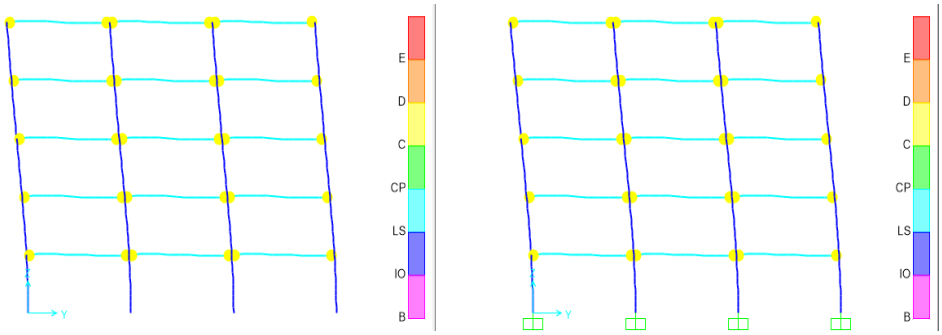
2. Sendi Plastis Arah Y

Sendi plastis yang berorientasi pada arah Y mulai terbentuk di dalam kolom sejak tahap awal proses, yang dapat dikenali melalui kemunculan titik-titik plastis berwarna ungu di beberapa lokasi.



Gambar 4. Step 1 dan step 2 sendi plastis arah y

Pada step 1 Gambar 4 belum terdapat pelelehan pada sendi plastis. Pelelehan sendi plastis pertama kali berlangsung di step 2 dengan perpindahan sejumlah 0,051962 m melalui gaya geser dasar sejumlah 18668,936 kN. Pada langkah ke-12, perangkat lunak analisis struktural SAP2000 menghentikan proses iterasi, yang berarti bahwa akses ke sendi plastis terbatas hanya hingga tahap tersebut. Dalam analisis yang dilakukan, sendi plastis pada kolom teridentifikasi mulai dari kolom di lantai pertama hingga lantai kelima.

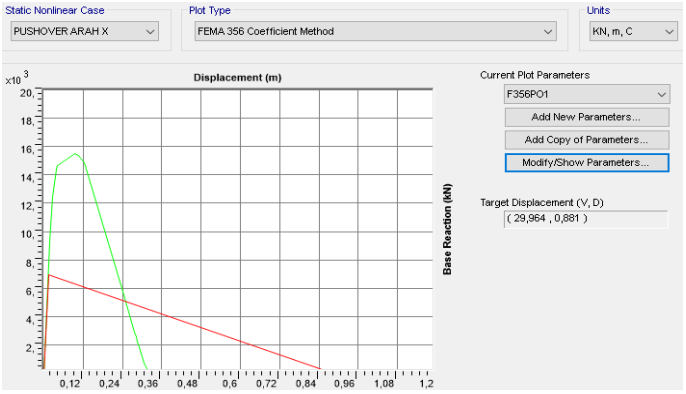


Gambar 5. Step 9 dan step 12 sendi plastis arah y

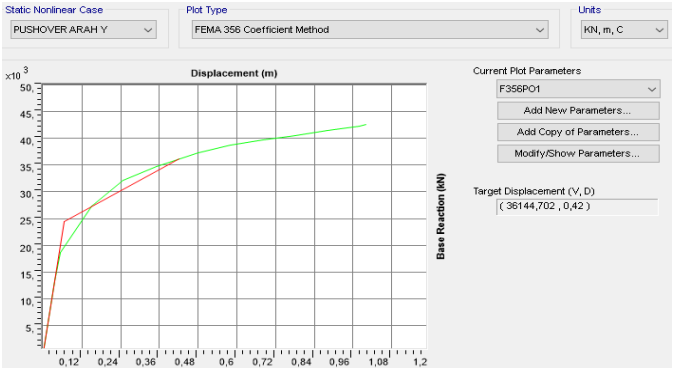
Step 9 sampai dengan step ke 12 pada Gambar 5 menunjukkan distribusi sendi plastis yang sama, step 12 merupakan kondisi pelelehan sendi plastis maksimum dengan perpindahan sejumlah 1,000032 m melalui gaya geser dasar sejumlah 42533,185 kN. Sendi plastis pertama kali muncul pada balok dan kolom di arah X pada langkah awal (step 1), menunjukkan bahwa gaya lateral mulai menyebabkan kerusakan plastis sejak dini. Pada langkah ke-26, sendi plastis telah tersebar hampir di seluruh elemen struktur dengan sebagian kolom mencapai fase *Collapse Prevention*, menandakan ambang batas keamanan sudah terlampaui. Pada arah Y, distribusi

sendi plastis terjadi lebih cepat dan padat dimulai dari step 2 dan mencapai puncaknya di step 12. Ini menunjukkan bahwa arah Y lebih cepat mengalami degradasi plastis, memperkuat temuan sebelumnya tentang fleksibilitas arah Y yang tinggi namun berisiko lebih besar terhadap keruntuhan lokal. Berdasarkan klasifikasi ATC-40, beberapa komponen berada pada kategori kinerja B dan C, yang berarti struktur telah mengalami deformasi plastis signifikan namun belum sepenuhnya gagal.

4.3 Kurva Kapasitas dan Daya Dukung Struktur



Gambar 6. Kurva koefisien perpindahan FEMA 356 akibat pushover arah x gedung



Gambar 7. Kurva koefisien perpindahan FEMA 356 akibat pushover arah y gedung

Dari kurva *pushover* yang terlihat dari grafik koefisien perpindahan FEMA 356 di atas, ditulis hasilnya melalui Tabel 1 di bawah.

Tabel 1. Perpindahan dan gaya geser maksimum bangunan

	Displacement (m)	**Base Force (kN)**
Pushover X	1,000012	15.497,347
Pushover Y	1,000032	42.533,185

Kurva kapasitas hasil simulasi pada Gambar 6 dan 7 menunjukkan perbedaan signifikan antar arah. Pada arah X, proses analisis berakhir pada perpindahan 1,000012 meter dengan gaya geser dasar maksimum 30,046 kN. Sebaliknya, arah Y menunjukkan daya tahan yang jauh lebih besar, dengan perpindahan akhir 1,000032 meter dan gaya geser dasar 42.533,185 kN. Perbedaan ini menegaskan bahwa struktur memiliki kapasitas lateral lebih tinggi di arah Y, meskipun tingkat deformasinya lebih besar. Hal ini mengindikasikan kompromi antara fleksibilitas dan kekuatan, serta menunjukkan bahwa arah Y memerlukan perhatian lebih dalam perencanaan perkuatan struktur.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa struktur bangunan rumah sakit kategori risiko IV yang dianalisis menggunakan metode *pushover* memiliki tingkat kinerja yang bervariasi tergantung arah gaya lateral. Pada arah X, struktur berada pada kategori *Immediate Occupancy* hingga *Damage Control*, dengan distribusi sendi plastis yang relatif merata dan stabil. Namun, pada arah Y, struktur menunjukkan *drift* yang lebih besar dan penyebaran sendi plastis yang lebih cepat, yang menunjukkan bahwa arah ini lebih rentan terhadap deformasi akibat gempa. Kurva kapasitas memperlihatkan bahwa meskipun arah Y memiliki daya dukung lateral lebih besar, fleksibilitas yang tinggi berpotensi mempercepat kerusakan lokal. Hasil ini menjawab bahwa metode *pushover* efektif dalam mengevaluasi kinerja struktur beton bertulang terhadap beban gempa, serta mengidentifikasi posisi sendi plastis dan kapasitas maksimum bangunan. Secara praktis, temuan ini dapat menjadi acuan dalam desain dan evaluasi bangunan tahan gempa, khususnya untuk fungsi kritis seperti rumah sakit. Namun, penelitian ini terbatas pada satu jenis struktur dan model numerik; oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan mencakup variasi bentuk denah, sistem struktur, serta verifikasi dengan data eksperimental atau simulasi dinamis non linier.

DAFTAR PUSTAKA

[1] F. Nugroho, "Penerapan Analisis *Pushover* Untuk Menentukan Kinerja Struktur Pada Bangunan Eksisting Gedung Beton Bertulang," *Jurnal Momentum (ISSN: 1693-752X)*, vol. 18, no. 2, pp. 19–25, 2016.

[2] W. Dewobroto, "Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 3, no. 1, pp. 7–24, 2006.

[3] A. Siswanto and M. Alifm, "Kriteria Dasar Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa," *Jurnal Teknik sipil*, vol. 11, 2018.

[4] D. I. Cahyani, E. Budiman, B. Haryanto, F. N. Abdi, and M. Widiastuti, "Analisis *Pushover* Untuk Performance Based Design Pada Struktur Beton Bertulang Dengan Menggunakan Software ETABS (Studi Kasus : Proyek Hotel Fox Harris Lite di Jln. S.Parman, Kota Samarinda, Kalimantan Timur)," *Teknologi Sipil : Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, vol. 6, no. 1, p. 30, Jun. 2022, doi: 10.30872/ts.v6i1.7721.

[5] E. Desimaliana, N. V. Diredja, and R. Syahputra, "Analisis *Pushover* terhadap Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur Gedung Baja Komposit," *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, vol. 8, no. 2, p. 118, Aug. 2022, doi: 10.26760/rekaracana.v8i2.118.

[6] D. R. Benita, E. Desmaliana, and A. Pribadi, "Analisis Perbandingan Kinerja Struktur Baja SRBKK Tipe Inverted-V pada Gedung Bertingkat 12, 16, dan 20 Lantai," *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, vol. 5, no. 4, p. 65, Dec. 2019, doi: 10.26760/rekaracana.v5i4.65.

[7] Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono, E. A. Krisdianti, and G. Gunarso, "Analisis Kinerja Struktur Pada Gedung Bertingkat Dengan Analisis *Pushover* Berdasarkan Atc-40," *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 29, no. 2, pp. 7–16, Jul. 2024, doi: 10.36728/jtsa.v29i2.3300.

[8] R. Djamaluddin, M. Tjaronge, and A. Baharudin, "Studi Karakteristik Balok Beton Bertulang Luar Study Characteristics External Reinforced Concrete Beam," *Jurnal Penelitian Teknik Sipil*.

[9] A. Asroni, *Teori dan Desain Balok Plat Beton Bertulang*. Surakarta: Muhamamadiyah University Press, 2016.

[10] F. Rizki and P. Pamungkas, "Analisis Kinerja Struktur Pada Konstruksi Baja dan Konstruksi Beton Bertulang Dengan Analisa *Pushover* Statik Non-Linear Menggunakan Software ETABS (Studi Kasus : Hotel Santika, Batam)," *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 2, no. 1, pp. 64–76, Jun. 2021, doi: 10.37253/jcep.v2i1.729.

[11] I. M. Sastra Wibawa, I. K. D. Kubon Tubuh, and P. P. L. Aditya Prawira, "Analisis Kinerja Struktur Gedung Dengan Analisis *Pushover* Pada Proyek Gedung Rektorat Universitas Mahasaraswati Denpasar," *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, vol. 10, no. 2, pp. 53–61, Nov. 2021, doi: 10.36733/jikt.v10i2.3001.

[12] Sudarman, H. Manalip, R. S. Windah, and S. o Dapas, "Analisis *Pushover* Pada Struktur

Gedung Bertingkat Tipe Podium," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 2, no. 4, pp. 201–213, 2014.

[13] S. Wahyuni, A. Khamid, Wahidin, Imron, and Y. Feriska, "Evaluasi Kinerja Struktur Dinding Bata dengan Metode Analisis *Pushover* pada Bangunan Sederhana," *Infratech Building Journal (IJB)*, vol. 2, pp. 29–39, 2021.

[14] S. Kusumo and D. Kurniati, "Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung Kuliah C UNISA Yogyakarta Menggunakan *Pushover* Analysis Dengan Metode FEMA 356 Dan ATC-40," 2013.

[15] A. S. K. Wardhani, P. Priyono, and A. S. Manggala, "Evaluasi Kapasitas Struktur Gedung Meotel By Dafam Jember Dengan Metode *Pushover* Analysis," *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Hexagon*, vol. 4, no. 2, pp. 1–4, Sep. 2020, doi: 10.32528/hgn.v4i2.3563.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 97-106

Analisis Hubungan Distribusi Ukuran Butir Material Timbunan Terhadap Nilai Kohesi dan Sudut Geser Dalam Menggunakan Uji *Large Scale Direct Shear*

Decandyo Risqi Ramadhana Putra[1*], Agus Tugas Sudjianto[2], M. Cakrawala[3]

[1]PT. Agrinas Palma Nusantara (Direktorat Konsultan Konstruksi)
[2,3]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: decandyorizqi@gmail.com

ABSTRAK

Kekuatan geser tanah merupakan parameter penting dalam perencanaan geoteknik, khususnya pada konstruksi timbunan dan struktur tanah. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan distribusi ukuran butir terhadap parameter kuat geser berdasarkan hasil pengujian *Large Scale Direct Shear* (LSDS). Penelitian menggunakan 40 sampel material yang terdiri atas 31 sampel random kasar dan 9 sampel random halus. Karakteristik distribusi ukuran butir dianalisis berdasarkan D10, D30, D60, koefisien keseragaman (Cu), koefisien kelengkungan (Cc), serta persentase *coarse part* dan *finer part*. Parameter kuat geser berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) diperoleh dari pengujian LSDS berdasarkan kriteria *Mohr-Coulomb*. Analisis hubungan dilakukan menggunakan regresi linier dan koefisien determinasi (R^2). Hasil klasifikasi menunjukkan material terdiri atas GW 25%, GP 42,5%, GC 30%, dan SP 2,5%. Nilai kohesi berkisar 0,2 – 7,0 kg/cm² dengan rata-rata 3,1 kg/cm², sedangkan sudut geser dalam berkisar 18,7° – 44,7° dengan rata-rata 34,6°. Hubungan distribusi ukuran butir terhadap kohesi relatif lemah dengan R^2 0,0158–0,1347. Sebaliknya, *coarse part* dan *finer part* menunjukkan hubungan lebih kuat terhadap sudut geser dalam dengan R^2 sebesar 0,5477. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi butiran lebih representatif dalam menjelaskan variasi sudut geser dalam.

Kata kunci : Distribusi Ukuran Butir, Kohesi, Sudut Geser Dalam, Large Scale Direct Shear dan Kuat Geser.

ABSTRACT

Soil shear strength is an important parameter in geotechnical design, particularly in the construction of embankments and soil structures. This study aims to analyze the relationship between grain size distribution and shear strength parameters based on the results of Large Scale Direct Shear (LSDS) tests. The study used 40 material samples, consisting of 31 coarse random samples and 9 fine random samples. The characteristics of the particle size distribution were analyzed based on D10, D30, D60, the uniformity coefficient (Cu), the kurtosis coefficient (Cc), and the percentages of coarse and finer particles. Shear strength parameters—namely cohesion (c) and internal friction angle (φ)—were obtained from LSDS testing based on the Mohr-Coulomb criteria. The relationship was analyzed using linear regression and the coefficient of determination (R^2). The classification results showed that the material consisted of 25% GW, 42.5% GP, 30% GC, and 2.5% SP. Cohesion values ranged from 0.2 to 7.0 kg/cm² with an average of 3.1 kg/cm², while the internal friction angle ranged from 18.7° to 44.7° with an average of 34.6°. The relationship between particle size distribution and cohesion was relatively weak, with R^2 values ranging from 0.0158 to 0.1347. In contrast, the coarse and finer fractions showed a stronger relationship with the angle of internal friction, with an R^2 of 0.5477. These results indicate that particle composition is a more representative factor in explaining variations in the angle of internal friction.

***Keywords* :** *Particle Size Distribution, Cohesion, Internal Friction Angle, Large Scale Direct Shear, and Soil Shear Strength.*

1. PENDAHULUAN

Tanah merupakan salah satu material utama dalam pekerjaan konstruksi dan rekayasa geoteknik. Karakteristik tanah perlu dipahami karena material tersebut berperan sebagai bagian dari sistem pendukung berbagai struktur, seperti fondasi, timbunan, lereng, dan konstruksi lainnya. Salah satu karakteristik mekanik yang penting dalam analisis geoteknik adalah kuat geser tanah. Kuat geser menunjukkan kemampuan material dalam menahan tegangan geser sebelum mengalami keruntuhan dan umumnya dinyatakan melalui parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) [1], [2]. Kuat geser tanah dipengaruhi oleh berbagai karakteristik material, antara lain ukuran dan distribusi butiran, bentuk butiran, kepadatan, kadar air, serta kondisi tegangan. Pada material berbutir kasar, interaksi antar butir, gesekan, dan mekanisme *interlocking* menjadi bagian penting dalam pembentukan tahanan geser. Oleh karena itu, perubahan komposisi dan distribusi ukuran butiran dapat menghasilkan perubahan terhadap perilaku kuat geser material [1], [3]. Distribusi ukuran butiran merupakan karakteristik yang menggambarkan penyebaran partikel berdasarkan ukurannya. Analisis distribusi ukuran butiran dapat digunakan untuk menentukan diameter karakteristik D10, D30, dan D 60. Ketiga parameter tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan koefisien keseragaman (Cu) dan koefisien kelengkungan (Cc) sebagai parameter yang menggambarkan karakteristik gradasi material [4].

Hubungan antara ukuran butir dan kuat geser telah menjadi perhatian dalam berbagai penelitian. Islam et al. [5] menunjukkan bahwa ukuran partikel dapat memengaruhi perilaku kuat geser pasir. Perubahan ukuran partikel menghasilkan perubahan terhadap karakteristik geser material, terutama melalui mekanisme kontak dan gesekan antar butir [6]. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik distribusi ukuran butiran perlu dipertimbangkan dalam analisis parameter kuat geser. Pada material yang mengandung fraksi halus, pengaruh distribusi ukuran butiran terhadap kuat geser menjadi lebih kompleks. Umam et al. [13] menunjukkan bahwa gradasi pasir dan kadar lempung dapat memengaruhi kuat geser tanah. Penambahan material lempung dapat meningkatkan kontribusi kohesi, sedangkan perubahan komposisi material dapat menyebabkan perubahan terhadap sudut geser dalam. Rambe [7] juga membahas keterkaitan fraksi lempung dengan nilai kohesi dan indeks plastisitas.

Pengujian *direct shear* merupakan salah satu metode laboratorium yang umum digunakan untuk menentukan parameter kuat geser. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan normal dan gaya geser pada benda uji hingga terjadi kondisi keruntuhan. Hasil pengujian dapat digunakan untuk memperoleh parameter kohesi dan sudut geser dalam berdasarkan hubungan tegangan normal dan tegangan geser [8]. Penggunaan *Large Scale Direct Shear* (LSDS) menjadi solusi untuk menguji material berbutir besar yang tidak dapat direpresentasikan secara optimal oleh benda uji kecil. Berdasarkan pengujian 40 sampel dari Laboratorium Geoteknik PT Agrinas Palma Nusantara, penelitian ini menganalisis hubungan antara parameter distribusi ukuran butiran (Cu, Cc, *coarse part*, dan *finer part*) terhadap parameter kuat geser (kohesi dan sudut geser dalam). Mengingat masih terbatasnya kajian yang membandingkan parameter indeks gradasi dan komposisi terhadap hasil pengujian LSDS, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan tersebut serta menentukan parameter distribusi ukuran butiran yang paling representatif dalam menjelaskan variasi kuat geser material.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Distribusi Ukuran Butir

Distribusi ukuran butir merupakan penyebaran ukuran partikel yang terdapat dalam suatu sampel material [4]. Distribusi tersebut dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik gradasi dan membantu mengidentifikasi perilaku material. Dalam penelitian geoteknik, distribusi ukuran butir umumnya diperoleh melalui analisis saringan untuk material berbutir kasar dan analisis hidrometer untuk material berbutir halus [9]. Hasil kedua pengujian dapat digabungkan menjadi kurva distribusi ukuran butir. Parameter D10, D30, dan D60 merupakan diameter partikel yang masing-masing menunjukkan ukuran ketika 10%, 30%, dan 60% material lolos secara kumulatif. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung koefisien keseragaman dan koefisien kelengkungan.

Koefisien keseragaman dihitung menggunakan:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Sedangkan koefisien kelengkungan dihitung menggunakan:

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

Nilai Cu yang semakin besar menunjukkan rentang ukuran butir yang semakin beragam. Sementara itu, nilai Cc digunakan untuk menggambarkan bentuk kurva distribusi ukuran butir [10].

Pada penelitian ini, selain Cu dan Cc, distribusi material juga dianalisis berdasarkan *coarse part* dan *finer part*. *Coarse part* didefinisikan sebagai persentase material yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm), sedangkan *finer part* merupakan persentase material yang lolos saringan No. 4. Dengan demikian, *finer part* dalam penelitian ini bukan hanya *fines* (<0,075 mm), melainkan mencakup seluruh material berukuran di bawah 4,75 mm.

2.2 Kuat Geser Material

Kuat geser merupakan kemampuan material untuk menahan gaya geser sebelum mengalami keruntuhan [6]. Kuat geser dipengaruhi oleh interaksi antarpartikel, tegangan normal, karakteristik butiran, kadar air, kepadatan, dan kondisi pengujian. Dalam kriteria *Mohr-Coulomb*, hubungan antara kuat geser dan tegangan normal dinyatakan sebagai:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad (3)$$

Dengan τ sebagai tegangan geser maksimum, c sebagai kohesi, σ' sebagai tegangan normal efektif, dan ϕ sebagai sudut geser dalam [8].

Kohesi merupakan komponen kuat geser yang berkaitan dengan ikatan antar partikel. Pada tanah berbutir halus, terutama lempung, kohesi dapat berkaitan dengan gaya tarik dan sifat plastisitas material. Sebaliknya, pasir dan kerikil umumnya memiliki kohesi yang rendah sehingga tahanan gesernya lebih banyak dipengaruhi oleh gesekan antar butir [11]. Sudut geser dalam menggambarkan tahanan geser akibat gesekan dan *interlocking* antar partikel. Parameter tersebut dipengaruhi oleh bentuk, kekasaran, kepadatan, dan distribusi ukuran butir. Material berbutir kasar cenderung memiliki kontribusi gesekan dan *interlocking* yang lebih dominan [12].

2.3 *Large Scale Direct Shear* (LSDS)

Large Scale Direct Shear (LSDS) merupakan metode pengujian laboratorium yang dikembangkan dari prinsip *direct shear* konvensional dengan memanfaatkan ukuran sampel benda uji serta dimensi kotak geser yang jauh lebih besar. Secara prinsip, mekanisme pengujian ini tetap melibatkan pemberian variasi tegangan normal dan penambahan gaya geser secara bertahap hingga material uji benar-benar mencapai titik keruntuhan struktural. Hasil pencatatan data berupa besaran tegangan normal dan tegangan geser maksimum tersebut kemudian diolah untuk memperoleh kurva atau garis hubungan *Mohr-Coulomb* yang menentukan parameter kuat geser material [8]. Penggunaan LSDS menjadi penting untuk material dengan fraksi kasar karena ukuran kotak geser yang lebih besar memungkinkan butiran kasar tetap dipertahankan dalam sampel [13]. Kondisi tersebut dapat mengurangi efek batas dan memberikan representasi yang lebih baik terhadap perilaku material granular dalam skala yang lebih besar.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan analisis korelasional. Penelitian bertujuan menganalisis hubungan antara karakteristik distribusi ukuran butir dengan parameter kuat geser, yaitu kohesi dan sudut geser dalam. Data yang digunakan merupakan hasil pengujian laboratorium distribusi ukuran butir dan LSDS yang telah tersedia.

3.2 Lokasi dan Data Penelitian

Data penelitian diperoleh dari Laboratorium Geoteknik PT Agrinas Palma Nusantara (Persero) Divisi Survei dan Investigasi. Data pengujian berasal dari kegiatan laboratorium pada tahun 2025–2026. Penelitian menggunakan 40 sampel pada Tabel 1, yang terdiri atas:

Tabel 1. Jumlah Sampel Penelitian

Kode Sampel	Jenis Material	Jumlah Sampel
RK	Random Kasar	31
RH	Random Halus	9
Total		**40**

Dari 40 sampel tersebut, tidak seluruh sampel memiliki nilai D10. Oleh karena itu, nilai Cu dan Cc hanya tersedia pada sampel yang memiliki D10, D30, dan D60 yang dapat ditentukan. Dalam data set penelitian terdapat 27 sampel dengan nilai Cu dan Cc, sedangkan sampel lainnya tidak memiliki nilai tersebut.

3.3 Pengujian Distribusi Ukuran Butir

Analisis distribusi ukuran butir dilakukan untuk memperoleh persentase material yang lolos pada berbagai ukuran saringan [14]. Data tersebut digunakan untuk menentukan D10, D30, D60, Cu, Cc, *coarse part*, dan *finer part*. Pengujian distribusi ukuran butir mengacu pada metode analisis saringan yang digunakan dalam penelitian.

3.4 Pengujian *Large Scale Direct Shear*

Pengujian LSDS dilakukan untuk memperoleh nilai kohesi dan sudut geser dalam. Sampel diberikan beberapa variasi tegangan normal kemudian dikenai gaya geser sampai mencapai kondisi keruntuhan. Hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser maksimum digunakan untuk memperoleh parameter kuat geser berdasarkan:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4)$$

3.5 Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu analisis deskriptif, analisis regresi linier, dan analisis interpretatif. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan distribusi ukuran butir dan parameter kuat geser. Analisis regresi digunakan untuk mengetahui kecenderungan hubungan antara variabel distribusi ukuran butir dengan c dan φ.

Hubungan yang dianalisis meliputi:

- Cu terhadap c (Kohesi)
- Cc terhadap c (Kohesi)
- *coarse part* terhadap c (Kohesi)
- *finer part* terhadap c (Kohesi)
- Cu terhadap φ (Sudut Geser Dalam)
- Cc terhadap φ (Sudut Geser Dalam)
- *coarse part* terhadap φ (Sudut Geser Dalam)
- *finer part* terhadap φ (Sudut Geser Dalam)

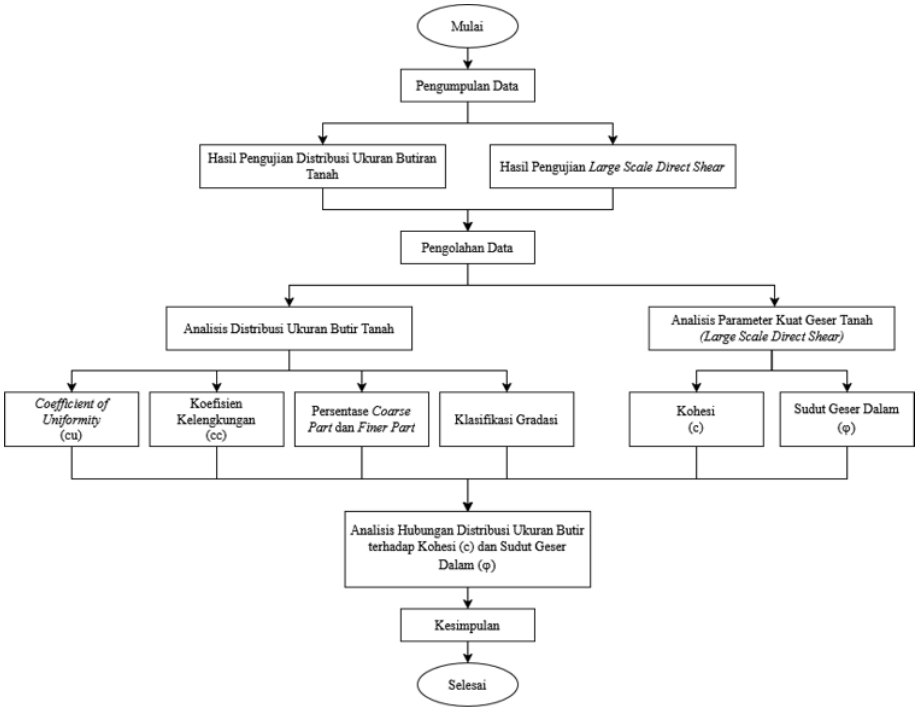
Persamaan regresi linier digunakan dalam bentuk :

$$Y = aX + b \quad (5)$$

sedangkan tingkat kemampuan variabel dalam menjelaskan variasi parameter kuat geser dievaluasi menggunakan nilai R^2.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian dapat dijelaskan pada Gambar 1 sebagai berikut :



Gambar 1. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Distribusi Ukuran Butir

Hasil analisis menunjukkan bahwa material memiliki variasi distribusi ukuran butir yang cukup besar. Nilai D10, D30, dan D 60 menunjukkan rentang yang berbeda pada masing-masing sampel. Variasi tersebut menunjukkan bahwa material penelitian tidak memiliki karakteristik gradasi yang seragam.

Tabel 2. Klasifikasi Material

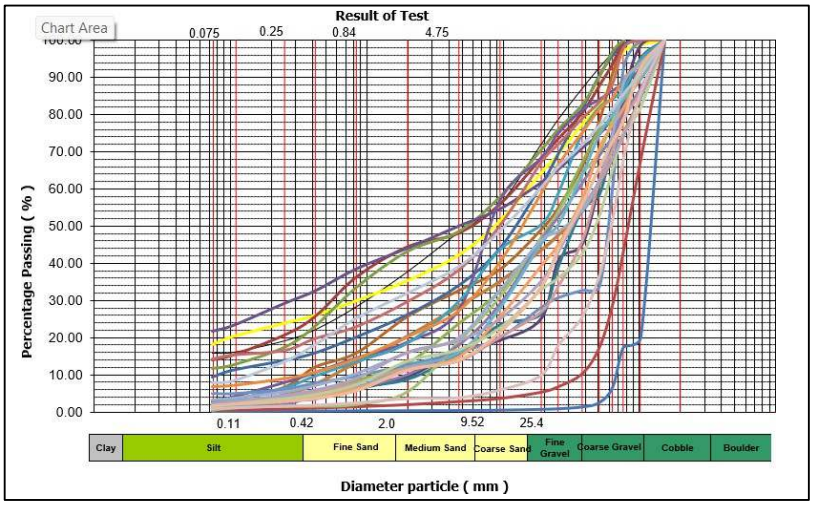
Klasifikasi	Jumlah Sampel	Persentase (%)
Well Graded Gravel	10.0	25.0
Poorly Graded Gravel	17.0	42.5
Clayey Gravel	12.0	30.0
Poorly Graded Sand	1.0	2.5
Total	40	100

Sumber : Perhitungan Excel 2026

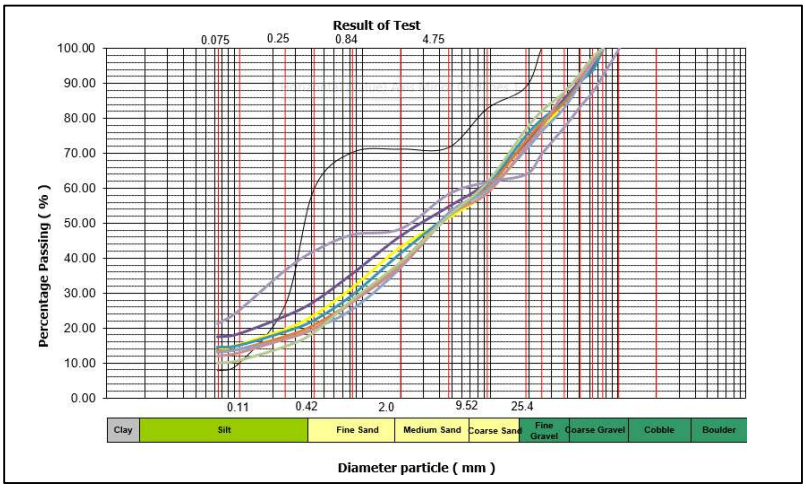
Klasifikasi material pada Tabel 2 tersebut menunjukkan dominasi material berbutir kasar. *Poorly Graded Gravel* merupakan kelompok terbesar dengan 42,5%, sedangkan *Well Graded Gravel* mencapai 25%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar material memiliki kandungan fraksi kasar yang cukup besar sehingga pengujian LSDS relevan digunakan untuk mengevaluasi karakteristik kuat gesernya. Selain parameter Cu dan Cc, hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata *coarse part* sebesar sekitar 63%, sedangkan *finer part* sekitar 37%. *Coarse part* berada pada rentang 25 – 90%, sedangkan *finer part* berada pada rentang 0 – 75%. Kurva distribusi ukuran butir material random kasar dan halus disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

4.2 Parameter Kuat Geser

Berdasarkan hasil pengujian LSDS, nilai kohesi berada pada rentang 0,2–7,0 kg/cm² dengan nilai rata-rata 3,1 kg/cm². Sementara itu, sudut geser dalam berada pada rentang 18,7–44,7° dengan nilai rata-rata 34,6°. Variasi nilai tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik kuat geser antar sampel. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh distribusi ukuran butir (Gambar 2 dan 3), komposisi material, kepadatan, bentuk butiran, serta kondisi pengujian.



Gambar 2. Kurva Distribusi Ukuran Butir Material Random Kasar



Gambar 3. Kurva Distribusi Ukuran Butir Material Random Halus

4.3 Hubungan Distribusi Ukuran Butir terhadap Kohesi

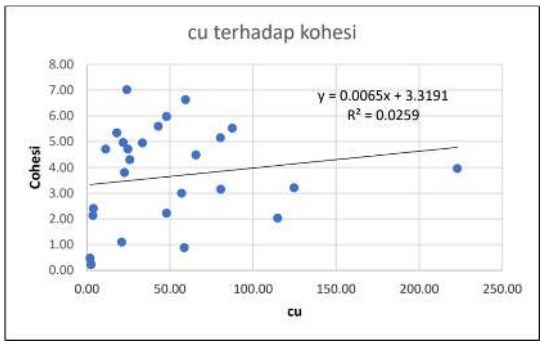
Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa hubungan antara parameter distribusi ukuran butir dengan kohesi relatif lemah.

Tabel 3. Rekapitulasi Analisis Hubungan terhadap Kohesi

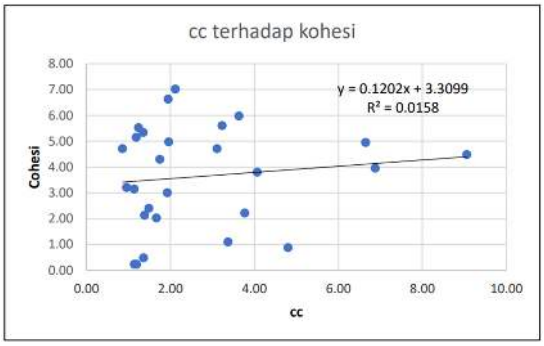
Parameter	Persamaan	R^2	Interpretasi
Cu	0,0065x+3,3191	0,0259	Sangat lemah
Cc	0,1202x+3,3099	0,0158	Sangat lemah
Finer Part	-0,0385x+4,3102	0,1347	Lemah
Coarse Part	0,0316x+0,887	0,0963	Sangat lemah

Sumber : Perhitungan Excel 2026

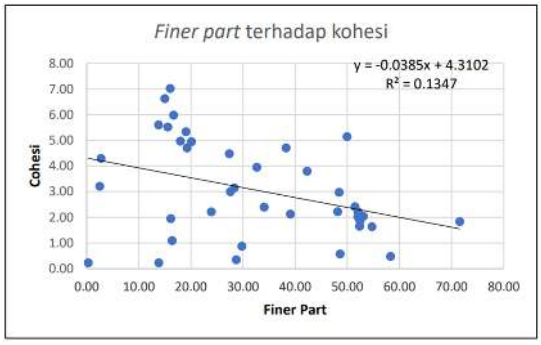
Tabel 3 menunjukkan bahwa analisis regresi antara parameter distribusi ukuran butir dan kohesi secara umum tergolong sangat lemah hingga lemah. Koefisien keseragaman (Cu) dan koefisien kelengkungan (Cc) masing-masing hanya menghasilkan R^2 sebesar 0,0259 (y = 0,0065x + 3,3191) dan 0,0158 (y = 0,1202x + 3,3099). Sementara itu, *coarse part* juga tergolong sangat lemah dengan R^2 sebesar 0,0963 (y = 0,0316x + 0,887). Rendahnya R^2 tersebut mengindikasikan bahwa distribusi ukuran butir belum mampu menjelaskan variasi kohesi pada data penelitian. Adapun *finer part* menghasilkan R^2 tertinggi sebesar 0,1347 (y = -0,0385x + 4,3102), meski hubungannya tetap lemah. Hal ini terjadi karena *finer part* mencakup seluruh material di bawah 4,75 mm yang masih didominasi pasir, sehingga tidak dapat langsung dianggap sebagai material kohesif. Oleh karena itu, pengaruh material kohesif seperti lempung dan lanau sebaiknya dianalisis secara terpisah. Grafik hubungan tiap-tiap parameter disajikan pada Gambar 4, 5, 6, dan 7.



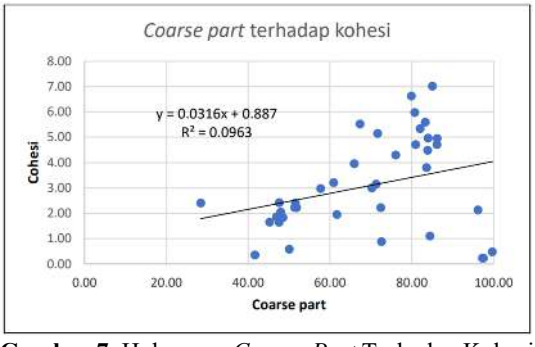
Gambar 4. Hubungan Cu Terhadap Kohesi



Gambar 5. Hubungan Cc Terhadap Kohesi



Gambar 6. Hubungan *Fine Part* Terhadap Kohesi



Gambar 7. Hubungan *Coarse Part* Terhadap Kohesi

4.4 Hubungan Distribusi Ukuran Butir terhadap Sudut Geser Dalam

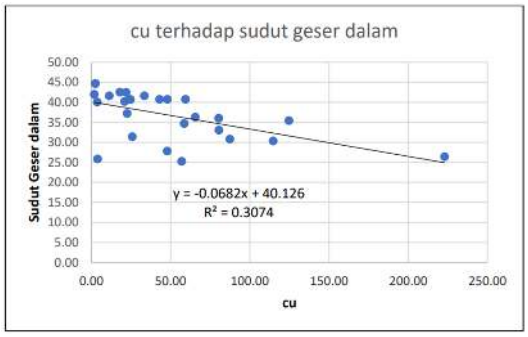
Hasil regresi terhadap sudut geser dalam menunjukkan hubungan yang lebih jelas dibandingkan hubungan terhadap kohesi.

Tabel 4. Rekapitulasi Analisis Hubungan terhadap Sudut geser dalam

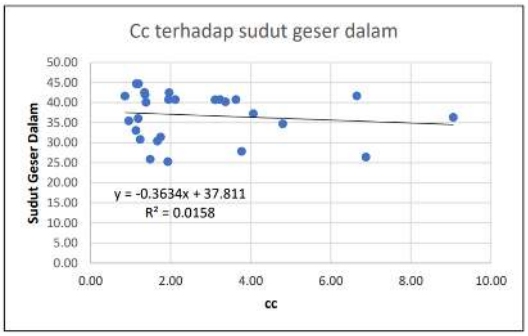
Parameter	Persamaan	R^2	Interpretasi
Cu	φ = -0,0682Cu + 40,126	0,3074	Lemah–Sedang
Cc	φ = -0,3634Cc + 37,811	0,0158	Sangat Lemah
Finer Part	φ = -0,2692(Finer) + 43,055	0,5477	Sedang
Coarse Part	φ = 0,2692(Coarse) + 16,137	0,5477	Sedang

Sumber : Perhitungan Excel 2026

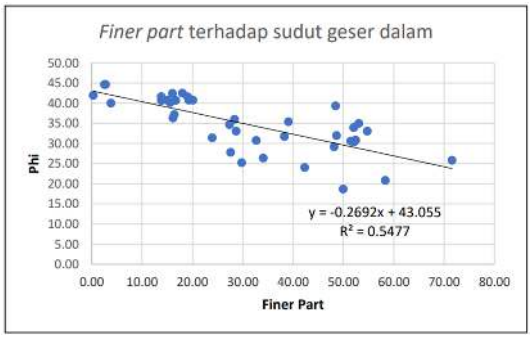
Pada Tabel 4 parameter *coarse part* menghasilkan hubungan positif dengan sudut geser dalam. Nilai R^2 sebesar 0,5477 menunjukkan hubungan sedang. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan proporsi material kasar diikuti oleh peningkatan nilai φ pada data penelitian. Kondisi tersebut dapat dikaitkan dengan meningkatnya kontak antar butir kasar dan mekanisme *interlocking*. Penelitian mengenai campuran *soil-rock* menunjukkan bahwa peningkatan kandungan gravel meningkatkan kontribusi kontak antar partikel gravel terhadap perilaku geser [4]. Penelitian lain pada campuran pasir-gravel juga menunjukkan bahwa kandungan gravel merupakan salah satu faktor yang memengaruhi perilaku geser material. Sebaliknya, *finer part* memiliki hubungan negatif terhadap φ dengan nilai R^2 sebesar 0,5477. Hal tersebut merupakan konsekuensi langsung dari hubungan komposisi antara *coarse part* dan *finer part*. Semakin besar persentase *finer part*, semakin kecil persentase *coarse part*. Hubugan Cu, Cc, Finer Part, dan *Coarse Part* terhadap sudut geser dalam ditampilkan pada Gambar 8, 9, 10, dan 11.



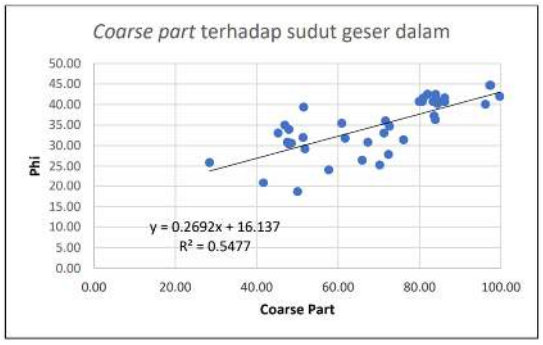
Gambar 8. Hubungan Cu Terhadap Sudut Geser Dalam



Gambar 9. Hubungan Cc Terhadap Sudut Geser Dalam



Gambar 10. Hubungan *Finer Part* Terhadap Sudut Geser Dalam



Gambar 11. Hubungan *Coarse Part* Terhadap Sudut Geser Dalam

4.5 Pembahasan terhadap Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara karakteristik ukuran butiran dan sudut geser dalam lebih terlihat dibandingkan hubungannya dengan kohesi. Temuan tersebut sejalan dengan konsep dasar mekanika tanah bahwa material granular umumnya memperoleh tahanan geser dari mekanisme gesekan dan interaksi antar partikel [1],[2]. Islam et al. [5] menunjukkan bahwa ukuran partikel berpengaruh terhadap perilaku kuat geser pasir. Hal ini memberikan dasar bahwa perubahan karakteristik ukuran partikel dapat memengaruhi sudut geser dalam material granular.

Sementara itu, Umam et al. [11] menunjukkan bahwa kadar lempung dapat memengaruhi kuat geser. Hasil tersebut memberikan gambaran bahwa fraksi halus perlu diperhatikan secara lebih spesifik. Dalam penelitian ini, *finer part* masih mencakup pasir, lanau, dan lempung sehingga belum dapat menggambarkan pengaruh material kohesif secara spesifik. Richefeu et al. [15] juga menunjukkan pentingnya mekanisme kontak dan kondisi material granular dalam perilaku kuat geser. Hal tersebut mendukung interpretasi bahwa peningkatan proporsi material kasar dapat berkaitan dengan perubahan mekanisme interaksi antar partikel.

4.6 Faktor Lain yang Memengaruhi Hasil

Nilai R^2 yang belum mencapai 1,00 menunjukkan bahwa distribusi ukuran butiran bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi parameter kuat geser. Beberapa faktor yang kemungkinan berkontribusi terhadap variasi nilai tersebut antara lain:

1. Kepadatan material. Material dengan susunan partikel yang lebih rapat memiliki kontak antar partikel yang lebih banyak sehingga dapat menghasilkan tahanan geser yang lebih tinggi.
2. Bentuk dan angularitas butiran. Butiran bersudut cenderung menghasilkan mekanisme *interlocking* yang lebih kuat dibandingkan butiran yang membulat.
3. Kadar air. Perubahan kadar air dapat memengaruhi kondisi kontak antar partikel serta respons material terhadap pembebanan.
4. Karakteristik material halus. Kandungan lempung, plastisitas, dan karakteristik mineralogi dapat memberikan pengaruh terhadap kohesi.
5. Kondisi pengujian LSDS. Tegangan normal, persiapan sampel, dan kondisi pelaksanaan pengujian dapat memengaruhi hasil.

Beberapa penelitian mengidentifikasi jenis material, kepadatan, bentuk butiran, kadar air, tegangan normal, dan persiapan sampel sebagai faktor yang dapat memengaruhi hasil LSDS, tetapi faktor-faktor tersebut tidak dianalisis secara khusus dalam penelitian ini. Oleh karena itu, model regresi yang diperoleh dalam penelitian ini harus dipahami sebagai hubungan empiris berdasarkan data set penelitian, bukan persamaan universal yang dapat digunakan untuk semua material.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian *Large Scale Direct Shear* (LSD) terhadap 40 sampel material yang didominasi oleh kelompok *gravel* (GW 25,0%, GP 42,5%, GC 30,0%, dan SP 2,5%), diperoleh nilai kohesi rata-rata sebesar 3,1 kg/cm² (rentang 0,2 – 7,0 kg/cm²) serta sudut

geser dalam (φ) rata-rata sebesar 34,6° (rentang 18,7°– 44,7°). Analisis menunjukkan bahwa hubungan distribusi ukuran butir terhadap kohesi relatif lemah (R^2 antara 0,0158 – 0,1347), sedangkan hubungannya terhadap sudut geser dalam jauh lebih jelas, terutama pada parameter *coarse part* (hubungan positif, $R^2 = 0{,}5477$) dan *finer part* (hubungan negatif, $R^2 = 0{,}5477$) yang terbukti paling representatif. Dengan demikian, proporsi material kasar dan material berukuran di bawah 4,75 mm memiliki korelasi yang lebih baik dalam menjelaskan variasi sudut geser dalam dibandingkan parameter Cu ($R^2 = 0{,}3074$) dan Cc ($R^2 = 0{,}0158$), meskipun hubungan empiris ini masih dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti kepadatan, bentuk butir, kadar air, sifat material halus, dan kondisi pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. M. Das and K. Sobhan, "Geotechnical engineering," 2018.

[2] M. Budhu, *Soil mechanics and foundations*. John Wiley and Sons, 2010.

[3] J. Knappett and R. F. Craig, *Craig's soil mechanics*. CRC press, 2019.

[4] A. S. for T. and Materials, *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*, vol. 34. 2017.

[5] M. N. Islam, A. Siddika, M. B. Hossain, A. Rahman, and M. A. Asad, "Effect of particle size on the shear strength behaviour of sands," *Australian Geomechanics*, vol. 46, no. 3, pp. 75–86, 2011.

[6] R. Hidayat, "Peninjauan Perilaku Geser Pasir Dengan Variasi Kepadatan Tanah Menggunakan Uji Geser Langsung," 2025, *Universitas Gadjah Mada*.

[7] R. P. RAMBE, "Pengaruh Fraksi Lempung Pada Pasir Terhadap Nilai Kohesi Tanah Dan Indeks Plastisitas," 2016.

[8] B. S. Nasional, *Cara uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase (SNI 2813 : 2008)*. Indonesia, 2008.

[9] H. Darwis, *Dasar - Dasar Mekanika Tanah*, I. Yogyakarta: Pena Indis, 2018.

[10] B. S. Nasional, *Metode uji kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase (SNI 3420 : 2016)*. Indonesia, 2016.

[11] K. Umam, S. A. Nugroho, and G. Wibisono, "Pengaruh gradasi pasir dan kadar lempung terhadap kuat geser tanah," 2017, *Riau University*.

[12] F. F. Yolanda, "Kajian Sifat Mekanik Tanah Terhadap Risiko Longsor Tebing Sungai Batang Lubuh Di Kecamatan Rambah, Kabupaten Rokan Hulu," 2026, *Universitas Pasir Pengaraian*.

[13] A. Sahadewa, "Perkembangan Uji Geser Langsung Skala Ukuran Besar untuk Material Acak Bendungan di Indonesia," *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, vol. 31, no. 1, pp. 1–15, 2025.

[14] S. N. Indonesia, *Metode Uji Untuk Analisis Saringan Agregat Halus Dan Agregat Kasar (SNI ASTM C16-2012)*. Indonesia, 2012.

[15] V. Richefeu, M. S. El Youssoufi, and F. Radjai, "Shear strength properties of wet granular materials," *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, vol. 73, no. 5, p. 51304, 2006.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 107-117

Studi Analisis Drainase Perkotaan Berbasis SWMM 5.1 Pada Saluran Primer Kedungbanteng – Banjarasri Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo

Moch. Fasya Alfarisi[1*], Riman[2], Abdul Halim[3]

[1,2,3]Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama Malang
*Email Korespondensi: mochfasyaalfarisi234@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini membahas tentang analisis kinerja sistem drainase perkotaan pada saluran primer di daerah Kedungbanteng-Banjarasri, Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo, menggunakan perangkat lunak EPA SWMM 5.1. Perkembangan wilayah diiringi perubahan tata guna lahan menyebabkan meningkatnya limpasan permukaan, sementara kapasitas saluran drainase yang tersedia belum mampu mengakomodasi peningkatan debit aliran secara optimal. Kondisi tersebut mengakibatkan terjadinya banjir pada beberapa titik di wilayah tersebut. Metode penelitian dilakukan melalui analisis hidrologi dan hidraulika berdasarkan data curah hujan, data topografi, serta data eksisting saluran drainase. Curah hujan rancangan dihitung menggunakan periode ulang 10 tahun, kemudian dimodelkan ke dalam EPA SWMM 5.1 untuk mengevaluasi kapasitas saluran, debit limpasan, serta kondisi hidraulika jaringan drainase eksisting. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa curah hujan rancangan periode 10 tahun sebesar 83,170 mm dengan volume limpasan permukaan sebesar 3,907 ha-m atau 72,55 % dari total volume hujan yang jatuh pada daerah tangkapan. Debit puncak terbesar terjadi pada *subtatchment* S4 sebesar 0,56 m³/ detik, diikuti oleh S6 sebesar 0,53 m³/detik dan S1 sebesar 0,52 m³/detik. Hasil evaluasi menunjukkan saluran C4 dan C5 mengalami kondisi *Conduit surcharge* dengan nilai *Max/Full Depth* mencapai 1,00. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas saluran tidak mampu menampung debit aliran yang masuk sehingga terjadi tekanan hidrolis balik (*backwater*). Selain itu, sedimentasi dan pertumbuhan vegetasi liar pada saluran turut mengurangi kapasitas penampang yang menyebabkan terjadinya luapan pada *junction* J4 dan J5 dengan total volume banjir sebesar 140 m³. Berdasarkan hasil evaluasi, pompa portabel dengan kapasitas asumsi 0,1 m³/detik disarankan sebagai alternatif penanganan secara teoritis tanpa mengubah dimensi saluran eksisting.

Kata Kunci: Drainase Perkotaan, EPA SWMM 5.1, Debit Limpasan, *Surcharge* , Genangan dan Curah Hujan Rancangan.

ABSTRACT

This study examines the performance analysis of the urban drainage system in the primary channels of the Kedungbanteng-Banjarasri area, Tanggulangin Subdistrict, Sidoarjo Regency, using EPA SWMM 5.1 software. Regional development, accompanied by changes in land use, has led to an increase in surface runoff, while the capacity of the existing drainage channels has not been able to optimally accommodate the increased flow. These conditions have resulted in flooding at several locations in the area. The research methodology involved hydrological and hydraulic analyses based on rainfall data, topographic data, and existing drainage channel data. The design rainfall was calculated using a 10-year return period and then modeled in EPA SWMM 5.1 to evaluate channel capacity, runoff discharge, and the hydraulic conditions of the existing drainage network. The results of this study indicate that the 10-year design rainfall is 83.170 mm, with a surface runoff volume of 3.907 ha-m, or 72.55% of the total rainfall volume falling within the catchment area. The highest peak discharge occurred in sub-catchment S4 at 0.56 m³/second, followed by S6 at 0.53 m³/second and S1 at 0.52 m³/second. The evaluation results showed that channels C4 and C5 experienced conduit surcharge conditions with a Max/Full Depth ratio reaching 1.00. These conditions indicate that the channel's capacity is insufficient to accommodate the incoming flow, resulting in backwater. Additionally, sedimentation and the growth of invasive vegetation in the channel further reduce the cross-sectional capacity, causing overflow at junctions J4 and J5 with a total flood volume of 140 m³. Based on the evaluation results, a portable pump with an assumed capacity of 0.1 m³/second is recommended as a theoretical mitigation alternative without altering the dimensions of the existing channel.

Keywords: *Urban Drainage, EPA SWMM 5.1, Runoff Discharge, Surcharge, Flooding, and Design Rainfall.*

1. PENDAHULUAN

Drainase perkotaan merupakan infrastruktur yang berfungsi mengendalikan limpasan permukaan akibat curah hujan untuk mengurangi risiko genangan dan banjir. Peningkatan intensitas hujan serta perubahan tata guna lahan akibat perkembangan kawasan perkotaan menyebabkan kapasitas sistem drainase eksisting sering kali tidak mampu menampung debit limpasan. Kondisi tersebut juga terjadi di daerah Kedungbanteng–Banjarasri, Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo, di mana saluran primer masih mengalami luapan saat hujan berintensitas tinggi sehingga menimbulkan genangan [1]. Penelitian terdahulu oleh Fahruddiansyah dkk, [1] mengevaluasi sistem jaringan drainase di daerah Kedungbanteng–Banjarasri menggunakan ArcGIS 10.5 dengan fokus pada kondisi dan pemetaan jaringan. Penelitian ini menggunakan pendekatan berbeda dengan menerapkan EPA SWMM 5.1 untuk menganalisis kinerja hidrologi dan hidraulika saluran primer berdasarkan curah hujan dan karakteristik saluran eksisting. Keterbaruan penelitian ini terletak pada penerapan EPA SWMM 5.1 untuk menganalisis respons saluran primer terhadap curah hujan rancangan periode ulang 10 tahun, mengidentifikasi saluran yang mengalami *surcharge* dan titik *junction* yang mengalami *flooding*, serta menentukan alternatif penanganan berdasarkan hasil simulasi. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap kinerja saluran drainase eksisting menggunakan EPA SWMM 5.1, yang mampu mensimulasikan proses hidrologi dan hidraulika untuk mengevaluasi kapasitas saluran serta mengidentifikasi titik luapan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kapasitas saluran primer di daerah Kedungbanteng–Banjarasri menggunakan EPA SWMM 5.1 serta menyusun alternatif penanganan pada lokasi yang mengalami luapan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Banjir

Banjir merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang sering terjadi di Indonesia akibat tingginya curah hujan, kondisi topografi, serta faktor lingkungan yang meningkatkan potensi terjadinya genangan [2]. Banjir terjadi ketika debit aliran melebihi kapasitas sungai atau saluran drainase sehingga menyebabkan genangan. Kejadian banjir dipengaruhi oleh tingginya curah hujan, perubahan tata guna lahan, pendangkalan sungai, penyempitan saluran dan hambatan aliran air. Berdasarkan karakteristik penyebabnya, banjir dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu banjir bandang, banjir genangan, banjir lumpur, banjir rob dan banjir Cileuncang [3], [4].

2.2 Drainase

Drainase merupakan sistem yang berfungsi mengalirkan, menguras atau membuang kelebihan air dari suatu kawasan sehingga dapat mengurangi potensi genangan dan banjir. Berdasarkan sistem jaringannya, drainase dibedakan menjadi drainase mikro yang melayani kawasan lokal dan drainase makro yang berfungsi mengalirkan debit air dalam skala yang lebih besar [5]. Fungsi utama drainase adalah mengendalikan kelebihan air permukaan, mengurangi risiko genangan dan banjir, mencegah erosi, serta melindungi infrastruktur [6]. Sistem drainase yang baik juga berperan dalam menjaga kualitas lingkungan dan mendukung kesehatan masyarakat [7].

2.3 Kondisi Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan untuk menentukan curah hujan rancangan, intensitas hujan dan debit banjir rencana sebagai dasar evaluasi kapasitas saluran drainase. Analisis curah hujan rancangan terdapat beberapa metode yaitu metode rata-rata aljabar, metode Polygon Thiessen dan Metode Isohyet [8]. Pada penelitian ini metode yang digunakan yaitu Metode Rata-Rata Aljabar (Aritmatika Sederhana) yang dapat dilihat sebagai berikut:

$$\bar{R} = \frac{R1+R2+R3\ldots Rn}{n} \quad \ldots\ldots (1)$$

Dimana :

$\bar{R}$	= Curah hujan rata-rata (mm)
R1, R2,R3,…Rn	= Curah hujan yang tercatat di stasiun penakar hujan.
n	= jumlah stasiun penakar hujan

Kemudian dilanjutkan dengan tahapan analisis frekuensi, Analisis ini bertujuan memperoleh nilai curah hujan rancangan yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan dan evaluasi bangunan hidraulik, seperti sistem drainase, saluran dan pengendalian banjir. Pemilihan distribusi yang digunakan didasarkan pada karakteristik data serta hasil uji kesesuaian distribusi yaitu uji Chi Square dan Smirnov Kolmogorov. Adapun persamaan yang digunakan penelitian ini dalam analisis frekuensi adalah sebagai berikut :

a. Distribusi Log Pearson Type III

$$\log X_t = \overline{logx} + (\mathrm{k} \, . S_{(logx)}) \quad (2)$$

Dimana :

Log x = rata – rata nilai logaritma data x sesuai data pengamatan
$S_{(logx)}$ = simpangan baku nilai logaritma data x sesuai data pengamatan
K = Faktor frekuensi
Xt = jumlah curah hujan dengan periode tahunan (T) [9]

b. Uji Distribusi Frekuensi [8]
- Uji Chi Square

$$X^2_H = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Ef-of)^2}{Ef} \quad (3)$$

Dimana :

X^2_H = Nilai *Chi Square*
Ef = Nilai yang diharapkan
Of = Nilai yang diamati

- Uji Smirnov Kolmogorov ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Harga Kristis (Cr) *Smirnov Kolmogrov*

N	a			
	0.2	**0.1**	**0.05**	**0.01**
5	0.45	0.51	0.36	0.67
10	0.32	0.37	0.41	0.49
15	0.27	0.3	0.34	0.4
20	0.23	0.26	0.29	0.36
25	0.21	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.2	0.23	0.27
40	0.17	0.19	0.21	0.25
45	0.18	0.18	0.2	0.24
50	0.15	0.17	0.19	0.23
n < 50	1.07 / √n	1.22 / √n	1.36 / √n	1.63 / √n

c. Intensitas Curah Hujan (I)
Untuk mendapatkan intensitas hujan dalam periode 1 jam dari data curah hujan harian maksimum dapat menggunakan rumus Mononobe sebagai berikut :

$$I = \frac{R}{24} \left(\frac{24}{t}\right)^{0,67} \quad (4)$$

Dimana :

I = Intensitas hujan (mm/jam)
R = Curah hujan total dalam 1 hari (mm)
t = Durasi hujan (jam)

2.4 Analisis Hidrolika

Analisis hidrolika merupakan analisis yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan saluran dalam mengalirkan debit aliran berdasarkan karakteristik aliran dan dimensi saluran [9].

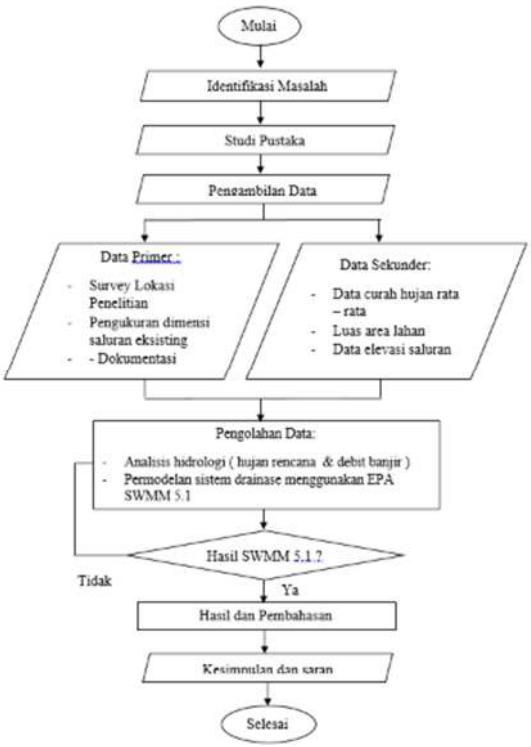
a. Tipe Aliran, pada saluran terbuka meliputi aliran seragam dan tidak seragam, aliran permanen dan tidak permanen, serta aliran subkritis, kritis dan superkritis yang ditentukan berdasarkan bilangan *Froude*, aliran turbulen dan laminar [10], [11], [12] .

b. Penampang saluran, digunakan untuk mengalirkan debit air sesuai dimensi saluran. Perhitungan kecepatan aliran dan debit umumnya menggunakan persamaan Manning.
c. Koefisien kekerasan *manning* (n), merupakan parameter yang memengaruhi kecepatan dan kapasitas aliran, dengan nilai yang ditentukan berdasarkan jenis material saluran [10].

2.5 Pemodelan Drainase menggunakan EPA SWMM 5.1

Storm Water Management Model (SWMM) merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh *United State Environmental Protection Agency* (U.S.EPA) untuk menganalisis hubungan antara curah hujan, limpasan permukaan dan kapasitas saluran drainase sehingga dapat digunakan dalam evaluasi kinerja sistem drainase [13]. Komponen utama yang digunakan dalam pemodelan SWMM 5.1 meliputi *Subtatchment, Junction (nodes), Conduit (Links), Outfall* dan *Rain Gage* [14]. *Subtatchment* mempretasikan daerah tangkapan hujan, *junction* merupakan titik pertemuan aliran, *Conduit* berfungsi sebagai saluran pengalir, *Outfall* merupakan titik pembuangan akhir, sedangkan *Raingage* digunakan sebagai input data curah hujan pada simulasi [15].

3. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Bagan Alir

Penelitian dilakukan pada saluran primer yang melewati Kelurahan Kedungbanteng-Banjarasri, Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo. Jarak saluran yang diteliti sepanjang 1.500 meter. Tahapan Penelitian pada bagan alir Gambar 1 meliputi studi pustaka, pengumpulan data primer dan sekunder, analisis hidrologi, pemodelan sistem drainase menggunakan EPA SWMM 5.1, proses simulasi (*Running*), analisis hasil simulasi serta penyusunan kesimpulan dan Saran Penanganan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan sebagai dasar dalam menentukan besarnya curah hujan rancangan dan debit banjir rencana yang digunakan pada pemodelan sistem drainase menggunakan EPA SWMM 5.1. Data curah hujan yang digunakan merupakan data curah hujan

harian maksimum periode tahun 2015-2024 dari 3 stasiun surah hujan yaitu Kludan, Putat dan Porong yang diperoleh dari satelit NASA. Untuk memvalidasi data NASA yang digunakan telah dilakukan pembandingan atau koreksi data dengan data BMKG yang tersedia yaitu tahun 2015-2020 (4 tahun) sehingga memiliki nilai yang mendekati data observasi, hal ini dilakukan karena data BMKG yang tidak dapat diakses bebas untuk periode yang akan digunakan. Selanjutnya, data curah hujan diolah untuk memperoleh curah hujan wilayah menggunakan metode rata-rata aljabar, kemudian dilakukan analisis frekuensi untuk menentukan curah hujan rancangan pada beberapa periode ulang. Hasil analisis frekuensi dihitung menggunakan beberapa distribusi probabilitas yaitu Distribusi Normal, Log Normal, Gumbel dan Log Pearson Type III. Hasil perhitungan curah hujan rancangan untuk setiap distribusi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Dispersi

UJI DISPERSI				
Jenis Distribusi	Syarat		Hasil	Keterangan
Normal	Cs =	0	0.35	Tidak Memenuhi
	Ck =	3	0.39	Tidak Memenuhi
Gumbel	Cs ≤	1.139	0.35	Memenuhi
	Ck ≤	5.4	0.39	Memenuhi
Log Normal	Cs =	3	0.007	Tidak Memenuhi
	Cv =	0.06	0.037	Tidak Memenuhi
Log Pearson Type III	Cs ≠	0	0.007	Memenuhi

Sumber : Perhitungan Excel 2026

Selanjutnya dilakukan uji kesesuaian distribusi menggunakan metode Chi Square dan Smirnov Kologorov untuk menentukan distribusi yang paling sesuai dengan karakteristik data curah hujan. Berdasarkan hasil pengujian, distribusi Log Pearson Type III dipilih karena memiliki nilai deviasi yang lebih kecil serta lebih mendekati nilai kritis pada uji Smirnov Kolmogorov dibandingkan Gumbel. Hasil uji kesesuaian distribusi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Distribusi

HASIL UJI DISTRIBUSI								
Uji Dispersi			Uji Chi Kuadrat			Uji Smirnov Kolmogrov		
Gumbel			Gumbel			Gumbel		
Syarat	Hasil	Keterangan	Syarat	Hasil	Keterangan	Syarat	Hasil	Keterangan
Cs ≤ 1.139	0,35	**Diterima**	X2 < X2Cr	0,4	**Diterima**	Dmax < Dcr	0,090	**Diterima**
Ck ≤ 5.4	0,39	**Diterima**						
Log Pearson Type III			Log Pearson Type III			Log Pearson Type III		
Cs ≠ 0	0,007	**Diterima**	X2 < X2Cr	0,4	**Diterima**	Dmax < Dcr	0,060	**Diterima**

Sumber : Perhitungan Excel 2026

Curah hujan rancangan yang diperoleh dari distribusi Log Pearson Type III selanjutnya digunakan untuk menghitung intensitas curah hujan menggunakan Metode Mononobe yang selanjutnya digunakan sebagai data masukan dalam pemodelan EPA SWMM 5.1 yang ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Intensitas Hujan dengan Metode Mononobe

INTENSITAS HUJAN MONONOBE					
T (Jam)	Periode Ulang				
	2	5	10	20	50
1	23,94	27,26	29,19	30,86	32,88
2	15,08	17,17	18,39	19,44	20,71
3	11,51	13,11	14,03	14,83	15,81
4	9,50	10,82	11,58	12,25	13,05
5	8,19	9,32	9,98	10,55	11,24
6	7,25	8,26	8,84	9,35	9,96
T (Jam)	Periode Ulang				
	2	5	10	20	50
7	6,54	7,45	7,98	8,43	8,99
8	5,98	6,82	7,30	7,71	8,22
9	5,53	6,30	6,75	7,13	7,60
10	5,16	5,87	6,29	6,65	7,08
11	4,84	5,51	5,90	6,24	6,65

INTENSITAS HUJAN MONONOBE					
T (Jam)	Periode Ulang				
	2	5	10	20	50
12	4,57	5,20	5,57	5,89	6,27
13	4,33	4,93	5,28	5,58	5,95
14	4,12	4,69	5,02	5,31	5,66
15	3,94	4,48	4,80	5,07	5,41
16	3,77	4,29	4,60	4,86	5,18
17	3,62	4,12	4,41	4,67	4,97
18	3,49	3,97	4,25	4,49	4,79
19	3,36	3,83	4,10	4,33	4,62
20	3,25	3,70	3,96	4,19	4,46
21	3,15	3,58	3,83	4,05	4,32
22	3,05	3,47	3,72	3,93	4,19
23	2,96	3,37	3,61	3,82	4,07
24	2,88	3,28	3,51	3,71	3,95

Sumber : Perhitungan Excel 2026

4.2 Data Eksisting Jaringan Drainase

Data eksisting jaringan drainase yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari instansi terkait dan digunakan sebagai parameter masukan dalam perhitungan. Model EPA SWMM 5.1, data tersebut meliputi karakteristik disik jaringan drainase, yaitu *Subtatchment, Junction, Conduit, Cross Section, Outfall*.

a. Data *Subatchment*, pada Tabel 5 digunakan untuk mempresentasikan karakteristik hidrologi daerah tangkapan. Pembagian *subcatchment* dilakukan berdasarkan batas daerah tangkapan air yang mengarah ke masing-masing *junction* pada jaringan drainase yang dimodelkan.

Tabel 5. Data Subtatchment

ID Subtatchment	Outlet	Area (ha)	Width (m)	Slope (%)	Imperv (%)	N-Imperv	N-Perv	Dstore-Imperv (mm)	Dstore-perv (mm)	Zero-Imperv (%)
S1	J1	8.44	393.47	3.8	60	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S2	J2	7.74	249.68	3.3	45	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S3	J2	7.59	441.28	0.3	50	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S4	J3	9.49	297.49	3.1	60	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S5	J4	9.15	259.21	3.1	35	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S6	J5	11.9	305.52	3.1	40	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S7	J6	5.6	233.33	2.5	50	0.01	0.1	0.05	0.05	25
S8	J7	4.85	256.61	2.5	50	0.01	0.1	0.05	0.05	25

Sumber : Perhitungan Excel 2026

b. Data *Junction*, pada Tabel 6 digunakan untuk mempresentasikan kondisi eksisting jaringan drainase. *Junction* ditentukan berdasarkan titik pertemuan, perubahan, atau hubungan antar segmen saluran pada sistem drainase eksisting.

Tabel 6. Data Junction

D Junction	X-Coordinate	Y-Coordinate	Elv.
J1	-539.009	2459.426	6
J2	2389.791	4321.346	5.8
J3	3773.202	5017.401	5.5
J4	5730.858	5406.032	5.3
J5	7971.288	5962.877	4.9
J6	8491.879	6687.935	4.5
J7	9762.181	7012.761	3.5

Sumber : Perhitungan Excel 2026

c. Data *Conduit*, pada Tabel 7 digunakan sebagai parameter aliran dalam simulasi. Parameter hidraulik berupa dimensi penampang saluran dan nilai kekasaran Manning ditentukan berdasarkan kondisi saluran eksisting yang digunakan sebagai input model. Nilai kekasaran Manning disesuaikan dengan karakteristik permukaan saluran pada masing-masing conduit.

Tabel 7. Data Conduit

ID Conduit	Length (m)	Roughness
C1	438.41	0.017
C2	187.57	0.05
C3	235.68	0.05
C4	269.56	0.05
C5	123.9	0.05
C6	179.54	0.05
C7	61.84	0.05

Sumber : Perhitungan Excel 2026

d. Data *Cross Section*, pada Tabel 8 digunakan untuk mempresentasikan kapasitas saluran eksisting. Dimensi penampang saluran yang digunakan dalam pemodelan SWMM ditentukan berdasarkan kondisi eksisting hasil pengukuran lapangan. Pada saat pengamatan, ditemukan adanya vegetasi pada beberapa bagian saluran yang menjadi bagian dari kondisi eksisting saluran yang dimodelkan.

Tabel 8. Data Cross Section

Shape	Bottom Width	Left Slope	Right Slope	Max Depth/Max Height
Trapezoidal	4.11	0.55	0.55	1.1
Trapezoidal	2.78	0.92	0.92	1.2
Trapezoidal	2.78	0.92	0.92	1.2
Trapezoidal	2.05	0.92	0.92	1.2
Trapezoidal	1.37	0.83	0.83	1.2
Trapezoidal	1.37	0.83	0.83	1.2
Trapezoidal	1.37	0.83	0.83	1.2

Sumber : Perhitungan Excel 2026

e. Data *Outfall*, pada Tabel 9 digunakan sebagai kondisi batas (*boundary condition*) dalam simulasi.

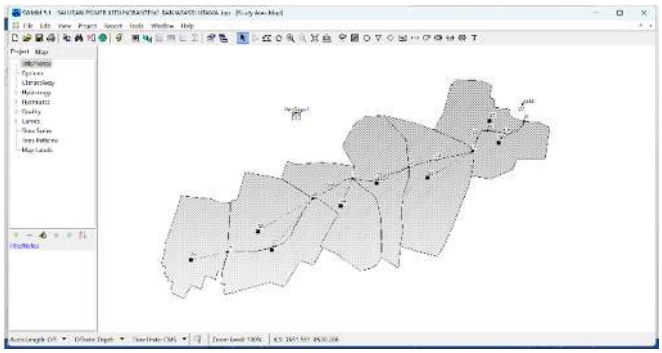
Tabel 9. Data Outfall

ID Outfall	X-Coordinate	Y-Coordinate	Elv
Outfall	9719.101	7578.027	3

Sumber : Perhitungan Excel 2026

4.3 Pemodelan Sistem Drainase Menggunakan EPA SWMM 5.1

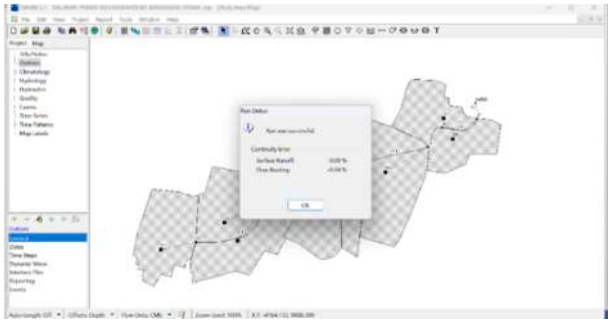
Pemodelan sistem drainase dilakukan menggunakan perangkat lunak EPA SWMM 5.1 dengan mengintegrasikan data hasil analisis hidrologi dan data eksisting jaringan drainase pada Gambar 2. Di input melalui *Raingage* dan *Time Serie*. Pemodelan diawali dengan penyusunan layout jaringan drainase sesuai kondisi lapangan, kemudian dilakukan penginputan parameter pada setiap komponen model berdasarkan data hasil survei dan hasil hidrologi. Setelah seluruh parameter selesai di input, dilakukan pengaturan *Simulation Options* sesuai kebutuhan simulasi sebelum proses *running* untuk memperoleh kondisi aliran pada jaringan drainase.



Gambar 2. Layout Keseluruhan Parameter pada SWMM 5.1

4.4 *Running* Simulasi EPA SWMM 5.1

Setelah seluruh parameter model, selesai di input dilakukan pengaturan *Simulation Options* yang meliputi metode *Infiltrasi Curve Number* (CN), *Flow Routing*, serta periode simulasi sesuai durasi hujan rencana. Selanjutnya, model dijalankan (*running*) untuk mensimulasikan respon hidrologi dan hidrolika sistem drainase pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampilan *Running Sucsessfull*

4.5 Hasil Simulasi Menggunakan EPA SWMM 5.1

Setelah seluruh parameter model di *input* dan proses simulasi (*running*) dilakukan menggunakan EPA SWMM 5.1 diperoleh *output* yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem drainase eksisting.

a. Status *Report*, pada Tabel 10 hasil simulasi menunjukkan nilai *Surface Runoff Cintinuity Error* sebesar -0,09% dan *Flow Routing Continuity Error* sebesar -0,59%. Nilai tersebut digunakan sebagai pemeriksaan terhadap keseimbangan massa dalam simulasi SWMM, yang menunjukkan adanya selisih kecil antara volume air yang masuk dan keluar selama proses simulasi. Selain itu, simulasi menghasilkan limpasan permukaan sebesar 72,55% dari total curah hujan serta *flooding loss* sebesar 0,014 ha-m (140 m³).

Tabel 10. Ringkasan Kontinuitas Kuantitas Limpasan Permukaan

Continuity Error(%)	Volume (ha-m)	Tebal Air (mm)	Persentase (%)
Total Presipitasi (Total Precipitation)	5.386	83.170	100
Kehilangan Evaporasi (Evaporation Loss)	0.000	0.000	0.000
Kehilangan Infiltrasi (Infiltration Loss)	1.208	18.647	22.42
Limpasan Perumkaan(surface Runoff)	3.907	60.336	72.55
Tampungan akhir (Final Storage)	0.276	4.265	5.120
Continuity Error(%)	-0.094		

Sumber : Perhitungan Excel 2026

b. Analisa Hidrologi Subtatchment, analisa hidrologi dilakukan untuk mengetahui besarnya limpasan yang dihasilkan pada setiap subtatchment pada Tabel 11. Parameter yang dianalisis meliputi debit puncak (*Peak Runoff*) dan Koefisien Limpasan (*Runoff Coefficient*). Berdasarkan hasil simulasi, S4 menghasilkan debit puncak terbesar, diikuti oleh S6 dan S1. Nilai Koefisien limpasan yang tinggi menunjukkan dominasi permukaan kedap air sehingga sebagian besar curah hujan berubah menjadi limpasan permukaan.

Tabel 11. Ringkasan Hasil Limpasan Permukaan pada setiap Subtatchment

ID Subtatchment	Total Hujan (mm)	Total Infiltrasi/meresap (mm)	Total limpasan permukaan (mm)	Debit puncak (m3/detik atau CMS)	Koefisien Limpasan (runoff coeff)
S1	83.17	14.40	66.37	0.52	0.798
S2	83.17	19.80	59.26	0.38	0.713
S3	83.17	18.00	59.71	0.37	0.718
S4	83.17	14.40	65.51	0.56	0.788
S5	83.17	23.41	54.32	0.38	0.653
S6	83.17	21.60	56.28	0.53	0.677
S7	83.17	18.00	61.68	0.30	0.742
S8	83.17	18.00	62.15	0.27	0.747

Sumber : Perhitungan Excel 2026

c. Analisa Hidrolika Saluran, dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas saluran dalam mengalirkan debit limpasan berdasarkan parameter debit maksimum, kecepatan aliran dan *max/full depth* pada Tabel 12. Hasil simulasi pada Tabel 13 menunjukkan bahwa saluran C4 dan C5 telah mencapai maksimum (*max/full depth* = 1,00) sehingga berpotensi menyebabkan luapan.

Tabel 12. Ringkasan Parameter Hidraulika Aliran pada Saluran (conduit)

ID Saluran (Link)	Debit Max m3/detik	waktu debit maks (jam)	Kecepatan max (m/detik)	Rasio kedalaman max (max/full depth)	Status kapasitas saluran
C1	0.530	02:03	0.510	0.230	Aman
C2	1.246	02:03	0.520	0.590	Aman
C3	1.766	02:04	0.470	0.860	Siaga
C4	2.015	02:01	0.540	1.000	Kritis/Surcharge
C5	2.378	01.55	0.840	1.000	Kritis/Surcharge
C6	2.679	02:01	1.060	0.920	Siaga
C7	2.941	02:01	1.250	0.880	Siaga

Sumber : Perhitungan Excel 2026

Tabel 13. Ringkasan Durasi Kejenuhan Penampang Saluran (*Conduit Surcharge*)

ID Conduit	Hours Both Ends Full	Hours Upstream	Hours Dnstream full	Hours Capacity
C4	0,23 jam (14 menit)	0,23 jam	0,23 jam	0,23 jam
C5	0,38 jam (23 menit)	0,38 jam	0,38 jam	0,38 jam

Sumber : Perhitungan Excel 2026

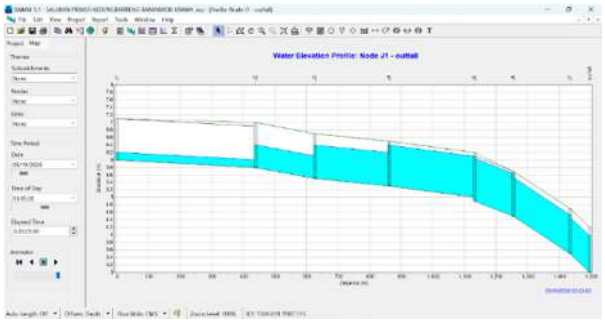
d. Analisis genangan pada *Junction* pada Tabel 14 menunjukkan bahwa luapan terjadi pada J4 dan J5. J5 mengalami luapan terbesar dengan durasi 0,39 jam dan Total *Flood Volume* sebesar $0{,}097 \times 10^6$ liter atau setara dengan 97 m^3, sedangkan J4 mengalami luapan selama 0,24 jam dengan Total *Flood Volume* sebesar $0{,}043 \times 10^6$ liter atau setara dengan 43 m^3. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas saluran pada C4 dan C5 tidak mampu menampung seluruh aliran yang masuk pada saat debit puncak, sehingga terjadi luapan pada J4 dan J5 dan terjadi aliran balik (*Backwater*).

Tabel 14. Ringkasan Hasil Analisis Genangan Banjir Pada Titik Simpul (Junction)

ID Junction	Durasi Banjir (Hours Flooded)	Debit Luapan Maks (m3/detik)	Waktu Debit Puncak Luapan (Jam)	Total Volume Banjir (10^6 liter)	Status genangan
J4	0,24 jam (14 menit)	0,079	02;01	0,043	Meluap/ Banjir
J5	0,39 jam (23 menit)	0,156	02;00	0,097	Meluap/Banjir

Sumber : Perhitungan Excel 2026

Visualisasi *water elevation profile* pada Gambar 4 menunjukkan kenaikan muka air pada segmen C4-C5 hingga memenuhi penampang saluran, yang mengonfirmasi terjadinya luapan di J4 dan J5.



Gambar 4. Tampilan *Water Elevation Profile*

4.6 Upaya Penanganan

Berdasarkan hasil simulasi SWMM, luapan terjadi pada J4 dan J5 karena kapasitas pengaliran saluran tidak mampu menampung aliran yang masuk. Kondisi eksisting saluran yang terdapat tumpukan vegetasi dapat mengurangi ruang efektif aliran dan berpotensi memperburuk

kapasitas pengaliran saluran. Oleh karena itu, pembersihan vegetasi pada saluran C4 dan C5 direkomendasikan sebagai salah satu upaya penanganan. Selain itu, penggunaan *mobile pump* pada lokasi genangan, khususnya di sekitar J4 dan J5, dapat dipertimbangkan sebagai alternatif penanganan operasional saat terjadi genangan. Berdasarkan volume genangan hasil simulasi sebesar 0,014 ha-m (140 m³) , penggunaan pompa portabel pada penelitian ini menggunakan asumsi pompa portabel berkapasitas 100 l/detik 0,1m³/detik). Nilai tersebut digunakan sebagai asumsi dalam perhitungan waktu pengurasan dan bukan merupakan kapasitas pompa aktual yang diperoleh dari hasil pengujian lapangan. Dasar Persamaan Hambatan Waktu Pengurasan

$$t = \frac{V}{Q_{pompa}} \quad \text{..... (5)}$$

Dimana :

t = waktu / durasi pengurasan genangan (detik)
V = Volume luapan banjir hasil simulasi SWMM (m³) = 140 m³
Q_{pompa} = Kapasitas debit operasional pompa portabel (0.1 m³/detik)

$$t = \frac{140\ \text{m}^3}{0{,}1\ \text{m}^3/\text{detik}} = 1.400\ detik = 23{,}33\ menit$$

5. KESIMPULAN

Berdasarkan evaluasi kinerja sistem drainase primer di Kelurahan Kedungbanteng-Banjarasri menggunakan EPA SWMM 5.1 dengan curah hujan rencana periode ulang 10 tahun sebesar 83,170 mm yang menghasilkan total limpasan permukaan 3,907 ha-m, teridentifikasi bahwa saluran C4 dan C5 mengalami *conduit surcharge* (kapasitas penuh) yang memicu luapan (*flooding*) total 140 m³ pada *junction* J4 dan J5. Sebagai alternatif penanganan, penggunaan *mobile pump* berkapasitas 100 liter/detik secara teoritis dapat menguras total genangan tersebut dalam waktu sekitar 23,33 menit dengan tetap memperhatikan kondisi operasional aktual di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. Fahruddiansyah, E. Noerhayati, and A. Rokhmawati, "Studi Evaluasi Sistem Jaringan Drainase Kedungbanteng – Banjarasri Kecamatan Tanggulangin Kabupaten Sidoarjo Berbasis Aplikasi ArcGIS 10.5," *Jurnal Rekayasa Sipil*, vol. 12, no. 4, 2022.

[2] R. Afrian, "Kajian Mitigasi Terhadap Penyebab Bencana Banjir di Desa Sidodadi Kota Langsa," *Jurnal Georafflesia: Artikel Ilmiah Pendidikan Geografi*, vol. 5, no. 2, 2021, doi: 10.32663/georaf.v5i2.1660.

[3] S. Eka Putri, A. F. Corp, Rembrandt, Dasman Lanin, Genius Umar, and Mulya Gusman, "Kota Padang : Identifikasi Potensi Bencana Banjir Dan Upaya Mitigasi," *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Nusantara (JIMNU)*, vol. 1, no. 3, 2023, doi: 10.59435/jimnu.v1i3.56.

[4] R. Balahanti, W. Mononimbar, and P. H. Gosal, "Analisis Tingkat Kerentanan Banjir di Kecamatan Singkil Kota Manado," *Jurnal spasial*, vol. 11, no. 1, 2023.

[5] S. Siregar, F. Mahfizar, and S. Ramadhani, "Analisis Drainase Kawasan Letda Sudjono Kota Medan," *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, vol. 7, no. 3, 2024, doi: 10.24815/jarsp.v7i3.37682.

[6] A. Siswanto and A. Halim, "Kajian Evaluasi Kapasitas Tampung Saluran Terhadap Debit Banjir Rancangan Pada Perencanaan Sistem Jaringan Drainase Kota Kandangan," 2021.

[7] W. Meilani, R. Sylviana, L. Juliandra, and T. Iskandar, "Efisiensi, perawatan dan pemeliharaan drainase desa Sumbersari," *Jurnal Pengabdian Masyarakat: Pemberdayaan, Inovasi Dan Perubahan*, vol. 4, no. 4, 2024.

[8] A. Gunawan, I. Syaputra, M. Agusalim, and Indriyanti, "Pengaruh Sebaran Stasiun Hujan Terhadap Debit Banjir Rancangan Pada Das Lipukasi Sungai Empungnge Kabupaten Barru," *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, vol. 1, no. 04, 2023.

[9] Suripin, *Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan*. Yogyakarta: Yogyakarta: Andi, 2004.

[10] R. H. B. Ash Shiddiq, N. N. Suryaman, and N. P. Ardiansyah, "Analisis Jenis Aliran pada Saluran Terbuka dengan Hambatan," *Jurnal Komposit*, vol. 8, no. 2, 2024, doi:

10.32832/komposit.v8i2.15499.

[11] N. Nurhaliza, Y. S. Putra, and A. A. Kushadiwijayanto, "Studi Numerik Pola Aliran di Sekitar Pintu Air Menggunakan Pendekatan Komputasi Dinamika Fluida," *PRISMA FISIKA*, vol. 10, no. 3, 2023, doi: 10.26418/pf.v10i3.57851.

[12] D. Pratama, K. Hadiningrum, and R. F. Muldiani, "Studi Awal Pengaruh Temperatur terhadap Karakteristik Aliran Fluida Pada Belokan Pipa 90° melalui Simulasi," *Jurnal MIPA*, vol. 11, no. 2, 2022, doi: 10.35799/jm.v11i2.41826.

[13] Neda Anny Wafiyah and V. A. K. Dewi, "Evaluasi Kapasitas Saluran Drainase Menggunakan Software EPA SWMM Versi 5.1 di Desa Suciharjo," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 9, no. 2, 2024, doi: 10.29244/jsil.9.2.241-250.

[14] N. Apriani, Y. Defiana, and W. Sumarno, "Analisis Kapasitas Sistem Drainase Dengan Pemodelan EPA SWMM 5.1 (Studi Kasus Di Jalan SL. Tobing Kota Tasikmalaya)," *SEMINAR TEKNOLOGI MAJALENGKA (STIMA)*, vol. 6, 2022, doi: 10.31949/stima.v6i0.734.

[15] F. Azhari, R. Franchitika, and K. I. Sari, "Evaluasi Saluran Drainase di Jalan Gaharu Kota Binjai Menggunakan Aplikasi EPA SWMM," *SMART: Jurnal Teknik Sipil, Manajemen Konstruksi, dan Arsitektur*, vol. 2, no. 1, 2024, doi: 10.24114/smart.v2i1.57984.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 118-126

Penerapan Metode *Earned Value Management* Pada Proyek Renovasi Rumah Skala Menengah

Jion Pridasari Eka Candra[1*], Abdul Halim[2], Dafid Irawan[3]

[1]EC Group
[2,3]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: diandrachandra82@gmail.com

ABSTRAK

Proyek renovasi rumah skala menengah memerlukan pengendalian biaya dan waktu yang efektif agar pelaksanaannya berjalan sesuai rencana. Dalam praktiknya, keterbatasan durasi, anggaran, serta perubahan pekerjaan selama konstruksi berpotensi menimbulkan keterlambatan dan pembengkakan biaya apabila tidak dikendalikan secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian bertujuan menganalisis kinerja biaya dan waktu menggunakan metode *Earned Value Management* (EVM) serta memprediksi biaya penyelesaian akhir proyek. Metode yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus, menggunakan data RAB, jadwal pelaksanaan, laporan realisasi biaya, serta progres pekerjaan mingguan. Parameter analisis meliputi PV, EV, AC, SV, CV, SPI, CPI, dan EAC. Hasil menunjukkan nilai *Schedule Variance* (SV) sebesar -Rp211.140.336 dan *Schedule Performance Index* (SPI) sebesar 0,83 yang mengindikasikan penyelenggaraan proyek lebih lambat dari perencanaan. Nilai *Cost Variance* (CV) sebesar -Rp1.819.368 dan *Cost Performance Index* (CPI) sebesar 0,998 menunjukkan pengeluaran biaya aktual sedikit lebih besar dari anggaran. Estimasi biaya akhir pada saat penyelesaian proyek (*EAC*) sebesar Rp1.281.982.792 menghasilkan kekurangan anggaran atau kerugian sebesar Rp45.288.807 dari total anggaran yang direncanakan. Berdasarkan studi kasus yang diteliti, penerapan metode EVM terbukti efektif dalam memberikan indikator peringatan terhadap kinerja waktu dan biaya pada proyek konstruksi rumah skala menengah.

Kata kunci : *Earned Value Management*, Kinerja Proyek dan Rumah Skala Menengah.

ABSTRACT

Medium-scale home renovation projects require effective cost and time management to ensure they proceed as planned. In practice, time constraints, budget limitations, and changes in scope during construction can potentially lead to delays and cost overruns if not systematically managed. Therefore, this study aims to analyze cost and schedule performance using the Earned Value Management (EVM) method and to predict the project's final completion cost. The method used is descriptive quantitative analysis with a case study approach, utilizing data from the bill of quantities (BoQ), the construction schedule, cost realization reports, and weekly work progress reports. The analysis parameters include PV, EV, AC, SV, CV, SPI, CPI, and EAC. The results show a Schedule Variance (SV) value of -Rp211,140,336 and a Schedule Performance Index (SPI) of 0.83, indicating that project execution is slower than planned. A Cost Variance (CV) value of -Rp1,819,368 and a Cost Performance Index (CPI) of 0.998 indicate that actual costs were slightly higher than the budget. The Estimated Actual Cost (EAC) at project completion was Rp1,281,982,792, resulting in a budget shortfall or loss of Rp45,288,807 from the total planned budget. Based on the case study examined, the application of the EVM method proved effective in providing early warning indicators regarding time and cost performance in a medium-scale residential construction project.

Keywords **:** *Earned Value Management, Project Performance, and Medium-Scale Housing.*

1. PENDAHULUAN

Dalam konteks pembangunan rumah skala menengah, pengendalian proyek menjadi hal yang krusial karena jenis proyek ini umumnya memiliki keterbatasan anggaran dan jadwal yang ketat, sementara perubahan desain dan kondisi lapangan sering kali menyebabkan keterlambatan dan pembengkakan biaya [1]. *Earned Value Management* (EVM) adalah metode teruji untuk mengintegrasikan informasi jadwal, biaya, dan keluaran fisik proyek sehingga manajemen dapat

memperoleh indikator kinerja objektif seperti *Cost Performance Index* (CPI) dan *Schedule Performance Index* (SPI). Penerapan EVM memungkinkan deteksi dini penyimpangan kinerja dan peramalan (*forecasting*) kebutuhan koreksi sehingga pengambil keputusan dapat melakukan intervensi yang lebih tepat waktu. Berbagai penelitian di Indonesia menunjukkan EVM efektif dipakai pada proyek konstruksi skala berbeda untuk memantau kinerja biaya dan waktu [1]. Beberapa penelitian mencatat tantangan penerapan EVM di lapangan, antara lain kebutuhan data input yang lengkap, kultur pelaporan progres kontraktor, dan adaptasi metrik EVM untuk pekerjaan yang bersifat diskontinu seperti renovasi. Oleh sebab itu diperlukan kajian yang menguji efektivitas EVM untuk proyek renovasi rumah skala menengah mengidentifikasi hambatan penerapan, menguji keandalan indikator (CPI, SPI, ETC, EAC) pada konteks renovasi, dan merekomendasikan prosedur pelaporan yang praktis bagi kontraktor lokal [2]. Berdasarkan gap tersebut, penelitian berjudul "Penerapan Metode *Earned Value Management* pada Proyek Renovasi Rumah Skala Menengah" bertujuan untuk mengevaluasi kinerja biaya dan waktu proyek renovasi menggunakan EVM.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Manajemen Proyek Konstruksi

Dalam konteks proyek pembangunan atau renovasi rumah skala menengah, manajemen proyek berperan penting untuk memastikan keterpaduan antara biaya, waktu, dan mutu agar hasil akhir sesuai dengan spesifikasi teknis, jadwal pelaksanaan, serta batas anggaran yang telah direncanakan [3]. Keberhasilan proyek konstruksi ditentukan oleh tiga variabel utama, yaitu biaya (*cost*), waktu (*time*), dan mutu (*quality*) yang dikenal dengan istilah *triple constraint*. Kegagalan dalam menjaga keseimbangan ketiganya dapat menyebabkan penurunan kinerja proyek, seperti keterlambatan penyelesaian, pembengkakan biaya, atau penurunan kualitas hasil pekerjaan [4]. Dalam hal ini, penerapan metode *Earned Value Management* (EVM) menjadi salah satu solusi yang efektif karena mampu menggabungkan aspek biaya, waktu, dan kemajuan pekerjaan dalam satu sistem pengukuran kinerja yang komprehensif. Menurut Hayati dan Lugi (2020), penerapan EVM pada proyek konstruksi di Indonesia dapat membantu manajer proyek dalam mendeteksi penyimpangan biaya dan jadwal lebih awal sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan [5].

2.2 Siklus Hidup Proyek

Siklus hidup proyek (*project life cycle*) merupakan kerangka kerja yang mendeskripsikan urutan tahapan dari awal hingga akhir pelaksanaan proyek. Kerangka ini membantu manajer proyek menentukan kerja yang harus dilakukan pada setiap fase kegiatan untuk mencapai tujuan proyek. Secara umum, siklus hidup proyek terbagi ke dalam beberapa fase utama: *initiation* (inisiasi), *planning* (perencanaan), *execution* (pelaksanaan), *monitoring & controlling* (pengendalian), dan *closing* (penutupan). Setiap fase dalam siklus hidup proyek memiliki karakteristik serta tantangan operasionalnya masing-masing. Tahap inisiasi melibatkan identifikasi kebutuhan dan kelayakan proyek, kemudian dilanjutkan dengan fase perencanaan yang mencakup penyusunan jadwal kerja dan estimasi biaya yang realistis.



Gambar 1. Siklus Hidup Proyek

Pada fase pelaksanaan, fokus beralih pada koordinasi pekerjaan di lapangan dan kontrol terhadap kinerja. Pengendalian dan evaluasi menjadi bagian integral dalam fase monitoring, di mana progres proyek dievaluasi terhadap rencana awal untuk memastikan bahwa pekerjaan tetap berada pada jalurnya. Akhirnya, fase penutupan mencakup serah terima hasil pekerjaan kepada pemilik proyek serta dokumentasi pelajaran yang dipetik untuk referensi pelaksanaan proyek berikutnya [6]. Untuk contoh ilustrasi siklus hidup proyek terdapat di Gambar 1.

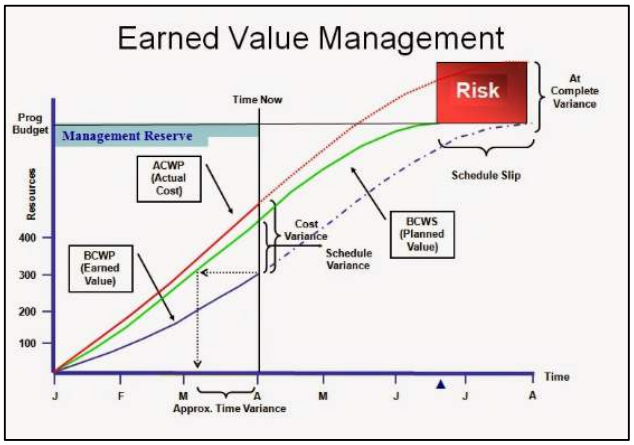
2.3 *Earned Value Management* (EVM)

Metode *Earned Value Management* (EVM) merupakan suatu teknik manajemen proyek yang digunakan untuk mengukur dan memantau kinerja proyek secara objektif melalui perbandingan antara nilai pekerjaan yang direncanakan, nilai pekerjaan yang telah diselesaikan, dan biaya aktual yang dikeluarkan [7]. Menurut *Project Management Institute* [8], EVM menggunakan tiga komponen dasar:

1. B*udgeted Cost of Work Scheduled* (BCWS) – nilai anggaran pekerjaan yang direncanakan sampai periode tertentu.
2. *Budgeted Cost of Work Performed* (BCWP) – nilai anggaran pekerjaan yang telah selesai dikerjakan.
3. *Actual Cost of Work Performed* (ACWP) – biaya aktual yang telah dikeluarkan untuk pekerjaan yang diselesaikan berdasarkan rekapitulasi pengeluaran riil yang tercatat dalam laporan keuangan proyek, buku kas harian, nota pembelian material, upah tenaga kerja, serta subkontraktor yang benar-benar telah dikeluarkan.

2.4 Indikator dan Parameter Dalam EVM

Dalam metode *Earned Value Management* (EVM), terdapat tiga indikator utama, yaitu BCWS (rencana biaya pekerjaan), BCWP (nilai pekerjaan yang telah diselesaikan), dan ACWP (biaya aktual yang dikeluarkan). Ketiga indikator ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja proyek dari sisi waktu dan biaya. Selanjutnya, indikator tersebut dikembangkan menjadi parameter analisis seperti *Schedule Variance* (SV), *Cost Variance* (CV), *Schedule Performance Index* (SPI), dan *Cost Performance Index* (CPI) untuk menilai tingkat efisiensi dan kemajuan proyek [9]. Hubungan antar indikator ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Antara Parameter Penyusun EVM

1. *Budgeted Cost of Work Scheduled* (BCWS).

   BCWS menunjukkan anggaran yang seharusnya telah terpakai sesuai jadwal rencana hingga periode tertentu. Nilai ini menjadi baseline dalam EVM untuk membandingkan rencana dengan realisasi, serta menilai apakah proyek berjalan sesuai target waktu dan biaya [9].

2. *Budgeted Cost of Work Performed* (BCWP)

   BCWP adalah nilai pekerjaan yang benar-benar telah diselesaikan berdasarkan progres aktual. Indikator ini digunakan untuk membandingkan capaian pekerjaan terhadap rencana (BCWS) serta menjadi dasar evaluasi kinerja biaya dan waktu dalam EVM [9].

3. *Actual Cost of Work Performed* (ACWP)

   ACWP adalah biaya aktual yang telah dikeluarkan untuk pekerjaan yang sudah diselesaikan. Indikator ini mencerminkan realisasi biaya proyek dan digunakan untuk menilai efisiensi dengan membandingkannya terhadap nilai pekerjaan yang diperoleh (BCWP) [9].

4. *Schedule Variance* (SV)

   SV menunjukkan selisih antara progres rencana dan progres aktual. Indikator ini digunakan untuk menilai apakah proyek mengalami keterlambatan atau percepatan terhadap jadwal [10].

5. *Cost Variance* (CV)

   CV menunjukkan selisih antara nilai pekerjaan yang diperoleh dan biaya yang dikeluarkan. Indikator ini digunakan untuk menilai efisiensi biaya, apakah terjadi pemborosan atau penghematan dibanding rencana [10].

6. *Schedule Performance Index* (SPI)

   SPI adalah rasio antara progres aktual dan rencana, yang menunjukkan kinerja jadwal proyek apakah sesuai, lebih cepat, atau terlambat [11].

7. *Cost Performance Index* (CPI)

   CPI adalah rasio yang menunjukkan efisiensi biaya proyek dengan membandingkan nilai pekerjaan terhadap biaya yang dikeluarkan, untuk menilai apakah proyek hemat atau melebihi anggaran [11].

8. *Estimate at Completion* (EAC)

   EAC digunakan untuk memproyeksikan total biaya akhir proyek berdasarkan efisiensi biaya berjalan [11].

9. *Estimate Time at Completion* (ETC)

   ETC digunakan untuk memproyeksikan total durasi penyelesaian proyek berdasarkan indeks kinerja jadwal aktual [11].

2.4.1 Penerapan EVM Pada Proyek Konstruksi

Metode EVM telah banyak diterapkan pada proyek konstruksi berskala besar seperti pembangunan gedung bertingkat, jembatan, dan infrastruktur transportasi karena kemampuannya dalam mengintegrasikan biaya, jadwal, serta kinerja pekerjaan secara kuantitatif. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa EVM mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi proyek serta mendeteksi deviasi biaya dan waktu sejak dini [7]. Fleming dan Koppelman (1994) menjelaskan bahwa terdapat perbedaan mendasar antara metode biaya tradisional dan metode *Earned Value*. Pendekatan biaya tradisional hanya membandingkan biaya rencana dengan biaya aktual, sehingga belum mampu menggambarkan kinerja proyek secara akurat karena tidak mempertimbangkan kemajuan fisik pekerjaan. Sebaliknya, metode *Earned Value* menambahkan unsur nilai pekerjaan yang telah diselesaikan (*percent complete*), sehingga memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif. Dengan pendekatan ini, manajer proyek dapat menilai keterkaitan antara biaya yang dikeluarkan dan hasil pekerjaan yang dicapai, sehingga kinerja proyek dari segi waktu dan biaya dapat dianalisis secara lebih tepat [12].

2.4.2 Rumah Skala Menengah

Rumah skala menengah di Indonesia sering diartikan sebagai hunian yang diperuntukkan bagi masyarakat kelas menengah dan juga bukan hunian mewah dengan karakteristik ukuran kavling dan bangunan yang relatif sedang dan harga jual yang bersifat komersial. Dalam Dimensi Utama Teknik Sipil tercatat bahwa luas kavling rumah menengah adalah 54 m^2 hingga 600 m^2 [13]. Dari sisi harga dan regulasi, menurut PP No. 12 Tahun 2021 adalah rumah dengan harga jual 3 hingga 15 kali lipat rumah subsidi, sehingga segmen ini memiliki kisaran harga yang sangat berbeda dibanding rumah subsidi namun masih di bawah rumah mewah [14]. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2011 tentang Perumahan dan Kawasan Permukiman, rumah

diklasifikasikan menjadi rumah umum dan rumah komersial, di mana rumah komersial diperuntukkan bagi masyarakat yang memperoleh rumah melalui mekanisme pasar [15].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada proyek pembangunan renovasi rumah skala menengah yang berlokasi di Jl. Rambutan No.2, RT.2/RW.10, Baru, Kec. Ps. Rebo, Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13940. Lokasi tersebut dipilih karena pengumpulan data progres fisik, biaya aktual, serta dokumen pelaksanaan secara langsung ke lapangan agar lebih akurat.

3.2 Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder, yang keduanya berperan penting dalam memastikan keakuratan dan validitas hasil analisis.

1. Data Primer, diperoleh secara langsung dari lapangan melalui kegiatan observasi, wawancara, serta pencatatan progres pekerjaan dan biaya aktual setiap minggu. Observasi dilakukan untuk mendapatkan gambaran nyata terkait kondisi pelaksanaan proyek, kesesuaian antara rencana dan realisasi pekerjaan, serta kendala yang dihadapi di lapangan.
2. Data Sekunder, diperoleh dari dokumen resmi proyek yang mencakup Rencana Anggaran Biaya (RAB), kurva-S rencana, jadwal pelaksanaan, laporan mingguan, serta dokumentasi kegiatan proyek dalam bentuk foto dan catatan lapangan. Data sekunder ini digunakan untuk memverifikasi dan melengkapi data primer, serta menjadi acuan dalam analisis perbandingan antara kondisi aktual dengan rencana awal.

3.3 Metode Penentuan Progres Fisik dan Dasar Pembobotan Pekerjaan

Progres fisik *(% progress*) di lapangan ditentukan melalui opname - opname harian dan mingguan yang mencatat volume pekerjaan riil yang telah terpasang dibandingkan dengan total volume rencana pada Rencana Anggaran Biaya (RAB). Dasar pembobotan pekerjaan (*weighting factor*, w_i) dihitung berdasarkan persentase harga item pekerjaan terhadap total biaya proyek (kontrak atau RAB total). Formula pembobotan dinyatakan sebagai berikut:

$$w_i = (\text{Harga Pekerjaan i} / \text{Total Anggaran Proyek}) \times 100\% \quad (1)$$

Dengan nilai bobot tersebut, nilai perolehan (*Earned Value* atau BCWP) pada periode tertentu dihitung dengan mengalikan persentase kemajuan fisik aktual item pekerjaan tersebut dengan bobot rencana dan nilai total anggaran.

3.4 Tanggal Pelaporan (Status Date)

Status date (tanggal pelaporan atau *cut-off date*) ditetapkan secara berkala setiap akhir pekan (mingguan) selama periode observasi proyek renovasi berlangsung dimulai dari tanggal 11 Juni 2023 sampai terselesaikannya proyek ditanggal 31 Maret 2024. *Status date* berfungsi sebagai batas waktu pemotongan data (*data date*) untuk membandingkan posisi kumulatif nilai rencana (BCWS), nilai perolehan (BCWP), dan biaya aktual (ACWP) guna mengevaluasi kinerja biaya dan waktu secara objektif pada saat pelaporan.

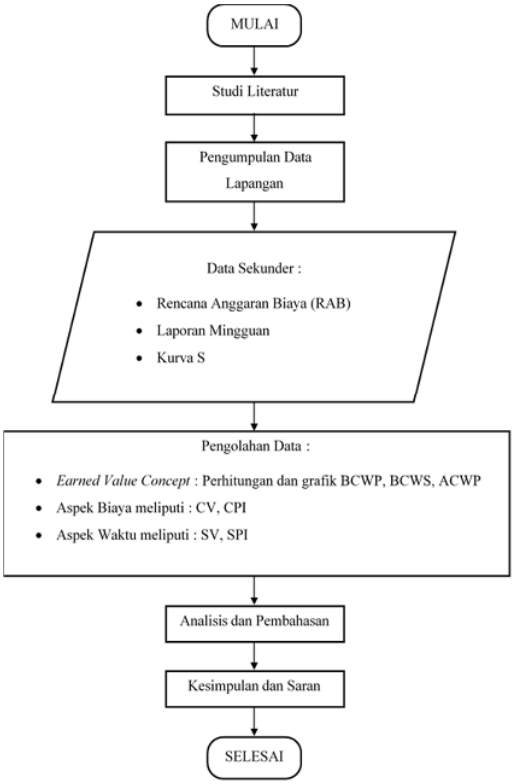
3.5 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan tiga variabel utama dalam metode *Earned Value Management* (EVM) yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Penelitian

Variabel Utama	Simbol	Deskripsi	Satuan
Budgeted Cost of Work Schedule	BCWS	Nilai rencana pekerjaan sampai periode tertentu berdasarkan RAB dan jadwal	Rupiah (Rp)
Budgate Cost of Work Performanced	BCWP	Nilai pekerjaan yang benar-benar telah diselesaikan	Rupiah (Rp)
Actual Cost of Work Performanced	ACWP	Biaya aktual yang telah dikeluarkan untuk menyelesaikan pekerja	Rupiah (Rp)

3.6 Bagan Alur Penelitian



Gambar 3. Bagan Alur Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Proyek

Rencana anggaran biaya untuk pelaksanaan proyek pembangunan renovasi rumah skala menengah sebesar Rp1.236.693.985 (Satu Milyar Dua Ratus Tiga Puluh Enam Juta Enam Ratus Sembilan Puluh 3 Ribu Sembilan Ratus Delapan Puluh Lima Rupiah) Setiap anggaran untuk pekerjaan dapat dijelaskan berdasarkan bobot dari setiap item yang tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Rencana Anggaran Biaya Pelaksanaan Proyek

NO	URAIAN PEKERJAAN	HARGA TOTAL (Rp)
1	PEKERJAAN PERSIAPAN	Rp42.820.000,00
2	PEKERJAAN TANAH & PONDASI	Rp1.924.165,85
3	PEKERJAAN BETON	Rp303.573.154,92
4	PEKERJAAN ATAP	Rp177.330.645,88
5	PEKERJAAN PASANGAN DINDING	Rp103.530.817,25
6	PEKERJAAN PINTU & JENDELA	Rp180.190.000,00
7	PEKERJAAN PLAFOND	Rp56.317.143,01
8	PEKERJAAN PENUTUP LANTAI	Rp88.134.400,00
9	PEKERJAAN INSTALASI LISTRIK & AIR	Rp72.208.410,89
10	PEKERJAAN FINISHING	Rp48.199.654,26
11	PEKERJAAN KUNCI & KACA	Rp7.916.360,00
12	PEKERJAAN LANDSCAPE	Rp81.000.000,00
13	PEKERJAAN TAMBAHAN	Rp73.549.233,15
SUB TOTAL		Rp1.236.693.985,21
PPN 11%		Rp136.036.338,37
TOTAL		Rp1.372.730.323,58

4.2 Analisa Budgeted Cost of Work Schedule (BCWS)

Analisa *Budgeted Cost of Work Schedule* (BCWS) dilakukan untuk menentukan nilai biaya yang direncanakan sesuai dengan jadwal pelaksanaan proyek. BCWS merepresentasikan

biaya kumulatif yang seharusnya dikeluarkan berdasarkan rencana waktu pelaksanaan (*time schedule*) dan rencana anggaran biaya (RAB) pada periode tertentu. Dan hasil rekap *Budgeted Cost of Work Schedule* (BCWS) tiap-tiap bulan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisa *Budgeted Cost of Work Schedule* (BCWS)

Bulan	BAC	Bobot %	Biaya		Bobot Kumulatif %
			Bulanan	Kumulatif	
Juni	Rp1.236.693.985	1,484	Rp 18.351.429	Rp 18.351.429	1,484
Juli		1,979	Rp 24.468.571	Rp 42.820.000	3,462
Agustus		0,104	Rp 1.282.777	Rp 44.102.777	3,566
September		8,693	Rp 107.508.900	Rp 151.611.677	12,259
Oktober		19,675	Rp 243.315.256	Rp 394.926.933	31,934
November		19,513	Rp 241.314.521	Rp 636.241.455	51,447
Desember		7,470	Rp 92.379.230	Rp 728.620.685	58,917
Januari		20,542	Rp 254.036.650	Rp 982.657.335	79,458
Februari		20,542	Rp 254.036.650	Rp 1.236.693.985	100,000

4.3 Analisa *Budgate Cost of Work Performanced* (BCWP)

BCWP merepresentasikan nilai anggaran yang seharusnya dikeluarkan berdasarkan progres fisik aktual pekerjaan yang telah dicapai, bukan berdasarkan biaya aktual yang dikeluarkan. Nilai BCWP diperoleh dengan mengalikan persentase penyelesaian pekerjaan aktual dengan total anggaran pekerjaan yang tercantum dalam Rencana Anggaran Biaya (RAB). Dan hasil rekap *Budgeted Cost of Work Performed* (BCWP) tiap bulan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisa *Budgeted Cost of Work Schedule* (BCWP)

Bulan	BAC	Bobot %	Biaya		Bobot Kumulatif %
			Bulanan	Kumulatif	
Juni	Rp1.236.693.985	7,21	Rp 73.988.052	Rp 73.988.052	7,214
Juli		17,60	Rp 180.542.105	Rp 254.530.157	24,819
Agustus		11,68	Rp 119.754.920	Rp 374.285.077	36,496
September		7,63	Rp 78.297.420	Rp 452.582.498	44,131
Oktober		10,49	Rp 107.566.920	Rp 560.149.418	54,619
November		12,89	Rp 132.239.420	Rp 692.388.839	67,514
Desember		11,75	Rp 120.460.245	Rp 812.849.083	79,260
Januari		8,78	Rp 90.053.874	Rp 902.902.958	88,041
Februari		8,05	Rp 82.538.020	Rp 985.440.978	96,089
Maret		3,91	Rp 40.112.670	Rp 1.025.553.649	100,000

4.4 Analisa *Actual Cost of Work Performanced* (ACWP)

ACWP merepresentasikan total biaya riil yang dikeluarkan untuk menyelesaikan pekerjaan pada periode tertentu, yang meliputi biaya langsung seperti material, tenaga kerja, dan peralatan, serta biaya tidak langsung seperti biaya operasional proyek, pengawasan, dan administrasi. Dan hasil rekap *Actual Cost of Work Performed* (ACWP) tiap-tiap bulan ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Analisa *Actual Cost of Work Performed* (ACWP)

Bulan	BAC	Bobot %	Biaya		Bobot Kumulatif %
			Bulanan	Kumulatif	
Juni	Rp1.236.693.985	7,23	Rp 74.228.665	Rp 74.228.665	7,225
Juli		17,63	Rp 181.081.104	Rp 255.309.770	24,851
Agustus		11,69	Rp 120.149.629	Rp 375.459.399	36,546
September		7,65	Rp 78.618.582	Rp 454.077.981	44,198
Oktober		10,33	Rp 106.117.412	Rp 560.195.393	54,527
November		12,91	Rp 132.656.277	Rp 692.851.671	67,439
Desember		11,77	Rp 120.892.657	Rp 813.744.327	79,206
Januari		8,80	Rp 90.395.893	Rp 904.140.220	88,005
Februari		8,07	Rp 82.866.705	Rp 987.006.926	96,071
Maret		3,93	Rp 40.366.091	Rp 1.027.373.017	100,000

4.5 Pembahasan

Bab pembahasan ini menyajikan analisis dan interpretasi hasil perhitungan serta evaluasi data yang telah diperoleh pada bab sebelumnya terkait pelaksanaan proyek pembangunan rumah tinggal skala menengah di Cijantung, Jakarta Timur. Pembahasan difokuskan pada analisis kinerja proyek berdasarkan aspek waktu dan biaya dengan menggunakan pendekatan *Earned Value Management* (EVM), yang meliputi analisis BCWS, BCWP, ACWP, SV, CP, SPI, dan CPI. Maka berdasarkan data-data tersebut dapat ditentukan nilai prakiraan waktu dan biaya penyelesaian sebagai berikut:

1. Analisa Prakiraan Waktu Penyelesaian:

   Penyimpanan terhadap jadwal:

   SV = BCWP – BCWS ..... (2)

   = Rp 1.025.553.649 – Rp 1.236.693.985

   = -Rp 211.140.336 (Pelaksanaan tidak sesuai jadwal atau terlambat)

   Penyimpangan terhadap biaya:

   CV = BCWP – ACWP.....(3)

   = Rp 1.025.553.649 – Rp 1.027.373.017

   = -Rp1.819.368 (Biaya pelaksanaan lebih besar dari anggaran)

2. Indeks Kinerja Waktu

   SPI = BCWP / BCWS.....(4)

   = Rp 1.025.553.649 / Rp 1.236.693.985

   = 0,83 (Sehingga didapatkan nilai 0,83 < 1 artinya penyelenggaraan proyek lebih lambat dari perencanaan.)

3. Indeks Kinerja Biaya

   CPI = BCWP / ACWP.....(5)

   = Rp 1.025.553.649 / Rp 1.027.373.017

   = 0,998 < 1 (Pengeluaran lebih besar dari anggaran)

4. Perkiraan Biaya Untuk Pekerjaan Tersisa

   ETC = (BAC – BCWP) / SPI.....(6)

   = (Rp 1.236.693.985 – Rp 1.025.553.649) / 0,83

   = Rp 254.609.775

5. Perkiraan Biaya Pada Saat Penyelesaian Proyek

   EAC = ETC + ACWP.....(7)

   = Rp 254.609.775 + Rp 1.027.373.017

   = Rp 1.281.982.792

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa biaya yang diperlukan untuk penyelesaian proyek lebih besar dari anggaran yang direncanakan dan mendapat kerugian sebesar:

Sisa Anggaran = BAC – EAC.....(8)

= Rp 1.236.693.985 - Rp 1.281.982.792

= -Rp 45.288.807

6. KESIMPULAN

Penerapan metode *Earned Value Management* (EVM) pada proyek renovasi rumah skala menengah terbukti efektif dalam memantau dan memberikan gambaran kinerja biaya serta waktu. Hasil analisis menunjukkan bahwa proyek mengalami keterlambatan jadwal dengan nilai *Schedule Variance* (SV) sebesar -Rp211.140.336 dan *Schedule Performance Index* (SPI) 0,83, serta pembengkakan biaya dengan *Cost Variance* (CV) sebesar -Rp1.819.368 dan *Cost*

Performance Index (CPI) 0,998. Kondisi tersebut berdampak pada perkiraan biaya akhir penyelesaian (*Estimate at Completion* / EAC) yang membengkak menjadi Rp1.281.982.792 dari anggaran awal (BAC) sebesar Rp1.236.693.985, sehingga proyek diperkirakan mengalami kerugian sebesar Rp45.288.807.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. A. Siva and I. Junita, "Evaluasi Kinerja Proyek Perumahan Rakyat di Kabupaten Bandung Barat dengan Menggunakan Earned Value Management (EVM) dan Visualisasi Kurva 'S,'" *Journal of Integrated System*, vol. 8, no. 1, pp. 75–88, 2025, doi: 10.28932/jis.v8i1.11568.

[2] D. Karlina, S. Rahmawati, R. A. Hutagalung, and M. Amin, "Model Dan Metode Integrasi Biaya Dan Jadwal Dalam Manajemen Proyek : Sebuah Systematic Literature Review Periode 2020-2025," *Jurnal IPTEK*, vol. 2025, pp. 31–34, 2025.

[3] M. H. Jufri, S. N. Sari, R. Maulana, and A. Hermawan, "Analisis Fungsi Manajemen Konstruksi Dalam Proyek Pembangunan Gedung Kampus Di Yogyakarta," *Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, vol. 2, no. 2, pp. 141–148, 2023.

[4] M. Natalia, Riswandi, D. Oktaviani, and M. H. Putri, "Analisis Faktor-Faktor Penyebab Kendala Triple Constraint Proyek Konstruksi di Kota Jakaarta Akibat Pandemi Covid-19," *SIKLUS Jurnal Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 160–174, 2021.

[5] N. I. Hayati and D. Lugi, "Evaluasi Biaya Dan Waktu Dengan Metode Earned Value Management (Studi Kasus: Ruko Damara Village, Kel. Ciparigi, Kota Bogor)," *Jurnal Komposit*, vol. 4, no. 2, p. 61, 2020, doi: 10.32832/komposit.v4i2.3760.

[6] F. Ayuza, "Pengelolaan Manajemen Risiko Terintegrasi Dalam Tahapan Siklus Hidup Proyek Konstruksi Di Indonesia Integrated Risk Management in the Stages of the Construction Project Life Cycle in Indonesia," *Journal Of Authentic Research*, vol. 4, no. Special Issue, pp. 806–815, 2025.

[7] R. F. Utari and L. S. Mahabella, "Pengendalian Biaya dan Waktu dengan Pendekatan Metode Earnead Value Concept (EVM) (Studi Kasus : Proyek Pembangunan Gedung Rawat Inap kelas 3 Cempaka RSUD Kab Tabanan- Bali)," *Jurnal Media Teknik Sipil*, vol. 17, no. 2, pp. 9–15, 2024, doi: 10.22219/jmts.v17i2.9734.

[8] PMI, *A Guide To The Project Management Body Of Knowledge (PMBOK Guide) - Seventh Edition and The Standard for Project Management*, 7th ed. Pennyslvania: Project Management Institute, 2021.

[9] P. P. Febrianti and B. Alfandi, "Analisis Biaya Dan Waktu Menggunakan Metode EVM (Earned Value Management) (Studi Kasus Pada Pekerjaan Bore Pile, Pile Cap dan Tie Beam Di Proyek Pembangunan Kantor UPT Crew KA Stasiun Depok Lama," *STRUCTURE TEKNIK SIPIL*, vol. 5, no. 2, pp. 79–83, 2023.

[10] A. Hadju, A. Fauzi, and R. Purnamasari, "Evaluasi Perhitungan Waktu dan Biaya Pekerjaan Konstruksi Pembangunan Tower ITS 2 Surabaya Menggunakan Metode Earned Value Management (EVM)," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 13, Nov. 2024, doi: 10.12962/j23373539.v13i3.143137.

[11] I. G. N. Sunatha *et al.*, "Kinerja Biaya Dan Waktu Proyek Dengan Metode Earned Value Management (Studi Kasus : Pembangunan Gedung Dekanat Fakultas Kedokteran Udayana)," vol. 15, no. 02, pp. 39–47, 2023.

[12] Q. W. Fleming and J. M. Koppelman, "The essence of evolution of earned value," *Cost Engineering*, vol. 36, no. 11, p. 21, 1994.

[13] L. Dewabrata, T. Kwanda, and J. Rahardjo, "Faktor-Faktor Yang Dipertimbangkan Dalam Pembelian Rumah Tinggal Kelas Menengah Menurut Broker Properti Di Surabaya," *Dimensi Utama Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, pp. 58–76, 2023, doi: 10.9744/duts.10.1.58-76.

[14] PPRI, "PP No.12 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Perumahan dan Kawasan Pemukiman," 2021.

[15] PPRI, "Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 2011 Tentang Perumahan Dan Kawasan Permukiman," no. 1, 2011.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 127-137

Analisis Pembebanan Jalan Tembus Rencana Soekarno Hatta – RSUD Dr. Soedomo Trenggalek Menggunakan CONTRAM

Anis Purwaningsih[1*], Aji Suraji[2], M. Cakrawala[2]

[1,2,3]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Korespondensi Email: anispningsih@widyagama.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan volume lalu lintas pada ruas Jalan Nasional Tulungagung – Ponorogo di Kabupaten Trenggalek berpotensi menurunkan kinerja jaringan jalan. Salah satu solusi yang direncanakan adalah pembangunan jalan tembus yang menghubungkan Jl. Soekarno Hatta dengan RSUD Dr. Soedomo untuk mempercepat perjalanan dan mendistribusikan arus lalu lintas. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak pembangunan jalan tembus terhadap kinerja jaringan jalan di Kabupaten Trenggalek. Analisis dilakukan melalui pemodelan pembebanan jaringan menggunakan perangkat lunak Contram 5.09. Analisis evaluasi kinerja ruas dan simpang menggunakan metode MKJI 1997 yang meliputi derajat kejenuhan (DS), tundaan dan tingkat pelayanan (LOS). Hasil analisis kondisi eksisting pada Contram menunjukkan bahwa Ruas Jl. Soekarno Hatta memiliki DS sebesar 0,368 dan Ruas Jl. Raya Trenggalek–Ponorogo sebesar 0,336, keduanya memiliki tingkat pelayanan B. Hasil pembebanan pada Contram memperkirakan jalan tembus akan dilalui 1.579 kendaraan/jam dengan DS sebesar 0,217 dan tingkat pelayanan B. Keberadaan jalan tembus menurunkan nilai DS pada Jl. Soekarno Hatta dari 0,368 menjadi 0,225 dan pada Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo dari 0,336 menjadi 0,208. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jalan tembus mampu meningkatkan kinerja jaringan jalan utama melalui penurunan tingkat kejenuhan DS sebesar 38% dan distribusi arus lalu lintas yang lebih merata.

Kata Kunci: Pembebanan Jaringan Jalan, Jalan Tembus, Kinerja Jaringan Jalan, MKJI 1997, Pemodelan Jalan dan CONTRAM.

ABSTRACT

The increase in traffic volume on the Tulungagung–Ponorogo National Road section in Trenggalek Regency has the potential to degrade the performance of the road network. One of the planned solutions is the construction of a bypass road connecting Jl. Soekarno Hatta with Dr. Soedomo Regional General Hospital to speed up travel and distribute traffic flow. This study aims to analyze the impact of the bypass road construction on road network performance in Trenggalek Regency. The analysis was conducted through network loading modeling using Contram 5.09 software. The performance evaluation of road segments and intersections used the 1997 MKJI method, which includes the degree of saturation (DS), delay, and level of service (LOS). The results of the analysis of existing conditions in Contram show that the Soekarno Hatta Road section has a DS of 0.368 and the Trenggalek–Ponorogo Highway section has a DS of 0.336; both have a service level of B. Traffic modeling results in Contram estimate that the through road will carry 1,579 vehicles per hour with a DS of 0.217 and a Level of Service (LOS) of B. The presence of the through road reduces the DS value on Jl. Soekarno Hatta from 0.368 to 0.225 and on Jl. Raya Trenggalek–Ponorogo from 0.336 to 0.208. These results indicate that the through road is capable of improving the performance of the main road network by reducing the DS saturation level by 38% and ensuring a more even distribution of traffic flow.

Keywords: *Road Network Loading, Through Roads, Road Network Performance, MKJI 1997, Road Modeling, and CONTRAM.*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan jalan tembus sebagai alternatif distribusi arus lalu lintas merupakan salah satu strategi untuk meningkatkan kinerja jaringan jalan di kawasan perkotaan. Keberadaan jalan tembus diharapkan mampu mengurangi beban lalu lintas pada ruas jalan utama, mempersingkat waktu tempuh, serta meningkatkan aksesibilitas menuju pusat-pusat kegiatan. Kabupaten Trenggalek dilintasi oleh Jalan Nasional Tulungagung – Ponorogo yang berfungsi sebagai koridor utama transportasi dan penggerak aktivitas ekonomi. Meningkatnya mobilitas masyarakat dan pertumbuhan aktivitas perkotaan menyebabkan ruas jalan nasional tersebut mengalami peningkatan volume lalu lintas, sehingga diperlukan alternatif penanganan berupa pembangunan jalan tembus yang menghubungkan Jl. Soekarno Hatta dengan RSUD Dr. Soedomo. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembangunan jalan alternatif atau jalan tembus mampu meningkatkan efisiensi jaringan transportasi melalui redistribusi arus lalu lintas dan penurunan tingkat kejenuhan pada ruas jalan utama [1], [2]. Menurut Manual Kapasitas Jalan Indonesia [3], kinerja ruas jalan dapat dievaluasi berdasarkan indikator derajat kejenuhan (Degree of Saturation/DS), kecepatan perjalanan, tundaan, dan tingkat pelayanan (*Level of Service*/LOS) [4]. Sementara itu, pemodelan transportasi menggunakan perangkat lunak Contram telah banyak dimanfaatkan untuk menstimulasikan pola pergerakan kendaraan pada jaringan jalan, memprediksi perubahan arus lalu lintas akibat pembangunan infrastruktur baru, serta mengevaluasi dampaknya terhadap kinerja jaringan jalan secara keseluruhan [5]. Oleh karena itu, kombinasi analisis menggunakan Contram dan MKJI menjadi pendekatan yang tepat untuk mengevaluasi efektivitas pembangunan jalan tembus.

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja jaringan Jalan Nasional Tulungagung–Ponorogo sebelum dan sesudah pembangunan jalan tembus Jl. Soekarno Hatta–RSUD Dr. Soedomo, serta memperkirakan besarnya arus lalu lintas yang akan menggunakan jalan baru tersebut. Analisis dilakukan pada ruas Jl. Soekarno Hatta dan Jl. Raya Trenggalek–Ponorogo beserta simpang-simpang yang berada di sekitar lokasi studi. Metode penelitian meliputi pemodelan pembebanan jaringan jalan menggunakan perangkat lunak Contram 5.09 dan analisis kinerja ruas maupun simpang berdasarkan MKJI 1997. Hasil penelitian diharapkan bahwa pembangunan jalan tembus mampu mendistribusikan arus lalu lintas ke jalur alternatif sehingga menurunkan nilai derajat kejenuhan pada ruas jalan utama tanpa mengurangi tingkat pelayanan jaringan jalan. Penelitian ini memberikan gambaran mengenai efektivitas pembangunan jalan tembus sebagai solusi peningkatan kinerja jaringan transportasi di Kabupaten Trenggalek. Pada penelitian sebelumnya tidak ditemukan analisis serupa dengan menggunakan perangkat lunak Contram 5.09 di Kabupaten Trenggalek. Hasil analisis diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pemerintah daerah dalam merencanakan pengembangan infrastruktur jalan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi studi-studi selanjutnya yang membahas evaluasi kinerja jaringan jalan menggunakan pendekatan pemodelan transportasi dan analisis kapasitas jalan, sehingga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam perencanaan transportasi perkotaan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Pembebanan jaringan adalah suatu tahapan pemodelan yang memperkirakan rute yang dilewati pengguna jalan [6]. Proses di mana permintaan perjalanan merupakan hasil dari pembebanan MAT ke jaringan jalan, tujuan pembebanan ini adalah untuk mendapatkan arus di ruas jalan atau total perjalanan di dalam jaringan yang ditinjau. Menurut Pandika [7], Contram 5.09 (*Continues Trafffic Assignment Model*) adalah perangkat lunak untuk membebankan lalu lintas pada jaringan jalan dengan prinsip shortest path dan *equilibrium trip assignment* pada berbagai variasi waktu dengan input berupa pola jaringan jalan (*supply*) dan matriks asal tujuan (*demand*).

2.2 Kinerja Ruas Jalan Perkotaan

Kinerja ruas jalan perkotaan ditentukan dari nilai derajat kejenuhan, di mana derajat kejenuhan merupakan volume lalu lintas (smp/jam) dibagi dengan kapasitas jalan (smp/jam).

Volume lalu lintas (smp/jam) dihasilkan dari perkalian jumlah kendaraan per jam dengan ekivalensi mobil penumpang (emp) [8]. Kapasitas jalan (smp/jam) didapatkan dari perkalian kapasitas dasar dan beberapa faktor penyesuaian. Persamaan dasar untuk menentukan kapasitas jalan perkotaan adalah sebagai berikut :

$$C = Co\ x\ FCw\ x\ FCsp\ x\ FCsf\ x\ FCcs \quad \text{..... (1)}$$

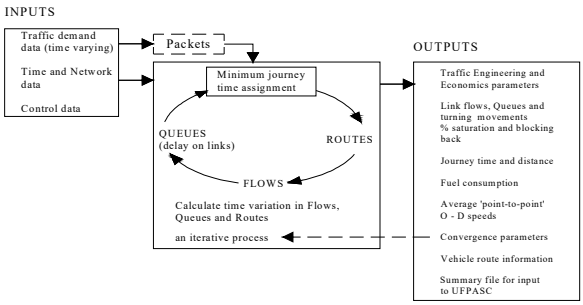
Di mana :

C = Kapasitas (smp/jam)
Co = Kapasitas Dasar (smp/jam)
FCw = Faktor penyesuaian lebar jalan
FCsp = Faktor penyesuaian pemisah arah (hanya untuk jalan tak terbagi)
FCsf = Faktor penyesuaian hambatan samping dan bahu jalan kereb
FCcs = Faktor penyesuaian ukuran kota

2.3 Tingkat Pelayanan (LOS)

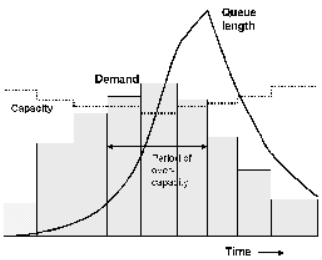
Level of Service (LOS) atau Tingkat Pelayanan adalah indikator yang menggambarkan kualitas suatu jalan dan merupakan batas kondisi pengoperasian [9]. Dalam MKJI, 1997 tingkat pelayanan didasarkan pada nilai derajat kejenuhan (DS), di mana DS < 0.75 mengindikasikan bahwa kinerja jaringan jalan dianggap stabil, sedang DS ≥ 0.75 menyatakan bahwa kinerja jaringan jalan sudah tidak stabil atau tidak berfungsi sebagaimana harusnya sehingga perlu adanya perbaikan jalan, rute atau penambahan jaringan jalan baru.

2.4 Perangkat Lunak CONTRAM 5.09



Gambar 1. Prinsip Kerja Contram [10]

Prinsip kerja CONTRAM 5.09 pada dasarnya hampir serupa piranti lunak pembebanan lalu lintas lainnya, dengan prinsip lintasan minimum (*shortest path*) dan para pengemudi diasumsikan telah mengenal kondisi lalu lintas yang ada, sehingga mereka akan memilih rute yang waktu perjalanannya minimum. Selanjutnya perjalanan kendaraan dari tempat tujuan (*destination*) dibebankan ke masing-masing link yang membangun lintasan minimum tersebut. Meskipun terdapat beberapa perbedaan yang mendasar dalam cara kerjanya dibandingkan dengan aplikasi lain yaitu berupa tingkat perincian (detail) dan beberapa hal lainnya. Input dari perangkat lunak ini adalah data permintaan lalu lintas (*traffic demand*) dan data jaringan (*network*) bersama dengan data sistem pengendalian jaringan (*control*). Sedangkan outputnya berupa arus total (kendaraan), lalu lintas harian rata-rata (kendaraan per hari), kecepatan (km/jam), waktu tempuh (detik) dan derajat kejenuhan (V/C).



Gambar 2. Hubungan Supply dan Demand [11]

Pada pemodelan jaringan jalan, zona dapat diartikan sebagai titik awal dan akhir suatu perjalanan. Cara sederhana dalam menentukan sistem zona adalah berdasarkan wilayah

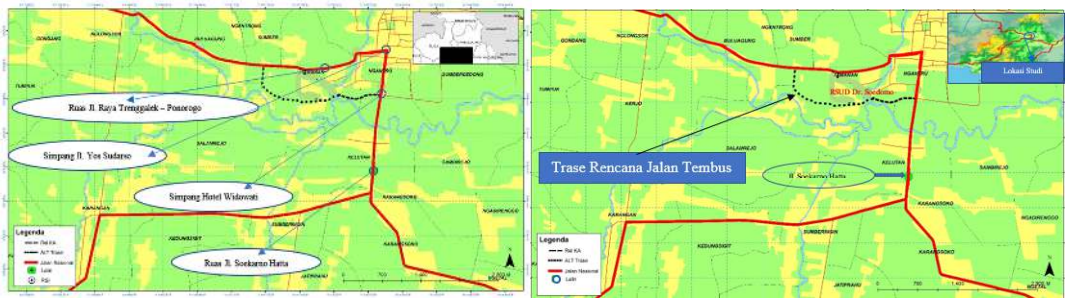
administrasi pemerintahan, dimulai dari kelurahan, kecamatan, kabupaten hingga provinsi. Semakin kecil sistem zona, kelurahan misalnya, maka dibutuhkan data yang semakin banyak. Selain didasarkan pada wilayah administrasi pemerintahan, penentuan zona juga dapat didasarkan pada jenis tata guna lahan. Matriks Asal Tujuan (MAT) atau Matriks Pergerakan adalah Matriks yang menunjukkan besarnya pergerakan pada zona asal menuju zona tujuan [12]. MAT adalah matriks berdimensi dua yang berisi informasi mengenai pergerakan antar lokasi. Baris dalam MAT menyatakan zona asal dan kolom dalam MAT menyatakan zona tujuan, sehingga setiap sel dalam MAT menyatakan besarnya arus pergerakan yang bergerak dari zona asal menuju ke zona tujuan selama selang waktu tertentu seperti digambarkan pada tabel berikut. Sel dari setiap baris i berisi pergerakan dari zona i ke setiap zona tujuan d, sedangkan sel dari tiap kolom d berisi pergerakan yang menuju ke zona d dari tiap asal i. Sel diagonal berisi pergerakan interzona yaitu i = d.

Terdapat beberapa jenis data input yang dibutuhkan untuk running ke perangkat lunak Contram 5.09, yaitu data *network*, data *demand*, dan data *control*. Validasi model diperlukan untuk mengecek hasil output Contram jaringan jalan eksisting apakah sudah sesuai dengan data hasil survei yang telah dilakukan [13]. Uji validasi yang akan dilakukan yaitu dengan menggunakan metode Uji Hipotesis dengan Anova [14]. Uji ini untuk mengetahui signifikasi perbedaan rata-rata (μ) antara kelompok sampel hasil pengumpulan data primer dan pemodelan menggunakan Contram 5.09. Contram 5.09 (*Continuous Traffic Assignment Model*) merupakan perangkat lunak pemodelan transportasi *makroskopik/mesoskopik* dinamis yang sangat andal untuk menganalisis manajemen lalu lintas, rute kendaraan, hambatan, serta antrean pada jaringan jalan.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berada di Kabupaten Trenggalek Jawa Timur dengan ruas jalan utama Jalan Nasional Tulungagung – Ponorogo yaitu Jl. Soekarno Hatta dan Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo. Rencana Trase Jalan tembus yaitu dari Jl. Soekarno Hatta (Simpang Hotel Widowati) melewati RSUD Dr. Soedomo dan keluar menuju Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo. Lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 3 di bawah.



(a) (b)

Gambar 3. Lokasi Survei (a) dan Trase Rencana Jalan Tembus (b)

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data bertujuan untuk mendapatkan data baik data primer maupun data sekunder. Selain itu juga dilakukan studi literatur sebagai referensi dalam penyusunan penelitian. Data lapangan yang diperlukan meliputi kinerja ruas jalan, kinerja simpang, volume lalu lintas, waktu tempuh. Data tersebut didapatkan melalui:

1. Survei Inventarisasi Jalan (*Road Inventory Survey*) bertujuan untuk mendapatkan data lebar jalan, lebar median, bahu jalan maupun trotoar [15]. Data ini digunakan untuk mendapatkan nilai kapasitas jalan maupun tingkat pelayanan jalan atau kinerja jalan.
2. Survei Waktu Tempuh Perjalanan (*Travel Time Survey*) bertujuan untuk mendapatkan kecepatan perjalanan. Dalam perhitungan waktu tempuh ini sudah termasuk waktu tundaan

atau hambatan perjalanan. Metode yang digunakan dalam survei ini adalah Metode Kendaraan Contoh [16].

3. Survei Cacah Lalu Lintas (*Traffic Counting Survey*) bertujuan untuk mengetahui berupa banyak kendaraan yang melewati jalan tersebut diasumsikan sejumlah kendaraan yang nantinya akan melewati ruas dan simpang lokasi studi [17].

3.3 Analisis Kinerja Jaringan Jalan

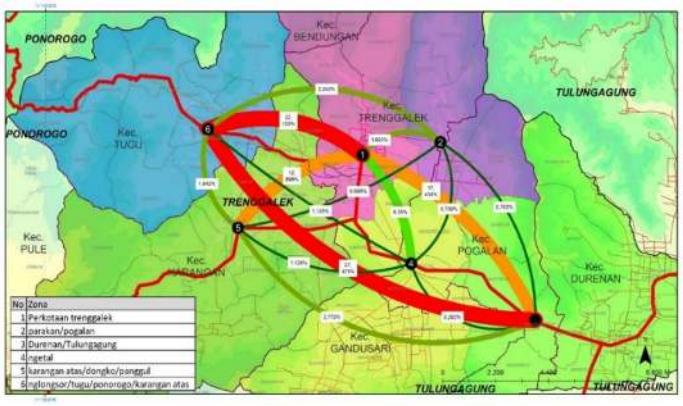
Analisis kinerja jaringan jalan dilakukan dengan menghitung arus lalu lintas pada jam puncak (smp/jam), dilanjutkan menghitung kapasitas jalan berdasarkan kriteria jaringan jalan (smp/jam). Dari nilai arus dan kapasitas tersebut dicari nilai derajat kejenuhan dengan membandingkan arus lalu lintas dengan kapasitas jalan. Tingkat pelayanan merupakan indikator kinerja jaringan jalan yang didapat dari penggolongan berbagai nilai derajat kejenuhan [18].

3.4 Analisis Pembebanan Jalan Tembus dengan Perangkat Lunak CONTRAM 5.09

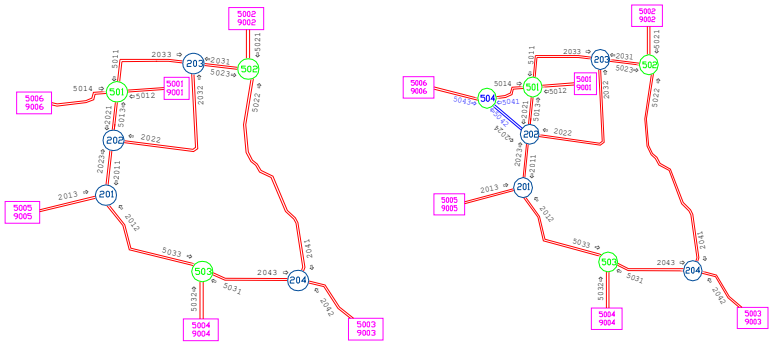
Sebelum melakukan pembebanan jalan tembus pada perangkat lunak, terlebih dahulu dilakukan pembebanan jaringan jalan eksisting sebelum adanya jalan tembus. Lalu dilakukan uji anova untuk memvalidasi hasil model jaringan jalan eksisting dalam perangkat lunak dengan kondisi asal. Setelah mendapatkan hasil model yang baik, maka dilanjutkan pembebanan jalan tembus dengan menambahkan ruas dan simpang (*link* dan *node*) pada model yang sudah tervalidasi. Tahapan penginputan data pada perangkat lunak Contram 5.09 di antaranya data MAT yang sudah ada dilakukan iterasi dengan perangkat lunak *Contram 5.09* untuk mendapatkan MAT tahun dasar. Selanjutnya dari MAT tahun dasar, jaringan jalan difungsikan sebagai "*supply*" dan MAT tahun dasar difungsikan sebagai "*demand*". Contram membantu melakukan iterasi atas pembebanan jaringan di mana setiap pengguna jalan mendapatkan rute paling optimal dari segi waktu dan biaya perjalanan. Data jaringan jalan, persimpangan, dan data ruas dimasukkan di dalam file dengan format (***.net***) yang meliputi Kapasitas, kecepatan, panjang link, waktu perjalanan, dan waktu siklus; Nomor kartu (kartu 1 : *time slice*; kartu 3 : nomor zona asal dan link tujuan; kartu 4 : simpang *uncontrolled* ; kartu 5 simpang prioritas; kartu 6 : simpang APILL; kartu 9 : emp / pcu); Nomor zona asal tujuan dimana zona asal adalah : 5001, 5002, 5003, 5004 dan zona tujuan adalah 9001, 9002 dan 9003; Nomor persimpangan (*Node*) dimana simpang bersinyal : 201, 202, 203… 20n, simpang prioritas : 301, 302, 303…. 30n dan simpang *uncontrolled* : 501, 502, 503… 50n; Nomor ruas (*Link*) meliputi kodefikasi ruas jalan (maks. 4 digit) yaitu dengan menambahkan satu angka di belakang angka simpul atau persimpangan itu, sebagai contoh 2011 (ruas ke satu pada persimpangan kesatu jenis persimpangan ber APILL).

Data permintaan lalu lintas dalam bentuk Matriks O/D dan disimpan dalam file (***.dem***) memuat zona asal dan zona tujuan. Data MAT tiap jenis kendaraan dikalikan dengan total jam puncak pada dua ruas yang dianalisis pada tiap-tiap jenis kendaraan pula. Jenis kendaraan dibagi menjadi 3 kelas kendaraan, yaitu kode 1 untuk "C" (*car*) yaitu kendaraan ringan. Kode 2 untuk "B" (*bus*) yaitu sepeda motor dan kode 3 untuk "L" yaitu untuk kendaraan berat. Bisa dimodifikasi sesuai kebutuhan. Distribusi kendaraan perjalanan asal tujuan berdasarkan modal *split* pada daerah studi. Data sistem pengendalian jaringan (*control* data) dibentuk dalam file (***.con***) meliputi nomor kartu untuk kontrol data meliputi (kartu 50-56 : *setting default*; kartu 71 : siklus APILL; kartu 77 : penomoran *setting* APILL). Pada simpang bersinyal akan ditampilkan panjang waktu siklus dengan durasi waktu hijau dan waktu kuning. Waktu siklus dihasilkan dari penjumlahan waktu hijau dan waktu kuning selama banyak fase yang dimiliki oleh suatu simpang [19].

Dalam penelitian ini sistem zona dibagi menjadi 6 zona wilayah (Gambar 4). Matriks Asal Tujuan Pergerakan Kabupaten Trenggalek pada dokumen Tatralok Kab. Trenggalek 2018 diketahui bahwa pergerakan terbesar adalah zona asal 3 yaitu arah Tulungagung menuju zona 6 arah Ponorogo sebesar 19.82% serta dari zona 1 wilayah Perkotaan Trenggalek menuju zona 6 arah Ponorogo meliputi Karangan bagian atas dan Tugu. Sedangkan jumlah terkecil adalah zona 4 Ngetal menuju zona 5 arah Dongko dan sekitarnya. Peta jaringan jalan pada Gambar 5 akan menampilkan letak zonasi pergerakan (pembagian zona) pada jaringan jalan atau *network modelling* sebelum dan sesudah adanya jalan tembus.

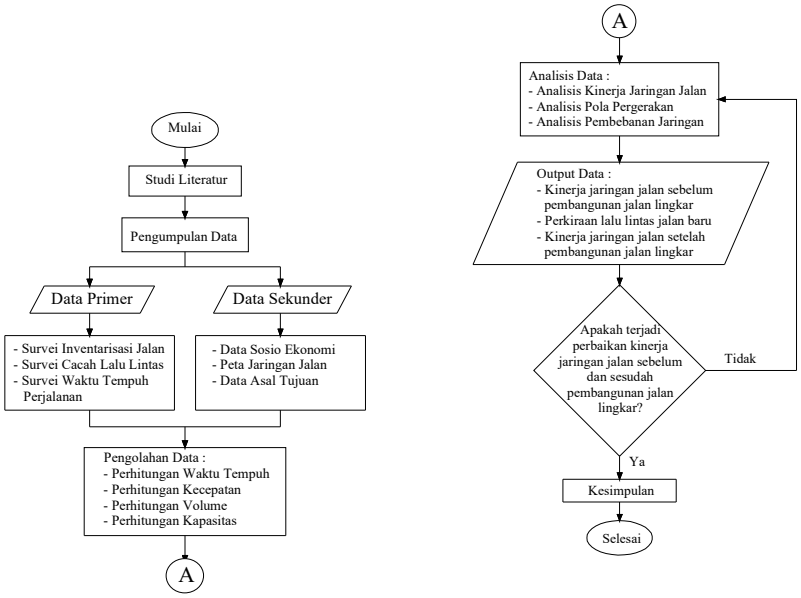


Gambar 4. Desire Line (Dok. Tatralok Kab. Trenggalek, 2018)



Gambar 5. Peta Jaringan Jalan **(**Network Modelling) (kiri-eksisting; kanan- dengan jalan tembus)

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Kinerja Ruas Jalan Eksisting

1. Data Inventarisasi Jalan

Jl. Soekarno Hatta merupakan tipe jalan (2/2 UD) atau jalan empat lajur dua arah terbagi, dan merupakan jalan perkotaan dengan kerb dan total kedua arah Jl. Soekaro Hatta sebesar 10

meter. Sedangkan Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo merupakan tipe jalan (2/2 UD) atau jalan dua lajur dua arah tak terbagi, dan merupakan jalan perkotaan dengan bahu, dengan lebar total 16.6 m. Data geometrik kedua ruas jalan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Data Geometrik Ruas Jalan

Nama Ruas	Trotoar (m)		Bahu (m)		Total Bahu	Lebar bahu efektif rata-rata
Jl. Soekarno Hatta	S-U	U-S	S-U	U-S	3.0	1.5
	1.5	1.0	1.5	1.5		
Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo	T-B	B-T	T-B	B-T	5.8	2.9
	1.75	1.5	3.05	2.75		

Sumber : Hasil Analisis 2018

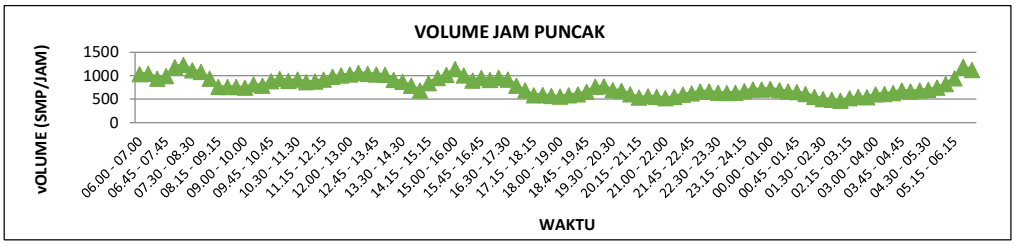
2. Data Waktu Tempuh Perjalanan
Titik 1 berada pada simpang 3 lengan Hotel Widowati dan titik 2 berada pada simpang 4 lengan Kantor Dinas Koperindagtamben.

Tabel 3. Data Waktu Tempuh Perjalanan

Titik	Waktu Perjalanan Rata-rata (Detik)	Panjang Rute (m)	Hambatan Rata-rata (Detik)	Waktu Bergerak (Detik)	Kecepatan Perjalanan (Km/Jam)	Kecepatan Bergerak (Km/Jam)
1-2	239.17	3100	15.90	223.26	46.66	49.99
2-1	239.50	3100	13.22	226.28	46.60	49.32

Sumber : Hasil Analisis 2018

3. Data Lalu Lintas
- Ruas Jl. Soekarno Hatta



Gambar 7. Volume Jam Puncak Ruas Jl. Soekarno Hatta

Tabel 4. Data Lalu Lintas Pada Jam Puncak Ruas Jl. Soekarno Hatta

Interval	Arah	LV	HV	MC	UM	Jumlah
07.15 - 08.15	Utara	304	7	1032	43	1386
	Selatan	154	2	1147	45	1348
Total (Kend./jam)						2734

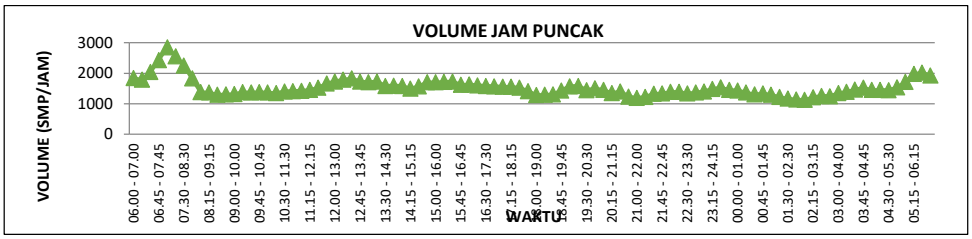
Tabel 5. Data Perhitungan Arus Total Ruas Jl. Soekarno Hatta

Arah	Kendaraan Ringan		Kendaraan Berat		Sepeda Motor		Jumlah	Q total
	LV :	1.00	HV :	1.20	MC :	0.35		
	Kend./jam	SMP/jam	Kend./jam	SMP/jam	Kend./jam	SMP/jam	Kend./jam	SMP/jam
Utara	304	304	7	8.4	1032	361.2	1343	673.6
Selatan	154	154	2	2.4	1147	401.45	1303	557.85
						Total	**1303**	**1231.5**

Sumber : Hasil Analisis 2018

Volume jam puncak pada Gambar 7 didapatkan dengan puncak jam – 15 menit. Dari fluktuasi data volume jam puncak, diketahui volume lalu lintas tertinggi terjadi pada puncak jam – 15 menit pukul 07.15 – 08.15 dengan jumlah total kendaraan 2734 kend./jam yang ditampilkan pada Tabel 4. Selanjutnya dari data jumlah kendaraan, didapatkan arus total ruas Jl. Soekarno Hatta pada Tabel 5 sebesar 1231.5 smp/jam.

- Ruas Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo



Gambar 8. Volume Jam Puncak Ruas Jl Raya Trenggalek – Ponorogo

Tabel 6. Data Lalu Lintas Pada Jam Puncak Ruas Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo

Interval	Arah	LV	HV	MC	UM	Jumlah
07.00 - 08.00	Barat	189	8	1581	24	1802
	Timur	193	9	868	29	1099
Total (Kend./jam)						2901

Tabel 7. Data Perhitungan Arus Total Ruas Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo

Arah	Kendaraan Ringan		Kendaraan Berat		Sepeda Motor		Jumlah	Q total
	LV :	1.00	HV :	1.20	MC :	0.35		
	Kend./jam	SMP/jam	Kend./jam	SMP/jam	Kend./jam	SMP/jam	Kend./jam	SMP/jam
Barat	189	189	8	9.6	1581	553.35	1778	751.95
Timur	193	193	9	10.8	868	303.8	1070	507.6
						Total	**2848**	**1259.6**

Sumber : Hasil Analisis 2018

Volume jam puncak pada Gambar 8 didapatkan dengan puncak jam – 15 menit. Dari fluktuasi data volume jam puncak, diketahui volume lalu lintas tertinggi terjadi pada puncak jam – 15 menit pukul 07.00 – 08.00 dengan jumlah total kendaraan 2901 kend./jam yang ditampilkan pada Tabel 4. Selanjutnya dari data jumlah kendaraan, didapatkan arus total ruas Jl. Soekarno Hatta pada Tabel 5 sebesar 1259.6 smp/jam.

4. Analisis Kinerja Ruas Jalan

Tabel 6. Hasil Analisis Kinerja Ruas Jalan

Nama Jalan	Arah	Arus lalu lintas Q (smp/jam)	Kapasitas C (smp/jam)	Derajat Kejenuhan DS	Tingkat Pelayanan
Jl. Soekarno Hatta	Dua arah	1231.45	3411.044	0.361	B
Jalan Raya Trenggalek Ponorogo	Dua arah	1259.55	3305.548	0.381	B

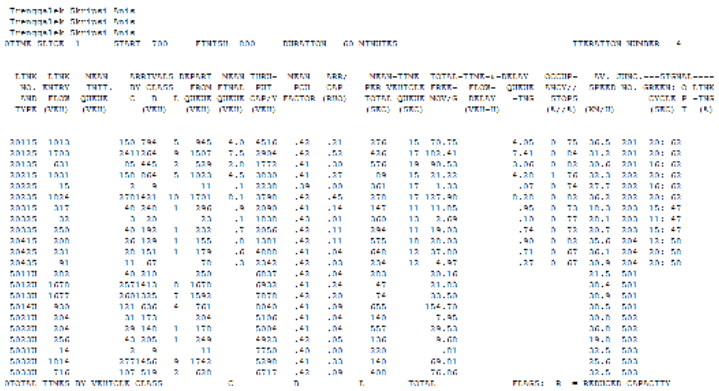
Hasil analisis kinerja ruas jalan didapatkan pada Jl. Soekarno Hatta didapatkan nilai derajat kejenuhan adalah sebesar 0.361 dengan tingkat pelayanan B. Sedangkan pada Jl. Raya Trenggalek Ponorogo didapatkan nilai derajat kejenuhan sebesar 0.381 dengan tingkat pelayanan B.

4.2 Pembebanan Jalan Eksisting ke dalam Perangkat Lunak CONTRAM

Validasi pemodelan pada Contram terlebih dahulu dilakukan dengan memasukkan data eksisting hasil survei ke dalam Contram serta dianalisis dengan melakukan Uji Anova. Dalam hal ini output pada Contram ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil pemodelan jalan eksisting ke dalam Contram ditampilkan pada Tabel 9. Selanjutnya untuk pembebanan jalan tembus pada perangkat lunak, dilakukan dengan menambahkan jaringan jalan tembus ke dalam model perangkat lunak yang telah tervalidasi. Output hasil jalan tembus pada Contram ditunjukkan pada Gambar 10 dan analisis jalan tembus hasil pemodelan ditampilkan pada Tabel 10.

Tabel 9. Perbandingan Arus Lalu Lintas Hasil Model

Ruas	Arah	Hasil Survei			Hasil Pada Contram		
		LV	HV	MC	LV	HV	MC
Jl. Raya Trenggalek Ponorogo	Barat	189	8	1581	121	4	636
	Timur	193	9	868	257	8	1413
Jl. Soekarno Hatta	Utara	304	7	1032	150	5	794
	Selatan	154	2	1147	278	10	1421

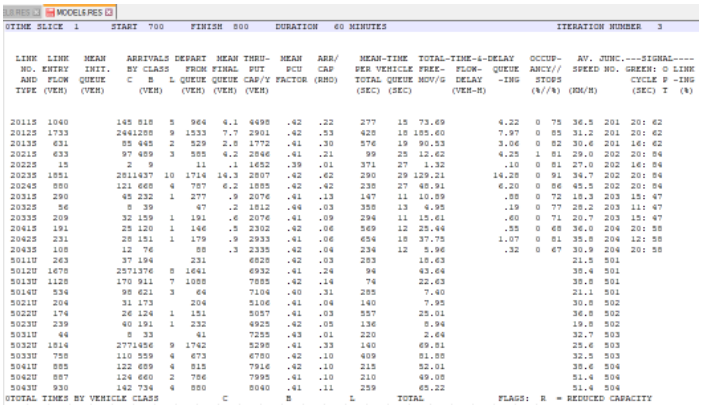


Gambar 9. Output CONTRAM 5.09 untuk Validasi Model

Dari hasil analisis Anova pada Tabel 9 didapatkan nilai P-value semua jenis kendaraan > 0.05. Nilai tersebut menunjukkan model dari perangkat lunak ini cukup baik untuk digunakan dalam pengembangan jaringan jalan pada Contram.

4.3 Pembebanan Jalan Tembus pada Perangkat Lunak CONTRAM

Pembebanan jalan tembus dengan Contram dapat dilakukan apabila perangkat lunak ini telah tervalidasi. Seperti pada Sub Bab 4.2, didapatkan bahwa pola pemodelan jaringan jalan dalam perangkat lunak telah memenuhi kriteria dan persyaratan untuk dapat melakukan pembebanan jaringan jalan baru yaitu jalan tembus. Hasil pembebanan jaringan jalan tembus dengan Contram ditunjukkan pada Gambar 10. Analisis jaringan jalan tembus hasil pemodelan ditampilkan pada Tabel 10.



Gambar 10. Output CONTRAM 5.09

Tabel 10. Hasil Analisis Arus Jaringan Jalan Tembus pada Contram Setelah Validasi Model

Ruas	Arah	LV	HV	MC
Jl. Raya Trenggalek Ponorogo	Barat	98	3	621
	Timur	122	4	689
Jl. Soekarno Hatta	Utara	97	3	489
	Selatan	170	7	911
Jalan Tembus	Barat	121	4	668
	Timur	124	2	660

Sumber : Hasil Pembebanan dengan CONTRAM 5.09

Hasil pembebanan jalan tembus melalui perangkat lunak Contram 5.09 pada tabel di atas didapatkan total kendaraan yang melintasi jalan tembus adalah sebesar 1579 kendaraan per jam.

4.4 Analisis Kinerja Jaringan Jalan Setelah Pembangunan Jalan Tembus

Tabel 11. Kinerja Jaringan Jalan Sebelum Pembangunan Jalan Tembus

Kondisi Eksisting dan Jalan Tembus		Sebelum Pembangunan Jalan Tembus			Sesudah Pembangunan Jalan Tembus		
Ruas	Arah	Q (Kend./jam)	DS	LOS	Q (Kend./jam)	DS	LOS
Jl. Raya Trenggalek Ponorogo	Barat Timur	761 1678	0.336	B	722 815	0.208	B
Jl. Soekarno Hatta	Utara Selatan	1027 1709	0.368	B	589 1088	0.225	B
Jalan Tembus	Barat Timur	- -	-	-	793 786	0.217	B

Sumber : Hasil Pembebanan dengan Perangkat Lunak *CONTRAM 5.09*

Dari Tabel 11 dapat diketahui bahwa terjadi perubahan arus lalu lintas pada jalan eksisting sebelum dan sesudah adanya jalan tembus. Lalu lintas harian rata-rata (LHR) total pada jalan eksisting Jl. Soekarno Hatta dan Jl. Raya Trenggalek Ponorogo adalah sebesar 48744 kendaraan per hari. Angka tersebut didapatkan dari arus lalu lintas kendaraan per jam hasil model dibagi dengan faktor k. Faktor k untuk kendaraan bermotor adalah 0.11 dan kendaraan ringan dan berat adalah 0.09 sehingga didapatkan lalu lintas kendaraan per hari. Adanya jalan tembus mengakibatkan sebagian lalu lintas menerus berpindah dari jalan utama menuju jalan tembus dan LHR total pada jalan utama (jalan eksisting Jl. Soekarno Hatta dan Jl. Raya Trenggalek Ponorogo) berkurang hingga menjadi sebesar 23469 kendaraan per hari. Untuk menentukan LHR total smp per jam maka kendaraan per hari tersebut di atas dikali dengan faktor emp pada masing-masing jenis kendaran. Sehingga didapatkan LHR total jalan utama sebelum adanya jalan tembus adalah sebesar 23194.4 smp per hari dan LHR total jalan utama setelah adanya jalan tembus berkurang hingga menjadi sebesar 11155.7 smp per hari.Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa lalu lintas harian rata-rata jalan eksisting yaitu Jl. Soekarno Hatta segmen simpang Hotel Widowati sampai dengan simpang Jl. Yos Sudarso berkurang dikarenakan berpindahnya sebagian lalu lintas menerus menuju jalan tembus.

5. KESIMPULAN

Analisis kinerja jaringan jalan eksisting hasil survei sebelum pembangunan jalan tembus adalah Pada ruas Jl. Soekarno Hatta (2/2 UD) didapatkan nilai derajat kejenuhan sebesar 0.361 dengan tingkat pelayanan B. Sedangkan pada ruas Jl. Raya Trenggalek – Ponorogo (2/2 UD) didapatkan nilai derajat kejenuhan sebesar 0.381 dengan tingkat pelayanan B. Perkiraan lalu lintas pada jalan tembus yang didapat dari pembebanan jaringan jalan menggunakan perangkat lunak *Contram* sebesar 1579 kendaraan per jam dengan derajat kejenuhan 0.217 dan tingkat pelayanan yaitu B. Pemodelan jaringan jalan tembus pada Contram mengakibatkan berpindahnya sebagian lalu lintas menerus menuju ke jalan tembus tersebut. Adapun kinerja jaringan jalan setelah dilakukan pembebanan pada Contram, yaitu Ruas Jl. Soekarno Hatta mengalami perbaikan di mana nilai derajat kejenuhan dari 0.368 menjadi 0.225 dengan tingkat pelayanan yaitu B. Sedangkan ruas Jl. Raya Trenggalek Ponorogo juga mengalami perbaikan dengan nilai derajat kejenuhan 0.336 menjadi 0.208 dan tingkat pelayanan yaitu B. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jalan tembus mampu meningkatkan kinerja jaringan jalan utama melalui penurunan tingkat kejenuhan sebesar 38% dan distribusi arus lalu lintas yang lebih merata.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. A. Akhiary and M. Ardan, “Analisis Kinerja Lalu Lintas akibat Pengalihan Arus Lalu Lintas di Jalan Perintis Kemerdekaan Kota Medan,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 17, no. 1, 2025.

[2] M. A. Vahlevi and N. M. Rkt, “Analisis Manajemen Lalu Lintas terhadap Perubahan Arus Lalu Lintas pada Jalan Jawa dan Jalan Irian Barat,” 2025.

[3] Direktorat Jenderal Bina Marga, “Manual Kapasitas Jalan Indonesia,” in *Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta*, 1997.

[4] F. Suganda and F. Rosyad, "Analisis Kinerja Ruas Jalan Akibat Pembangunan Saluran U Ditch Dan Preservasi Jalan Pada Kawasan Jalan Soekarno-Hatta Kota Palembang," *Rang Teknik Journal*, vol. 6, no. 1, 2023, doi: 10.31869/rtj.v6i1.3507.

[5] M. R. Hossain, M. S. Hossen, and D. R. Hafiz, "Traffic Impact Analysis of Re-scheduling Educational Institutes: A Case Study of Dhanmondi Residential Area, Dhaka," *International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning*, vol. 1, no. 2, 2014.

[6] B. P. Aldilase, S. R. Tamara, M. Narayudha, and W. Kushardjoko, "Analisa Dan Perencanaan Peningkatan Jalan Alternatif Manyaran–Mijen," *Jurnal Karya Teknik Sipil*, vol. 3, no. 1, pp. 187–193, 2014.

[7] E. Pandika, L. Djakfar, and S. Surjono, "Pengaruh perubahan guna lahan terhadap penyediaan jaringan jalan di kota kepanjen," *Rekayasa Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 130–140, 2015.

[8] M. B. Kela, H. Samara, F. M. J. S. Carlos, and A. Suraji, "Analisis Pembebanan Jaringan Jalan (Trip Assignment) pada Koridor Malang-Surabaya," *Widya Teknika*, vol. 21, no. 2, 2016.

[9] L. A. Kolinug, T. K. Sendow, F. Jansen, and M. R. E. Manoppo, "Analisa Kinerja Jaringan Jalan Dalam Kampus Universitas Sam Ratulangi," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 1, no. 2, 2013.

[10] D. R. Leonard, P. Gower, and N. B. Taylor, "CONTRAM: structure of the model," 1989.

[11] N. B. Taylor, "The CONTRAM dynamic traffic assignment model," *Netw. Spat. Econ.*, vol. 3, no. 3, pp. 297–322, 2003.

[12] W. Widianingrum, I. Isa, A. Wicaksono, and H. Bowoputro, "Model Tarikan Pergerakan Dan Pola Sebaran Pergerakan pada Kawasan Industri Agrobisnis Jabung," *Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil*, vol. 1, 2017.

[13] A. R. Wahyuningsih, Ir. A. R. SR. M. Riyanto, and Prof. Dr. I. A. Munawar. Ms. Munawar, "Analisis Bangkitan Dan Tarikan Perjalanan (Studi Kasus Pada Tata Guna Lahan Rumah Sakit Umum di Klaten)," *Integration of Climate Protection and Cultural Heritage: Aspects in Policy and Development Plans. Free and Hanseatic City of Hamburg*, vol. 26, no. 4, 2013.

[14] W. Wahab, L. Sentosa, and M. Sebayang, "Analisis Nilai Pertumbuhan Lalu Lintas dan Perkiraan Volume Lalu Lintas Dimasa Mendatang Berdasarkan Volume Lalu Lintas Harian Rata-rata (Studi Kasus Ruas Jalan Sp. Lago-Sorek/Jalan Lintas Timur)," *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains*, vol. 2, no. 1, 2015.

[15] R. Sulistyorini and D. Herianto, "Analisis Kinerja Jaringan Jalan di Provinsi Lampung dengan Menggunakan Pemodelan Transportasi," *Rekayasa: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, vol. 19, no. 3, pp. 191–204, 2015.

[16] A. H. J. Syahidan, R. Maulana, B. Riyanto, and K. H. Basuki, "Analisis Kinerja Ruas-Ruas Jalan Lingkungan dengan Model Pembebanan Lalu Lintas Menggunakan EMME 3.4. 1 (Studi Kasus: Kabupaten Sukamara, Kalimantan Tengah)," *Jurnal Karya Teknik Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 1–17, 2016.

[17] A. Suraji, A. T. Sujianto, and C. Aditya, "Karakteristik Arus Lalu Lintas Pada Ruas Jalan Caruban-Ngawi Dan Proporsi Kendaraan Berat Selama 24 Jam Pengamatan".

[18] E. Syamsuir *et al.*, "Analisis Kinerja Ruas Jalan Soekarno-Hatta Kota Payakumbuh," *Juli*, vol. 4, no. 1, 2025.

[19] S. Marisamynathan and S. Lakshmi, "Performance analysis of signalized intersection at metropolitan area," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 19–29, 2016.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 138-146

Uji Kuat Tekan dan Daya Serap Batako Dengan Penambahan Damdex

Immanuel Adrianus Ndolu Eoh[1*], Abdul Halim[2], Candra Aditya[3]

[1,2,3]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: kaidogzg@gmail.com

ABSTRAK

Batako adalah salah satu bahan bangunan yang paling banyak digunakan di Indonesia. Maka dari itu, kualitas batako yang baik akan mendukung keamanan struktur bangunan. Pada era sekarang ini, kita harus bisa memanfaatkan dan menemukan inovasi-inovasi baru dalam proses pembangunan. Perkembangan yang semakin maju dan modern, maka akan berkembang pula pembangunan infrastruktur. Salah satu alternatif bahan dasar yang dapat digunakan dalam pembuatan batako adalah Damdex. Damdex adalah bahan pencampur semen (*additive*) yang menghasilkan pelapis, perekat, dan penambal tahan air. Dengan sifat-sifat unggul tersebut, Damdex mampu melindungi bangunan dengan efisien dan efektif. Damdex adalah cairan yang berwarna kecoklatan yang berfungsi sebagai bahan aditif dalam campuran mortar atau Portland semen (*cement base*). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh Damdex sebagai bahan tambah dengan variasi 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6% dan 0,8% terhadap batako. Teknik analisis data secara kuantitatif, komparatif secara tabulasi dan grafik. Berdasarkan hasil pengujian dengan penambahan Damdex 0,2%, 0,4%, 0,6% dan 0,8% terjadi kenaikan kuat tekan masing-masing sebesar 0,02 MPa, 0,05 MPa, 0,58 MPa, dan 1,55 MPa terhadap batako normal (0%) dan terjadi penurunan daya serap masing-masing sebesar 0,01%, 0,02%, 0,03% dan 0,04 % terhadap batako normal (0%).

Kata kunci : Batako, Damdex, Kuat Tekan dan Daya Serap.

ABSTRACT

Concrete blocks are one of the most widely used building materials in Indonesia. Therefore, high-quality concrete blocks contribute to the structural safety of buildings. In today's world, we must be able to utilize and discover new innovations in the construction process. As development becomes increasingly advanced and modern, infrastructure development will also progress. One alternative base material that can be used in the production of batako is Damdex. Damdex is a cement additive that produces a waterproof coating, adhesive, and sealant. With these superior properties, Damdex is capable of protecting buildings efficiently and effectively. Damdex is a brownish liquid that functions as an additive in mortar or Portland cement (cement-based) mixtures. The objective of this study is to determine the effect of Damdex as an additive at varying concentrations—0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8%—on concrete blocks. Data analysis was conducted using quantitative, comparative methods presented in tables and graphs. Based on the test results, the addition of Damdex at 0.2%, 0.4%, 0.6%, and 0.8% resulted in increases in compressive strength of 0.02 MPa, 0.05 MPa, 0.58 MPa, and 1.55 MPa compared to standard concrete blocks (0%), and a decrease in water absorption of 0.01%, 0.02%, 0.03%, and 0.04%, respectively, compared to standard concrete blocks (0%).

Keywords: *Concrete Blocks, Damdex, Compressive Strength, and Water Absorption.*

1. PENDAHULUAN

Pada era sekarang ini kita harus bisa memanfaatkan dan menemukan inovasi-inovasi baru dalam sebuah proses pembangunan, karena perkembangan yang semakin maju dan modern maka berkembang pula pembangunan di dalam infrastruktur terutama berkaitan dengan bangunan dalam hal ini yaitu beton [1]. Batako adalah salah satu jenis material yang paling cocok untuk konstruksi dan sangat banyak digunakan di Indonesia, batako berkualitas tinggi akan sangat membantu dalam hal konstruksinya. Indonesia sendiri merupakan salah satu negara yang memiliki industri-industri cukup maju, salah satunya adalah manufaktur Bahan Kimia (Damdex) [2]. Pemilihan bahan tambahan Damdex sebagai bahan tambah pembuatan batako didasari karena peneliti ingin mencoba bahan Damdex agar tingkatkan kuat tekan pada beton dan serta fungsi

Damdex juga sebagai anti bocor beton dan apakah beton akan lebih baik dengan Damdex dan juga praktis sebagai bahan tambah campuran semen [3]. Dilihat dari permasalahan terjadi, peneliti akan memanfaatkan Damdex menjadi sebagai bahan tambah membuat batako. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan bahan tambah Damdex terhadap kuat tekan pada batako dan untuk mengetahui pengaruh penambahan bahan tambah Damdex terhadap daya serap pada batako [4].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batako

Batako atau yang juga dikenal sebagai bata beton, merupakan jenis batu cetak yang dihasilkan dari campuran tras, semen, dan air, atau bisa pula dibuat dari campuran semen, pasir, kapur, dan air yang dicampur hingga konsistensi lengket, lalu dibentuk menjadi balok-balok dengan beragam ukuran [5]. Berdasarkan SNI 03-0349-1989, bata beton atau batako adalah elemen berbentuk bata yang terbuat dari bahan utama seperti semen Portland, air, dan agregat, yang biasanya digunakan untuk dinding bangunan [6]. Bentuk batako sendiri terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu batako berlubang (*hollow block*) dan batako pejal (*solid block*), masing-masing memiliki ukuran yang berbeda [7].

2.2 Kuat tekan

Kuat tekan adalah besarnya beban per satuan luas yang dihasilkan oleh mesin tekan yang menyebabkan benda uji beton hancur ketika dibebani dengan gaya tekan tertentu [8]. Perbandingan besarnya beban maksimum yang dapat ditahan suatu bahan dengan luas penampang bahan yang mengalami gaya tersebut dikenal sebagai kuat tekan suatu bahan. Mutu batako ditentukan oleh kekuatan tekan struktur [3]. Kekuatan struktur yang diinginkan sebanding dengan kualitas batako yang dihasilkan. Agar batako dapat mencapai kuat tekan rata-rata yang diinginkan, proporsi ukurannya harus disesuaikan. Batako campuran yang dirancang harus dibuat dengan kuat tekan yang lebih rendah pada tahap pelaksanaan konstruksi [9]. untuk menghitung kekuatan tekan (SNI 03-1974-1990) dipergunakan persamaan matematis berikut:

$$F'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana:

F'c = Kuat tekan (MPa)
P = Beban maksimum (N)
A = Luas Penampang (mm^2)

2.3 Daya serap

Daya serap air batako adalah tingkat penyerapan air yang sangat dipengaruhi oleh pori-porinya. Semakin banyak pori-pori pada batako, semakin besar penyerapan air, yang dapat menyebabkan ketahanan batako berkurang [10]. Batako memiliki rongga, atau pori-pori, karena kualitas dan komposisi material yang tidak tepat. Rasio yang berlebihan dapat menyebabkan rongga karena air yang tidak dapat bereaksi, yang kemudian menguap dan menyebabkan rongga [11]. Daya serap beton sangat memengaruhi kinerjanya karena mempengaruhi kekuatan dan kekedapan beton. Untuk mengetahui beton dengan daya serap tinggi, dapat dicari dengan:

$$Penyerapan\ Air\ (\%) = \frac{mb-mk}{mk} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

mb = Massa basah dari sampel (gr); mk = Massa kering dari sampel (gr).

2.4 Damdex

Damdex adalah bahan tambahan yang digunakan dalam proses pembuatan beton dan material bangunan lainnya untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanisnya [12]. Produk ini biasanya berbentuk bubuk yang ditambahkan ke dalam campuran semen dan agregat, berfungsi untuk memperkuat ikatan antar partikel serta meningkatkan daya tahan terhadap air dan kelembapan. Penggunaan Damdex dapat meningkatkan kekuatan tekan beton, mengurangi risiko retak, dan memperbaiki daya serap air, sehingga sangat bermanfaat dalam konstruksi bangunan yang memerlukan ketahanan ekstra [13].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi penelitian

Untuk Proses pembuatan maupun campuran Komposisi batako dilaksanakan di tempat pencetakan Batako yang berada di Daerah Karang Ploso, Malang. Pencetakan Batako sendiri dilakukan selama 3 hari sesuai jumlah yang sudah di tentukan. Sedangkan penelitian untuk pengujian kuat tekan beton dilakukan di Laboratorium terpadu Universitas Widya Gama, yang berlokasi di Jl. Borobudur No.35 Mojolangu, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65142.

3.2 Jenis Penelitian

Suatu metode penelitian diperlukan agar tujuan penelitian dapat dicapai dengan sukses. Untuk menemukan solusi untuk masalah, perkara, gejala, atau fenomena tertentu, metode penelitian digunakan. Penelitian ini menggunakan studi kasus, yang melibatkan observasi dan wawancara serta konsultasi dengan orang lain dan catatan pribadi dan publik.

3.3 Metode Pengambilan Data

Studi kasus biasanya mempelajari kasus individu atau kelompok kecil secara menyeluruh. Berbagai teknik pengumpulan dan analisis data digunakan, tetapi biasanya wawancara dan observasi, serta konsultasi dengan orang lain dan catatan pribadi atau publik. Dan penelitian yang saya lakukan memang mencakupi proses wawancara terhadap tempat pencetakan batako dan proses konsultasi untuk melakukan pencetakan batako tersebut. Sedangkan Pengujian dan analisis data terhadap hasil cetakan harus dilakukan di Lab yang memenuhi standar untuk dil-akukan pengujian batako tersebut.

3.4 Rancangan Penelitian

Rancangan Suatu desain penelitian menggambarkan struktur masalah dan rencana penelitian yang akan digunakan untuk mendapatkan bukti empiris tentang hubungan antara masalah [14]. Desain penelitian mencakup semua tugas yang akan dilakukan peneliti, mulai dari pembuatan hipotesis dan penerapan praktisnya hingga analisis data, setelah itu peneliti menyimpulkan dan memberikan saran. Rancangan yang dibuat adalah penambahan Damdex 5 varian yang berbeda agar diketahui pengaruh Damdex terhadap tekanan yang kuat dan serapan batako itu sendiri.

Tabel 1. Rancangan Campuran

Komposisi			Jumlah Benda Uji	
Semen	Pasir	Damdex	Kuat Tekan	Daya Serap
2	11	0	7	7
2	11	0.2%	7	7
2	11	0.4%	7	7
2	11	0.6%	7	7
2	11	0.8%	7	7

Rancangan penelitian ini dilakukan dengan menambahkan Damdex ke dalam campuran bahan pembuatan batako dengan lima variasi kadar yang berbeda, yaitu 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, dan 0,8%, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Rancangan campuran tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan Damdex terhadap kuat tekan dan daya serap batako. Pada setiap variasi campuran, jumlah semen dan pasir dipertahankan tetap, sedangkan kadar Damdex divariasikan untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik batako yang dihasilkan [15]. Pengujian kuat tekan dan daya serap dilakukan pada masing-masing variasi untuk memperoleh data yang dapat digunakan dalam mengevaluasi efektivitas penambahan Damdex serta menentukan komposisi campuran yang memberikan hasil optimal.

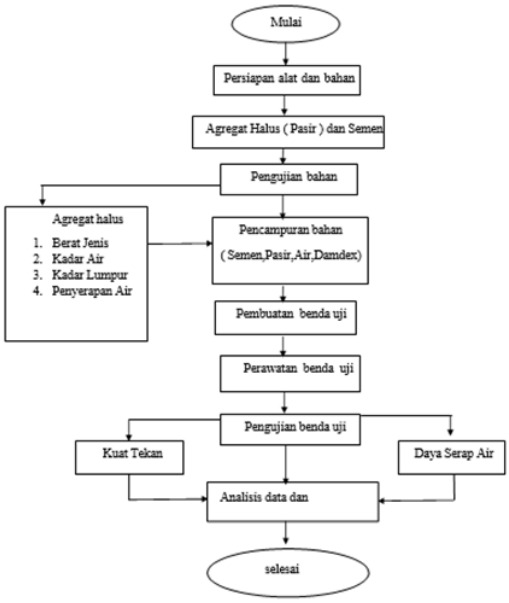
3.5 Variabel Penelitian

Adapun Studi ini menggunakan variabel bebas yang meliputi Damdex dan *admixture*. Ada dua variabel dalam penelitian ini: variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebasnya adalah penambahan Damdex dan admixture; 0%, 2%, 4%, 6%, 8% dari volume batako. Sedangkan Batako memiliki kekuatan tekan dan daya serap air sebagai variabel terikatnya.

3.6 Pelaksanaan Perawatan

Proses perawatan batako akan dilakukan setelah batako dikeluarkan dari cetakan sekitar umur satu hari. Proses *curing* yang dilakukan dengan menyiram batako yang berumur satu hari dan selama proses pengujian batako belum dilaksanakan. Sebelum proses pengujian dilakukan, Batako akan diangkat dan dikeringkan dengan tujuan supaya sampel tidak dalam kondisi basah. Material batako yang basah dapat mengurangi nilai kekerasan dan kuat tekan pada batako yang akan dilakukan proses pengujian. Maka dari itu batako harus ditaruh di tempat kering, supaya batako dihasilkan memiliki mutu dan kualitas yang bagus saat di uji nantinya.

3.7 Bagan alir penelitian



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram alir penelitian yang dimulai dari tahap persiapan alat dan bahan, dilanjutkan dengan pengujian karakteristik agregat halus berupa berat jenis, kadar air, kadar lumpur, dan penyerapan air. Selanjutnya, dilakukan pencampuran semen, pasir, air, dan Damdex dengan variasi kadar yang telah ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan dan perawatan benda uji. Setelah itu, benda uji diuji untuk mengetahui kuat tekan dan daya serap air batako. Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh penambahan Damdex terhadap karakteristik batako dan menentukan komposisi campuran yang optimal.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian agregat Halus

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Halus (Pasir)

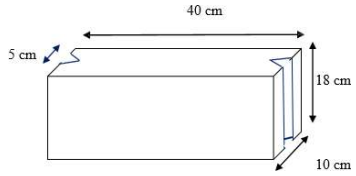
Pemeriksaan	Hasil	Standar SNI	Keterangan
Kadar Air	12,84 %	3 % - 5 %	Tidak Memenuhi
Berat Jenis Pasir	2,75 %	2,58 % - 2.83 %	Memenuhi
Penyerapan	3.95 %	-	-
Kadar Lumpur	11 %	5 %	Tidak Memenuhi

Sumber : Hasil Perhitungan,2024

Berdasarkan Tabel 2, hasil pemeriksaan karakteristik pasir menunjukkan bahwa kadar air yang diperoleh sebesar 12,84%, sehingga tidak memenuhi rentang standar yang digunakan, yaitu 3%–5%. Hasil pemeriksaan berat jenis pasir sebesar 2,75 memenuhi rentang standar sebesar 2,58–2,83. Sementara itu, kadar lumpur pasir sebesar 11% tidak memenuhi persyaratan standar yang

ditetapkan, yaitu maksimum 5%. Dengan demikian, berdasarkan ketiga parameter tersebut, pasir yang digunakan belum sepenuhnya memenuhi persyaratan yang ditetapkan, terutama pada parameter kadar air dan kadar lumpur.

4.2 Perhitungan Kebutuhan Bahan



Gambar 2. Data Hasil Uji Kuat Tekan

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 2, diperoleh hasil pengukuran volume sebesar 48.825 cm^3. Nilai tersebut setara dengan 48.825 ml karena satu sentimeter kubik (cm^3) setara dengan satu mililiter (ml). Dengan demikian, volume hasil pengukuran dapat dinyatakan sebesar 48.825 ml.

Tabel 3. Data Hasil Uji Kuat Tekan

Komposisi		Jumlah Benda Uji	
Damdex (ml)		Kuat Tekan (MPa)	Daya Serap (%)
0.2 %	9.76	7	7
0.4 %	19.53	7	7
0.6 %	29.29	7	7
0.8 %	39.06	7	7

Sumber: Hasil Perhitungan 2024

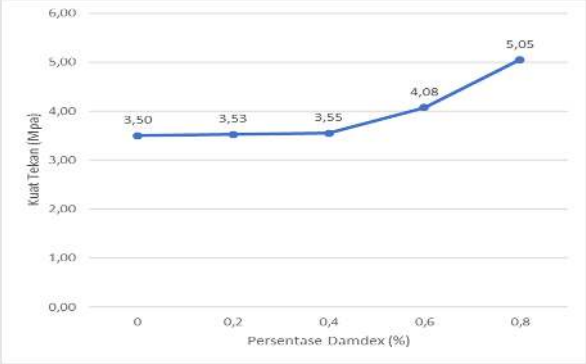
Dari Tabel 3, diketahui kebutuhan bahan tambah Damdex sebagai pengganti sebagian air. Pada campuran 0,2%, diperlukan 9,76 ml Damdex, untuk 0,4% diperlukan 19,53 ml, 0,6% memerlukan 29,29 ml, dan pada campuran 0,8% dibutuhkan 39,06 ml Damdex.

4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Tabel 4. Tabel Grafik Kuat Tekan

NO	Kode Batako	Berat (Kg)	Komposisi	P (KN)	P (N)	fc (MPa)	fc rata-rata (MPa)
1	B.M1	14,4	0% Damdex	180	180000	4,5	3,50
2	B.M2	14	0% Damdex	160	160000	4	
3	B.M3	13,9	0% Damdex	120	120000	3	
4	B.M4	15,6	0% Damdex	125	125000	3,125	
5	B.M5	14,1	0% Damdex	115	115000	2,875	
6	B1.M1	15,3	0,2% Damdex	115	115000	2,875	3,53
7	B1.M2	13,3	0,2% Damdex	140	140000	3,5	
8	B1.M3	15,3	0,2% Damdex	160	160000	4	
9	B1.M4	15,2	0,2% Damdex	170	170000	4,25	
10	B1.M5	15,4	0,2% Damdex	120	120000	3	
11	B2.M1	15	0,4% Damdex	135	135000	3,375	3,55
12	B2.M2	14,8	0,4% Damdex	150	150000	3,75	
13	B2.M3	14,2	0,4% Damdex	150	150000	3,75	
14	B2.M4	14,7	0,4% Damdex	120	120000	3	
15	B2.M5	14,4	0,4% Damdex	155	155000	3,875	
16	B3.M1	14,9	0,6% Damdex	140	140000	3,5	4,08
17	B3.M2	14,5	0,6% Damdex	180	180000	4,5	
18	B3.M3	15,3	0,6% Damdex	220	220000	5,5	
19	B3.M4	14,2	0,6% Damdex	140	140000	3,5	
20	B3.M5	14	0,6% Damdex	135	135000	3,375	
21	B4.M1	13,8	0,8% Damdex	210	210000	5,25	5,05
22	B4.M2	13,7	0,8% Damdex	245	245000	6,125	
23	B4.M3	13,6	0,8% Damdex	170	170000	4,25	
24	B4.M4	13,5	0,8% Damdex	195	195000	4,875	
25	B4.M5	15	0,8% Damdex	190	190000	4,75	

Sumber : Hasil Perhitungan 2024



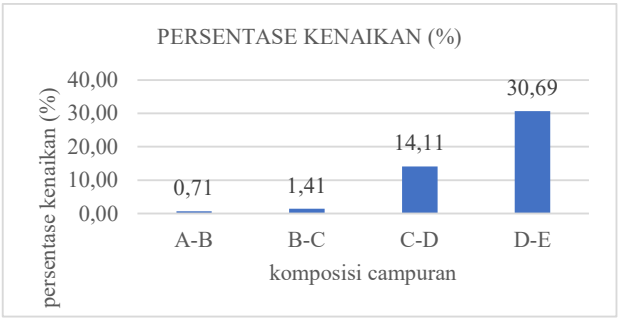
Gambar 3. Grafik Kuat Tekan Batako

Data hasil pengujian tiap batako berdasarkan bahan tambahan masing-masing komposisi: Untuk mendapatkan nilai f'c (MPa) rata-rata dari setiap penambahan Damdex maka dapat dicari dengan nilai fc (Mpa) awal dirata-ratakan setiap kali penambahan Damdex dari 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8%. Berikut ini adalah tabel rata-rata keseluruhan uji kuat tekan batako. Pada tabel 4 dan gambar 3 di atas memiliki perbedaan kenaikan setiap penambahan Damdex 0,2% yaitu dimana 0 % ke 0,2 % terjadi kenaikan sebesar 0,02 MPa . Dimana 0,2% ke 0,4 % terjadi kenaikan sebesar 0,03 MPa. Dimana 0,4 % ke 0,6 % terjadi kenaikan sebesar 0,53 MPa. Dimana 0,6 % ke 0,8 % terjadi kenaikan sebesar 0,97 MPa.

Tabel 5. Perbandingan Nilai Persentase Kuat Tekan Batako Normal Terhadap Penambahan Damdex

No	Komposisi		f'c (MPa)	persentase naik/turun (%)
1	A	B	3.50	0.00
2	B	B1.0,2%	3.52	0.71
3	C	B2.0,4%	3.55	1.43
4	D	B3.0,6%	4.08	16.43
5	E	B4.0,8%	5.05	44.29

Tabel 5 menunjukkan bahwa penambahan Damdex pada campuran batako meningkatkan kuat tekan secara signifikan dibandingkan batako normal (0% Damdex). Dengan penambahan 0,4% Damdex, kuat tekan naik sebesar 0,05 MPa atau 1,43%. Pada penambahan 0,6%, kenaikan mencapai 0,58 MPa atau 16,43%, dan pada 0,8%, kuat tekan meningkat drastis sebesar 1,55 MPa atau 44,29%. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase Damdex, semakin besar peningkatan kuat tekan batako.



Gambar 4. Grafik Persentase Naik Kuat Tekan Batako Terhadap Penambahan Damdex (Mpa)

Pada Gambar 4 di atas dapat terlihat bahwa setiap penambahan Damdex 0,2% memiliki perbedaan kenaikan. Dimana pada penambahan Damdex 0% ke 0,2 terjadi kenaikan sebesar 0,71%. Pada penambahan Damdex dari 0,2% ke 0,4% ter- jadi kenaikan sebesar 0,72%. Pada penambahan Damdex dari 0,4% ke 0,6% terjadi kenaikan sebesar 15,00%. Pada penambahan Damdex dari 0,6% ke 0,8% terjadi kenaikan sebesar 27,86%.

Tabel 6. Hasil Analisis *Anova Single Faktor*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	8.84125	4	2.2103125	4.74379611	0.0074292928	2.866081402
Within Groups	9.31875	20	0.4659375			
Total	18.16	24				

Sumber: Hasil Perhitungan 2024

Hipotesis :

H0 : Damdex sebagai bahan tambah tidak berpengaruhterhadap kuat beton.

H1 : Damdex sebagai bahan tambah berpengaruh terhadapkuat tekan beton.

H0 = α < P-value

H1 = α > P – value

Uraian :

α = 0,05 > P-value = 0.0074

H1 = Damdex sebagai bahan tambah berpengaruh terhadap kuat beton.

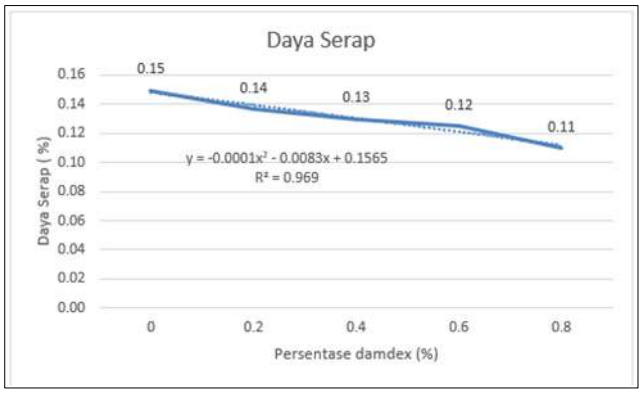
Berdasarkan hasil pengujian hipotesis, diperoleh nilai P-value sebesar 0,0074 dengan tingkat signifikansi α sebesar 0,05. Karena nilai P-value lebih kecil daripada nilai signifikansi 0,0074 < 0,05, maka H1 ditolak dan H1 diterima. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan Damdex sebagai bahan tambah berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan beton. Hasil pengujian hipotesis tersebut disajikan pada Tabel 6.

4.4 Hasil Pengujian Daya Serap

Tabel 7. Pengujian daya serap batako

No	Kode Paving	Komposisi	Berat basah (W1)	Berat kering (W2)	Daya serap (%)	Daya serap Rata-Rata (%)
1	B	0%	5.308	4.642	0.1435	0.15
2	B	0%	3.023	2.600	0.1627	
3	B	0%	3.973	3.477	0.1427	
4	B1	0,2%	2.948	2.561	0.1511	0.14
5	B1	0,2%	3.296	2.909	0.1330	
6	B1	0,2%	2.097	1.863	0.1256	
7	B2	0,4%	2.929	2.609	0.1227	0.13
8	B2	0,4%	1.902	1.684	0.1295	
9	B2	0,4%	2.371	2.085	0.1372	
10	B3	0,6%	3.039	2.678	0.1348	0.12
11	B3	0,6%	2.149	1.943	0.1060	
12	B3	0,6%	2.073	1.829	0.1334	
13	B4	0,8%	1.967	1.755	0.1208	0.11
14	B4	0,8%	2.996	2.666	0.1238	
15	B4	0,8%	2.135	1.968	0.0849	

Sumber: Hasil Perhitungan 2024



Gambar 5. Grafik pengaruh daya serap

Berdasarkan hasil pengujian daya serap batako yang disajikan pada Tabel 7 dan divisualisasikan pada Gambar 5, data hasil pengujian selanjutnya dikelompokkan dan disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Persentase nilai turun daya serap batako

No	Komposisi		f'c (MPa)	persentase naik/turun (%)
1	A	B	0.15	0.00
2	B	B1.0,2%	0.14	0.01
3	C	B2.0,4%	0.13	0.02
4	D	B3.0,6%	0.12	0.03
5	E	B4.0,8%	0.11	0.04

Sumber: Hasil Perhitungan 2024

Pada batako dengan penambahan Damdex, terjadi penurunan daya serap air dibandingkan batako normal (0% Damdex). Pada komposisi 0,2%, daya serap turun sebesar 0,14 MPa atau 0,01%, diikuti penurunan sebesar 0,13 MPa (0,02%) pada 0,4%, 0,12 MPa (0,03%) pada 0,6%, dan 0,11 MPa (0,04%) pada 0,8%. Penurunan daya serap ini menunjukkan peningkatan kekedapan batako, di mana pori-pori semakin tertutup. Berdasarkan tabel 8, hasil rancangan acak lengkap melalui Anova Single Faktor mengonfirmasi hasil ini.

Tabel 9. Hasil Analisis *Anova Single Faktor*

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	0.280913	1	0.280913	8.411107	0.027328	5.987378
Within Groups	0.200387	6	0.033398			
Total	.481301	7				

Sumber : Hasil Perhitungan 2024

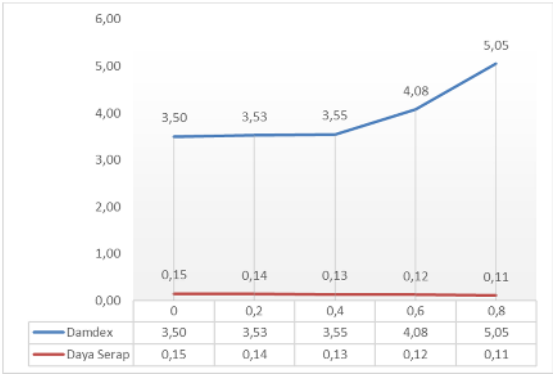
Hipotesis :

H0 : Damdex sebagai bahan tambah tidak berpengaruh terhadap daya serap.
H1 : Damdex sebagai bahan tambah berpengaruh terhadap daya serap.
H0 = α < Pvalue
H1 = α > P- value

Uraian :

α = 0,05 > P-value = 0.027
H1 : Damdex sebagai bahan tambah berpengaruh terhadap daya serap.

Berdasarkan hasil pengujian hipotesis, diperoleh nilai P-value sebesar 0,027 dengan tingkat signifikansi α sebesar 0,05. Karena nilai P-value lebih kecil daripada tingkat signifikansi (0,027 < 0,05), maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan Damdex sebagai bahan tambah berpengaruh secara signifikan terhadap daya serap batako. Hasil pengujian hipotesis tersebut disajikan pada Tabel 9.



Gambar 6. Grafik hubungan kuat tekan dan daya serap.

Gambar 6 menunjukkan bahwa penambahan Damdex secara signifikan meningkatkan kuat tekan batako dan menurunkan daya serap air. Pada penambahan 0,2%, kuat tekan naik menjadi 3,525 MPa dengan penurunan daya serap 0,14%. Pada 0,4%, kuat tekan naik menjadi 3,55 MPa dengan penurunan daya serap 0,13%. Pada 0,6%, kuat tekan mencapai 4,075 MPa dan daya serap turun 0,12%, sedangkan pada 0,8%, kuat tekan meningkat hingga 5,05 MPa dengan penurunan daya serap 0,11%. Semakin tinggi penambahan Damdex, semakin tinggi kuat tekan dan kekedapan batako, sesuai dengan standar SK-SNI-S-36-1990-03.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan maka didapatkan kesimpulan bahwa penambahan Damdex berpengaruh terhadap kuat tekan batako karena α = 0,05 > P-value = 0,074. Berdasarkan hasil pengujian dengan penambahan Damdex 0,2%, 0,4%, 0,6% dan 0,8 terjadi kenaikan kuat tekan masing-masing sebesar 0,02 MPa, 0,05 MPa, 0,58 MPa, dan 1,55 MPa terhadap batako normal (0%). Penambahan Damdex berpengaruh terhadap daya serap karena α = 0,05 > P- value = 0,073. Berdasarkan hasil pengujian dengan penambahan 0,2%, 0,4%, 0,6%, dan 0,8% terjadi penurunan daya serap masing-masing sebesar 0,01%, 0,02%, 0,03% dan 0,04 % terhadap batako normal (0%). Dalam hal ini menurunnya daya serap batako berarti kekedapan semakin meningkatkan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Everst, M. Pamadi, and A. I. Rifai, "Analisa Pengaruh Penambahan Zat Karbon dalam Pembuatan Batako Konvensional," *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 3, No 1, pp. 70–80, 2022.

[2] I. Fauzi, "Pengaruh Penambahan Ekstrak Limbah Sayuran dan Admixture Damdex Terhadap Kuat Tekan Beton Pada Metode Self Healing Concrete," Universitas Islam Riau Pekanbaru, 2022.

[3] E. Widyananto, N. Alami, and H. Suladi, "Analisis Kuat Tekan Batako Dengan Agregat Halus Abu Batu dan Limbah Styrofoam," *Jurnal Surya Beton*, vol. Volume 2, pp. 53–60, 2021.

[4] L. David, "Uji Kuat Tekan Dan Daya Serap Air Batako Dengan Variasi Penambahan Abu Cangkang Kerang," Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, 2019.

[5] A. Sedeyaningsih, "Pengaruh Penggantian Sebagian Agregat Halus Dengan Serbuk Batu Gamping Keras (KARST) Terhadap Kuat Tekan dan Berat Jenis Batako," Universitas Sebelasmaret Surakarta, 2010.

[6] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-0349-1989 Bata beton untuk pasangan dinding*. Badan Standardisasi Nasional, 1989.

[7] V. M. Thorat, M. Papal, V. Kacha, T. Sarnobat, and S. Gaikwad, "Hollow Concrete Blocks-A New Trend," *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 5, no. 5, pp. 19–26, 2015.

[8] P. P. Fane, H. Tanudjaja, and R. S. Windah, "Pengujian Kuat Tarik Lentur Beton Dengan Variasi Kuat Tekan Beton," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 3, pp. 313–321, 2015.

[9] M. Hisyam, D. Handayani, and J. Priyana, "Pengaruh Penambahan Serbuk Kaca dan Serat Sabut Kelapa Terhadap Kuat Tekan dan Daya Serap Air pada Batako," *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, vol. 27, no. 1, p. 25, Apr. 2025, doi: 10.20961/enviro.v27i1.101175.

[10] M. P. Ramadhani, "Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Damdex Pada Material Batako Sekam Padi Terhadap Aspek Teknis, Biaya Produksi, Dan Redaman Panas," Universitas Islam Indonesia, 2022.

[11] P. Sirait, "Analisis Kuat Tekan Beton Menggunakan Styrofoam Sebagai Bahan Tambah Pembuatan Batako," Universitas Medan Area Medan, 2023.

[12] I. R. Permana, "Analisis Pengaruh Abu Batu Sebagai Pengganti Agregat Halus Dan Penambahan Damdex Terhadap Karakteristik Beton Keras," Universitas Islam Indonesia, 2023.

[13] F. Nugroho, "Penerapan Analisis Pushover Untukmenentukan Kinerja Struktur Padabangunan Eksisting Gedung Beton Bertulang," *Jurnal Momentum (ISSN: 1693-752X)*, vol. 18, no. 2, pp. 19–25, 2016.

[14] J. Hermanto, "Desain Struktur Beton Bertulang Berdasarkan Aci 318-2002 Dan Sni 03-2847-2002 Dengan Menggunakan Program Etabs," *LP2M Universitas Muhammadiyah Maluku Utara*, vol. 13, pp. 17–26, 2017.

[15] N. Bumulo and N. W. Rusnadin, "Analisa Agregat Halus Pasir Zona III Dengan Agregat Kasar Ukuran 20 mm Dan 40 mm Untuk Uji Kuat Tekan Mutu Beton Pada Campuran Beton Normal," Gorontalo Journal Of Insfrastructure & Science Engineering, vol. 1, pp. 11–23, 2018.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 147-155

Analisis Kinerja Struktur *Gable frame* Profil WF dan Castella Terhadap Elemen Kritis Pada Gudang Pupuk PT. Molindo Raya Industrial

Maulia Umi Nazhiroh[1*], Candra Aditya[2], Dafid Irawan[3]

[1]PT. Molindo Raya Industrial
[2,3]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: maulia.un@gmail.com

ABSTRAK

Perencanaan struktur baja bentang lebar pada bangunan industri memerlukan sistem yang efisien dan memiliki kekakuan yang memadai untuk mengendalikan gaya dalam dan deformasi. Salah satu sistem yang umum digunakan adalah *gable frame* dengan variasi profil baja seperti *Wide Flange (WF)* dan Castella. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja struktur *gable frame* menggunakan kedua jenis profil tersebut pada gudang pupuk PT. Molindo Raya Industrial. Metode penelitian dilakukan melalui analisis numerik menggunakan perangkat lunak ETABS dengan mempertimbangkan beban mati, beban hidup, dan beban angin sesuai kombinasi pembebanan. Parameter yang dianalisis meliputi gaya aksial, gaya geser, momen lentur, serta lendutan maksimum untuk menentukan elemen kritis struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa elemen *rafter* merupakan elemen paling kritis dengan momen maksimum sebesar 9.967,64 kgf·m pada profil WF dan 9.868,79 kgf·m pada profil Castella. Lendutan maksimum pada profil WF sebesar 38,61 mm, sedangkan pada profil Castella sebesar 15,92 mm atau lebih kecil sekitar 58,77%. Perbedaan gaya dalam relatif kecil, namun profil Castella menunjukkan kinerja deformasi yang lebih baik.
Kata kunci : *Gable frame*, Profil WF, Profil Castella, Elemen kritis, dan Lendutan

ABSTRACT

The design of wide-span steel structures for industrial buildings requires an efficient system with sufficient stiffness to control internal forces and deformations. One commonly used system is the gable frame, which employs various steel profiles such as Wide Flange (WF) and Castella. This study aims to analyze and compare the performance of gable frame structures using these two types of profiles in the fertilizer warehouse of PT. *Molindo Raya Industrial. The research method involved numerical analysis using ETABS software, taking into account dead loads, live loads, and wind loads according to load combinations. The parameters analyzed included axial forces, shear forces, bending moments, and maximum deflections to identify the critical structural members. The analysis results show that the rafter is the most critical element, with a maximum moment of 9,967.64 kgf·m for the WF profile and 9,868.79 kgf·m for the Castella profile. The maximum deflection for the WF profile is 38.61 mm, while for the Castella profile it is 15.92 mm—approximately 58.77% smaller. Although the difference in forces is relatively small, the Castella profile exhibits better deformation performance.*
Keywords **:** *Gable frame, WF profile, Castella profile, Critical element, and Deflection.*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi baja mendorong penggunaan struktur bentang lebar yang kuat dan efisien, salah satu sistem yang banyak digunakan adalah struktur *gable frame* baja karena mampu menjangkau bentang lebar dengan efisiensi material dan kekakuan yang baik. Kinerja struktur tersebut dipengaruhi oleh profil baja yang digunakan, di antaranya *Wide Flange* (WF) dan Castella, yang dapat memberikan perbedaan pada distribusi gaya dalam dan deformasi struktur. Penelitian terdahulu telah membandingkan profil WF dan Castella berdasarkan kapasitas momen serta gaya dalam dan berat struktur [1] , namun kajian mengenai elemen kritis dan respons lendutan pada kondisi geometri dan pembebanan yang sama masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis dan membandingkan kinerja *gable frame* profil WF dan Castella pada gudang pupuk PT. Molindo Raya Industrial berdasarkan distribusi gaya dalam dan lendutan vertikal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur *Gable frame*

Struktur *gable frame* merupakan sistem portal kaku (*rigid frame*) berbentuk pelana yang banyak digunakan pada bangunan industri bentang lebar karena kemampuannya memberikan ruang tanpa kolom tengah serta efisiensi dalam fabrikasi dan konstruksi. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan kekakuan sambungan antara balok (*rafter*) dan kolom dalam menahan beban gravitasi maupun beban lateral [2]. Elemen utama penyusunnya terdiri atas *rafter*, kolom, dan sambungan yang secara langsung memikul serta mentransfer gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur ke pondasi. *Rafter* berfungsi sebagai penopang atap yang dominan menerima momen lentur, kolom bekerja sebagai elemen aksial–lentur yang menjaga kestabilan struktur, sedangkan sambungan dan *haunch* berperan meningkatkan kapasitas serta kekakuan lokal sistem. Tingkat deformasi struktur mencerminkan kekakuan global *gable frame*, dimana simpangan yang kecil menunjukkan performa struktur yang lebih stabil [3].

2.2 Profil *Wide Flange*

Profil *Wide Flange* (WF) merupakan profil baja berbentuk huruf I dengan flange lebar dan web relatif tipis yang dirancang untuk memberikan kapasitas tinggi terhadap momen lentur dan gaya tekan [4]. Profil ini banyak digunakan sebagai elemen balok dan kolom pada struktur baja, termasuk sistem *gable frame*, karena memiliki distribusi tegangan yang efisien, kekakuan yang baik, serta kemampuan menahan kombinasi gaya aksial dan momen secara optimal [5], [6].

2.3 Profil Castella

Balok Castella merupakan hasil modifikasi profil *Wide Flange* (WF) yang diperoleh melalui pemotongan badan balok secara zig-zag dengan sudut tertentu, kemudian disambung kembali sehingga menghasilkan penampang dengan tinggi yang lebih besar. Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan modulus penampang (S) dan momen inersia (I) tanpa menambah berat secara signifikan, sehingga diperoleh kapasitas lentur dan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan profil awal [7].

2.4 Pembebanan

Pembebanan merupakan faktor utama dalam analisis struktur karena menentukan besarnya gaya dalam dan deformasi yang terjadi pada *gable frame*. Beban yang diperhitungkan dalam penelitian ini meliputi beban mati (D), beban hidup (L), beban hujan (R) beban hidup atap (Lr), dan beban angin (W) sesuai ketentuan SNI 1727:2013 [8]. Beban mati berasal dari berat sendiri elemen struktur, sedangkan beban hidup berasal dari aktivitas penggunaan bangunan serta beban yang bersifat tidak tetap. Beban hujan dan beban hidup atap bekerja pada permukaan atap akibat pengaruh lingkungan, sementara beban angin timbul dari tekanan angin yang bekerja pada permukaan bangunan dan memengaruhi stabilitas struktur.

1) 1,4D ..... (1)
2) 1,2D + 1,6L + 0,5 (Lr atau S atau H)..... (2)
3) 1,2D + 1,6 (Lr atau S atau R) + (L atau 0,5W) ..... (3)
4) 1,2D + 1,0W + L + 0,5 (Lr atau S atau R) ..... (4)
5) 0,9D + 1,0E + L + 0.2S..... (5)
6) 0,9D + 1,0W ..... (6)

2.5 Gaya Dalam Pada Struktur Baja

Struktur *gable frame* menahan pembebanan melalui gaya dalam berupa gaya aksial (P), gaya geser (V), dan momen lentur (M). Gaya aksial bekerja sepanjang sumbu elemen dan dapat berupa tarik atau tekan, gaya geser bekerja tegak lurus terhadap sumbu elemen, sedangkan momen lentur menyebabkan elemen mengalami kelengkungan akibat kombinasi pembebanan [9]. Ketiga gaya dalam tersebut menjadi parameter utama dalam menentukan elemen kritis dan kinerja struktur.

2.6 Lendutan dan Kekakuan Struktur

Lendutan merupakan perpindahan vertikal elemen struktur akibat pembebanan yang mencerminkan tingkat deformasi sistem secara keseluruhan [10]. Besarnya lendutan dipengaruhi oleh sifat material dan dimensi penampang, dimana lendutan yang besar menunjukkan struktur yang lebih fleksibel dan kurang kaku [11]. Kekakuan berperan dalam mengendalikan deformasi agar tetap berada dalam batas layan yang diizinkan, sedangkan kestabilan berkaitan dengan kemampuan struktur mempertahankan keseimbangan tanpa mengalami kegagalan seperti tekuk. Struktur dengan simpangan kecil umumnya menunjukkan respons yang lebih kaku dan stabil terhadap pembebanan [3], sehingga evaluasi lendutan menjadi indikator penting dalam menilai kinerja *gable frame*.

2.7 Elemen Kritis pada Struktur *Gable frame*

Elemen kritis pada struktur *gable frame* adalah bagian yang menerima tegangan dan gaya maksimum akibat kombinasi beban [12]. Bagian yang umumnya menjadi kritis meliputi *rafter*, kolom, dan sambungan. *Rafter* menahan lentur dan tekan dengan kondisi paling kritis di daerah haunch, kolom bekerja dalam kompresi eksentris sehingga rentan terhadap tekuk, sedangkan sambungan berfungsi mentransfer gaya antar elemen dan mempengaruhi kekakuan sistem. Identifikasi elemen kritis diperlukan untuk memastikan keamanan dan kestabilan struktur.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada pada gudang pupuk organik milik PT. Molindo Raya Industrial yang beralamat di Jl. Sumberwaras No. 255. Bangunan tersebut menggunakan sistem rangka *gable frame* berbahan baja profil WF sehingga relevan untuk dianalisis dan dibandingkan dengan profil Castella. Penelitian dilakukan melalui simulasi numerik berbasis perangkat lunak, tanpa pengujian fisik secara langsung di lapangan.

3.2 Tahapan penelitian

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data gambar teknis, dimensi elemen, dan spesifikasi material struktur gudang pupuk milik PT. Molindo Raya Industrial yang digunakan sebagai dasar pemodelan. Selanjutnya, profil Castella direkayasa dari profil WF eksisting melalui penyesuaian geometri dan sifat penampang ekuivalen (*equivalent section properties*), tanpa memodelkan bukaan web secara fisik 3D pada ETABS. Kemudian dibuat dua model struktur *gable frame* dengan konfigurasi geometri dan pembebanan identik menggunakan perangkat lunak ETABS. Pembebanan diterapkan sesuai metode LRFD untuk memperoleh kondisi paling kritis. Hasil simulasi kedua profil kemudian dibandingkan guna menilai kekakuan, kestabilan, dan efisiensi struktur secara menyeluruh. Penelitian ini dibatasi pada analisis kinerja kualitatif dan respons kaku global struktur. Pemeriksaan kegagalan lokal khas balok Castella, seperti *vierendeel bending, web-post buckling*, serta kapasitas las pada bukaan web, tidak dicakup dan menjadi keterbatasan dalam penelitian ini.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

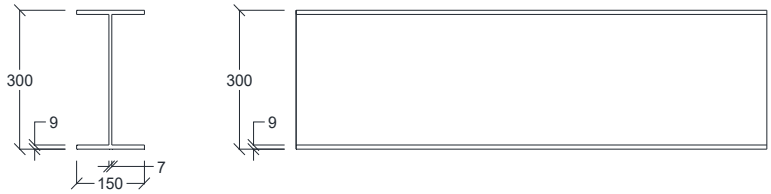
4.1 Parameter Analisis Struktur

Parameter analisis penelitian ini menggunakan data teknis struktur gudang milik PT. Molindo Raya Industrial sebagai dasar pemodelan *gable frame*. Geometri, material baja [13], dan pembebanan diterapkan identik pada profil WF dan Castella agar perbandingan objektif. Pemodelan dilakukan di ETABS dengan asumsi sambungan kaku dan analisis statik, sehingga diperoleh distribusi gaya dalam, lendutan, dan elemen kritis yang dipengaruhi oleh perbedaan bentuk penampang.

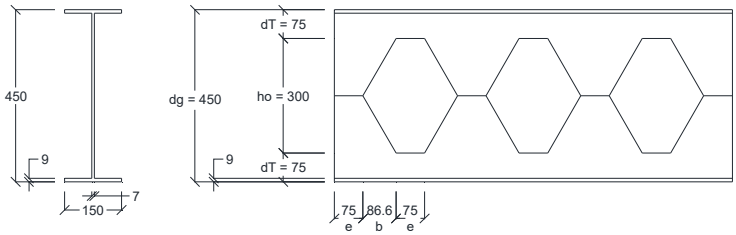
4.2 Desain Profil Struktur *Gable frame*

Tahap desain profil struktur *gable frame* untuk gudang PT. Molindo Raya Industrial di tunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2 melibatkan penentuan penampang baja yang akan

dianalisis secara numerik.



Gambar 1. Profil *Wide Flange*

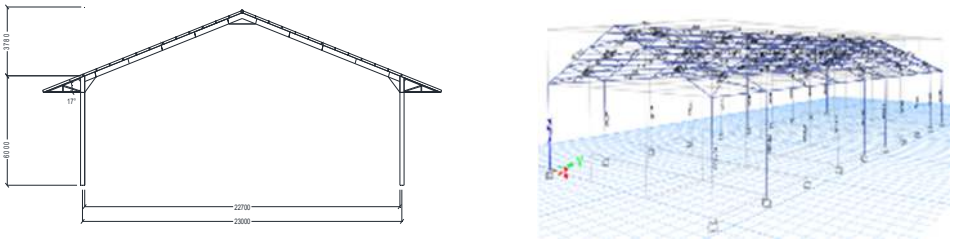


Gambar 2. Profil Castella

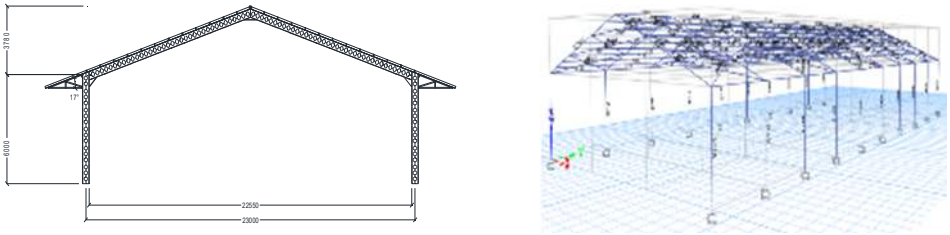
Profil WF eksisting dijadikan acuan, kemudian dimodifikasi menjadi profil Castella dengan menambah tinggi efektif melalui bukaan pada badan profil, sehingga efisiensi material meningkat. Profil WF memiliki tinggi 300 mm, lebar flange 150 mm, tebal web 6,5 mm, dan tebal flange 9 mm, sedangkan profil Castella, dengan faktor pengembangan k = 1,5, memiliki tinggi total 450 mm [14].

4.3 Permodelan Struktur Profil *Gable frame*

Permodelan *gable frame* di ETABS dilakukan untuk profil WF dan Castella dengan dimensi, material, dan kondisi tumpuan yang seragam sehingga perbedaan respons struktur hanya dipengaruhi oleh geometri penampang masing-masing. Hasil pemodelan struktur *gable frame* menggunakan profil WF dan Castella ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Permodelan Struktur *Gable frame* Profil WF



Gambar 4. Permodelan Struktur *Gable frame* Profil Castella

Model struktur tersebut selanjutnya digunakan untuk menganalisis distribusi gaya dalam, lendutan, dan elemen kritis pada masing-masing profil.

4.4 Pembebanan dan Kombinasi Pembebanan

Pembebanan struktur *gable frame* dimodelkan pada ETABS dengan mempertimbangkan beban mati, beban hidup, beban hujan, dan beban angin sesuai SNI 1727:2013. Data pembebanan yang digunakan dalam analisis disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Rekapitulasi Pembebanan

Rekapitulasi Pembebanan					
Tipe	D	L	R	W	
				Windward	Leeward
	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)
Tepi	7,16	16,67	12,25	19,37	19,37
Tengah	9,36	16,67	24,50	38,74	38,74
Puncak	7,16	16,67	12,25	19,37	19,37

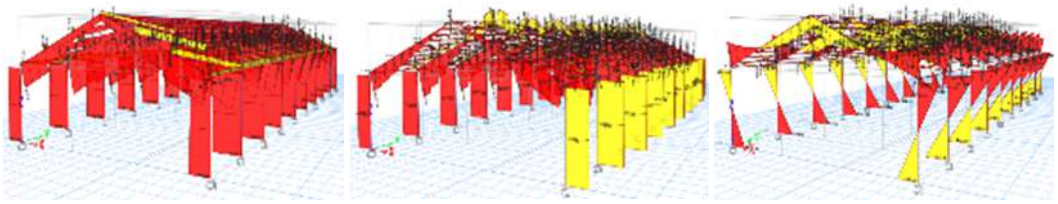
Tabel 2. Rekapitulasi Kombinasi Pembebanan

Rekapitulasi Kombinasi Pembebanan									
Tipe	1	2	3	4		5	6		7
				Windward	Leeward		Windward	Leeward	
	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)	(kg/m)
Tepi	10.03	41.38	44.86	50.75	50.75	0.00	25.81	25.81	0.00
Tengah	13.11	50.15	67.10	78.89	78.89	0.00	47.16	47.16	0.00
Puncak	10.03	41.38	44.86	50.75	50.75	0.00	25.81	25.81	0.00

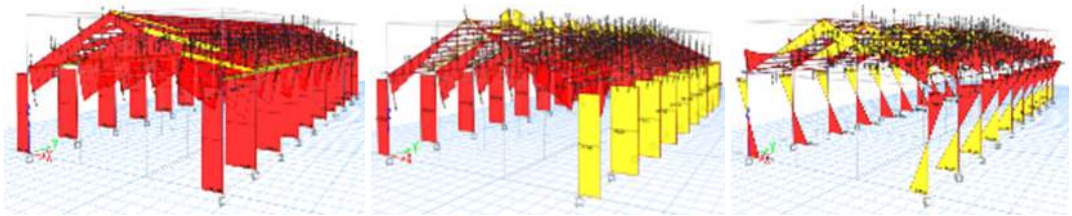
Parameter pembebanan tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis numerik untuk memperoleh respons struktur akibat kombinasi beban yang bekerja pada profil WF dan Castella [1].

4.5 Hasil Analisis Distribusi Gaya Dalam

Hasil analisis gaya dalam dilakukan menggunakan ETABS [15] untuk memperoleh distribusi gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur pada profil WF dan Castella. Hasil analisis distribusi gaya dalam untuk kedua profil disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Distribusi Gaya Dalam Profil WF

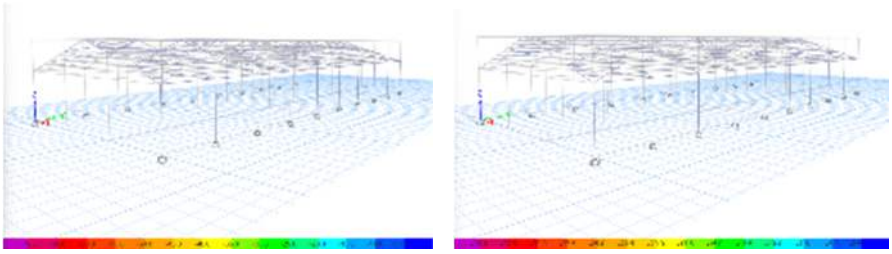


Gambar 6. Distribusi Gaya Dalam Profil Castella

Distribusi gaya dalam tersebut digunakan untuk menentukan nilai maksimum pada setiap elemen serta mengidentifikasi elemen kritis sebagai dasar perbandingan kinerja struktur antara profil WF dan Castella.

4.6 Hasil Analisis Respon Lendutan Struktur

Analisis lendutan dilakukan untuk mengevaluasi respons deformasi struktur *gable frame* menggunakan profil WF dan Castella terhadap batas layan yang ditetapkan. Hasil analisis lendutan kedua profil disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Respon Lendutan Profil WF & Castella

Hasil analisis numerik menggunakan ETABS menunjukkan bahwa kedua profil memenuhi kriteria batas layan dan kapasitas lentur. Profil WF memiliki lendutan maksimum 38,61 mm di bawah batas ijin 50,43 mm dengan kekuatan lentur 97,78 kN.m < 122,15 kN.m, sedangkan profil Castella lebih kaku dengan lendutan 15,92 mm dan kekuatan lentur 96,82 kN.m < 209,43 kN.m, sehingga modifikasi geometri meningkatkan kekakuan tanpa melampaui kapasitas nominalnya.

4.7 Hasil Analisis Elemen Kritis Struktur *Gable frame*

Hasil analisis elemen kritis struktur *gable frame* disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Tabel 3 menunjukkan hasil analisis profil WF, sedangkan Tabel 4 menunjukkan hasil analisis profil Castella berdasarkan nilai maksimum gaya aksial (P), gaya geser (V), dan momen lentur (M).

Tabel 3. Analisis Elemen Kritis Berdasarkan Gaya Dalam Profil WF

Elemen Kritis		Aksial (P)	Geser (V)	Lentur (M)	Identifikasi
		P max	V max	M max	
		kgf	kgf	kgf.m	
Rafter	R2A	-4567.9208	-2939.5594	-9048.3724	P maksimum
	R2D	-4567.9208	-2939.5594	-9048.3724	P maksimum
	R7A	-4276.9296	-2964.9061	-9967.6368	V & M maksimum
	R7D	-4276.9296	-2964.9061	-9967.6368	V & M maksimum
Kolom	C7A	-4768.2205	-3290.3941	9527.5167	P, V & M maksimum
	C7D	-4768.2202	3290.3943	-9527.5167	P, V & M maksimum
Sambungan (*Rafter* - Kolom)	R4A	-4446.9347	-2955.5012	-9941.7682	P maksimum
	R4D	-4446.9347	-2955.5012	-9941.7682	P maksimum
	R7A	-4276.9296	-2964.9061	-9967.6368	V & M maksimum
	R7D	-4276.9296	-2964.9061	-9967.6368	V & M maksimum
Sambungan (*Rafter* - *Rafter*)	S2	-4218.3314	1303.6365	577.9531	P maksimum
	S2	-4218.3314	1303.6365	577.9531	P maksimum
	S9	-4054.3512	1306.1881	588.2007	V maksimum
	S9	-4054.3512	1306.1881	588.2007	V maksimum
	S1	-673.4745	99.9244	3024.3227	M maksimum
	S1	-673.4745	99.9244	3024.3227	M maksimum

Tabel 4. Analisis Elemen Kritis Berdasarkan Gaya Dalam Profil Castella

Elemen Kritis		Aksial (P)	Geser (V)	Lentur (M)	Identifikasi
		P max	V max	M max	
		kgf	kgf	kgf.m	
Rafter	R4A	-4435.5491	-2969.4257	-9834.0098	P maksimum
	R4D	-4435.5491	-2969.4257	-9834.0098	P maksimum
	R7A	-4270.1147	-2981.0369	-9868.7894	M maksimum
	R7D	-4270.1147	-2981.0369	-9868.7894	M maksimum
	R9A	-4268.5372	-3012.0568	-9240.0378	V maksimum
	R9D	-4268.5372	-3012.0568	-9240.0378	V maksimum
Kolom	C4A	-4771.7083	-3290.3332	-9363.0541	P, V & M maksimum
	C4D	-4771.7063	3290.3296	9363.0394	P, V & M maksimum
Sambungan (*Rafter* - Kolom)	R4A	-4435,5491	-2969,4257	-9834,0098	P maksimum
	R4D	-4435,5491	-2969,4257	-9834,0098	P maksimum
	R7A	-4270,1147	-2981,0369	-9868,7894	M maksimum
	R7D	-4270,1147	-2981,0369	-9868,7894	M maksimum
	R9A	-4246,3518	-3012,0568	-9240,0378	V maksimum
	R9D	-4246,3518	-3012,0568	-9240,0378	V maksimum

Elemen Kritis		Aksial (P)	Geser (V)	Lentur (M)	Identifikasi
		P max	V max	M max	
		kgf	kgf	kgf.m	
Sambungan (*Rafter* - *Rafter*)	S1	-825,0318	159,5481	2696,5661	M maksimum
	S1	-825,0318	159,5481	2696,5661	M maksimum
	S2	-4040,0978	1236,135	961,1614	P maksimum
	S2	-4040,0978	1236,135	961,1614	P maksimum
	S9	-3885,5355	1238,9883	974,8847	V maksimum
	S9	-3885,5355	1238,9883	974,8847	V maksimum

4.8 Perbandingan Kinerja Struktur *Gable frame* Profil WF dan Castella

Perbandingan kinerja dilakukan pada dua model struktur *gable frame* dengan geometri, material, kondisi tumpuan, dan pembebanan yang identik. Profil WF digunakan sebagai kondisi acuan (baseline), sedangkan profil Castella digunakan sebagai profil pembanding. Persentase perbedaan dihitung untuk mengetahui perubahan respons struktur setelah profil WF dimodifikasi menjadi profil Castella. Dengan menggunakan persamaan:

$$Perbedaan\ \% = \frac{X_{Castella} - X_{WF}}{X_{WF}}\ x\ 100\% \quad \text{..... (7)}$$

Keterangan:

X_{WF} = nilai respons struktur profil WF

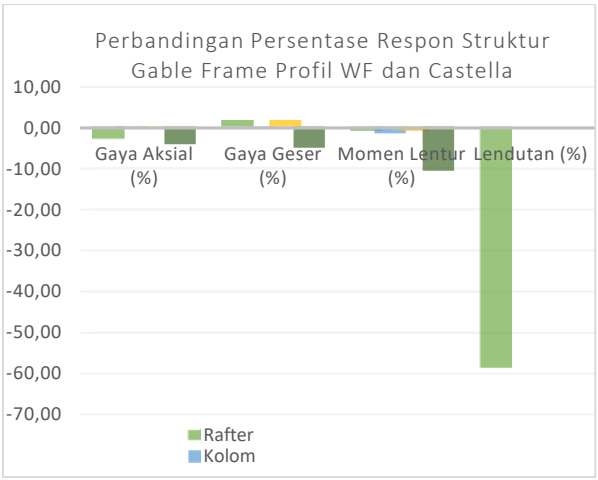
$X_{Castella}$ = nilai respons struktur profil Castella

Pada Tabel 5 dan Gambar 8 menyajikan hasil perbandingan kinerja struktur *gable frame* menggunakan profil WF dan Castella berdasarkan nilai maksimum beserta persentase perbedaannya.

Tabel 5. Perbandingan Kinerja Struktur *Gable frame* Profil WF dan Castella

Deskripsi		Satuan	Elemen	Profil		Persentase Perbedaan (%)
				WF	Castella	
Rafter	Gaya aksial maksimum	kgf	R2A	4567.9208	4433.6754	-2.94
		kgf	R2D	4567.9208	4433.6754	-2.94
		kgf	R4A	4446.9347	4435.5491	-0.26
		kgf	R4D	4446.9347	4435.5491	-0.26
	Gaya geser maksimum	kgf	R7A	2964.9061	2981.0369	0.54
		kgf	R7D	2964.9061	2981.0369	0.54
		kgf	R9A	2951.8887	3012.0568	2.04
		kgf	R9D	2951.8887	3012.0568	2.04
	Momen lentur maksimum	kgf·m	R7A	9967.6368	9868.7894	-0.99
		kgf·m	R7D	9967.6368	9868.7894	-0.99
	Lendutan maksimum	mm	R7A	38.61	15.92	-58.77
		mm	R7D	38.61	15.92	-58.77
Kolom	Gaya aksial maksimum	kgf	C7A	4768.2205	4734.4242	-0.71
		kgf	C7D	4768.2205	4734.4242	-0.71
		kgf	C4A	4754.1533	4771.7083	0.37
		kgf	C4D	4754.1527	4771.7083	0.37
	Gaya geser maksimum	kgf	C7A	3290.3943	3257.8187	-0.99
		kgf	C7D	3290.3943	3257.8187	-0.99
		kgf	C4A	3281.6229	3290.3332	0.27
		kgf	C4D	3281.622	3290.3332	0.27
	Momen lentur maksimum	kgf	C7A	9527.5167	9267.7075	-2.73
		kgf	C7D	9527.5167	9267.7075	-2.73
		kgf	C4A	9501.8652	9363.0541	-1.46
		kgf	C4D	9501.8636	9363.0541	-1.46
Sambungan (*Rafter* - Kolom)	Gaya aksial maksimum	kgf	R4A	4446.9347	4435.5491	-0.26
		kgf	R4D	4446.9347	4435.5491	-0.26
	Gaya geser maksimum	kgf	R7A	2964.9061	2981.0369	0.54
		kgf	R7D	2964.9061	2981.0369	0.54
		kgf	R9A	2951.8887	3012.0568	2.04
		kgf	R9D	2951.8887	3012.0568	2.04
	Momen lentur maksimum	kgf·m	R7A	9967.6368	9868.7894	-0.99
		kgf·m	R7D	9967.6368	9868.7894	-0.99

Deskripsi		Satuan	Elemen	Profil		Persentase Perbedaan (%)
				WF	Castella	
Sambungan (*Rafter - Rafter*)	Gaya aksial maksimum	kgf	S2	4218.3314	4040.0978	-4.23
		kgf	S2	4218.3314	4040.0978	-4.23
	Gaya geser maksimum	kgf	S9	1306.1881	1238.9883	-5.14
		kgf	S9	1306.1881	1238.9883	-5.14
	Momen lentur maksimum	kgf	S1	3024.3227	2696.5661	-10.84
		kgf	S1	3024.3227	2696.5661	-10.84



Gambar 8. Grafik Perbandingan Persentase Respon Struktur *Gable frame* Profil WF dan Castella

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan ETABS, distribusi gaya dalam pada struktur *gable frame* menunjukkan bahwa gaya aksial terbesar terjadi pada elemen kolom, gaya geser signifikan pada daerah sambungan, sedangkan momen lentur maksimum terjadi pada elemen *rafter* portal ke-7. Hasil analisis deformasi menunjukkan bahwa lendutan maksimum pada *rafter* R7A/R7D sebesar 38,61 mm untuk profil WF dan 15,92 mm untuk profil Castella pada kondisi geometri dan pembebanan yang sama. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa profil Castella menghasilkan lendutan 58,77% lebih kecil dibandingkan profil WF, dengan perbedaan respons gaya dalam yang relatif kecil. Dengan demikian, profil Castella menunjukkan respons deformasi yang lebih baik pada kondisi analisis yang ditinjau, meskipun pemeriksaan kapasitas geser serta sambungan tetap diperlukan untuk memastikan keamanan struktur.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Muhammad Ridwan, "Studi Analisis Perbandingan Antara Balok Baja Profil Wf (Wide Flange) Dan Balok Castella Dengan Model Struktur Gable Frame," *Institut Teknologi Nasional Malang*, 2014.

[2] F. Zuhrifah, A. Halim, and C. Aditya, "Analisis Portal Baja Pada Gedung Bertingkat Tinggi Berdasarkan SNI 03-1729-2002 dan SNI 1729:2015," *BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 1, no. 1, 2022, doi: 10.31328/bouwplank.v1i1.216.

[3] J. Prischila Litha, C. Aditya, and D. Irawan, "Perbandingan Respons Struktur Pada Portal Bertingkat Berdasarkan SNI 1726-2012 Dengan Variasi Penempatan Dinding Geser," *BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 1, no. 2, 2022, doi: 10.31328/bouwplank.v1i2.218.

[4] S. K. Meidiani and I. Juita, "Analisis Perbandingan Perencanaan Baja Profil Tunggal WF Dengan Profil Tersusun (Built-Up) Kanal Pada Bangunan Gable Frame," *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, vol. 3, no. 1, 2017, doi: 10.35449/teknika.v3i1.43.

[5] S. A. Saputra, M. Masykur, and S. U. Dewi, "Analisa Struktur Kolom dan Balok Baja Ditinjau Dari Kekuatan dan Biaya Pada Gedung Kantor PLN Distribusi Lampung," *JUMATISI: Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil*, vol. 1, no. 1, 2020, doi: 10.24127/jumatisi.v1i1.209.

[6] A. R. Alya, Y. Ramdani, R. Nursani, I. N. Rachma, and S. Wanto, "Perencanaan Struktur Gedung Serbaguna Menggunakan Elemen Struktur Baja," *Akselerasi : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 7, no. 1, 2026, doi: 10.37058/aks.v7i1.17612.

[7] Muh. A. Busman, Moh. J. Rachman, and Muh. I. Maming, "Analisa Perencanaan Peningkatan Balok Baja Profil WF (Wide Flange) dan Balok Castella Bertumpuan Sederhana," *artikel imiah*, vol. 101, 2015.

[8] B. S. Nasional, "Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain SNI 1727:2013," 2013, *BSN, Jakarta*. [Online]. Available: www.bsn.go.id

[9] E.- Suriani, "Studi Gaya Dalam Pada Konstruksi Balok Sederhana Dengan Pemodelan Beban," *NALARs*, vol. 24, no. 1, 2025, doi: 10.24853/nalars.24.1.21-32.

[10] I. M. Alatas, S. Taufik, and D. M. Januar, "Kajian Ulang Struktur Pabrik Dengan Alternatif Gable Frame Dan Rangka Batang," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 1, no. 2, 2023.

[11] Ricky Andi Pratama, Candra Aditya, Dafid Irawan, and Agus Tugas Sudjianto, "Pengaruh Rasio Tulangan Terhadap Lendutan Pada Perkerasan Kaku Dengan Penggunaan Limbah Marble Sebagai Agregat Halus," *Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH)*, vol. 8, no. 1, 2026, doi: 10.31328/ciastech.v8i1.7519.

[12] A. BIMANTARA, C. Aditya, and A. Halim, "Kajian Pelat Beton Bertulang Yang Tahan Terhadap Ammonium Nitrate," *BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 4, no. 1, 2024, doi: 10.31328/bouwplank.v4i1.449.

[13] V. B. Watwood, "Gable Frame Design Considerations," *Journal of Structural Engineering*, vol. 111, no. 7, 1985, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1985)111:7(1543).

[14] A. Setiawan, "Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD," 2008.

[15] Putri Safirna Lovidi, Dafid Irawan, Candra Aditya, and Agus Tugas Sudjianto, "Analisis Perbandingan Volume Pekerjaan Struktur Antara Perhitungan Manual Dengan BIM Autodesk Revit Pada Proyek Gedung Olahraga Tambakrejo Kabupaten Bojonegoro," *Conference on Innovation and Application of Science and Technology (CIASTECH)*, vol. 8, no. 1, 2026, doi: 10.31328/ciastech.v8i1.7517.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 156-164

Pengaruh Penggunaan Agregat Daur Ulang Dari Limbah *Paving block* Sebagai Pengganti Agregat Alami Terhadap Sifat Segar dan Kuat Tekan Beton Hibrida Berbasis *Fly ash*

Septian Bagus Perkasa[1*], Abdul Halim[2], Dafid Irawan[3]

[1]PT. PLN (Persero)
[2,3]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: septianperkasa@gmail.com

ABSTRAK

Kebutuhan akan material konstruksi yang ramah lingkungan mendorong pemanfaatan Limbah Pembangunan dan Pembongkaran (C&D *waste*) seperti limbah *paving block*, guna mengurangi ketergantungan pada agregat alami. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan agregat daur ulang dari limbah *paving block* terhadap sifat segar serta kuat tekan beton sekaligus menentukan variasi campuran optimum. Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan alternatif substitusi material konstruksi yang berkelanjutan serta mendukung pengurangan dampak lingkungan akibat limbah. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental laboratorium dengan rancangan 9 variasi campuran, di mana porsi *fly ash* ditetapkan konstan sebesar 25% dari total bahan pengikat serta variasi substitusi agregat halus dan kasar daur ulang dilakukan pada tingkat 0%, 50%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar agregat daur ulang cenderung menurunkan nilai *fly ash* (berkisar antara 10,7 cm hingga 12,4 cm) akibat tingginya penyerapan air pada mortar lama, namun seluruh variasi tetap memenuhi kriteria kemudahan pengerjaan (*workability*). Uji ANOVA membuktikan adanya pengaruh signifikan substitusi agregat terhadap kuat tekan (P-value = 0,001218 < 0,05 α), di mana variasi optimum dicapai pada kode A2B0 (100% agregat halus daur ulang dan 0% agregat kasar daur ulang) dengan kuat tekan sebesar 13,59 MPa, atau meningkat 51,8% dibandingkan beton kontrol A0B0 (8,95 MPa).

Kata Kunci: Limbah Paving, *Fly ash*, Kuat Tekan Beton, *Fly ash Test*, dan Beton Hibrida.

ABSTRACT

The need for environmentally friendly construction materials is driving the use of construction and demolition (C&D) waste—such as paving block waste—to reduce dependence on natural aggregates. This study aims to analyze the effect of using recycled aggregates from paving block waste on the fresh properties and compressive strength of concrete, while also determining the optimal mix design. The benefits of this study are to provide a sustainable alternative for construction material substitution and to support the reduction of environmental impacts caused by waste. The research method used was a laboratory experiment with a design of 9 mix variations, in which the fly ash content was kept constant at 25% of the total binder, and the substitution of recycled fine and coarse aggregates was varied at levels of 0%, 50%, and 100%. The results showed that increasing the proportion of recycled aggregates tended to lower the fly ash value (ranging from 10.7 cm to 12.4 cm) due to high water absorption in the old mortar; however, all variations still met the workability criteria. An ANOVA test confirmed a significant effect of aggregate substitution on compressive strength (P-value = 0.001218 < 0.05 α), with the optimal variation achieved in code A2B0 (100% recycled fine aggregate and 0% recycled coarse aggregate), yielding a compressive strength of 13.59 MPa—a 51.8% increase compared to the control concrete A0B0 (8.95 MPa).

Keywords: *Paving Waste, Fly ash, Concrete Compressive Strength, Fly ash Test, and Hybrid Concrete.*

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang dominan digunakan karena ketersediaan bahan penyusun, kemudahan pembentukan, dan kemampuan memikul beban tekan. Namun, pemakaian agregat alam dalam volume besar dan penggunaan bahan pengikat berbasis semen menimbulkan kebutuhan untuk mengembangkan pendekatan material yang lebih efisien terhadap sumber daya. Salah satu strategi yang relevan adalah mengombinasikan pemanfaatan agregat daur ulang dari limbah konstruksi dengan bahan *cementitious* tambahan seperti *fly ash*. Naskah sumber penelitian menempatkan limbah *paving block* sebagai material berbasis semen dan agregat yang masih dapat diolah menjadi agregat daur ulang. Limbah *paving block* memiliki karakteristik yang berbeda dari agregat alam karena permukaannya dapat mengandung mortar lama [1]. Kondisi tersebut berkaitan dengan perubahan berat jenis, tekstur, porositas, dan penyerapan air yang pada akhirnya dapat memengaruhi *workability* serta kuat tekan. Kajian terbaru yang secara khusus meneliti *concrete paving block* waste juga menunjukkan bahwa agregat *paving block* daur ulang layak dikaji sebagai pengganti agregat alam, tetapi pengaruhnya tetap bergantung pada fraksi agregat, tingkat substitusi, dan karakteristik material hasil sortasi [2]. *Fly ash* memberikan mekanisme tambahan berupa reaksi pozzolanik pada matriks beton. Dalam penelitian sumber, *fly ash* ditetapkan konstan sebesar 25% dari total bahan pengikat untuk memfokuskan analisis pada variasi agregat daur ulang. Kombinasi tersebut penting karena penyerapan air agregat daur ulang dan perubahan rheologi pasta akibat *fly ash* dapat saling memengaruhi [3]. Penelitian mengenai beton dengan *recycled aggregate* dan *fly ash* juga menunjukkan bahwa sifat agregat, kadar substitusi, dan komposisi binder secara bersama-sama memengaruhi kekuatan dan kinerja beton.

Celah penelitian yang ditangani studi ini adalah kombinasi khusus limbah *paving block* sebagai sumber agregat daur ulang halus dan kasar dengan *fly ash* yang dipertahankan konstan, lalu dievaluasi secara bersamaan melalui parameter *fly ash* dan kuat tekan umur 28 hari. Sembilan kombinasi tingkat substitusi 0%, 50%, dan 100% memberikan desain faktorial praktis untuk melihat kecenderungan kinerja campuran. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh substitusi agregat *paving* daur ulang terhadap sifat segar. Menganalisis pengaruh substitusi terhadap kuat tekan 28 hari. Menentukan variasi yang memberikan kombinasi kinerja paling baik. *Research gap* dari penelitian sebelumnya yaitu sebagian penelitian *recycled aggregate* menggunakan limbah beton umum, bukan limbah *paving block* yang mempunyai karakteristik sumber material berbeda. Penelitian mengenai *paving block* waste telah berkembang tetapi belum seluruhnya mengombinasikan penggunaan agregat daur ulang halus dan kasar secara simultan. Penelitian mengenai *recycled aggregate* concrete dan *fly ash* telah menunjukkan adanya potensi kombinasi kedua material tersebut, tetapi fokusnya banyak menggunakan *recycled concrete aggregate* dari beton konstruksi umum. Penggunaan *fly ash* sebagai bagian tetap sebesar 25% memberikan kondisi yang memungkinkan penelitian lebih terfokus pada pengaruh perubahan agregat daur ulang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan material komposit yang dihasilkan dari pengikatan dan pengerasan campuran antara semen hidraulis, air, agregat halus, agregat kasar, serta dengan atau tanpa bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Kualitas beton yang dihasilkan sangat bergantung pada ketepatan proporsi campuran yang digunakan. Mengacu pada SNI 7656:2012 tentang tata cara pemilihan proporsi untuk beton normal, beton berat, dan beton massa, perancangan proporsi campuran beton harus mempertimbangkan pemenuhan dua aspek utama [4]. Aspek tersebut meliputi kriteria kemudahan pengerjaan (*workability*) pada kondisi beton segar, serta pencapaian kuat tekan rencana dan keawetan (*durability*) pada kondisi beton keras. Standar ini menegaskan bahwa keberhasilan suatu proporsi adukan sangat ditentukan oleh pengontrolan parameter utama, salah satunya adalah rasio antara air dan bahan pengikat [5].

2.2 FABA

FABA merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran Batubara yang biasanya dilakukan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) [6]. Dalam proses pembakaran Batubara umumnya menghasilkan 80-90% *Fly ash* (FA) dan 10-20% *Bottom Ash* (BA). Secara fisis berdasarkan SNI 03-6414-2002, FA tergolong limbah hasil pembakaran Batubara yang berbentuk halus dan besar secara memiliki sifat *pozalonik* [7] [8].

2.3 Limbah *Paving block*

Paving block merupakan salah satu material konstruksi berbasis semen, agregat halus, dan air yang dimanfaatkan secara luas sebagai lapis perkerasan non-struktural pada pekarangan, jalan lingkungan, maupun area parkir. Peningkatan aktivitas pembangunan dan manufaktur beton secara langsung meningkatkan volume limbah, baik berupa sisa pecahan *paving block* (*demolition/crushed waste*) maupun limbah industri/domestik yang dimanfaatkan kembali menjadi bahan komposit *paving block* (eco-*paving block*) [9].

Pemanfaatan limbah dalam teknologi perkerasan *paving block* sejatinya memiliki dua orientasi utama. Pertama, pengelolaan limbah sisa bongkaran atau *paving block* rusak yang dihancurkan kembali untuk dimanfaatkan sebagai substitusi agregat kasar maupun halus pada campuran beton baru. Kedua, substitusi material penyusun *paving block* menggunakan limbah non-organik (seperti limbah plastik PET/LDPE, abu terbang/*fly ash*, maupun limbah kaca) guna mengurangi ketergantungan pada penggunaan semen Portland dan pasir alami [10]. Penggunaan limbah sebagai agregat Daur Ulang (*Recycled Concrete Aggregate*) atau bahan pengikat (binder) terbukti mampu menjaga performa fisik dan mekanis *paving block* agar tetap memenuhi kriteria Standar Nasional Indonesia (SNI 03-0691-1996) tentang Bata Beton (*Paving block*) [11]. Selain memperbaiki efisiensi biaya produksi, pendekatan ini menjadi bagian penting dari penerapan prinsip ekonomi sirkuler dan konstruksi berkelanjutan (*sustainable construction*) untuk menekan beban pencemaran lingkungan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian merupakan eksperimen laboratorium yang membandingkan beton kontrol dengan beton yang menggunakan agregat halus dan/atau kasar daur ulang dari limbah *paving block*. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Beton dan Bahan Konstruksi Universitas Widya Gama Malang pada Mei–Agustus 2026. Variabel bebas adalah proporsi agregat halus daur ulang dan agregat kasar daur ulang; variabel terikat adalah *fly ash* dan kuat tekan 28 hari; sedangkan jenis semen, kadar *fly ash*, air, ukuran benda uji, metode pencampuran, pemadatan, *curing*, umur pengujian, dan prosedur pengujian dikontrol.

3.1 Material dan Karakterisasi

Material penelitian terdiri atas Portland semen, *fly ash*, pasir alam, agregat halus daur ulang *paving block*, kerikil alam, agregat kasar daur ulang *paving block*, dan air. Limbah paving dibersihkan, dihancurkan, diayak, kemudian dipisahkan menjadi fraksi halus dan kasar. Karakterisasi agregat mencakup kadar air, gradasi, berat jenis, penyerapan air, kadar lumpur untuk fraksi halus, serta berat isi. Prosedur karakterisasi dan pengolahan material mengikuti dokumentasi penelitian pada skripsi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa agregat kasar alam memiliki kadar air 3,84%, berat jenis SSD 1,79, dan penyerapan 0,56%; agregat halus alam memiliki kadar air 1,70%, berat jenis SSD 2,02, kadar lumpur 0,36%, dan penyerapan 1,48%. Pecahan paving kasar memiliki kadar air 4,54%, berat jenis SSD 1,58, dan penyerapan 0,31%, sedangkan pecahan paving halus memiliki kadar air 2,39%, berat jenis SSD 1,89, kadar lumpur 1,55%, dan penyerapan 1,80%. Penelitian eksperimental ini menguji pengaruh penggantian agregat alami dengan agregat daur ulang dari limbah *paving block* terhadap kinerja beton hibrida. Variabel bebas dari penelitian ini adalah persentase penggantian agregat halus dan agregat kasar alami dengan agregat daur ulang limbah *paving block*, masing-masing

sebesar 0%, 50%, dan 100%. Variabel terikat penelitian ini yaitu performa beton hibrida yang meliputi sifat segar (*workability* melalui uji *fly ash*) serta sifat mekanis (kuat tekan beton silinder pada umur 28 hari). Sedangkan variabel kontrolnya adalah parameter yang dijaga konstan meliputi jenis semen, kadar *fly ash* (25%), sumber air, dimensi benda uji, metode pencampuran, pemadatan, curing, target *fly ash*, umur pengujian, serta standar prosedur pengujian.

3.2 Rancangan Campuran dan Benda Uji

Pembuatan benda uji beton silinder dengan variasi campuran 1:2:3 memadukan semen dan *fly ash* sebagai bahan pengikat hibrida, serta pecahan *paving block* halus dan kasar. Tabel kebutuhan bahan untuk pembuatan 5 silinder setiap campuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan Kebutuhan Campuran

Kode	Semen	*Fly ash*	Air	Pasir alami	Paving halus	Kerikil alami	Paving kasar	Total
	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
A0B0	6,897	2,299	6,000	21,202	0,000	27,966	0,000	64,364
A0B1	6,897	2,299	6,200	21,202	0,000	13,983	14,126	64,707
A0B2	6,897	2,299	6,200	21,202	0,000	0,000	28,252	64,850
A1B0	6,897	2,299	6,400	10,601	10,629	27,966	0,000	64,792
A1B1	6,897	2,299	6,500	10,601	10,629	13,983	14,126	65,035
A1B2	6,897	2,299	6,600	10,601	10,629	0,000	28,252	65,278
A2B0	6,897	2,299	6,700	0,000	21,258	27,966	0,000	65,121
A2B1	6,897	2,299	6,700	0,000	21,258	13,983	14,126	65,264
A2B2	6,897	2,299	6,600	0,000	21,258	0,000	28,252	65,307

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

3.3 Pengujian dan Analisis Statistik

Fly ash diuji pada beton segar setelah pencampuran. Setelah pencetakan, benda uji dilepas pada umur sekitar 24 jam dan dirawat melalui perendaman hingga umur pengujian 28 hari. Kuat tekan diuji menggunakan *compression testing machine*. Kuat tekan dihitung dari rasio beban maksimum terhadap luas penampang silinder. Dalam pelaporan standar saat ini [12] ,[13] ,[4], untuk menguji apakah variasi campuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan, digunakan ANOVA *Single Factor* dengan taraf signifikansi 5%. Pengujian dibandingkan menggunakan p-value terhadap $\alpha = 0,05$. Pendekatan ini dipertahankan dari pengolahan data pada naskah sumber.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Agregat Limbah Paving Halus dan Kasar

Analisis agregat limbah paving dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kelayakan agregat sebagai bahan penyusun campuran beton melalui beberapa pengujian, yaitu kadar air, berat jenis, gradasi, kadar lumpur, penyerapan air dan berat isi. Hasil seluruh pengujian digunakan untuk menyusun campuran beton. Hasil dari pengujian agregat limbah paving ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Limbah Paving

Nama Pengujian	Hasil Pengujian Agregat Halus		Hasil Pengujian Agregat Kasar		Satuan
Kadar Air	2,39%		4,54%		%
Modulus Halus	3,93		9,88		mm
Berat Jenis Jenis bulk Jenis SSD Jenis semu	 1,84 1,89 1,96		 1,57 1,58 1,58		-
Kadar Lumpur	1,55%		-		-
Penyerapan Air	1,80%		0,31%		%
Berat Isi	Rodded : Shoveled :	1,60 1,44	Rodded : Shoveled :	1,26 1,25	g/cc

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

4.2 Hasil Pengujian Agregat Alami Halus dan Kasar

Analisis agregat alami dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kelayakan agregat sebagai bahan penyusun campuran beton melalui beberapa pengujian, yaitu kadar air, berat jenis, gradasi, kadar lumpur, penyerapan air dan berat isi. Hasil dari seluruh pengujian tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik fisik agregat alami sebagai material penyusun campuran beton. Hasil dari pengujian agregat alami halus dan kasar ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Alami

Nama Pengujian	Hasil Pengujian Agregat Halus	Hasil Pengujian Agregat Kasar	Satuan
Kadar Air	1,70%	3,84%	%
Modulus Halus	3,64	9,79	mm
Berat Jenis Jenis bulk Jenis SSD Jenis semu	 1,98 2,02 2,09	 1,77 1,79 1,81	-
Kadar Lumpur	0,36%	-	-
Penyerapan Air	1,48%	0,56%	%
Berat Isi	Rodded : 1,65 Shoveled : 1,61	Rodded : 1,47 Shoveled : 1,42	g/cc

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

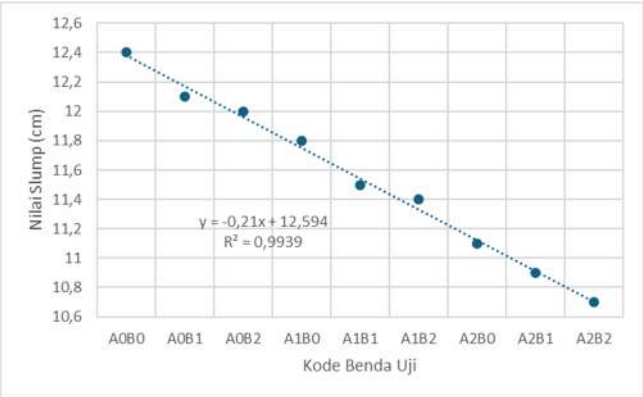
4.3 Sifat Segar (*Slump Test*)

Nilai *fly ash* seluruh variasi berada pada rentang 10,7-12,4 cm dengan rata-rata keseluruhan 11,54 cm. Campuran kontrol A0B0 memiliki *fly ash* tertinggi 12,4 cm, sedangkan nilai terendah terjadi pada A2B2 sebesar 10,7 cm. Variasi A2B0 yang kemudian menjadi variasi kuat tekan optimum memiliki *fly ash* 11,1 cm.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Fly ash*

No	Kode	Nilai Sump Test (cm)	Rata-rata	Prosentase	Naik / Turun
1	A0B0	12,4	11,54	100%	0%
2	A0B1	12,1		98%	-2%
3	A0B2	12,0		97%	-3%
4	A1B0	11,8		95%	-5%
5	A1B1	11,5		93%	-7%
6	A1B2	11,4		92%	-8%
7	A2B0	11,1		90%	-10%
8	A2B1	10,9		88%	-12%
9	A2B2	10,7		86%	-14%

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

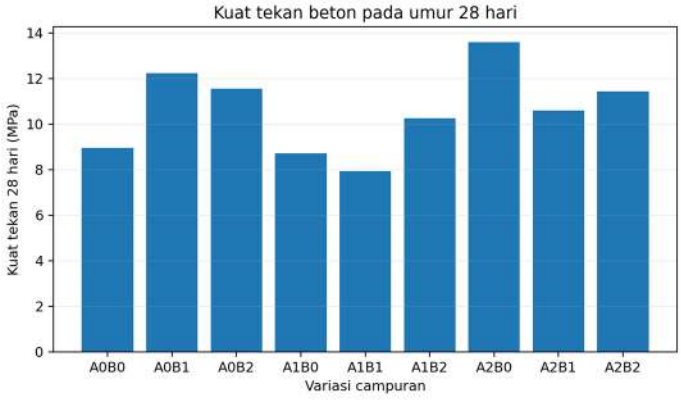


Gambar 1. Hubungan Nilai *Fly ash* Dengan Benda Uji

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, campuran kontrol A0B0 menghasilkan nilai *fly ash* tertinggi sebesar 12,4 cm, sementara sampel A2B2 dengan substitusi agregat daur ulang menghasilkan nilai terkecil sebesar 10,7 cm (A0B1 = 12,1 cm; A0B2 = 12,0 cm; A1B0 = 11,8 cm; A1B1 = 11,5 cm; A1B2 = 11,4 cm; A2B0 = 11,1 cm; A2B1 = 10,9 cm). Pada Gambar 1, penurunan nilai *fly ash* seiring bertambahnya variasi substitusi ini dipengaruhi oleh karakteristik daya serap air yang tinggi pada pecahan *paving block*. Hal ini sejalan dengan temuan yang mengonfirmasi bahwa penggunaan agregat daur ulang secara signifikan menurunkan *workability* dan nilai *fly ash* beton akibat tingginya porositas serta penyerapan air pada material limbah tersebut [14].

4.4 Kuat tekan 28 hari

Pengujian mencakup 45 benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm pada umur 28 hari. Hasil rata-rata menunjukkan A2B0 sebagai campuran dengan kuat tekan tertinggi 13,59 MPa, sedangkan A1B1 terendah 7,93 MPa (Gambar 2). Kontrol A0B0 menghasilkan 8,95 MPa. Data lengkap rata-rata sembilan variasi dipertahankan dari Tabel 5.



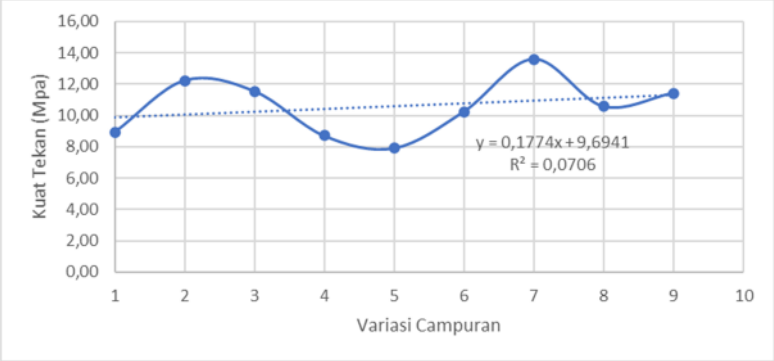
Gambar 2. Kuat Tekan Beton Pada Umur 28 Hari

Pengujian kuat tekan mengevaluasi sebanyak 45 sampel benda uji silinder. Tahapan pengujian ini dilaksanakan saat beton telah memasuki umur 28 hari pasca masa perawatan (*curing*), proses pengukuran kapasitas beban tekan tersebut menggunakan perangkat *Compression Testing Machine*. Hasil pengujian kuat tekan beton setiap campuran terdapat pada Tabel 5. Grafik hubungan variasi campuran dengan kuat tekan terdapat pada Gambar 3.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan

No.	Kode	Fcr (Mpa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan Kuat Tekan Terhadap Beton Normal (%)
1	A0B0	8,95	0%
2	A0B1	12,23	26,85%
3	A0B2	11,55	22,55%
No.	Kode	Fcr (Mpa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan Kuat Tekan Terhadap Beton Normal (%)
4	A1B0	8,72	-2,60%
5	A1B1	7,93	-12,86%
6	A1B2	10,25	12,71%
7	A2B0	13,59	34,17%
8	A2B1	10,59	15,51%
9	A2B2	11,44	21,78%

Sumber : Perhitungan Excel (2026)



Gambar 3. Hubungan Variasi Campuran Dengan Kuat Tekan

Kenaikan kuat tekan terbesar terjadi pada variasi A2B0 (100% agregat halus daur ulang) yaitu sebesar 13,59 MPa atau naik 51,8% dari kontrol A0B0 (8,95 MPa), sedangkan kombinasi simultan A1B1 justru menghasilkan nilai terendah sebesar 7,93 MPa. Kenaikan signifikan pada A2B0 didorong oleh *micro-filler effect* dan reaktivitas semen tua yang belum terhidrasi sempurna (*unhydrated cement*) pada agregat halus, yang bereaksi kembali serta memperdensifikasi matriks *Interfacial Transition Zone* (ITZ). Sebaliknya, penurunan pada A1B1 dipicu oleh munculnya sistem ganda ITZ (*multiple* ITZs) yang lemah serta tingginya penyerapan air akibat gabungan fraksi halus dan kasar daur ulang, sehingga memicu pembentukan retak mikro (*micro-cracking*) [9].

4.5 Hubungan Antara Komposisi Air dan Kuat Tekan Beton

Berdasarkan pengujian fisik dan mekanis di laboratorium, variasi komposisi air dalam campuran beton memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tekan akhir beton. Penyesuaian jumlah air berbanding lurus dengan tingkat kerapatan rongga udara internal matriks semen. Hubungan kuantitatif antara proporsi penggunaan air dan hasil pengujian kuat tekan beton tersebut ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hubungan Komposisi Air dan Kuat Tekan

Kode	Air (Kg)	Kuat Tekan Rata-rata
A0B0	6,000	8,95
A0B1	6,200	12,23
A0B2	6,200	11,55
A1B0	6,400	8,72
A1B1	6,500	7,93
A1B2	6,600	10,25
A2B0	6,700	13,59
A2B1	6,700	10,59
A2B2	6,600	11,44

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 6, dapat dilihat hubungan antara komposisi penggunaan air (Kg) terhadap nilai kuat tekan rata-rata beton yang dihasilkan dari berbagai kode sampel (A0B0 hingga A2B2). Kuat tekan tertinggi dicapai oleh sampel kode A2B0 dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 13,59 MPa pada penggunaan air sebanyak 6,700 Kg. Kuat tekan terendah terdapat pada sampel kode A1B1 dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 7,93 MPa pada penggunaan air sebanyak 6,500 Kg. Penelitian Meh dkk. [15] memperkuat alasan ilmiah mengapa fluktuasi naik-turun kuat tekan terjadi pada variasi A1 dan A2 seiring penurunan bertahap kadar air.

Penelitian ini mengkaji pemanfaatan agregat daur ulang dari limbah *paving block* pada beton hibrida berbasis *fly ash*. Penelitian tersebut menggunakan sembilan variasi campuran dengan substitusi agregat halus dan kasar sebesar 0%, 50%, dan 100%, kemudian mengevaluasi sifat segar melalui *fly ash* serta sifat mekanik melalui kuat tekan beton umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan substitusi agregat daur ulang menyebabkan penurunan nilai *fly ash*

dari 12,4 cm pada A0B0 menjadi 10,7 cm pada A2B2, yang dikaitkan dengan tingginya penyerapan air agregat dari limbah *paving block*. Benda uji hasil pengujian kuat tekan ditampilkan pada Gambar 4. Pada penelitian Pasapan [1], terdapat perbedaan pada penelitian saat ini yang menunjukkan adanya respons kuat tekan yang berbeda ketika agregat halus dan kasar daur ulang dikombinasikan, sehingga masih diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme interaksi kedua fraksi tersebut. Pada sifat mekanik, penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan antara tingkat substitusi agregat daur ulang dan kuat tekan tidak bersifat linier. Variasi A2B0, yaitu 100% agregat halus daur ulang dan 0% agregat kasar daur ulang, menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 13,59 MPa, sedangkan A1B1 menghasilkan nilai terendah sebesar 7,93 MPa. Penulis mengaitkan fenomena tersebut dengan *micro-filler effect*, kemungkinan reaktivitas semen lama, *Interfacial Transition Zone* (ITZ), penyerapan air, dan *micro-cracking*.



Gambar 4. Benda uji hasil pengujian kuat tekan

4.6 Analisis ANOVA

ANOVA *Single Factor* pada Tabel 7 menghasilkan SS antara kelompok sebesar 133,6515, df = 8, MS = 16,70644, F = 4,214398, p-value = 0,001218, dan F-kritis = 2,208518. Karena p-value < 0,05, hipotesis nol ditolak. Dengan demikian, variasi campuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan beton pada data penelitian ini. Hasil tersebut merupakan data statistik asli dari pengolahan Excel pada skripsi.

Tabel 7. Hasil Analisis ANOVA

Sumber variasi	Df	MS	F	p-value
Antarkelompok	8	16,70644	4,214398	0,001218
Dalam kelompok	36	3,964134	-	-
Total	44	-	-	-

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian laboratorium, penggunaan agregat daur ulang dari limbah *paving block* terbukti memengaruhi sifat segar dan kuat tekan beton hibrida secara signifikan. Dari parameter sifat segar, peningkatan kadar agregat daur ulang menyebabkan penurunan nilai *fly ash* (berkisar antara 10,7 cm hingga 12,4 cm) akibat tingginya daya serap air pada mortar lama yang melekat, namun seluruh variasi adonan beton segar tetap memenuhi kriteria kemudahan pengerjaan (*workability*). Dari parameter sifat mekanis, substitusi agregat daur ulang memberikan pengaruh nyata terhadap kuat tekan beton umur 28 hari (P-value = 0,001218 < 0,05), di mana campuran optimum dicapai oleh variasi A2B0 (100% agregat halus daur ulang dan 0% agregat kasar daur ulang dengan kadar *fly ash* 25%) yang menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 13,59 MPa atau meningkat 51,8% dibandingkan beton kontrol A0B0 (8,95 MPa). Penemuan ini mengonfirmasi bahwa limbah

paving block efektif dimanfaatkan sebagai substitusi agregat alami untuk menghasilkan beton hibrida berkinerja optimal sekaligus mendukung konstruksi berkelanjutan yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Pasapan, "Karakteristik Paving Blok Yang Terbuat Dari Limbah Batu Bata Tahan Api Dan Semen Portland Komposit" 2023, *Universitas Hasanuddin*.

[2] J. Pizoń, K. Matýsková, M. Horňáková, M. Gołaszewska, and G. Kratošová, "Recycled concrete paving block waste as a selected sustainable substitute for natural aggregate in cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 478, p. 141356, 2025.

[3] U. Ayuningtyas *et al.*, "Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Konstruksi Ramah Lingkungan Dalam Rangka Mendukung Kriteria Bangunan Hijau," *SNPPM*, pp. 51–56, 2022.

[4] SNI, "SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa," *Badan Standarisasi Nasional*, p. 52, 2012.

[5] S. A. N. Wahidin, M. I. Rasyid, A. A. Adam, S. N. Akifa, and B. R. Ramadhan, "Pengaruh Rasio Air – Pengikat terhadap Waktu Pengikatan dan Kuat Tekan Pasta Geopolimer," *Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ)*, vol. 7, no. 3, pp. 349–361, 2025.

[6] A. M. Kusuma, "Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash Sebagai Bahan Material Kontruksi Ramah Lingkungan Pada Bangunan," *J-Sipil : Jurnal Teknologi Dan Ilmiah Teknik Sipil Dan Sains*, vol. 1, no. 1, pp. 13–23, 2024.

[7] B. S. Nasional, "SNI 2460:2014 Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton," p. 16, 2014.

[8] F. Anggara, H. T. B. M. Petrus, D. B. A. Anisa, H. Manurung, and F. Y. A. Saputra, "Tinjauan Pustaka Karakterisasi Dan Potensi Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash (FABA)," *Buletin Sumber Daya Geologi*, vol. 16, no. 1, pp. 53–70, 2021.

[9] V. Revilla-Cuesta, F. Faleschini, M. A. Zanini, M. Skaf, and V. Ortega-Lopez, "Porosity-based models for estimating the mechanical properties of self-compacting concrete with coarse and fine recycled concrete aggregate," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 103425, 2021.

[10] A. N. Majid, R. Roestaman, and S. Permana, "Penggunaan Agregat Halus Ex Paving Block untuk Campuran Beton," *Jurnal Konstruksi*, vol. 19, no. 2, pp. 340–350, 2022, doi: 10.33364/konstruksi/v.19-2.924.

[11] Y. Amran, A. W. Permana, and S. Kurniawan, "Pemanfaatan Limbah Plastik Jenis Polypropylene Sebagai Bahan Utama Paving Block Plastis Dengan Campuran Arang Sekam Padi Mengacu Pada Sni 03-0691-1996," *TAPAK [Teknologi Aplikasi Konstruksi]: Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 97–109, 2024.

[12] B. S. Nasional, "SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton Semen Portland," 2008.

[13] B. S. Nasional, "SNI 1974-2023 Metode uji untuk kekuatan tekan beton spesimen silinder," *Jakarta:BSN*, 2023.

[14] C. Hui, Y. Liu, R. Hai, and M. Liu, "Experimental Study and Analysis on Workability and Mechanical Performance of High Fluidity Recycled Concrete," *Journal Materials*, vol. 15, no. 6104, p. 13, 2022.

[15] K. M. F. K. Meh, Z. Omar, and S. K. Mohamed, "Compressive Strength–Water Absorption Behaviour of Concrete with Coal Bottom Ash as Sand Replacement across Water–Cement Ratios," Journal of Building Material Science| Volume, vol. 8, no. 01, 2026.

BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 165-177

Analisis Daktilitas dan Mekanisme Kegagalan Sambungan Balok-Kolom Pracetak Dengan Perkuatan Kombinasi Pelat BAJA-CFRP

Edo Prasetya Adi[1*], I Kadek Adit Putra Igmas[2], Muhammad Mahesa Ramadhan[3], Nika Devi Permata Wijaya[4], Satrio Cancer Avendi[5]

[1,2,3,4,5]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang, Kota Malang
*Email Korespondensi: prasetya.edo@unmer.ac.id

ABSTRAK

Sambungan balok-kolom pracetak tipe kering rentan mengalami kegagalan getas dan kehilangan daktilitas pada beban siklik, sehingga membutuhkan perkuatan yang efektif. Penelitian ini mengevaluasi retrofit kombinasi pelat baja eksternal, angkur, dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Sheet pada sambungan yang sebelumnya telah dibebani hingga rusak. Pengujian pembebanan quasi-siklik dilakukan pada benda uji eksisting dan retrofit dengan dua variasi pengangkuran, yaitu dua angkur (CP2) dan empat angkur (CP4). Daktilitas perpindahan (μΔ) dihitung dengan pendekatan s*ecant* dan tangensial. Retrofit memulihkan kapasitas beban lateral dan meningkatkan daktilitas dibandingkan kondisi eksisting. CP4 memberikan kapasitas beban tertinggi (Pmaks 17,72 kN dibandingkan 15,58 kN pada CP2), sedangkan CP2 memiliki μΔ lebih tinggi pada acuan Pmaks, baik *secant* (2,98 dibandingkan 2,71) maupun tangensial (9,53 dibandingkan 7,10). Peningkatan daktilitas *secant* terhadap kondisi eksisting mencapai 156,26% (CP2) dan 80,10% (CP4). Simpangan ultimit (Δu) diambil sebesar 45 mm karena pengujian dihentikan akibat gap pada sambungan, debonding, dan angkur mulai kendor sebelum beban turun 20% dari Pmaks, sehingga μΔ merupakan batas bawah. Perkuatan ini meningkatkan daktilitas sambungan pracetak, namun perbedaan antar-konfigurasi masih bersifat indikatif karena hanya satu benda uji per variasi.

Kata Kunci: CFRP, Daktilitas, Pelat Baja, Retrofit, dan Sambungan Balok-Kolom Pracetak.

ABSTRACT

Dry-type precast beam-to-column connections are prone to brittle failure and loss of ductility under cyclic loading, thus requiring effective reinforcement. This study evaluates a retrofit combination of external steel plates, anchors, and Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets on connections that had previously been loaded to failure. Quasi-cyclic loading tests were conducted on existing and retrofitted test specimens with two anchorage variations: two anchors (CP2) and four anchors (CP4). Displacement ductility (μΔ) was calculated using the secant and tangential approaches. The retrofit restored lateral load-carrying capacity and improved ductility compared to the existing condition. CP4 provided the highest load capacity (Pmax 17.72 kN compared to 15.58 kN for CP2), while CP2 had a higher μΔ at the Pmax reference, both secant (2.98 compared to 2.71) and tangential (9.53 compared to 7.10). The increase in secant ductility compared to the existing condition reached 156.26% (CP2) and 80.10% (CP4). The ultimate deflection (Δu) was taken as 45 mm because the test was stopped due to a gap in the joint, debonding, and the anchors beginning to loosen before the load dropped by 20% from Pmax; thus, μΔ represents the lower limit. This reinforcement improves the ductility of precast joints; however, differences between configurations are still indicative since only one test specimen was used per variation.

Keywords: *CFRP, Ductility, Steel Plate, Retrofit, and Precast Beam-Column Connection.*

1. PENDAHULUAN

Sambungan balok–kolom merupakan komponen penting guna menentukan kinerja sistem rangka dalam struktur beton bertulang, khususnya pada konstruksi beton pracetak. Berbeda dengan sistem sambungan basah (*wet connection*), sambungan pracetak dibentuk dari elemen yang diproduksi di pabrik dan dirakit di lapangan sehingga keberadaan bidang sambungan berpotensi menurunkan kemampuan deformasi inelastik serta kestabilan struktur saat menerima pembebanan lateral berulang akibat gempa [1]. Pada kondisi tersebut, sambungan harus mampu menahan kombinasi gaya lentur, geser, dan aksial secara siklik tanpa mengalami kegagalan tiba-

tiba. Tantangan ini semakin besar pada sambungan tipe kering (*dry connection*), karena mekanisme transfer gaya dipengaruhi oleh kontak permukaan, gaya gesek, dan sistem pengikat mekanis, seperti pelat baja, angkur, dan baut. Oleh karena itu, diperlukan metode perkuatan yang efektif untuk meningkatkan kapasitas deformasi dan daktilitas sambungan tanpa menambah beban struktur secara signifikan [2][3]. Salah satu metode perkuatan struktur beton bertulang yang mulai banyak dikembangkan adalah penggunaan material *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) sebagai sistem perkuatan eksternal. Material ini memiliki kuat tarik tinggi, bahan ringan, tahan korosi, dan mudah diaplikasikan. Di antara berbagai jenis FRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) paling banyak digunakan karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta kinerja yang stabil terhadap pengaruh lingkungan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perkuatan CFRP pada sambungan balok–kolom mampu meningkatkan kapasitas deformasi inelastik, daktilitas, dan kestabilan respons histeresis akibat pembebanan siklik. Penggunaan CFRP Sheet maupun pelat baja juga dilaporkan mampu meningkatkan kinerja sambungan beton bertulang [2], [4], [5].

Namun, penelitian mengenai kombinasi pelat baja dan CFRP Sheet pada sambungan balok-kolom beton pracetak tipe kering masih terbatas. Pelat baja efektif meningkatkan kekakuan dan kapasitas geser, sedangkan CFRP memberikan kuat tarik tinggi, efek pengekangan, dan tambahan sifat daktail tanpa menambah berat struktur secara signifikan. Kombinasi kedua material ini diprediksi mampu menghasilkan kinerja sambungan yang lebih baik dibandingkan menggunakan perkuatan dengan material tunggal [6], [7]. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada investigasi sinergi mekanis antara pelat baja eksternal dan lembaran CFRP, serta evaluasi titik pengangkuran mekanis pada sambungan pracetak tipe kering yang belum banyak dieksplorasi secara mendalam. Pemilihan variasi penggunaan 2 angkur (CP2) dan 4 angkur (CP4) secara spesifik ditujukan untuk mengevaluasi efisiensi jumlah pengikat mekanis dalam mendistribusikan konsentrasi tegangan di area sendi plastis, sekaligus memitigasi fenomena terkelupasnya lekatan (*debonding*) prematur pada material komposit. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi perilaku sambungan balok–kolom kering beton pracetak yang diperkuat menggunakan kombinasi pelat baja dan lembaran CFRP melalui pembebanan berulang (quasi-siklik) akibat gempa. Evaluasi dilakukan terhadap kapasitas deformasi, perilaku daktilitas, pola retak, dan mekanisme keruntuhan untuk menilai efektivitas sistem perkuatan dalam meningkatkan kinerja sambungan beton pracetak yang tahan terhadap gempa [8], [9].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daktilitas dan Penentuan Titik Leleh Ekuivalen

Daktilitas (μ_Δ) merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi kinerja struktur penahan beban gempa, yang didefinisikan sebagai kemampuan elemen struktur untuk mengalami deformasi inelastik secara signifikan tanpa kehilangan kapasitas layan beban secara tiba-tiba. Kemampuan ini memungkinkan struktur tetap mempertahankan stabilitasnya setelah melewati batas elastis, sehingga keruntuhan bersifat bertahap. Secara matematis, daktilitas dievaluasi berdasarkan hubungan beban-perpindahan (*load-displacement*) dan dirumuskan sebagai rasio antara simpangan pada kondisi batas ultimit (Δu) terhadap simpangan pada saat leleh ekuivalen (Δy) [10]. Hubungan tersebut ditunjukkan pada Persamaan (1):

$$\mu\Delta = \Delta u/\Delta y \quad \text{..... (1)}$$

Keterangan:

μ_Δ : Daktilitas perpindahan (*displacement ductility*)

Δu : Simpangan ultimit, yaitu simpangan pada cabang pasca-puncak saat beban turun 20% dari Pmaks (0,8 Pmaks), atau simpangan maksimum yang dicapai bila pengujian dihentikan sebelum penurunan tersebut (mm)

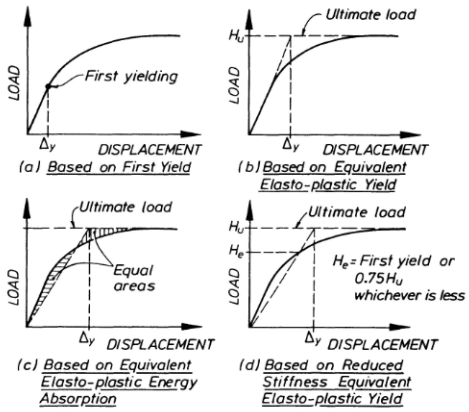
Δy : Simpangan leleh ekuivalen (mm)

Secara umum dikenal dua jenis daktilitas, yaitu daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$) dan daktilitas kelengkungan ($\mu\varphi$). Penelitian ini menggunakan $\mu\Delta$ karena hanya tersedia data global hubungan beban–simpangan. Pada pengujian elemen struktur beton pracetak yang tidak dilengkapi instrumen regangan (*strain gauge*) pada tulangan utama, titik leleh (*yield point*) dapat ditentukan

melalui pendekatan geometris pada kurva *backbone* [11]. Oleh karena itu, perpindahan leleh (Δy) tidak dapat diidentifikasi hanya melalui pengamatan visual terhadap retak pertama. Metode analitis yang paling umum dan rasional adalah menggunakan pendekatan geometris pada *backbone curve*.

2.2 Daktilitas Secant dan Daktilitas Tangensial

Dalam mengevaluasi perilaku inelastik struktur akibat pembebanan siklik, daktilitas *Secant* dan tangensial digunakan untuk merepresentasikan parameter stabilitas yang berbeda [12]. Daktilitas s*ecant* mengukur kapasitas deformasi makro global dengan membandingkan simpangan puncak terhadap batas leleh elastisnya, yang menjadi acuan utama dalam desain seismik berbasis perpindahan [13][12]. Garis s*ecant* ditarik dari titik awal menuju titik di mana beban mencapai sekitar 0,75 darzi kapasitas beban maksimum (Pmaks). Garis lurus elastis tersebut kemudian diekstrapolasikan hingga memotong proyeksi garis horizontal dari beban Pmaks. Titik perpotongan inilah yang diproyeksikan ke sumbu absis untuk menentukan nilai perpindahan leleh ekuivalen (Δy). Pendekatan ini merepresentasikan sistem elasto-plastis ekuivalen dengan kekakuan yang telah direduksi akibat respons nonlinier dan retak pada beton [11]. Selanjutnya, indeks daktilitas perpindahan ditentukan sebagai rasio antara perpindahan ultimit (Δu) dan perpindahan leleh (Δy).



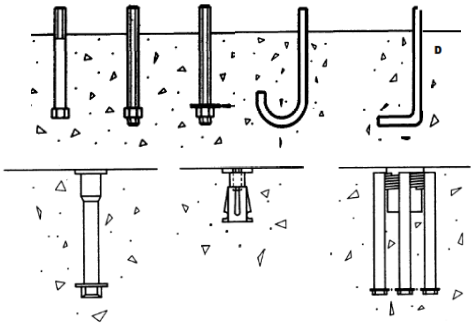
Gambar 1. Pendekatan geometris perpindahan leleh pada *backbone curve*

Sementara itu, metode tangensial menentukan titik leleh berdasarkan pendekatan *equivalent elasto-plastic yield*, yaitu dengan merepresentasikan kurva respons aktual ke dalam sistem elastoplastik ekuivalen untuk memperoleh perpindahan leleh. Pada metode ini, garis kekakuan awal diperpanjang hingga memotong garis horizontal beban Pmaks, dan titik potongnya diproyeksikan ke sumbu simpangan sebagai Δy (Gambar 1- b). Pendekatan tangensial dan *secant* dapat menghasilkan nilai perpindahan leleh dan indeks daktilitas yang berbeda karena menggunakan idealisasi respons struktur yang berbeda. Pada sambungan balok–kolom beton pracetak dengan *dry connection*. Cahyani dkk. [14] menerapkan kedua pendekatan tersebut untuk mengevaluasi daktilitas sambungan dan menentukan kondisi ultimit pada tiga kondisi, yaitu saat mencapai beban maksimum (*peak load*), saat beban menurun sebesar 5% dari beban maksimum, dan pada akhir pengujian. Dengan demikian, perbedaan metode penentuan perpindahan leleh perlu dipertimbangkan secara konsisten dalam perhitungan daktilitas. Ling dkk. [12] menegaskan bahwa berbagai metode penentuan daktilitas dapat menghasilkan nilai yang berbeda untuk benda uji yang sama, sehingga perbandingan antar benda uji harus dilakukan menggunakan metode yang sama.

2.3 Perilaku Sambungan dry-Joint dan Perkuatan CFRP–Pelat Baja

Sambungan kering (*dry-joint*) pada struktur beton pracetak pada Gambar 2 mentransfer gaya melalui mekanisme mekanis seperti kontak, friksi, baut, angkur, dan elemen baja [15]. Pada pembebanan lateral siklik, mekanisme tersebut dapat menghasilkan slip, pembukaan dan penutupan celah (*gap opening–closing*), serta konsentrasi tegangan yang memengaruhi kapasitas deformasi dan mekanisme kegagalan sambungan [16][17]. Penggunaan *steel connector* pada

sambungan balok-kolom pracetak dapat menghasilkan perilaku daktail melalui deformasi inelastis pada komponen baja serta memengaruhi kapasitas deformasi dan disipasi energi sambungan [17]. Penelitian lain mengenai sambungan pracetak dengan pelat baja juga menunjukkan bahwa konfigurasi dan dimensi pelat berpengaruh terhadap respons histeresis dan daktilitas sambungan [18].



Gambar 2. Model pengangkuran beton pracetak

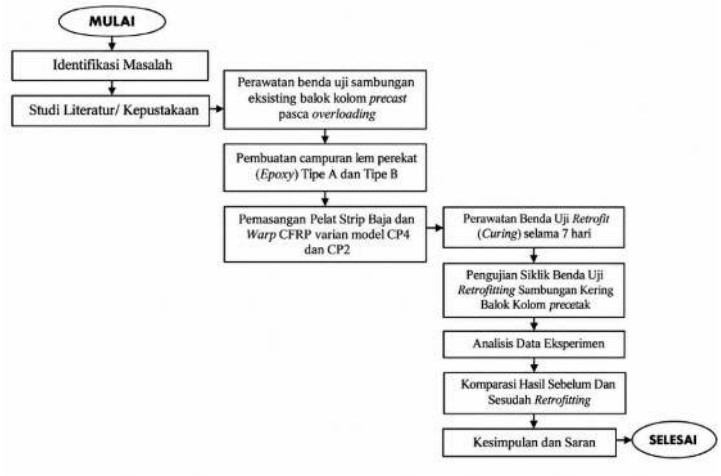
2.4 Perkuatan Komponen Struktur

Perkuatan struktur (*structural strengthening*) merupakan metode rehabilitasi yang bertujuan meningkatkan kapasitas dan kinerja struktur beton bertulang akibat degradasi, perubahan fungsi, kesalahan desain, maupun beban ekstrem. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), khususnya *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, tahan korosi, dan relatif mudah diaplikasikan. CFRP dapat digunakan dalam bentuk *Sheet*, *plate/laminate*, maupun *Near Surface Mounted* (NSM) dan telah diterapkan untuk meningkatkan kapasitas serta kemampuan deformasi elemen beton [19][20]. Pada sambungan balok-kolom, efektivitas perkuatan CFRP dipengaruhi oleh konfigurasi pemasangan dan meliputi mekanisme transfer gaya. Beberapa metode retrofit sambungan balok-kolom beton bertulang terhadap pembebanan siklik yang telah dikaji meliputi CFRP *laminate*, kombinasi CFRP *laminate*–CFRP *Sheet*, pelat baja, serta tulangan tambahan yang dikombinasikan dengan CFRP *Sheet*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi perkuatan memengaruhi respons siklik, kapasitas, daktilitas, dan mekanisme kerusakan sambungan [21]. Pada sambungan pracetak, Xian Rong dkk. [17] menunjukkan bahwa *steel connector* dapat mengalami deformasi inelastis dan berkontribusi terhadap perilaku daktail sambungan. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa kombinasi pelat baja dan CFRP dapat digunakan pada retrofit beam-column joint untuk meningkatkan kapasitas dan kemampuan deformasi sambungan. Penelitian terdahulu tersebut menunjukkan bahwa CFRP dan komponen baja memiliki potensi yang berbeda dalam meningkatkan kinerja sambungan, tetapi penerapan kombinasi pelat baja-CFRP pada sambungan balok-kolom pracetak tipe *dry-joint* masih terbatas. Khususnya, kajian yang memfokuskan kombinasi tersebut terhadap daktilitas dan mekanisme kegagalan akibat pembebanan siklik masih perlu dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis daktilitas dan mekanisme kegagalan sambungan balok-kolom pracetak dengan perkuatan kombinasi pelat baja-CFRP.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Secara keseluruhan, tahapan pelaksanaan penelitian ini dilakukan secara sistematis mulai dari tahap persiapan hingga penarikan kesimpulan. Rangkaian tahapan penelitian tersebut disajikan secara ringkas dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.

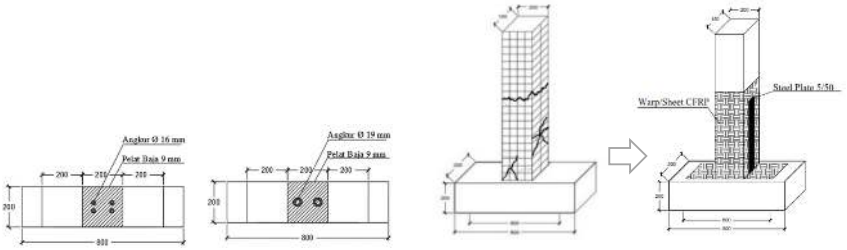


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3.2 Detail Benda Uji

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan melakukan *retrofitting* pada benda uji eksisting berupa sambungan balok-kolom pracetak metode sambungan kering seperti pada Gambar 4. Benda uji balok pracetak memiliki dimensi penampang 150x200 mm dengan panjang 1000 mm, sedangkan kolom berdimensi 200x200 mm dengan panjang 800 mm. Mutu beton (f'c) yang digunakan untuk kedua elemen adalah 25 MPa, dengan tegangan leleh baja tulangan (fy) sebesar 366,94 MPa. Penulangan utama menggunakan baja berdiameter 12 mm dan sengkang berdiameter 8 mm. Konfigurasi sambungan menggunakan pelat baja penahan setebal 9 mm dengan variasi penggunaan 2 dan 4 buah angkur berdiameter 16 mm dan 19 mm. Benda uji eksisting telah melewati tahap pembebanan quasi-siklik hingga mencapai kondisi *overloading*, yang ditandai dengan penurunan kapasitas beban sebesar 20% setelah melewati titik puncak (*peak*). Untuk model variasi benda dijabarkan sebagaimana berikut:

a. Model CP4: Perkuatan kombinasi pelat baja dan CFRP *Sheet* dengan menggunakan 4 buah angkur pada area sambungan.
b. Model CP2: Perkuatan kombinasi pelat baja dan CFRP *Sheet* dengan menggunakan 2 buah angkur pada area sambungan



Gambar 4. Model *Dry-joint* Balok-Kolom dan Model *Retrofitting*

3.3 Spesifikasi Material Perkuatan

Material utama yang diaplikasikan untuk perkuatan sambungan meliputi lembaran *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dan pelat baja strip. Perekatan material menggunakan resin epoxy dua komponen (dasar dan *hardener*). Lem perekat (*epoxy*) meresap ke dalam serat FRP sehingga memberikan efek ikat yang kuat. Semua metode dan pengaplikasian epoxy dirangkum dalam [22]. Detail spesifikasi disajikan pada Tabel 1. Sebelum tahap perkuatan, seluruh benda uji eksisting telah melewati tahap pengujian pembebanan quasi-siklik hingga mencapai fase kegagalan (*overloading*). Riwayat kerusakan awal secara kuantitatif ditetapkan berdasarkan kurva histeresis penelitian sebelumnya, di mana benda uji eksisting E4 (4 angkur) dibebani hingga mencapai beban puncak rata-rata sebesar 14,79 kN, sedangkan benda uji E2 (2 angkur) mencapai 12,51 kN. Pembebanan terus dilanjutkan hingga mengalami penurunan

kekuatan sebesar 20% dari beban puncak, yakni menjadi sekitar 11,83 kN untuk varian E4 dan 10,01 kN untuk varian E2. Pada fase ini, terbentuk retak lentur dominan yang diikuti dengan pembukaan celah (*gap opening*) pada antarmuka pertemuan sambungan balok-kolom. Sebagai respons atas kerusakan tersebut, sistem perkuatan diaplikasikan dengan menempatkan pelat baja melintasi area retakan yang memiliki panjang penyaluran (*development length*) sejauh 500 mm secara vertikal pada penampang kolom. Area pelat baja tersebut kemudian dibungkus menggunakan lilitan CFRP *Sheet* secara parsial yang dikhususkan pada zona kritis sambungan (pertemuan balok dan kolom) untuk memberikan gaya kekangan (*confinement*) yang terpusat tanpa menyelubungi keseluruhan elemen struktur.

Tabel 1. Spesifikasi Material Perkuatan dan Perekat

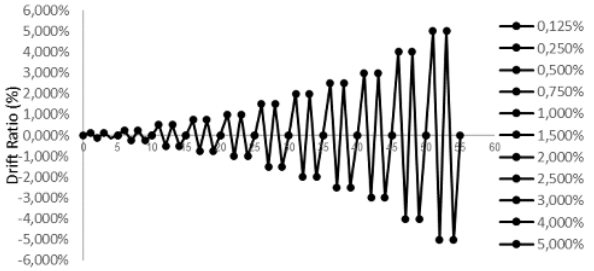
Jenis Material	Merk / Tipe	Fungsi dan Spesifikasi
FRP Lembaran	SikaWrap 231C	Berbentuk *CFRP Wrap* untuk menahan gaya geser sambungan.
Pelat Baja Strip	Baja Strip 5x50 mm	Dipasang pada area balok sebagai penahan gaya lentur dan menambah kekakuan.
Epoxy Tipe A:B	SikaDur 30	Perekat pelat baja strip (rasio komponen A dan B = 3:1)
Epoxy Tipe A:B	SikaDur 330	Perekat CFRP *Sheet* (rasio komponen A dan B = 4:1).
Grouting	Sika-grout	Penambal retakan/pecahan beton eksisting pasca-kerusakan.

3.4 Prosedur Pengujian

Setelah proses perkuatan selesai, benda uji menjalani masa perawatan (*curing*) selama 7 hari untuk memastikan material perekat epoxy mencapai kekuatan lekat yang optimal. Pengujian kemudian dilakukan menggunakan aktuator hidrolik berkapasitas tinggi dengan memberikan beban lateral quasi-siklik guna mensimulasikan gaya gempa. Pengujian mengadopsi standar ACI374.1 [23] dengan mengaplikasikan beban quasi-siklik berdasarkan kontrol simpangan (*displacement control*). Pembebanan dimulai dengan drift ratio 0,125%, kemudian dinaikkan menjadi 0,25% dan 0,50%, lalu dengan interval 0,25% hingga 1,00%, interval 0,50% hingga 3,00%, dan interval 1,00% hingga 5,00%. Setiap tahap terdiri atas dua siklus. Detail siklus dan pola pembebanan lateral tersebut disajikan pada Tabel 2 dan diilustrasikan pada Gambar 5.

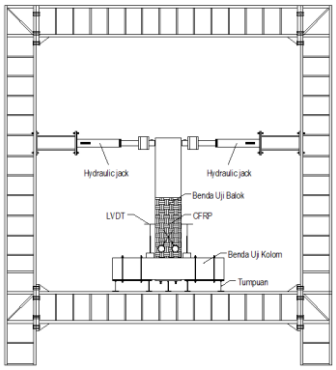
Tabel 2. Siklus pembebanan *quasi-siklik*

Tahap	Simpangan (mm)		*Drift Ratio*
	(+)	(-)	(%)
1	1,13	1,13	0,125%
2	2,25	2,25	0,25%
3	4,50	4,50	0,50%
4	6,75	6,75	0,75%
5	9,00	9,00	1,00%
6	13,50	13,50	1,50%
7	18,00	18,00	2,00%
8	22,50	22,50	2,50%
9	27,00	27,00	3,00%
10	36,00	36,00	4,00%
11	45,00	45,00	5,00%



Gambar 5. Pola Pembebanan

Guna memperoleh data deformasi presisi, permukaan spesimen dipetakan dengan grid berukuran 50 mm x 50 mm. Titik acuan ditetapkan pada perpotongan as kolom dan permukaan balok. Berdasarkan acuan tersebut, aktuator hidrolik dan LVDT lateral diletakkan sejajar pada ketinggian 850 mm. Dua dial gauge dipasang menyilang di area joint dengan pusat persilangan setinggi 300 mm. Dua LVDT vertikal menumpu pada balok berjarak 150 mm dari as kolom (Gambar 6). Data dari load cell dan LVDT direkam otomatis melalui data logger. Karena menggunakan spesimen eksisting tanpa strain gauge, evaluasi difokuskan pada analisis visual serta pendekatan analitis daktilitas secant dan tangensial yang diturunkan dari respons global struktur pada pengujian quasi-siklik balok-kolom pracetak ini.:



Gambar 6. *Setting* alat pembebanan quasi-siklik

3.5 Analisa Data

Kurva *backbone* (hubungan beban–simpangan) dibentuk dari titik-titik puncak siklus pada arah beban yang memberikan Pmaks lebih besar (sisi positif untuk CP4 dan sisi negatif untuk CP2). Nilai daktilitas *secant* dan tangensial ditentukan dengan mempertimbangkan dua kondisi beban acuan berikut, yaitu Py1 dan Pmaks seperti yang dijelaskan di bawah ini:

a) Beban pada belokan pertama kurva (leleh pertama)

Titik ini adalah belokan pertama pada kurva *backbone*, yaitu pada simpangan 18 mm (drift ratio 2%), tempat kurva mulai berubah dari perilaku hampir linier menuju perilaku nonlinier. Karena benda uji tidak dilengkapi *strain gauge*, titik ini ditentukan dari bentuk kurva *backbone*, bukan dari regangan. Beban pada titik ini disebut beban leleh pertama (Py1) dan dipakai sebagai beban acuan untuk menentukan perpindahan leleh ekuivalen (Δy).

b) Beban maksimum (Pmaks) pada ujung kurva

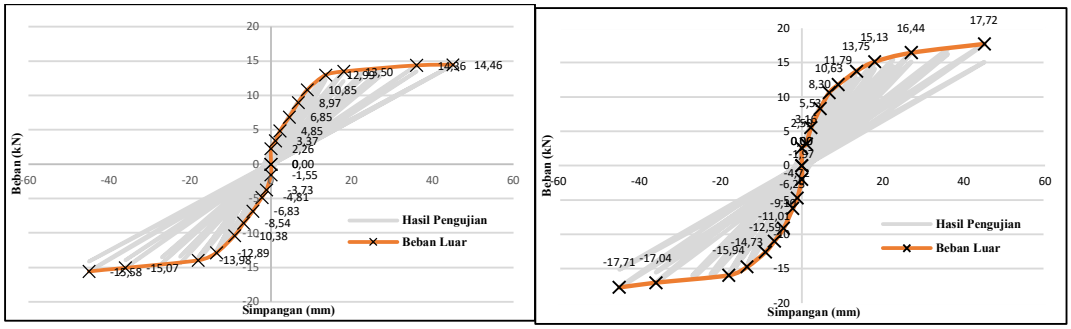
Titik ini adalah beban maksimum (Pmaks) pada ujung kurva *backbone*, yaitu pada simpangan 45 mm. Pada kedua benda uji, kuat lateral belum turun hingga 0,8 Pmaks ketika pengujian dihentikan, sehingga Δu diambil pada simpangan maksimum yang dicapai (45 mm) dan μΔ yang dilaporkan merupakan batas bawah (konservatif).

Perpindahan leleh ekuivalen (Δy) pada kedua kondisi acuan (Py1 dan Pmaks) ditentukan secara geometris dari kurva *backbone* dengan dua idealisasi (Gambar 1). Pada metode s*ecant* (Gambar 1d), garis ditarik dari titik awal melalui titik backbone pada 0,75 dari beban acuan (0,75 Py1 atau 0,75 Pmaks; diperoleh dengan interpolasi linear antar titik puncak siklus), diperpanjang hingga memotong garis horizontal beban acuan tersebut, kemudian titik potongnya diproyeksikan ke sumbu simpangan. Pada metode tangensial (Gambar 1b), garis kekakuan awal ditarik dari titik awal melalui titik backbone pertama (1,13 mm), diperpanjang hingga memotong garis horizontal beban acuan, kemudian diproyeksikan dengan cara yang sama. Perpindahan ultimit (Δu) didefinisikan sebagai simpangan pada cabang pasca-puncak saat beban turun 20% dari Pmaks. Pada pengujian ini, beban belum turun hingga nilai tersebut ketika pengujian dihentikan pada simpangan 45 mm akibat gap pada sambungan, debonding, dan angkur mulai kendor, sehingga cabang pasca-puncak tidak terekam. Karena itu Δu benda uji retrofit diambil sebesar 45 mm dan μΔ yang dilaporkan merupakan batas bawah. Δu benda uji eksisting diambil sesuai hasil pengujian, yaitu pada kondisi pengujian yang berbeda, sehingga perbandingannya bersifat indikatif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kurva Histeresis

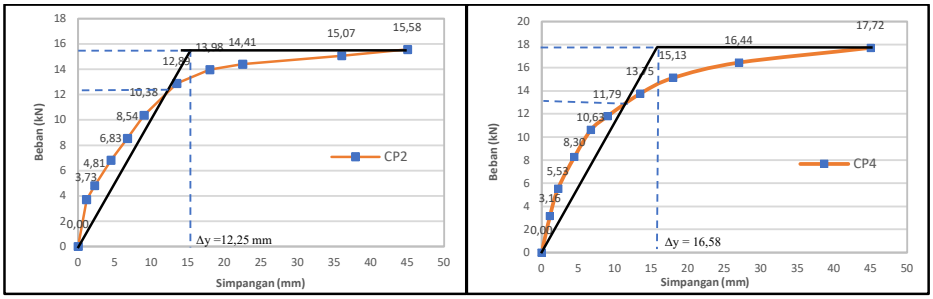
Pengujian sambungan balok–kolom beton pracetak dengan sistem sambungan kering yang diperkuat menggunakan kombinasi material Pelat Baja dan CFRP *Sheet* dilakukan melalui metode pembebanan quasi-siklik untuk mengevaluasi sifat, karakteristik, serta respons struktur akibat beban berulang secara mendalam. Data primer hasil pengujian yang berupa hubungan dinamis antara beban (*load*) dan simpangan (*displacement*) kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk kurva histeresis. Selanjutnya, kurva histeresis tersebut dijadikan dasar utama dalam analisis perilaku struktur dengan membentuk kurva *backbone* atau kurva selubung. Pembentukan kurva ini dilakukan dengan menghubungkan titik-titik respons puncak yang terjadi pada setiap siklus, baik pada arah pembebanan positif maupun negatif, sehingga memberikan gambaran visual mengenai degradasi kekuatan dan stabilitas struktur. Analisis kurva *backbone* sangat krusial untuk menentukan parameter leleh, kapasitas ultimit, serta tingkat daktilitas sambungan pasca-perkuatan. Adapun hasil plot kurva histeresis dan kurva *backbone* yang merepresentasikan perilaku mekanis benda uji dari seluruh rangkaian pengujian tersebut disajikan secara detail pada hasil Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Hasil kurva histeresis benda uji retrofit 4 angkur (kiri) 2 angkur (kanan)

Berdasarkan gambaran kurva histeresis yang dihasilkan dari pengujian beban quasi-siklik pada Gambar 7, terlihat adanya perbedaan karakteristik visual pada mekanisme respon struktural yang dipengaruhi secara langsung oleh efektivitas sistem perkuatan pada area sambungan. Bentuk dan tingkat kepadatan kurva tersebut mencerminkan kemampuan sistem kombinasi dalam perkuatan struktur sambungan kering balok-kolom untuk mendistribusikan tegangan secara merata, sekaligus mempertahankan integritas komponen selama proses pembebanan berulang berlangsung. Selain itu, luasan serta kelandaian kurva histeresis yang terbentuk mengindikasikan tingkat kapasitas disipasi energi gempa dan ketahanan spesimen uji terhadap fenomena degradasi kekakuan lateral. Guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perbandingan performa antar variabel antara kondisi eksisting dan objek retrofit, rincian hasil pengujian kuantitatif, nilai parameter daktilitas, serta analisis mendalam terkait perilaku mekanis pasca-leleh struktur tersebut akan dijabarkan secara sistematis pada poin-poin penjelasan berikut ini:

a) Daktilitas Secant acuan Py1 dan Pmaks



Gambar 8. Kurva *Backbone* Daktilitas *Secant* benda uji retrofit 4 angkur (kiri) 2 angkur (kanan)

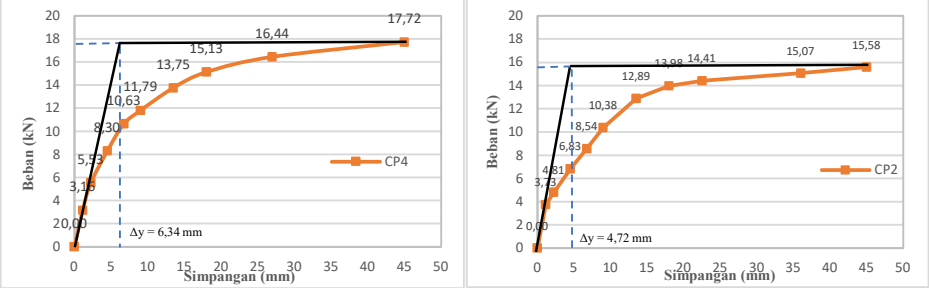
Tabel 3. Daktilitas *secant* dengan acuan Py1 dan Pmaks (Δu = 45 mm)

Daktilitas *Secant*, Acuan Py1				
Benda Uji	Py1 (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	15,13	45,00	10,84	4,15
CP2	13,98	45,00	12,25	3,67
Daktilitas *Secant*, Acuan Pmaks				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	16,58	2,71
CP2	15,58	45,00	15,12	2,98

Hasil analisis daktilitas s*ecant* pada Tabel 3 menunjukkan bahwa konfigurasi CP4 (empat angkur) memberikan μΔ lebih tinggi daripada CP2 pada acuan Py1 (4,15 berbanding 3,67), sedangkan pada acuan Pmaks CP2 sedikit lebih tinggi daripada CP4 (2,98 berbanding 2,71). Δu yang dipakai adalah 45 mm untuk kedua benda uji (simpangan akhir pengujian), sehingga nilai μΔ merupakan batas bawah. Nilai daktilitas s*ecant* ini merepresentasikan rasio simpangan ultimit terhadap simpangan leleh ekuivalen, yang menjadi indikator kemampuan struktur menyerap energi tanpa kehilangan stabilitas kekakuan secara mendadak. Urutan antara CP4 dan CP2 berbeda menurut acuan beban yang dipakai dan selisihnya relatif kecil, dengan satu benda uji untuk tiap variasi. Oleh karena itu pengaruh jumlah angkur terhadap distribusi gaya dan daktilitas masih bersifat indikatif dan perlu diverifikasi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak.

Peningkatan kapasitas deformasi pasca-leleh tersebut turut didorong oleh mekanisme kekangan (*confinement*) dari CFRP *Sheet* yang bekerja sinergis dengan pelat baja eksternal dalam menahan ekspansi lateral beton. Pada fase mendekati beban puncak, CFRP membantu membatasi perambatan retak diagonal dan menunda kegagalan lekat (*debonding*) pada pelat baja, sehingga struktur mampu mengembangkan kapasitas deformasi pasca-leleh yang lebih besar. Meskipun demikian, *debonding*, gap pada sambungan, dan angkur yang mulai kendor tetap terjadi menjelang simpangan 45 mm, sehingga pengujian dihentikan pada simpangan tersebut.

b) Daktilitas Tangensial acuan Py1 dan Pmaks



Gambar 9. Kurva *Backbone* Daktilitas Tangensial benda uji retrofit 4 angkur (kiri) 2 angkur (kanan)

Tabel 4. Daktilitas tangensial dengan acuan Py1 dan Pmaks (Δu = 45 mm)

Daktilitas Tangensial, Acuan Py1				
Benda Uji	Py1 (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	15,13	45,00	5,41	8,32
CP2	13,98	45,00	4,24	10,62
Daktilitas Tangensial, Acuan Pmaks				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	6,34	7,10
CP2	15,58	45,00	4,72	9,53

Analisis daktilitas tangensial melengkapi evaluasi s*ecant* dengan idealisasi perpindahan leleh yang berbeda, sehingga nilai indeksnya tidak dapat dibandingkan langsung dengan hasil s*ecant*. Pada acuan Py1, CP2 mencatat μΔ lebih tinggi daripada CP4 (10,62 berbanding 8,32),

dan pola yang sama terlihat pada acuan Pmaks (9,53 untuk CP2 dan 7,10 untuk CP4; Tabel 4; Gambar 9). Perbedaan ini berasal dari perpindahan leleh tangensial CP2 yang lebih kecil (Δy = 4,72 mm dibandingkan 6,34 mm untuk CP4 pada acuan Pmaks) dengan Δu yang sama (45 mm). Sebaliknya, CP4 mencapai Pmaks yang lebih tinggi (17,72 kN dibandingkan 15,58 kN). Nilai Δy tangensial sensitif terhadap cara penarikan garis kekakuan awal, sedangkan kurva backbone sudah melengkung sejak titik pertama, sehingga selisih antar-konfigurasi perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Karena benda uji belum dilengkapi pengukuran regangan lokal dan hanya terdapat satu benda uji untuk tiap variasi, peran jumlah angkur masih bersifat indikatif. Pada kedua konfigurasi, μΔ tangensial retrofit pada acuan Pmaks (7,10–9,53) jauh melampaui kondisi eksisting (3,00–3,46; Tabel 6), sehingga efektivitas sistem perkuatan tetap terkonfirmasi.

4.2 Perbandingan Nilai Daktilitas Retrofitting dan Eksisting

Untuk merangkum evaluasi parameter inelastik sebelumnya, hasil perhitungan dari masing-masing model dibandingkan secara langsung dengan kondisi awalnya (eksisting). Perbandingan ini bertujuan untuk membuktikan secara nyata seberapa efektif sistem perkuatan kombinasi dalam mendongkrak kinerja sambungan pracetak. Melalui penyajian data ini, peran jumlah angkur dapat terlihat lebih jelas, terutama pengaruhnya dalam menahan beban lateral dan menekan laju penurunan kekakuan struktur. Perbandingan dilakukan pada acuan Pmaks, dan Δu benda uji eksisting serta retrofit diambil pada kondisi pengujian yang berbeda (Tabel 5 dan 6). Secara terperinci, kapasitas deformasi struktur secara keseluruhan (daktilitas s*ecant*) dirangkum pada Tabel 5, sedangkan tingkat stabilitas struktur setelah melewati fase leleh (daktilitas tangensial) disajikan pada Tabel 6 berikut:

Tabel 5. Perbandingan Daktilitas Eksisting dan *Retrofit*ting Metode *Secant* di titik P Maks

Metode *Secant*				
Benda Uji Eksisting				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
E4	14,79	18,00	11,94	1,51
E2	12,51	27,00	23,25	1,16
Benda Uji *Retrofit*				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	16,58	2,71
CP2	15,58	45,00	15,12	2,98
E4 – CP4	Rasio Kenaikan eksisting dan pasca retrofit (%)			80,10
E2 – CP2				156,26

Tabel 6. Perbandingan Daktilitas Eksisting dan *Retrofit*ting Metode Tangensial di titik P Maks

Metode Tangensial				
Benda Uji Eksisting				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
E4	14,79	18,00	5,20	3,46
E2	12,51	27,00	9,00	3,00
Benda Uji *Retrofit*				
Benda Uji	Pmaks (kN)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μΔ)
CP4	17,72	45,00	6,34	7,10
CP2	15,58	45,00	4,72	9,53
E4 – CP4	Rasio Kenaikan eksisting dan pasca retrofit (%)			105,12
E2 – CP2				217,65

Perbandingan pada Tabel 5 menegaskan efektivitas perkuatan kombinasi pelat baja–CFRP Sheet dalam meningkatkan daktilitas sambungan dibandingkan kondisi eksisting. Secara nilai mutlak, CP2 mencatat μΔ *secant* tertinggi (2,98), sedangkan peningkatan terhadap eksisting mencapai 156,26% untuk CP2 dan 80,10% untuk CP4, karena kondisi awal E2 paling rendah (μΔ = 1,16). Pola ini menunjukkan bahwa perkuatan meningkatkan daktilitas sambungan pada kedua konfigurasi, terlepas dari jumlah angkur yang digunakan.

Pada Tabel 6, metode tangensial memberikan pola yang sejalan: CP2 mencatat μΔ tertinggi (9,53 berbanding 7,10 untuk CP4) dan rasio kenaikan tertinggi (217,65% berbanding 105,12% untuk CP4) terhadap kondisi eksistingnya. Konsistensi pola antara kedua metode ini memperkuat temuan, meskipun besaran indeksnya berbeda karena perbedaan idealisasi titik leleh. Karena selisih antar-konfigurasi tidak besar, pengujian belum dilengkapi strain gauge, dan tiap variasi hanya terdiri atas satu benda uji, kontribusi jumlah angkur terhadap distribusi gaya lokal masih bersifat indikatif dan perlu diverifikasi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak. Secara keseluruhan, kedua metode memvalidasi efektivitas retrofit dalam meningkatkan daktilitas sambungan pracetak terhadap ancaman beban seismik; nilai μΔ retrofit merupakan batas bawah karena pengujian dihentikan pada simpangan 45 mm.

4.3 Pola Retak dan Mekanisme Keruntuhan



Gambar 10. Pola Retak Benda Uji *Retrofit* CP4

Analisis visual terhadap pola retak pada benda uji CP4 (Gambar 10) menunjukkan bahwa kegagalan didominasi oleh retak lentur yang muncul pada area balok tepat di atas batas lembaran CFRP *Sheet*. Fenomena pembukaan celah (*gap opening*) pada permukaan sambungan balok-kolom mulai teramati saat simpangan mencapai 18 mm atau pada tahap ke-7 (drift ratio 2%). Pembukaan celah, debonding, dan angkur yang mulai kendor berkembang hingga simpangan 45 mm (drift ratio 5%), yang menjadi alasan pengujian dihentikan. Pola retak ini mengindikasikan bahwa sistem perkuatan kombinasi dapat menggeser konsentrasi tegangan dari pusat sambungan ke area balok, sehingga integritas inti sambungan tetap terjaga. Mekanisme ini menunjukkan keberhasilan metode *retrofit* dalam meningkatkan kinerja struktural sambungan kering melalui pendistribusian regangan yang lebih merata.



Gambar 11. Pola Retak Benda Uji *Retrofit* CP2

Berbeda dengan benda uji 4 buah angkur, mekanisme keruntuhan benda uji dengan 2 buah angkur yang diperkuat CFRP terjadi karena retakan dan terkelupasnya CFRP Sheet pada permukaan sambungan balok dan kolom (Gambar 11). Retakan pada permukaan bermula pada tahap ke-5 dengan *drift ratio* 1% (simpangan 9 mm) dan terus berlanjut hingga pengujian dihentikan. Saat memasuki tahap ke-7 dengan *drift ratio* 2% (simpangan 18 mm), CFRP Sheet mulai terkelupas dan angkur penahan sambungan mulai longgar akibat beban tekan dan tarik yang diterima benda uji secara terus-menerus selama pengujian. Kerusakan ini berkembang hingga simpangan 45 mm (*drift ratio* 5%), yaitu saat pengujian dihentikan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian eksperimental, retrofit kombinasi pelat baja dan CFRP Sheet terbukti efektif memulihkan kapasitas beban lateral dan meningkatkan daktilitas sambungan balok-kolom pracetak dibandingkan kondisi eksisting. Konfigurasi empat angkur (CP4) memberikan kapasitas beban tertinggi (Pmaks = 17,72 kN), sedangkan dua angkur (CP2) memberikan μΔ s*ecant* tertinggi pada acuan Pmaks (2,98 berbanding 2,71) dan peningkatan tertinggi terhadap kondisi eksisting (156,26%; CP4: 80,10%). Daktilitas tangensial menunjukkan pola serupa (CP2 = 9,53; CP4 = 7,10). Nilai μΔ merupakan batas bawah karena Δu diambil pada simpangan akhir 45 mm, saat pengujian dihentikan akibat gap pada sambungan, debonding, dan angkur mulai kendor sebelum beban turun 20% dari Pmaks. Hasil ini masih merupakan indikasi awal karena jumlah benda uji terbatas dan tidak ada *strain gauge*. Penelitian lanjutan disarankan mencakup pemodelan *Finite Element Analysis* untuk distribusi tegangan antar variasi angkur, evaluasi kekakuan dan disipasi energi per siklus, serta ketahanan jangka panjang perekat epoksi terhadap degradasi lingkungan dan beban siklik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Tarabia, S. Allam, E. Etman, and M. Aboelhassan, "Behavior of precast reinforced concrete beam-column external connections under cyclic loading," *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 185, p. PII-27-PII-43, 2019, doi: 10.2495/ERES190031.

[2] M. Rahmanpour, M. Zarrin, H. Afshin, P. Shakor, D. N. Qader, and F. Aslani, "Experimental study on repairing and retrofitting lightweight concrete external beam-column joint under cyclic loading using steel plates and CFRP," *Structures*, vol. 87, p. 111760, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111760.

[3] Y. Zhong, F. Xiong, J. Chen, A. Deng, W. Chen, and X. Zhu, "Experimental study on a novel dry connection for a precast concrete beam-to-column joint," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 17, 2019, doi: 10.3390/su11174543.

[4] S. Tayfur, N. Alver, E. Türk, M. Menteşoğlu, and E. Ercan, "Failure Behavior of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beam–Column Joints under Reversed-Cyclic Lateral Loading: Mechanical and Acoustic Emission Observations," *Structural Engineering International*, vol. 34, pp. 1–12, Feb. 2023, doi: 10.1080/10168664.2022.2164237.

[5] R. S. Prakash and N. Parthasarathi, "Experimental and numerical study on FRP-rehabilitated RC beam-column joints at high temperature with artificial neural network," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–26, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-16055-9.

[6] M. Assad, R. A. Hawileh, and J. A. Abdalla, "Flexural strengthening of reinforced concrete beams with CFRP laminates and spike anchors," *Composites Part C: Open Access*, vol. 13, no. February, p. 100443, 2024, doi: 10.1016/j.jcomc.2024.100443.

[7] A. Ebanesar, H. Gladston, E. Noroozinejad Farsangi, and S. V. Sharma, "Strengthening of RC beam-column joints using steel plate with shear connectors: Experimental investigation," *Structures*, vol. 35, no. August 2021, pp. 1138–1150, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.042.

[8] R. Al-Rousan *et al.*, "Cyclic Behavior of FRP Strengthened Beam-Column Joints under Various Concrete Damage Levels," *Construction Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 38–61, 2023, doi: 10.3390/constrmater3010004.

[9] S. Singhal, A. Chourasia, and Y. Kajale, "Cyclic behaviour of precast reinforced concrete beam-columns connected with headed bars," *Journal of Building Engineering*, vol. 42, p. 103078, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103078.

[10] T. Paulay and M. J. N. Priestly, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. 2009. doi: 10.1002/9780470172841.

[11] Park.R, "Ductility Evaluation From Laboratory and Analytical Testing," *Procedings og ninth world conference on earthquake engineering*, 1988.

[12] J. H. Ling, Y. T. Lim, and E. Jusli, "Methods to Determine Ductility of Structural Members: A Review," *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 9, no. May, pp. 181–194, 2023, doi: 10.22146/jcef.6631.

[13] G. M. Calvi, N. M. J. Priestley, and M. J. Kowalsky, "Displacement Based Seismic Design of Structures - MJN Priestley high resolution.pdf," *5th New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*, 2008.

[14] K. N. Cahyani, A. Soehardjono, and A. Wibowo, "Ductility of Precast Concrete Beam-Column Connection Using Dry Connection Method," 2019.

[15] American Concrete Institute, "ACI 355.1R-91 : Anchorage to Concrete," 1991.

[16] K. Y. C. *et al.*, "Seismic-Resistant Precast Concrete Structures: State of the Art," *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, no. 4, p. 3118001, Apr. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001972.

[17] Xian Rong, Hongwei Yang, and Jianxin Zhang, "Experimental study of precast beam-to-column joints with steel connectors under cyclic loading," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 13, pp. 2822–2834, Oct. 2020, doi: 10.1177/1369433220920448.

[18] H. Ashad, "Experimental Study of Precast Beam Joints Using Steel Plates in Beam-Column Joints Due to Cyclic Loading," *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, vol. 8, no. 2, pp. 137–148, 2023, doi: 10.51557/pt_jiit.v8i1.2096.

[19] "440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," *440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, 2017, doi: 10.14359/51700867.

[20] K. Heiza, A. Nabil, N. N. Meleka, and T. M, "Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques," *Sixth International Conference on Nano-Technology in Construction*, no. March, pp. 1–24, 2022.

[21] a K. Balasubramaniana, N. Lakshmananb, C. Antony Jeyasehare,G. Ramesha and B.H. Bharatkumar*, "EVALUATION OF PERFORMANCE OF RETROFITTED REINFORCED CONCRETE BEAM COLUMN JOINTS– A SIMPLIFIED MODEL K.," vol. 13, no. 6, pp. 783–803, 2012.

[22] ACI Committee 503, "ACI 503R-93. Use of epoxy compounds with concrete (Reapproved)," *American Concrete Institute (ACI)*, vol. 93, pp. 1–28, 1998.

[23] ACI374.1, "ACI CODE-374.1-05(19): Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary (Reapproved 2019)," *American Concrete Institute*, pp. 1–9, 2019.