

PR
PR

Publikasi Riset



TEKSI
TEKSI

rientasi Teknik Sipil

Pemodelan Kapasitas Tampung Sungai Tapin dengan Aplikasi HEC-RAS 5.0.7

Dwi Surya Saputri, Noordiah Helda.

Analisis Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Proyek Konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado

Adrian Philip Marthinus, Jermias Tjakra, Grace Yoyce Malingkas.

Pemodelan Tinggi Muka Air Berdasarkan Debit Aktual Dan Rancangan Pada Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk Menggunakan HEC-RAS

Muhammad Rizky Firdaus, Nilna Amal.

Pemanfaatan QGIS dalam Penentuan Rute dan Lokasi Halte Optimal Feeder Wirawiri FD09 di Kawasan Kampus Unesa Ketintang

Irfan Zhain, Prathita Muti'a Yuzaeva.

Perencanaan Geometrik Dan Analisis Kebutuhan Material Badan Jalan Rel Double Track Pada Lintasan KM 309+260 – KM 302+600 Divre IV

Tanjung Karang

Febriyadi, Arif Setyaji, Exaudi, Nur Anisa Mardhotila, Muhammad Riski Arif, Nurwanda Sari, Siti Maulidina, Hadyan Arifin Bustam.

The Effect of Variations in Fly Ash and Metakaolin Binders on The Compressive Strength of Geopolymer Mortar

Aufa Fitria, Tira Roesdiana.

Analisis Kepuasan Penghuni terhadap Fasilitas Umum dan Kondisi Fisik Bangunan Menggunakan Metode Importance Performance Analysis (IPA)

Andreas Septian Danuwarta, Rizki Astri Apriliani, Wisnu Abiarto Nugroho.

Analisis Perubahan Dinamika Garis Pantai Watu Gedek dan Muara Gede Kabupaten Lumajang Menggunakan Data Satelit Multi-Temporal dan Analisis Spasial

Anna Rosytha, Zainal Abidin, Arifien Nursandah.
Hubungan Antara Liquid Limit dan Sudut Geser Fully Softened dan Residual pada High Plasticity Stiff Overconsolidated Clay

Muhammad Nafi' Mulyono, Kresno Wikan Sadono, Sri Prabadiyani Retno Wardani.

Kajian Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) pada Perusahaan Konstruksi Bangunan

Maulidya Octaviani Bustamin, Wisnu Abiarto Nugroho, Petrus Para Mite.

Penghilangan Ampicillin Resistance Genes dengan Karbon Aktif pada Pengolahan Air Bersih
Sri Anggreini, Ade Jaya Saputra, Syaiba Suci Ramadhini.

Analisis Skala Prioritas Pembangunan Rumah Pasca Bencana Hidrometeorologi Kabupaten Aceh Barat

Ade Dwinta, Hilma Erliana, Cut Liliiza Yusra, Raina Parmitalia Dinda, Intan Wulan Sari.

Analisis Jaringan Distribusi Air Bersih Menggunakan Epanet 2.2 di Perumahan Lobunta Kelurahan Banjarwangunan

Helenadya Greennov, Awliya Tribhuwana.

Analisis Faktor dan Indikator yang Mempengaruhi Penurunan Human Error pada Proyek Konstruksi
Cynthia Fadhila Diantoro Putri, Mohammad Arif Rohman

Published by
Jurusan Teknik Sipil
Gedung A4
Fakultas Teknik
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Ketintang
Jalan Ketintang, Surabaya
60231

Website
<https://journal.unesa.ac.id/index.php/proteksi>

Email
jurnalproteksi@unesa.ac.id

Contact
087849941119

Kata Pengantar

Jurnal Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (PROTEKSI) Universitas Negeri Surabaya (UNESA) ini telah mendapatkan e-ISSN dari LIPI dan Proteksi saat ini menduduki peringkat SINTA 4 (Indeks Sains dan Teknologi) [ranked SINTA 4 \(Science and Technology Index\) published in Director Decree SK no. 72/E/KPT/2024](#). Proteksi menerbitkan Volume 8, Nomor 1, Juni 2026. Penerbitan jurnal ini dimaksudkan untuk memberikan informasi ilmiah mengenai perkembangan ilmu teknik sipil yang meliputi hasil penelitian, kajian pustaka dan telaah kritis pada kasus-kasus ilmu ketekniksipil. Pada Volume 8, Nomor 1 ini menerbitkan 14 judul artikel ilmiah yang kami sajikan. Penulis pada Volume 8, Nomor 1 ini merupakan sivitas akademika dari dalam maupun luar Universitas Negeri Surabaya. Redaksi mengucapkan terima kasih kepada para mitra bestari dan penyunting yang telah menyediakan waktunya untuk menyunting naskah artikel yang dimuat. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada para penulis dan semua pihak yang telah membantu hingga terbitnya jurnal ini. Kami sangat mengharapkan peran aktif semua pihak sebagai penulis artikel, baik dari lingkungan akademisi maupun praktisi dan lain-lain khususnya bidang teknik sipil. Semoga materi yang disampaikan dapat berguna bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan secara umum. Kritik dan saran sangat redaksi harapkan untuk perbaikan penerbitan berikutnya. Terimakasih dan Selamat Membaca.

Volume 8, No. 1, Juni 2026

E-ISSN : 2655-6421

Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (PROTEKSI)

Pimpinan Redaksi :

Nurul Jannah Asid, S.T., M.T. (UNESA)

Editor :

Danayanti Azmi Dewi Nusantara S.T., M.T. (UNESA)
Hendro Sutowijoyo, S.T., M.T. (Universitas Narotama)
Meity Wulandari, S.T., M.T. (UNESA)
Audinda Virsa Leinia, S.T., M.Sc. (UNESA)
Anita Intan Nura Diana, S.T., M.T. (UNIJA)
Siti Talitha Rachma, S.T., M.Sc. (UNESA)
Maulidya Octaviani Bustamin, S.T., M.MT. (UNITOMO)
Irfan Prasetyo Loekito, S.T., M.Sc. (UNESA)

Mitra Bestari :

Prof. Dr. Ir. Erina Rahmadyanti, S.T., M.T. (UNESA)
Ir. Arie Wardhono, S.T., M.MT., M.T., Ph.D. (UNESA)
Dr. Ir. Indra Komara, S.T., M.T. (ITATS)
Dr. Eng. Ir. Mohammad Ferdaus Noor Aulady, S.T., M.T., M.Sc., IPM., ASEAN Eng (ITATS)
Ir. Purwo Mahardi, S.T., M.Sc. (UNESA)
Rizki Astri Aprilianai, S.T., M.T. (UNITOMO)
Dwi Desharyanto, S.T., M.T. (Universitas Wiraraja)
Ach. Desmantri Rahmanto, S.T., M.T. (Universitas Wiraraja)
Dr. Adhi Muhtadi, S.T., S.E., M.Si., M.T. (Universitas Narotama)
Safrin Zuraidah, S.T., M.T. (UNITOMO)
Rezky Susmono Karuru, S.T., M.T. (Universitas Tadulako)
Desy Ratna Arthaningtyas, S.T., M.T. (UNESA)
Ir. Adita Utami, S.T., M.T. (Universitas Pertamina)

Alamat Penerbit :

Jurusan Teknik Sipil
Gedung A4, Fakultas Teknik
Universitas Negeri Surabaya
Telp. (031) 8280009

Website: <https://journal.unesa.ac.id/index.php/proteksi/index>

Email : jurnalproteksi@unesa.ac.id

Frekuensi terbit setahun 2 kali (Juni dan Desember)

Jurnal Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil merupakan suatu wadah karya tulis ilmiah para dosen dan praktisi yang bergerak dibidang teknik sipil meliputi struktur, lingkungan, rekayasa jalan, rekayasa tanah, rekayasa air, manajemen kontruksi sebagai perwujudan tri darma perguruan tinggi.

DAFTAR ISI

PROTEKSI

Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil

Halaman Judul.....	i
Kata Pengantar.....	ii
Susunan Dewan Redaksi.....	iii
Daftar Isi.....	iv
Pemodelan Kapasitas Tampungan Sungai Tapin dengan Aplikasi HEC-RAS 5.0.7	
Dwi Surya Saputri, Noordiah Helda.....	1-11
Analisis Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Proyek Konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado	
Adrian Philip Marthinus, Jermias Tjakra, Grace Yoyce Malingkas.....	12-16
Pemodelan Tinggi Muka Air Berdasarkan Debit Aktual Dan Rancangan Pada Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk Menggunakan HEC-RAS	
Muhammad Rizky Firdaus, Nilna Amal	17-25
Pemanfaatan QGIS dalam Penentuan Rute dan Lokasi Halte Optimal Feeder Wirawiri FD09 di Kawasan Kampus Unesa Ketintang	
Irfan Zhain, Prathita Muti'a Yuzaeva.....	26-33
Perencanaan Geometrik Dan Analisis Kebutuhan Material Badan Jalan Rel Double Track Pada Lintasan KM 309+260 – KM 302+600 Divre IV Tanjung Karang	
Febriyadi, Arif Setyaji, Exaudi, Nur Anisa Mardhotila, Muhammad Riski Arif, Nurwanda Sari, Siti Maulidina, Hadyan Arifin Bustam	34-44
<i>The Effect of Variations in Fly Ash and Metakaolin Binders on The Compressive Strength of Geopolymer Mortar</i>	
Aufa Fitria, Tira Roesdiana.....	45-49
Analisis Kepuasan Penghuni terhadap Fasilitas Umum dan Kondisi Fisik Bangunan Menggunakan Metode <i>Importance Performance Analysis (IPA)</i>	
Andreas Septian Danuwarta, Rizki Astri Apriliani, Wisnu Abiarto Nugroho.....	50-58
Analisis Perubahan Dinamika Garis Pantai Watu Gedek dan Muara Gede Kabupaten Lumajang Menggunakan Data Satelit Multi-Temporal dan Analisis Spasial	
Anna Rosytha, Zainal Abidin, Arifien Nursandah.....	59-69
Hubungan Antara <i>Liquid Limit</i> dan Sudut Geser <i>Fully Softened</i> dan Residual pada <i>High Plasticity Stiff Overconsolidated Clay</i>	
Muhammad Nafi' Mulyono, Kresno Wikan Sadono, Sri Prabadiyani Retno Wardani.....	70-78
Kajian Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) pada Perusahaan Konsruksi Bangunan	
Maulidya Octaviani Bustamin, Wisnu Abiarto Nugroho, Petrus Para Mite.....	79-85
Penghilangan Ampicillin Resistance Genes dengan Karbon Aktif pada Pengolahan Air Bersih	
Sri Anggreini, Ade Jaya Saputra, Syaiba Suci Ramadhini.....	86-93

Analisis Skala Prioritas Pembangunan Rumah Pasca Bencana Hidrometeorologi Kabupaten Aceh Barat

Ade Dwinta, Hilma Erliana, Cut Liliiza Yusra, Raina Parmitalia Dinda, Intan Wulan Sari.....94-104

Analisis Jaringan Distribusi Air Bersih Menggunakan Epanet 2.2 di Perumahan Lobunta Kelurahan Banjarwangunan

Helenadya Greenov, Awliya Tribhuwana.....105-112

Analisis Faktor dan Indikator yang Mempengaruhi Penurunan Human Error pada Proyek Konstruksi

Cynthia Fadhila Diantoro Putri, Mohammad Arif Rohman.....113-18

Pemodelan Kapasitas Tampungan Sungai Tapin dengan Aplikasi HEC-RAS 5.0.7

The Modelling Capacity of Tapin River using HEC-RAS 5.0.7 Application

Dwi Surya Saputri¹, Noordiah Helda²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat, Jln. A. Yani Banjarbaru.
Email: noordiah.helda@ulm.ac.id

Abstrak

Banjir merupakan peristiwa yang terjadi ketika air menggenangi lahan yang kering atau ketika aliran sungai melebihi kapasitas tampungnya. Menurut Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), pada tahun 2021 terjadi banjir di Tapin yang dipicu oleh curah hujan dengan intensitas yang tinggi. Untuk menganalisis kapasitas tampung Sungai Tapin, perlu adanya pemodelan hidraulika berupa aplikasi HEC-RAS untuk memberi gambaran terhadap kemampuan sungai dalam menampung banjir, terutama setelah pembangunan Bendungan Tapin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besar debit banjir rencana berdasarkan analisis hidraulika menggunakan aplikasi HEC-RAS 5.0.7. Pada penelitian ini digunakan data sekunder, yaitu data Digital Elevation Model (DEM), data hujan satelit Global Precipitation Measurement (GPM), dan data Cross Section. Metode yang digunakan untuk analisis perhitungan yaitu metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu. Berdasarkan hasil analisis hidraulika, debit maksimum banjir yang terjadi sebelum pembangunan Bendungan Tapin pada kala ulang 2 sampai 100 tahun adalah sebesar 202,07 m³/s sampai 520,13 m³/s. Sedangkan debit maksimum banjir yang terjadi setelah pembangunan Bendungan Tapin pada kala ulang 2 sampai 100 tahun adalah sebesar 147,15 m³/s sampai 316,69 m³/s. Berdasarkan hasil penelitian, pembangunan Bendungan Tapin terbukti mampu menurunkan debit banjir sebesar 27% s.d. 50%, sehingga kapasitas tampungan Sungai Tapin masih mampu mengakomodasi debit banjir rencana hingga kala ulang 100 tahun.

Kata Kunci: Debit Banjir; Kapasitas Tampungan; Data Satelit GPM; HEC-RAS 5.0.7.

Abstract

Flooding occurs when water inundates dry land or when a river's flow exceeds its capacity. According to the National Disaster Management Agency (BNPB), flooding in Tapin in 2021 was triggered by heavy rainfall. To analyze the river's capacity to handle floods, it is necessary to use hydraulic modeling through the HEC-RAS application, which provides insight into the river's ability to accommodate floods, particularly after the construction of the Tapin Dam. This study aims to analyze the flood discharge volume based on hydraulic analysis using HEC-RAS 5.0.7. The study uses secondary data, including Digital Elevation Model (DEM) data, Global Precipitation Measurement (GPM) satellite rainfall data, and Cross Section data. The method used for the calculation analysis is the Nakayasu Synthetic Unit Hydrograph method. Based on the hydraulic analysis results, the maximum flood discharge before the Tapin Dam construction, for return periods ranging from 2 to 100 years, is between 202.07 m³/s and 520.13 m³/s. Meanwhile, after the construction of the Tapin Dam, the maximum flood discharge for the same return periods is between 147.15 m³/s and 316.69 m³/s. Based on the research findings, the operation of Tapin Dam has been proven to reduce peak flood discharge by approximately 27%–50%, indicating that the storage capacity of the Tapin River remains adequate to accommodate the design flood discharge for return periods of up to 100 years.

Keywords: Flood Discharge; Storage Capacity; GPM Satellite Data; and HEC-RAS 5.0.7.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Menurut Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), pada tahun 2021 terjadi banjir di Tapin yang dipicu oleh curah hujan dengan intensitas

yang tinggi. Hampir semua kabupaten di Provinsi Kalimantan Selatan di saat musim hujan, terutama di Kabupaten Tapin, menghadapi situasi yang sangat memprihatinkan. Dampaknya sangat serius, karena rumah warga dan fasilitas umum menjadi terendam, sehingga mengakibatkan permasalahan besar bagi

kehidupan masyarakat sehari-hari (Azmi & Helda, 2021). Menyusul kejadian hujan di bulan Maret 2024, sejumlah ruas jalan di Kabupaten Tapin digenangi air dengan kedalaman berkisar 3 sampai 7 cm setelah terjadi hujan. Kondisi genangan air tersebut tidak bertahan lama sehingga kondisi sungai di Tapin masih aman terhadap banjir (Tabri, 2024). Dapat disimpulkan bahwa pembangunan Bendungan Tapin memiliki kemampuan dalam pengendalian banjir.

Hubungan antara banjir dan kapasitas tampungan sungai sangat erat, karena kapasitas tampungan sungai merupakan salah satu faktor yang memengaruhi potensi terjadinya banjir. Kapasitas tampungan sungai mengacu pada kemampuan sungai untuk menampung aliran air. Untuk menganalisis kapasitas tampung Sungai Tapin, diperlukan pemodelan hidraulik guna memberikan gambaran tentang kemampuan sungai dalam mengatasi banjir, khususnya setelah pembangunan Bendungan Tapin. Pada tahun 2021, Azmi dan Helda telah meneliti dampak Bendungan Tapin terhadap debit banjir di hilir Sungai Tapin sebelum bendungan tersebut beroperasi secara optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kota Rantau tetap aman dari banjir. Hingga kini, setelah tiga tahun beroperasi, Bendungan Tapin masih mampu mengendalikan banjir.

Analisis kapasitas tampungan sungai perlu ditinjau dari aspek hidrologi dan hidraulika sehingga dapat menjadi bahan evaluasi penampang sungai apabila debit banjir melebihi kapasitas sungai tersebut, terutama untuk kejadian hujan ekstrem di masa yang akan datang. Dengan pertimbangan di atas, perlu dilakukan penelitian tentang analisis kapasitas tampungan Sungai Tapin setelah pembangunan Bendungan Tapin dengan menggunakan software HEC-RAS sebagai bahan evaluasi untuk optimalisasi pengendalian banjir.

Sungai

Sungai merupakan jalur pengaliran air dari sumber mata air hingga ke muaranya, yang memiliki batas secara geografis (Peraturan Pemerintah Nomor 35 Tahun 1991). Sungai memiliki berbagai jenis kemiringan mulai dari curam di hulu, landai, hingga relatif datar di muara. Kecepatan aliran air di hulu cenderung lebih cepat dan menurun secara perlahan hingga menjadi lebih lambat di daerah hilir. Sungai merupakan tempat terkumpulnya air dari sekitarnya yang mengalir menuju tempat yang lebih rendah. Daerah yang mensuplai air ke sungai dikenal sebagai daerah tangkapan air atau daerah penyangga. Tingkat suplai air dari daerah penyangga dipengaruhi oleh aktivitas dan perilaku masyarakat yang tinggal di daerah tersebut (Wardhana, 2001).

Terdapat dua tipe sungai menurut Reid dan Wood (1976) dalam Soegianto (2010) sebagai berikut.

- Sungai *permanen* merupakan sungai yang mendapatkan air dari sumber air tanah.
- Sungai *intermittent* merupakan sungai yang mendapatkan air terutama dari *surface runoff*. Karena *run-off bersifat musiman*, sungai akan berisi air pada musim hujan.

Kapasitas Tampungan

Kapasitas tampungan sungai adalah kemampuan sungai untuk menampung dan mengalirkan air. Jika aliran air yang ada melebihi kapasitas tampungan sungai, maka akan terjadi luapan di sungai tersebut. Luapan ini dapat menyebabkan genangan air di daerah sekitar sungai. Besarnya kapasitas tampungan sungai sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrolis sungai itu sendiri. Beberapa faktor yang memiliki pengaruh besar terhadap kapasitas sungai yaitu kemiringan, dimensi penampang, dan kekasaran dinding sungai (Leda, 2024).

Curah Hujan

Menurut Sunardi dkk (2023), curah hujan merupakan jumlah presipitasi yang jatuh pada suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu dan dinyatakan dalam satuan milimeter (mm). Besarnya curah hujan diukur sebagai tinggi lapisan air yang terbentuk pada permukaan datar dengan asumsi tidak terjadi kehilangan air akibat evaporasi, limpasan permukaan, maupun infiltrasi ke dalam tanah. Pengukuran curah hujan umumnya dilakukan secara periodik, baik harian maupun dalam interval waktu tertentu sesuai kebutuhan analisis.

Pemeriksaan Data Hujan Satelit

Sebelum dilakukan analisis, suatu seri data hujan dari pos penakar hujan maupun dari data satelit perlu diperiksa terlebih dahulu kelayakannya melalui beberapa buah uji, mencakup uji pencilan (*outlier test*), uji kecenderungan (*trend test*), uji kestabilan terhadap rata-rata dan simpangan baku (*stability test to mean and variance*) dan uji kemandirian (*independency test*). Secara terperinci, proses dari masing-masing uji tersebut adalah sebagai berikut.

1. Uji Outlier

Outlier, dalam bahasa Indonesia dikenal dengan terminologi 'pencilan', merupakan nilai suatu datum dari suatu seri data yang memiliki nilai sangat berbeda dengan datum-datum lainnya, baik terlalu besar maupun terlalu kecil. Meskipun hujan merupakan kejadian yang stokastik, normalisasi besaran nilai suatu hujan dapat didekati secara statistik. Kemungkinan kesalahan pencatatan hujan,

baik oleh manusia maupun alat pencatat hujan, dapat menyebabkan kesalahan pada tahap analisis. Oleh karena itu, suatu seri data hujan perlu diperiksa terlebih dahulu batas outlier-nya.

Persamaan frekuensi untuk mendeteksi adanya *outlier* adalah:

$$10^{Y_{H,L}} = \bar{y} \pm K_n S_y \dots\dots\dots (1)$$

keterangan:

$Y_{H,L}$: Batas (*threshold*) dari *outlier* atas dan bawah, dalam logaritma

\bar{y} : Nilai rata-rata dari data dalam bentuk logaritma

K_n : Konstanta uji *outlier*, merupakan fungsi dari jumlah data sampel

S_y : Simpangan baku dari data dalam bentuk logaritma

2. Uji Trend

Sebelum digunakan untuk analisis, suatu seri data hidrologi harus dipastikan terlebih dahulu bebas dari adanya *tren* (kecenderungan), yaitu korelasi antara urutan data dengan peningkatan (atau penurunan) besarnya nilai data tersebut. Secara umum, uji *tren* dilakukan untuk periode seluruh data yang ada, walaupun dapat juga dilakukan hanya pada periode data yang dicurigai terdapat *tren*.

Untuk mengetahui adanya *tren*, digunakan metode *Spearman's rank-correlation*. Metode ini didasarkan pada *Spearman rank-correlation coefficient*, R_{SP} , yang didefinisikan sebagai:

$$R_{SP} = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^n D_i^2}{n \times (n^2 - 1)} \dots\dots\dots (2)$$

$$D_i = Kx_i - Ky_i \dots\dots\dots (3)$$

dengan:

N : jumlah data sampel

D_i : perbedaan antara rank variabel x_i , Kx_i , (data diurutkan dari kecil ke besar) dan rank berdasarkan nomor urut data asli, Ky_i .

3. Uji Stabilitas (*Mean and Variance*)

Uji kestabilan ini dilakukan untuk mengetahui apakah data stasioner atau tidak. Secara umum, terdapat dua uji yang dilakukan pada varian dan mean berupa uji F dan t, di mana uji F pada distribusi rasio variannya mengikuti distribusi normal dan mengindikasikan stabilitas dari varian. Uji F digambarkan dengan persamaan:

$$F_t = \frac{\sigma^2_1}{\sigma^2_2} = \frac{s^2_1}{s^2_2} \dots\dots\dots (4)$$

keterangan:

F_t : stabilitas yang indikasinya dapat diterima

σ : deviasi standar skala populasi

s : deviasi standar skala sampel

4. Uji Independensi

Untuk melakukan pemeriksaan independensi dari seri data digunakan *serial-correlation coefficient*. Apabila seri data adalah acak sempurna, maka fungsi auto-correlation dari populasi akan sama dengan nol untuk semua lag, kecuali nol. Untuk pemeriksaan independensi ini cukup dilakukan perhitungan menggunakan *serial correlation coefficient*, yaitu korelasi antara data pengamatan yang berdekatan dalam seri data.

Menurut Box dan Jenkins (1970), *serial-correlation coefficient*, r_1 , adalah:

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}) \times (x_{i+1} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (5)$$

keterangan:

n : banyaknya data

x : nilai rata-rata sub-sampel

Intensitas Curah Hujan

Intensitas hujan merupakan intensitas jumlah hujan yang dinyatakan dalam tinggi hujan atau volume hujan tiap satuan waktu, intensitas hujan dapat di hitung dengan rumus Mononobe seperti berikut (Harahap & Harahap, 2021) :

$$I_t = \left[\frac{R_{24}}{24} \right] \left[\frac{24}{t} \right]^{2/3} \dots\dots\dots (6)$$

dimana:

I : Intensitas curah hujan (mm/jam).

R_{24} : Curah hujan maksimal dalam 24 Jam (mm).

t : Durasi (lamanya) curah hujan (menit) atau (jam).

Hubungan Hujan Limpasan

Hujan yang turun di suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) akan mengalir menuju sungai dan membentuk aliran sungai. Hubungan antara curah hujan dan debit aliran dipengaruhi oleh karakteristik DAS tersebut. Dalam suatu DAS, terdapat banyak stasiun pengukuran hujan yang memungkinkan pengukuran dalam jangka waktu yang panjang. Sebaliknya, pengukuran debit aliran umumnya lebih terbatas, baik dari segi jumlah stasiun maupun durasi pencatatan, sehingga data curah hujan biasanya lebih banyak dibandingkan dengan data debit aliran. Oleh karena itu, diperlukan suatu persamaan yang dapat menghubungkan debit aliran dengan curah hujan

berdasarkan data yang diperoleh secara bersamaan. Dengan adanya persamaan ini, debit aliran dapat diperkirakan hanya dengan menggunakan data hujan, bahkan ketika pengukuran debit tidak tersedia. Hubungan antara hujan dan limpasan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Q = b (P - P_a) \dots\dots\dots (7)$$

dimana:

- Q = kedalaman limpasan
- P = kedalaman hujan
- P_a = kedalaman hujan di bawah nilai tersebut tidak terjadi limpasan
- b = kemiringan garis

Jika curah hujan (P) lebih kecil dari P_a, maka seluruh hujan yang turun akan hilang di DAS melalui proses infiltrasi, evapotranspirasi, dan tampungan permukaan. Limpasan baru akan terjadi ketika curah hujan (P) melebihi P_a. Dalam persamaan tersebut, nilai b dan P_a diperoleh melalui analisis regresi berdasarkan data curah hujan dan limpasan. Meskipun penerapan persamaan ini memiliki keterbatasan, metode ini tetap dapat digunakan untuk memperkirakan limpasan bulanan atau tahunan, terutama pada DAS yang tidak memiliki data pengukuran debit (Triatmodjo, 2010).

Analisa Hidrologi

Analisis hidrologi merupakan analisis bagian awal dalam perancangan bangunan hidraulika. Informasi maupun besaran yang didapat dalam analisis hidrologi adalah masukan yang penting dalam analisis selanjutnya (Harahap & Harahap, 2021). Perhitungan analisis hidrologi dilakukan untuk mendapatkan nilai dari parameter-parameter hidrologi seperti intensitas hujan, hujan rancangan dan analisis debit banjir rencana yang digunakan dalam perencanaan saluran atau bangunan air lainnya.

Analisis Frekuensi

Analisis frekuensi atau disebut distribusi frekuensi digunakan untuk memperoleh probabilitas besaran curah hujan rencana dalam beberapa periode ulang. Dasar perhitungan distribusi frekuensi adalah parameter yang berkaitan dengan analisis data yang meliputi rata-rata, simpangan baku, koefisien *skewness* (kecondongan atau kemiringan) dan koefisien variasi (Harahap & Harahap, 2021).

Dalam analisis frekuensi, hasil yang diperoleh tergantung pada kualitas dan panjang data. Semakin sedikit data yang tersedia, semakin besar penyimpangan yang terjadi. Dalam ilmu statistik dikenal beberapa macam distribusi frekuensi yang

memiliki sifat khas masing-masing seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Statistik yang Menentukan Distribusi

Distribusi	Persyaratan
Normal	C _s = 0 C _k = 3
Log Normal	C _s ≈ C _v ³ + 3C _v C _k ≈ C _v ⁸ + 6 C _v ⁶ + 15C _v ⁴ + 16C _v ² + 3
Gumbel	C _s = 1,14 C _k = 5,4
Log Pearson III	Selain nilai di atas

Sumber: (Triatmodjo, 2008)

Jenis distribusi yang banyak digunakan dalam bidang hidrologi adalah:

1. Metode Gumbel

Untuk menghitung curah hujan rencana dengan metode distribusi Gumbel digunakan Persamaan 8.

$$X_T = \bar{X} + \frac{S}{S_n} (Y_t - Y_n) \dots\dots\dots (8)$$

dimana:

- X_T = Hujan rencana periode T tahun
- \bar{X} = nilai rata-rata curah hujan (mm)
- S = simpangan baku
- S_n = simpangan baku jumlah data (n)
- Y_t = nilai reduksi dari variabel periode T tahun
- Y_n = nilai reduksi variabel dari data (n)

2. Metode Log Pearson Tipe III

Metode Log Pearson Tipe III apabila digambarkan pada kertas peluang logaritmik akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan Persamaan 9.

$$\text{Log } X_T = \text{Log } \bar{X} + K.S \dots\dots\dots (9)$$

dimana:

- Log X_T = nilai log Hujan rencana periode T tahun
- Log \bar{X} = nilai log rata-rata curah hujan (mm)
- K = faktor probabilitas
- S = simpangan baku

3. Metode Log Normal

Metode Log Normal apabila digambarkan pada kertas peluang logaritmik akan merupakan persamaan garis lurus, sehingga dapat dinyatakan sebagai model matematik dengan Persamaan 10.

$$\text{Log } X_T = \text{Log } \bar{X} + K_T.S \dots\dots\dots (10)$$

dimana:

- X_T = Hujan rencana periode T tahun
- $\text{Log } \bar{X}$ = nilai log rata-rata curah hujan (mm)
- K_T = faktor probabilitas
- S = simpangan baku

Pengujian Kecocokan Distribusi

Hal ini dimaksudkan untuk menentukan apakah persamaan distribusi peluang yang telah dipilih dapat mewakili distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Ada dua jenis uji keselarasan, yaitu uji keselarasan *Chi-Square* dan *Smirnov-Kolmogorov*. Pada tes ini biasanya yang diamati adalah nilai hasil perhitungan yang diharapkan (Soewarno, 1995).

1. Uji Keselarasan *Chi-Square*

Prinsip metode ini didasarkan pada jumlah pengamatan yang diharapkan pada pembagian kelas dan ditentukan berdasarkan jumlah data pengamatan yang terbaca di dalam kelas tersebut atau dengan membandingkan nilai chi-square (f^2) dengan nilai chi-square kritis (f^2_{cr}). Digunakan rumus (Soewarno, 1995):

$$X^2 = \sum \frac{(E_i - O_i)^2}{E_i} \dots\dots\dots (11)$$

$$K = 1 + 3,3 \text{ Log } n \dots\dots\dots (12)$$

$$dk = K - R - 1 \dots\dots\dots (13)$$

dimana:

- X^2 = harga chi square
- O_i = jumlah nilai pengamatan pada sub kelompok ke-1
- E_i = jumlah nilai teoritis pada sub kelompok ke-1
- K = jumlah sub kelompok
- R = 2 untuk distribusi normal dan binominal, 1 untuk distribusi poisson
- dk = derajat kepercayaan

2. Uji Keselarasan *Smirnov Kolmogorov*

Pengujian kecocokan sebaran dengan metode ini dilakukan dengan membandingkan probabilitas untuk tiap variabel dari distribusi empiris dan teoritis, didapat perbedaan (Δ) tertentu. Perbedaan maksimum yang dihitung (Δ_{maks}) dibandingkan dengan perbedaan kritis (Δ_{cr}) untuk suatu derajat nyata dan banyaknya variat tertentu, maka sebaran sesuai jika ($\Delta_{maks} < \Delta_{cr}$). Rumus yang dipakai (Soewarno, 1995):

$$\Delta_{max} = P_E(x) - P_t(x) \dots\dots\dots (14)$$

$$P_E(x) = \frac{1}{M+1} \dots\dots\dots (15)$$

$$f_t = \frac{x_i - \bar{X}}{s} \dots\dots\dots (16)$$

$$P_t(x) = 1 - Z \dots\dots\dots (17)$$

dimana:

- $P_E(X)$ = Posisi data x menurut sebaran empiris
- $P_t(X)$ = Posisi data x menurut sebaran teoritis
- M = nomor urut data
- X_i = curah hujan ke i
- \bar{X} = curah hujan rata-rata
- S = simpangan baku
- Z = Luas daerah di bawah kurva normal

Hidrograf Aliran

Hidrograf aliran memiliki peran penting dalam mengatasi permasalahan hidrologi, terutama dalam pengelolaan banjir dan pemenuhan kebutuhan air. Hidrograf ini menunjukkan distribusi aliran sungai sepanjang waktu dan mencerminkan karakteristik Daerah Aliran Sungai (DAS). Hubungan antara hidrograf aliran dan kondisi fisik DAS memberikan gambaran tentang bagaimana DAS merespons pola hujan yang terjadi. Dalam kajian hidrologi, respons DAS ini dikenal sebagai hidrograf satuan (*unit hydrograph*), yaitu hidrograf yang dapat merepresentasikan karakteristik khas suatu DAS (Nugroho, 2001).

Hidrograf Satuan

Hidrograf satuan sering digunakan untuk mengubah curah hujan menjadi debit aliran. Hidrograf ini juga dikenal sebagai hidrograf limpasan langsung, yaitu hidrograf yang merepresentasikan aliran tanpa aliran dasar di hilir DAS akibat hujan efektif sebesar 1 mm yang merata di seluruh permukaan DAS dengan intensitas tetap dalam durasi tertentu. Metode hidrograf satuan umum digunakan dalam perancangan banjir karena relatif sederhana, tidak memerlukan data yang kompleks, dan dapat memberikan estimasi yang cukup akurat.

Beberapa asumsi dalam penggunaan hidrograf satuan meliputi:

1. Hujan efektif memiliki intensitas konstan selama durasi hujan efektif. Oleh karena itu, hujan yang digunakan dalam analisis biasanya hujan dengan durasi singkat.
2. Hujan efektif tersebar merata di seluruh DAS. Dengan asumsi ini, hidrograf satuan kurang sesuai untuk DAS yang sangat luas, karena sulit mendapatkan distribusi hujan yang merata. Untuk mengatasinya, DAS yang luas dapat dibagi menjadi beberapa sub-DAS, di mana masing-masing dianalisis menggunakan hidrograf satuan (Triatmodjo, 2010).

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS)

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu adalah salah satu metode yang banyak digunakan

dalam analisis debit banjir rencana (Yuliana, 2023). Metode ini digunakan untuk menentukan hidrograf banjir rancangan pada suatu DAS, sehingga dapat membantu dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air, terutama dalam mitigasi risiko banjir.

Data Satelit GPM

Satelit GPM (*Global Precipitation Measurement*) merupakan sebuah satelit yang diluncurkan bersama oleh NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) dan JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) pada tahun 2014. Satelit ini merupakan kelanjutan dari satelit TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) yang dapat merekam data curah hujan 2-4 jam setiap harinya, dan memiliki cakupan area yang lebih luas daripada TRMM (Wahyuni dkk., 2020).

Analisa Hidraulika

Analisis hidraulika dilakukan untuk mensimulasikan kondisi aliran sungai berdasarkan debit banjir rencana hasil analisis hidrologi. Hasil simulasi digunakan untuk memperoleh profil muka air, mengevaluasi kapasitas penampang sungai, serta mengidentifikasi potensi luapan banjir pada berbagai kala ulang debit (Mustamin, 2024). Dalam analisis hidraulika ini digunakan *software* pemodelan HEC-RAS.

ArcGIS

ArcGIS merupakan perangkat lunak yang cukup terkenal dan mampu dalam melaksanakan tugas Sistem Informasi Geografis (SIG). Selain bisa digunakan untuk membuat peta, ArcGIS juga mampu memodelkan serta mengelola data spasial secara efektif. Salah satu contoh data yang mampu dianalisis oleh ArcGIS adalah data DEM yang menggambarkan geometri permukaan bumi seperti batasan dan luas area DAS, jaringan sungai, tata guna lahan, serta jenis tanahnya (Wijayanto & Helda, 2022).

Menurut Abbas (2023), perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) yang digunakan untuk mengelola, mengolah dan menganalisis data spasial ini mampu mendukung deliniasi Daerah Aliran Sungai (DAS), identifikasi jaringan sungai, serta pengolahan data Digital Elevation Model (DEM) yang diperlukan dalam analisis hidrologi.

HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*) merupakan sebuah *software* yang digunakan untuk menganalisis beberapa masalah hidraulika, seperti mengestimasi banjir, menilai kapasitas sungai, memantau kedalaman

sungai di titik-titik tertentu, dan memilih lokasi untuk pembangunan struktur keairan, seperti stasiun pemompaan atau bendungan (Wijayanto & Helda, 2022). Program HEC-RAS menurut Bachri dkk. (2021) berfokus pada analisis hidrolis, data penampang sungai dibutuhkan untuk menentukan kapasitas tampungan sungai dan data hidrologi sebagai data input aliran.

HEC-RAS digunakan untuk menghitung elevasi permukaan air pada lokasi tampang melintang (*cross-section*) yang dianalisis sepanjang sungai atau aliran berdasarkan nilai aliran tertentu. Perhitungan profil dilakukan mulai dari *cross-section* yang telah diperkirakan, kemudian dilanjutkan ke arah hilir untuk aliran superkritikal atau ke arah hulu untuk aliran subkritikal (Aprizal & Meris, 2020).

Perangkat lunak HEC-RAS mampu memodelkan baik aliran permanen (*steady flow*) maupun aliran tak permanen (*unsteady flow*). Dalam penelitian ini, digunakan pemodelan unsteady flow karena hasilnya dapat dimanfaatkan untuk melakukan penelusuran banjir (*flood routing*) di sungai.

Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah yang akan dianalisis adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil analisis debit banjir rencana Sungai Tapin berdasarkan analisis hidrologi metode HSS Nakayasu?
2. Bagaimana kondisi tampungan sungai sebelum pembangunan Bendungan Tapin dengan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS?
3. Bagaimana kondisi tampungan sungai setelah pembangunan Bendungan Tapin dengan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS?

Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang diuraikan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis besar debit banjir rencana yang harus ditampung oleh Sungai Tapin berdasarkan analisis hidrologi metode HSS Nakayasu.
2. Menganalisis kondisi tampungan Sungai Tapin sebelum pembangunan Bendungan Tapin dengan bantuan perangkat lunak HEC-RAS.
3. Menganalisis kondisi tampungan Sungai Tapin setelah pembangunan Bendungan Tapin dengan bantuan perangkat lunak HEC-RAS.

Batasan Masalah

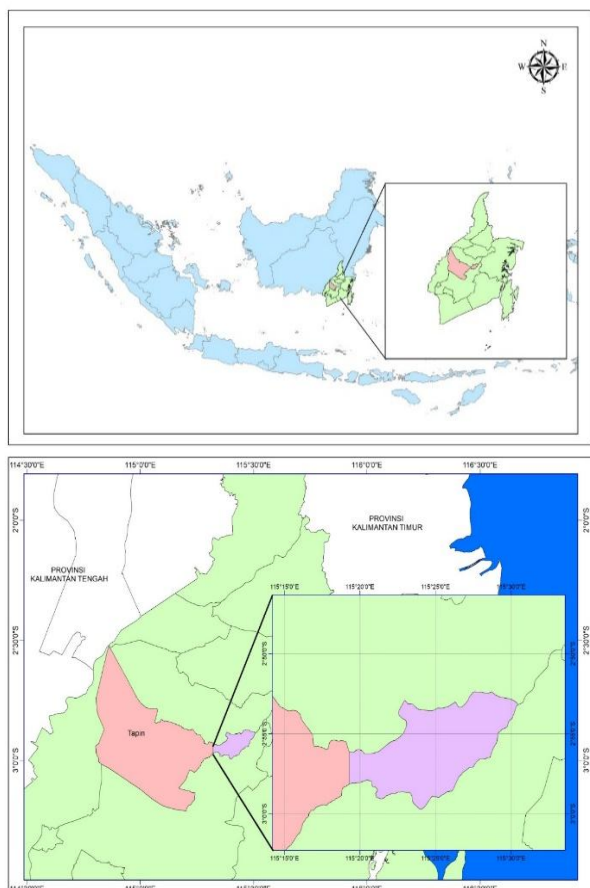
Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini akan dilakukan pada Sub-DAS Sungai Tapin di Kecamatan Piani, Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan.
2. Analisis hidrologi untuk debit banjir rancangan menggunakan HSS Nakayasu.
3. Pemodelan hidraulika menggunakan HEC-RAS 5.0.7.
4. Data curah hujan yang digunakan adalah data satelit GPM periode 2004-2023, dikarenakan ketersediaan data lapangan yang tidak memadai.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Sub DAS Sungai Tapin di Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan dengan luas Sub DAS 140,90 km² dan panjang sungai penelitian 37,48 km yang mengalir melewati Desa Linuh, Desa Bungur, Desa Kalumpang, Desa Timbung, dan Desa Marampiau. Secara geografis, lokasi sungai sub-DAS berada pada 2°32'43" dan 3°00'43" LS hingga 114°46'13" dan 115°30'33" BT seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Sumber: Hasil pengolahan menggunakan ArcGIS berdasarkan data DEM nasional dan batas administrasi Kabupaten Tapin (2024).

Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Pengumpulan Data

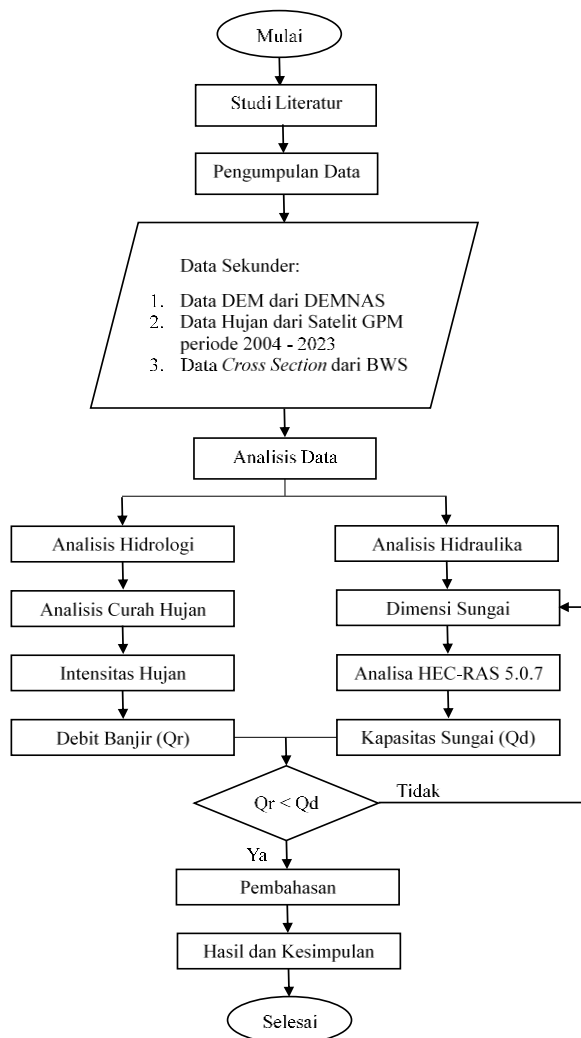
Dalam penelitian ini, langkah pertama yang dilakukan yaitu menyiapkan dan mengumpulkan data sekunder, yaitu data hujan satelit GPM selama periode 2004-2023, data *Digital Elevation Model* (DEM) bersumber dari situs DEM Nasional, dan data *cross section* dari BWS Kalimantan III sebanyak 29 *cross section*. Setelah semua data diperoleh, kemudian diproses dengan menganalisis ArcGIS dan melalui perhitungan analisis frekuensi untuk perhitungan hujan. Data yang telah diolah akan dimasukkan dalam perhitungan debit yang direncanakan menggunakan HEC-RAS 5.0.7.

Pengolahan dan Analisis Data

Penelitian ini meliputi pengolahan dan analisis data berupa data curah hujan satelit GPM, analisis frekuensi, uji kesesuaian distribusi probabilitas, dan analisis debit banjir rencana.

Bagan Alir Penelitian

Pada penelitian ini, tahapan yang dikerjakan digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Curah Hujan

Data curah hujan pada penelitian ini menggunakan data satelit GPM harian maksimum per tahun (2004-2023). Dikarenakan ketiadaan data curah hujan lapangan, pada penelitian ini digunakan data satelit GPM grid 99, 107, dan 108 yang mencakup area Sub-DAS Bendungan Tapin.

Uji Data Curah Hujan Satelit

Sebelum dilakukan analisis, suatu seri data hujan satelit perlu diperiksa terlebih dahulu kelayakannya melalui beberapa uji, mencakup uji pencilan (*outlier test*), uji kecenderungan (*trend test*), uji kestabilan terhadap rata-rata dan simpangan baku (*stability test to mean and variance*), dan uji kemandirian (*independency test*).

Adapun rekapitulasi hasil perhitungan uji data curah hujan satelit GPM 99, GPM 107, dan GPM 108 dapat dilihat pada Tabel 2 .

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Data Satelit GPM

No	Data Satelit	Uji Data Hujan	Keterangan
1	GPM 99	Uji Outlier	Memenuhi
		Uji Trend	Tidak Memenuhi
		Uji Stabilitas	Tidak Memenuhi
		Uji Independensi	Memenuhi
		Uji Outlier	Memenuhi
2	GPM 107	Uji Trend	Memenuhi
		Uji Stabilitas	Memenuhi
		Uji Independensi	Memenuhi
		Uji Outlier	Memenuhi
3	GPM 108	Uji Trend	Memenuhi
		Uji Stabilitas	Tidak Memenuhi
		Uji Independensi	Memenuhi
		Uji Outlier	Memenuhi

Hasil pengujian data curah hujan satelit GPM 99, 107, dan 108 didapatkan hasil bahwa hanya GPM 107 yang memenuhi syarat, sehingga untuk perhitungan selanjutnya hanya menggunakan data satelit GPM grid 107. Adapun data satelit GPM 107 harian maksimum per tahun (2004-2023) dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Curah Hujan Satelit GPM

No.	Tahun	GPM (mm)	No.	Tahun	GPM (mm)
1	2004	98,52	11	2014	144,05
2	2005	156,05	12	2015	89,05
3	2006	125,22	13	2016	159,89
4	2007	102,01	14	2017	78,61
5	2008	250,23	15	2018	124,96

No.	Tahun	GPM (mm)	No.	Tahun	GPM (mm)
6	2009	85,32	16	2019	99,18
7	2010	114,74	17	2020	55,27
8	2011	86,41	18	2021	99,97
9	2012	165,49	19	2022	68,20
10	2013	176,27	20	2023	89,20

Sumber: Data Curah Hujan Satelit GPM (*Global Precipitation Measurement*) periode 2004–2023

Analisis Frekuensi

Hasil analisis frekuensi setelah curah hujan rencana dihitung dengan metode Distribusi Gumbel, Log Pearson tipe III, Log Normal dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Analisa Frekuensi Beberapa Metode

No.	Kala Ulang (tahun)	Distribusi Gumbel (mm)	Log Pearson Tipe III (mm)	Log Normal (mm)
1	2	111,60	109,26	109,52
2	5	160,32	152,68	176,81
3	10	192,57	182,90	228,95
4	20	223,50	214,36	284,58
5	25	233,31	221,27	296,68
6	50	263,54	249,85	365,37
7	100	293,55	278,96	437,50

Uji Kecocokan Distribusi

Data hasil perhitungan ini harus disesuaikan dengan Uji Chi-Kuadrat dan Uji Smirnov-Kolmogorov untuk menentukan data curah hujan rancangan yang dapat digunakan. Berdasarkan hasil uji kecocokan distribusi, didapatkan hasil bahwa metode yang paling sesuai yaitu Distribusi Gumbel, karena nilai hasil kedua uji kecocokan distribusi memenuhi keduanya.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Uji Chi-Square dan Uji Smirnov Kolmogorov

UJI CHI-SQUARE				
No.	Metode Distribusi	X ² hitung	X ² kritis	Keterangan
1	Log Normal	8,000	5,991	Tidak Memenuhi
2	Gumbel	4,000	5,991	Memenuhi
3	Log Pearson Tipe III	8,500	5,991	Tidak Memenuhi
UJI SMIRNOV KOLMOGOROV				
No.	Metode Distribusi	X ² hitung	X ² kritis	Keterangan
1	Log Normal	0,210	0,297	Memenuhi
2	Gumbel	0,104	0,2977	Memenuhi
3	Log Pearson Tipe III	0,085	0,297	Memenuhi

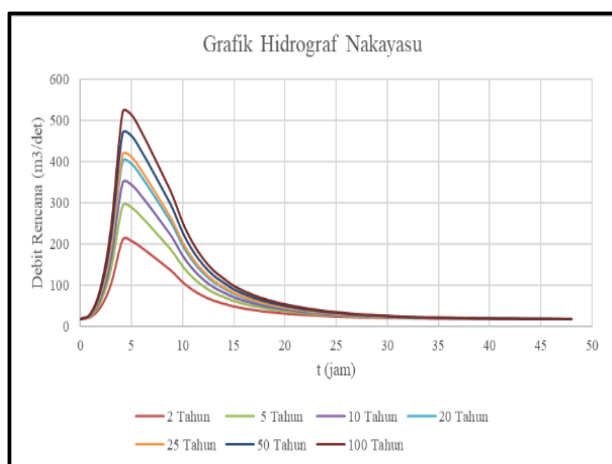
Dari Tabel 5 dapat ditentukan bahwa data yang dapat digunakan adalah Distribusi Gumbel karena memenuhi untuk hasil semua pengujian. Sehingga pada penelitian ini akan digunakan data curah hujan rancangan maksimum distribusi Gumbel untuk memperoleh debit banjir rancangan terbesar.

Tabel 6. Hujan Rancangan Metode Gumbel

No.	Kala Ulang (tahun)	Distribusi Gumbel (mm)
1	2	111,60
2	5	160,32
3	10	192,57
4	20	223,50
5	25	233,31
6	50	263,54
7	100	293,55

Analisis Debit Banjir Rencana

Perhitungan pada analisis ini menggunakan metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu. Metode HSS Nakayasu dipilih karena DAS Tapin tidak memiliki data debit pengamatan yang memadai untuk penyusunan hidrograf satuan terukur. Selain itu, metode ini banyak digunakan pada DAS di Indonesia dan mampu memberikan estimasi debit banjir rencana dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Adapun grafik hasil perhitungan HSS Nakayasu dapat dilihat pada Gambar 3.

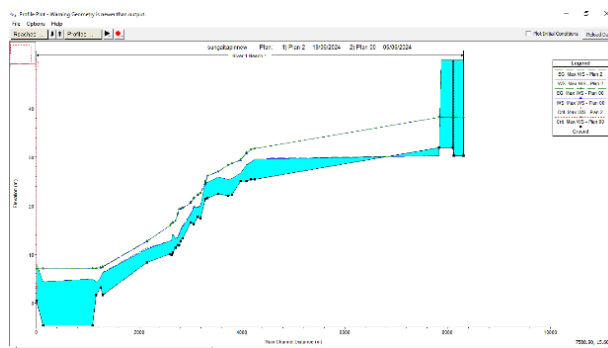


Gambar 3. Grafik HSS Nakayasu Per Kala Ulang

Hasil perhitungan debit maksimum menggunakan metode HSS Nakayasu adalah sebesar 209,59 m³/s (kala ulang 2 tahun), 293,05 m³/s (kala ulang 5 tahun), 348,30 m³/s (kala ulang 10 tahun), 401,31 m³/s (kala ulang 20 tahun), 418,12 m³/s (kala ulang 25 tahun), 469,91 m³/s (kala ulang 50 tahun), dan 521,32 m³/s (kala ulang 100 tahun).

Analisis Debit Banjir Rencana

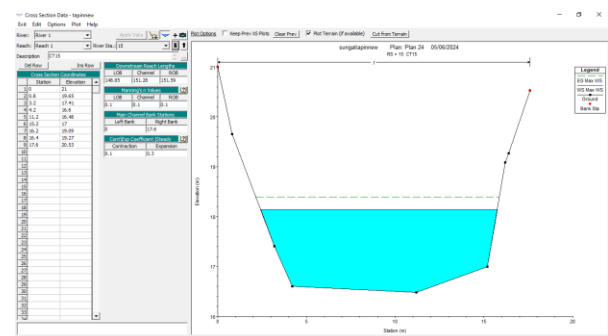
Data yang digunakan untuk analisa kapasitas tampungan adalah dari hasil perhitungan debit banjir rencana menggunakan metode HSS Nakayasu. Analisa ini menggunakan aplikasi HEC-RAS (*Hydrological Engineering Centre-River Analysis System*). Hasil simulasi penampang sungai Tapin sebelum dan sesudah adanya bendungan Tapin dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil Muka Air Sungai Tapin Sebelum dan Sesudah Adanya Bendungan Tapin

keterangan:

- : Profil muka air sebelum adanya Bendungan Tapin
- : Profil muka air sungai sesudah pembangunan Bendungan Tapin



Gambar 5. Profil Melintang Sungai Tapin

Gambar 5 di atas menunjukkan perubahan ketinggian muka air banjir Sungai Tapin sebelum dan sesudah adanya Bendungan Tapin. Selanjutnya, adapun tabel hasil running unsteady pada Sungai Tapin dapat dilihat pada Tabel 7.

Dari Tabel 7 didapatkan bahwa debit maksimum hasil *running* HEC-RAS 5.0.7 untuk kala ulang 2 sampai 100 tahun adalah sebesar 147,12 m³/s sampai 316,69 m³/s. Adapun Tabel 8 merupakan rekapitulasi hasil analisa debit banjir maksimum dengan Analisa Hidrologi dan Analisa Hidraulika sebelum maupun sesudah adanya Bendungan Tapin.

Tabel 7. Hasil *Running Unsteady Software* HEC-RAS 5.0.7

Kala ulang (tahun)	Q Maks (m ³ /s)	Elv min (m)	Elv maks (m)	Elv muka air (m)
2	147,12	30.3	38.42	38.42
5	187,32	30.3	40.36	40.36
10	189,43	30.3	40.46	40.46
20	203,04	30.3	42.05	42.05
25	211,70	30.3	42.47	42.47
50	299,08	30.3	46.04	46.04
100	316,69	30.3	47.24	47.24

Tabel 8. Rekapitulasi Analisa Debit dengan Metode HSS Nakayasu dan HEC-RAS

Kala Ulang (Tahun)	Debit Maksimum (m ³ /s)		
	HSS Nakayasu	HEC-RAS Sebelum Bendungan	HEC-RAS Sesudah Bendungan
2	209,59	202,07	147,15
5	293,05	288,47	187,32
10	348,30	343,60	189,43
20	401,31	401,87	203,04
25	418,12	418,33	211,70
50	469,91	467,36	299,08
100	521,20	520,13	316,69

Dari Tabel 8, didapatkan hasil bahwa selisih penurunan debit banjir sekitar 27% sampai 50%. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa Sungai Tapin mampu menampung debit banjir setelah adanya pembangunan Bendungan Tapin. Berdasarkan Tabel 8, terlihat bahwa debit maksimum hasil HSS Nakayasu untuk kala ulang 100 tahun sebesar 521,20 m³/s berkurang menjadi 316,69 m³/s setelah melalui simulasi bendungan pada HEC-RAS. Hal ini menunjukkan bahwa Bendungan Tapin berfungsi sebagai bangunan pengendali banjir yang mampu mereduksi debit puncak melalui mekanisme tampungan waduk dan pengaturan pelepasan debit melalui bangunan pelimpah (*spillway*). Dengan demikian, debit yang mengalir ke hilir sungai menjadi lebih kecil dibandingkan dengan debit banjir yang masuk ke waduk.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan debit banjir dengan analisis hidrologi menggunakan metode HSS Nakayasu untuk kala ulang 2 sampai 100 tahun adalah sebesar 209,59 m³/s sampai 521,32 m³/s. Berdasarkan hasil simulasi pemodelan banjir *unsteady flow* dengan HEC-RAS 5.0.7 sebelum pembangunan bendung untuk kala ulang 2 sampai 100 tahun adalah sebesar 202,07 m³/s sampai 520,13

m³/s. Berdasarkan hasil simulasi pemodelan banjir *unsteady flow* dengan HEC-RAS 5.0.7, setelah pembangunan bendung untuk kala ulang 2 sampai 100 tahun adalah sebesar 147,15 m³/s sampai 316,69 m³/s, dengan selisih penurunan debit banjir sebesar 27,18% sampai 49,48%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa Bendungan Tapin dapat mengurangi debit banjir pada kapasitas tampungan Sungai Tapin.

REFERENSI

- Abbas, A. S. (2023). *Watershed Delineation from DEM by Model Builder in ArcGIS*. *Civil Engineering Journal*, 9(11).
- Ado, M., dkk. (2022). Analisa Model Kapasitas Tampungan Sungai Manikin dengan menggunakan Aplikasi HEC-RAS. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(2).
- Aprizal, Meris A. (2020). Aplikasi HEC-RAS dalam Pengendalian Banjir Sungai Way Kandis. *Jurnal Teknik Sipil Intitut Teknologi Padang*, 7(1), 1-8.
- Azmie, M. & Helda, N. (2021). Analisis Pengaruh Pembangunan Bendungan Tapin terhadap Debit Banjir di Hilir Sungai Tapin Kabupaten Tapin. *Jurnal Riset dan Inovasi Teknologi*, 1(1), 40-47.
- Bachri, S., Aldianto, Y. E., Sumarmi, Sastro B U, K., & F Naufal, M. (2021). *Flood Modelling of Badeng River Using HEC-RAS in Singojuruh Sub-District, Banyuwangi Regency, East Java, Indonesia*. *Jurnal Geografi*, 13(1), 76–87.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2021). [Ribuan Rumah Warga Sejumlah Kabupaten di Kalimantan Selatan Dilanda Banjir](#). Diakses 23 April 2024.
- Dariyanti, Y., Bhakti, T. & Achmad, N. (2022). Analisis Angkutan Sedimen Sungai Panjang Kabupaten Semarang. *Jurnal Rancang Bangun Teknik Sipil*, 8(2), 29-34.
- Harahap, M. & Harahap, D. (2021). Evaluasi Saluran Drainase pada Jalan Tangguk Bongkar Kelurahan Tegal Sari Mandala II Kecamatan Medan Denai. *Buletin Utama Teknik*, 16(2), 94-102.
- Leda, G. K. C., Bunganaen, W. & Udiana, I. M. (2024). Analisis Kapasitas Tampungan Sungai pada Daerah Aliran Sungai Kapsali Menggunakan HEC-RAS 6.4.1. *Jurnal Forum Teknik Sipil*, 4(2), 99-111.
- Mustamin, M. R., dkk. (2024). *Integration of UH SUH, HEC-RAS and GIS in Flood Mitigation with Flood Forecasting and Early Warning System for Gilireng Watershed, Indonesia*. *Earth*, 5(3), 274-292.

- Noor, M. A. & Utomo, B. (2013). Studi Kapasitas Sungai Riam Kiwa Menggunakan HEC-RAS 4.1.0. *Info Teknik*, 14(1), 81-91.
- Nugroho, S. P. (2001). Analisis Hidrograf Satuan Sintetik Metode Snyder, Clark Dan SCS Dengan Menggunakan Model HEC-1 Di Das Ciliwung Hulu. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 2(1), 57-67.
- Rahmawati, Ni'am, F. & Mudiyo, R. (2021). Kajian Penempatan Lokasi Bangunan Pengendali Sedimen (Check Dam) DAS Tapin. *Jurnal Ilmiah*, 64-77.
- Saputra, M., Fatimah, E. & Azmeri. (2017). Analisis Kapasitas Tampung dan Penentuan Lokasi Kerusakan. *Jurnal Magister Teknik Sipil*, 1-10.
- Soegianto. 2010. *Ekologi Perairan Tawar*. Airlangga Universitas Press. Surabaya.
- Soewarno. (1995). *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*. Bandung.
- Sunardi, S., Ilahi, A. F. & Soeharto, M. (2023) Tingkat Akurasi dan Presisi Data Hujan Sensor Peralatan Otomatis terhadap Penakar Hujan Konvensional di Provinsi Sulawesi Tengah. *Buletin GAW Bariri*, 4(2), 40-49.
- Suripin. (2004). *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Yogyakarta: ANDI Offset.
- Tabri, M. (2024). [*Diguyur Hujan Deras, Sejumlah Ruas Jalan di Tapin Digenangi Air*](#). Diakses 9 Maret 2024.
- Triatmodjo, B. (2008). *Hidrologi Terapan (I)*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2010). *Hidrologi Terapan (II)*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Wahyuni, S., Hambali, R. & Fahrani, F. (2020). Evaluasi Ketelitian Data Curah Hujan Satelit GPM terhadap Data Curah Hujan Permukaan, 1083-1094.
- Wardhana, W. A. (2001). *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Wijayanto, M. R. & Helda, N. (2022). Aplikasi Program HEC-RAS 5.0.7 untuk Pemodelan Banjir di Sub-sub DAS Martapura Kabupaten Banjar. *Serambi Engineering*, 3868-3880.
- Yansyah, R., Kusumastuti, D. & Tugiono, S. (2015). Analisa Hidrologi dan Hidrolika Saluran Drainase Box Culvert di Jalan Antasari, Bandar Lampung menggunakan Program HEC-RAS. *Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik*, 3(1), 1-12.
- Yuliana, Y. (2023). Analisis Banjir Rancangan Menggunakan Metode Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu dan Metode Rasional pada DAS Pengabuan Kabupaten Tanjung Jabung Barat.
- Zevri, A. (2020). Analisis Rencana Tinggi Tanggul Banjir DAS Bangkatan sebagai Alternatif Pengendalian Banjir Kota Binjai. *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(2), 63-76.

Analisis Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Proyek Konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado

An Analysis of Occupational Safety and Health Implementation in the Dwelling Place Construction Project, Perkamil Manado

Adrian Philip Marthinus¹, Jermias Tjakra², Grace Yoyce Malingkas³
^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Telp: (0431) 863886.
email: adrianphmarth@unsrat.ac.id

Abstrak

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek penting dalam proyek konstruksi untuk mencegah kecelakaan dan meningkatkan produktivitas kerja. Tingginya angka kecelakaan di sektor konstruksi menunjukkan bahwa penerapan K3 masih perlu ditingkatkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan K3 pada proyek konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado, dengan fokus pada kepatuhan pekerja terhadap prosedur kerja, penggunaan alat pelindung diri (APD), kondisi peralatan kerja, serta efektivitas pengawasan dan pembinaan. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui survei kuesioner kepada 23 responden, observasi lapangan, dan wawancara dengan pihak pengawas proyek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan K3 di proyek ini tergolong cukup baik, dengan tingkat kepatuhan prosedur kerja dan kondisi peralatan mencapai 100%, penggunaan APD sebesar 65,22%, dan pembinaan K3 sebesar 78,26%. Berdasarkan analisis SWOT, kekuatan utama terletak pada kepatuhan terhadap SOP dan kondisi alat kerja yang baik, sedangkan kelemahan terdapat pada disiplin penggunaan APD dan pelatihan yang belum rutin. Secara keseluruhan, penerapan K3 pada proyek Dwelling Place Perkamil Manado sudah berjalan baik, namun perlu penguatan pelatihan, pengawasan, dan budaya keselamatan kerja yang berkelanjutan.

Kata Kunci: analisis SWOT; Dwelling Place Perkamil Manado; K3; proyek konstruksi

Abstract

Occupational Safety and Health (OSH) is an essential aspect of construction projects to prevent accidents and improve work productivity. The high rate of accidents in the construction sector indicates that the implementation of OSH still needs improvement. This study aims to analyze the implementation of OSH at the Dwelling Place Perkamil Manado construction project, focusing on workers' compliance with work procedures, the use of personal protective equipment (PPE), the condition of work tools, and the effectiveness of supervision and training. The research employed a descriptive quantitative approach through questionnaires distributed to 23 respondents, field observations, and interviews with project supervisors. The results show that the implementation of OSH in this project is classified as fairly good, with 100% compliance with work procedures and equipment conditions, 65.22% use of PPE, and 78.26% participation in OSH training. Based on the SWOT analysis, the main strengths lie in adherence to standard operating procedures (SOP) and well-maintained equipment, while weaknesses include inconsistent PPE use and the lack of regular training. Overall, the implementation of OSH at the Dwelling Place Perkamil Manado project has been running well, but it requires strengthening through continuous training, supervision, and the development of a sustainable safety culture.

Keywords: SWOT analysis; Dwelling Place Perkamil Manado; OSH; construction project

PENDAHULUAN

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek krusial dalam proyek konstruksi, yang bertujuan untuk melindungi pekerja dari risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja. Penerapan K3 yang efektif tidak hanya meningkatkan keselamatan pekerja tetapi juga berkontribusi pada efisiensi dan

produktivitas proyek secara keseluruhan. (ISO 45001:2018)

Data Kementerian Ketenagakerjaan tahun 2024, menyatakan ada 161.129 kasus kecelakaan kerja pada bulan Agustus 2024. Dimana jumlah ini meningkat 37,21% dari jumlah kasus kecelakaan kerja pada bulan Juli 2024 yaitu sebanyak 117.435 kasus kecelakaan kerja. Industri konstruksi menjadi

penyumbang terbesar angka kecelakaan kerja dengan total kasus sekitar 40%. Angka ini menggambarkan perlunya peningkatan penerapan protokol keselamatan kerja serta pengawasan yang lebih ketat oleh pemerintah.

Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja dan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 05/PRT/M/2014 menegaskan pentingnya penerapan K3 dalam setiap proyek konstruksi. Namun, tingginya angka kecelakaan kerja menunjukkan bahwa penerapan K3 masih perlu ditingkatkan.

Proyek Dwelling Place Perkamil Manado merupakan proyek konstruksi perumahan yang kompleks, sehingga penerapan K3 menjadi sangat penting untuk memastikan keselamatan pekerja dan kelancaran proyek. Analisis terhadap penerapan K3 di proyek ini diperlukan untuk mengidentifikasi tingkat kepatuhan terhadap standar keselamatan dan mengidentifikasi potensi risiko yang ada.

Menanggapi hal tersebut, perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk menganalisis penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada proyek konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado. Penelitian mengacu pada penerapan K3 pada proyek konstruksi, regulasi tentang K3 konstruksi dan dilakukan pada jam kerja dengan menggunakan metode survei melalui lembar kuisisioner, observasi dan wawancara. Hasil penelitian kemudian disajikan dalam narasi, tabel dan analisis SWOT. Penelitian dilaksanakan dengan pembiayaan yang bersumber dari Daftar Isian Pelaksanaan Anggaran (DIPA) Universitas Sam Ratualngi, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi tahun 2025.

TINJAUAN PUSTAKA

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) adalah suatu sistem yang bertujuan untuk menjamin keselamatan pekerja serta menciptakan lingkungan kerja yang sehat dan aman (Hidayat, 2020). Dalam proyek konstruksi, penerapan K3 sangat penting mengingat tingginya risiko kecelakaan akibat berbagai faktor seperti ketinggian, alat berat, dan kondisi lingkungan kerja yang dinamis (Pratama, 2021).

Penerapan K3 di Indonesia diatur dalam Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja serta Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 05/PRT/M/2014 tentang Pedoman Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (MK3) dalam penyelenggaraan konstruksi. Selain itu, terdapat standar internasional seperti ISO 45001:2018 yang menjadi acuan dalam sistem manajemen K3 (*International Labour Organization*, 2020).

Penerapan program K3 terbagi dalam dua bentuk pendekatan yaitu pendekatan perilaku dan pendekatan fisik. Pendekatan perilaku dipengaruhi oleh peranan tiap pelaku dalam menciptakan dan menerapkan kondisi kerja yang aman (Instruksi Menteri Tenaga Kerja, 1984). Para pelaku ini terdiri atas empat komponen yang saling terpisah, tetapi harus tetap saling berhubungan dan bekerja sama yaitu komponen manajer puncak, pengawas dan manajer proyek, mandor dan pekerja.

Pendekatan fisik dalam program K3 dapat dilakukan dengan cara memberikan pendidikan dan latihan mengenai metode dan prosedur yang benar, mengidentifikasi potensi bahaya, memberikan perhatian atas perawatan/ pemanfaatan peralatan yang dapat membahayakan keselamatan kerja, pemakaian alat pelindung yang telah ditetapkan, melakukan inspeksi keselamatan dan kesehatan kerja (Inspeksi K3) secara rutin dan teliti di lokasi proyek (Instruksi Menteri Tenaga Kerja, 1984).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan K3 berkaitan erat dengan budaya keselamatan di lingkungan kerja. Menurut penelitian oleh Rahman (2021), penerapan K3 yang baik dapat mengurangi tingkat kecelakaan kerja hingga 40% dalam proyek konstruksi (Rahman, 2021). Studi oleh Firmansyah (2022) juga menunjukkan bahwa penggunaan teknologi digital dalam pengawasan K3 meningkatkan kepatuhan pekerja terhadap prosedur keselamatan (Firmansyah, 2022).

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan studi kasus pada proyek konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado. Metode ini menggunakan survei kuesioner dan analisis SWOT dengan jumlah responden sebanyak 23 orang. Skala Penilaian yang digunakan adalah Skala Guttman (Ya atau Tidak). Hasil penelitian disajikan dalam tabel dan narasi. Kemudian dilakukan analisis SWOT penerapan K3 pada proyek konstruksi.

a. Metode Survei (Kuesioner)

Data utama diperoleh melalui penyebaran kuesioner kepada responden pekerja proyek. Kuesioner terdiri dari 48 pertanyaan dengan pilihan jawaban *Ya* dan *Tidak*.

b. Observasi Lapangan

Observasi dilakukan secara langsung untuk melihat penerapan K3 di lokasi proyek, termasuk penggunaan APD, prosedur penggunaan alat kerja, serta pengawasan K3.

c. Wawancara

Wawancara dilakukan dengan pengawas dan manajer proyek untuk memperkuat hasil kuesioner dan observasi, terutama mengenai kebijakan dan pengawasan K3.

d. Analisis Data

Data dari kuesioner dan observasi dianalisis secara deskriptif kuantitatif, kemudian dilakukan analisis SWOT untuk mengidentifikasi kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman dalam penerapan K3 di proyek.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Proyek Konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado diukur melalui penyebaran kuesioner. Terdiri dari 48 pertanyaan yang memuat 4 variabel independen yaitu penggunaan APD, prosedur kerja, penggunaan peralatan, serta pengawasan dan pembinaan K3. Hasil kuesioner ditinjau dan dibahas sebagai berikut:

Penggunaan APD

Penggunaan APD ditinjau untuk mengetahui tingkat kepatuhan pekerja dalam menggunakan perlengkapan keselamatan kerja selama melaksanakan pekerjaan konstruksi di proyek Dwelling Place Perkamil Manado. Variabel ini diukur melalui beberapa indikator, yaitu penggunaan helm pengaman, kaca mata pengaman saat pengelasan, rompi keselamatan, sarung tangan, sabuk pengaman saat bekerja di ketinggian, dan sepatu boots. Hasil pengolahan data untuk variabel penggunaan APD disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Distribusi Responden Berdasarkan Penggunaan APD Proyek Konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado

Penggunaan APD	Jumlah	
	Frekuensi	Presentase (%)
Ya	15	65.22
Tidak	8	34.78
Jumlah	23	100

Sumber: Hasil kuesioner (2025)

Dari hasil kuesioner, sebesar 65,22% responden menyatakan selalu menggunakan APD saat bekerja, sementara 34,78% lainnya mengaku kadang-kadang atau tidak menggunakan APD lengkap. Hal ini menunjukkan bahwa kesadaran pekerja terhadap pentingnya APD sudah cukup baik, tetapi masih perlu peningkatan pengawasan dan penegakan aturan disiplin kerja.

Prosedur Kerja

Prosedur Kerja ditinjau untuk mengetahui tingkat penerapan metode dan tata cara kerja yang aman oleh pekerja selama pelaksanaan proyek konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado. Variabel ini diukur melalui beberapa indikator, yaitu pemahaman pekerja terhadap langkah kerja sebelum memulai pekerjaan, pelaksanaan pengarahan kerja harian, kepatuhan terhadap urutan prosedur kerja, perencanaan kerja yang aman, pemahaman terhadap pekerjaan berisiko seperti pekerjaan di ketinggian dan pengangkatan material, penggunaan alat bantu yang sesuai, ketersediaan rambu-rambu keselamatan, kondisi area kerja yang aman, penyimpanan material yang tertata, pelaksanaan pelatihan kerja aman, kecukupan waktu istirahat, ketersediaan SOP, serta kejelasan instruksi dari pengawas lapangan. Hasil pengolahan data untuk variabel prosedur kerja disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Distribusi Responden Berdasarkan Prosedur Kerja Proyek Konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado

Prosedur Kerja	Jumlah	
	Frekuensi	Presentase (%)
Ya	23	100
Tidak	0	0
Jumlah	23	100

Sumber: Hasil kuesioner (2025)

Sebanyak 100% responden menyatakan bahwa mereka mengikuti prosedur kerja yang telah ditetapkan di proyek. Ini menunjukkan bahwa penerapan sistem kerja sesuai SOP sudah terlaksana dengan baik, berkat adanya pengarahan dan instruksi yang jelas dari pengawas lapangan.

Penggunaan Peralatan

Penggunaan Peralatan ditinjau untuk mengetahui tingkat penerapan keselamatan kerja yang berkaitan dengan penggunaan, pemeliharaan, dan pengelolaan peralatan kerja pada proyek konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado. Variabel ini diukur melalui beberapa indikator, yaitu kondisi dan kelayakan alat kerja, pemeriksaan alat secara berkala, pemahaman pekerja terhadap penggunaan alat yang aman, penanganan kerusakan alat, ketersediaan dan penggunaan APD, ketersediaan APAR, keamanan peralatan listrik, penyimpanan bahan bangunan, kebersihan dan perawatan peralatan setelah digunakan, pelatihan penggunaan alat berat, pelaporan kerusakan alat, ketersediaan alat pelindung pada area berisiko tinggi, serta akses terhadap jalur evakuasi darurat. Hasil

pengolahan data untuk variabel penggunaan peralatan disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Distribusi Responden Berdasarkan Penggunaan Peralatan Proyek Konstruksi *Dwelling Place* Perkamil Manado

Penggunaan Peralatan	Jumlah	
	Frekuensi	Presentase (%)
Ya	23	100
Tidak	0	0
Jumlah	23	100

Sumber: Hasil kuesioner (2025)

Seluruh responden (100%) menyatakan bahwa peralatan kerja yang digunakan berada dalam kondisi layak dan aman. Hal ini mencerminkan manajemen proyek memiliki sistem perawatan alat yang baik serta memastikan alat kerja sesuai standar keselamatan.

Pengawasan dan Pembinaan K3

Pengawasan dan Pembinaan K3 ditinjau untuk mengetahui sejauh mana upaya pengawasan, pembinaan, dan komunikasi keselamatan kerja telah diterapkan pada proyek. Variabel ini diukur melalui beberapa indikator, yaitu keikutsertaan pekerja dalam pelatihan atau sosialisasi keselamatan kerja, peran pengawas dalam memberikan peringatan terhadap pelanggaran K3, keterbukaan pekerja dalam melaporkan potensi bahaya, pemahaman pekerja terhadap prosedur penanganan kecelakaan kerja, ketersediaan media informasi K3 seperti buku panduan dan poster keselamatan, pengetahuan mengenai lokasi fasilitas P3K dan petugas K3, pelaksanaan pengarahan kerja sebelum memulai pekerjaan, pemeriksaan kesehatan tenaga kerja, serta perhatian perusahaan terhadap kondisi fisik dan mental pekerja. Hasil pengolahan data untuk variabel pengawasan dan pembinaan K3 disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Distribusi Responden Berdasarkan Pengawasan dan Pembinaan K3 Proyek Konstruksi *Dwelling Place* Perkamil Manado

Pengawasan dan Pembinaan K3	Jumlah	
	Frekuensi	Presentase (%)
Ya	18	78.26
Tidak	5	21.74
Jumlah	23	100

Sumber: Hasil kuesioner (2025)

Sebanyak 78,26% responden menyatakan telah mendapatkan pengawasan dan pembinaan K3 secara rutin, sedangkan 21,74% merasa belum

mendapatkan pembinaan secara optimal. Ini menunjukkan perlunya peningkatan intensitas pelatihan dan komunikasi antara pengawas serta pekerja agar penerapan K3 menjadi budaya kerja yang konsisten.

Analisis SWOT

Berdasarkan hasil kuesioner, observasi lapangan, dan wawancara, dilakukan analisis SWOT untuk mengidentifikasi kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman dalam penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada proyek konstruksi *Dwelling Place* Perkamil Manado. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai kondisi penerapan K3 saat ini serta merumuskan strategi yang dapat mendukung peningkatan kinerja K3 di proyek. Hasil analisis SWOT disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Analisis SWOT Penerapan K3 Proyek Konstruksi *Dwelling Place* Perkamil Manado

Strength (Kekuatan)	Weakness (Kelemahan)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Kepatuhan terhadap prosedur kerja cukup tinggi — seluruh pekerja (100%) menyatakan melaksanakan pekerjaan sesuai dengan prosedur dan instruksi kerja yang ditetapkan. 2. Kondisi alat kerja tergolong aman dan layak pakai — 100% pekerja menilai peralatan yang digunakan dalam kondisi baik, manajemen proyek telah menerapkan sistem perawatan alat kerja sesuai standar. 3. Ketersediaan APD cukup baik — lebih dari 65% pekerja menyatakan APD tersedia dan digunakan dengan baik. 4. Adanya pengawasan dan pengarahan lapangan yang aktif — mayoritas pekerja mengaku mendapatkan pengarahan sebelum memulai pekerjaan. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kedisiplinan penggunaan APD masih perlu ditingkatkan — sekitar 35% pekerja belum konsisten menggunakan APD secara lengkap selama bekerja. 2. Pembinaan dan pelatihan K3 belum rutin — 21,74% pekerja merasa belum pernah mendapatkan pelatihan formal terkait keselamatan kerja. 3. Kesadaran individu terhadap bahaya kerja masih rendah — sebagian pekerja belum memahami sepenuhnya risiko kerja di area konstruksi dan pentingnya tindakan pencegahan. 4. Pencatatan dan dokumentasi K3 belum sistematis — laporan kecelakaan kerja dan kegiatan K3 belum terdokumentasi secara konsisten.

Opportunity (Peluang)	Threat (Ancaman)
1. Dukungan regulasi pemerintah — penerapan K3 mendapat payung hukum dari UU No. 1 Tahun 1970 dan PP No. 50 Tahun 2012, serta standar ISO 45001.	1. Potensi kecelakaan akibat kelalaian manusia — masih adanya pekerja yang tidak menggunakan APD dapat menimbulkan risiko cedera kerja.
2. Potensi peningkatan kompetensi tenaga kerja — pelatihan K3 dapat diintegrasikan dalam program sertifikasi atau pembinaan pekerja proyek.	2. Keterbatasan anggaran dan waktu pelatihan — jadwal proyek yang padat sering menghambat pelaksanaan pelatihan K3.
3. Kesempatan menjadi proyek percontohan — Dwelling Place Perkamil Manado berpotensi menjadi model penerapan K3 di proyek perumahan kawasan Manado.	3. Cuaca dan kondisi lapangan — faktor eksternal seperti hujan dan permukaan kerja licin dapat meningkatkan risiko kecelakaan.
4. Kemajuan teknologi informasi — penggunaan aplikasi monitoring K3 dapat membantu meningkatkan efektivitas pengawasan.	4. Kurangnya budaya keselamatan di kalangan subkontraktor — pekerja dari pihak ketiga belum tentu memiliki tingkat kesadaran K3 yang sama dengan pekerja utama proyek.

KESIMPULAN

Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada proyek konstruksi Dwelling Place Perkamil Manado berada pada kategori cukup baik, yang ditunjukkan oleh kepatuhan pekerja terhadap prosedur kerja, penggunaan peralatan yang aman, serta dukungan manajemen proyek dalam pelaksanaan K3. Namun, masih terdapat beberapa aspek yang perlu ditingkatkan, terutama kedisiplinan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), pelaksanaan pelatihan K3 secara berkala, dan pengelolaan dokumentasi kegiatan K3.

Hasil analisis SWOT menunjukkan bahwa kekuatan utama proyek terletak pada penerapan sistem kerja yang aman dan ketersediaan peralatan yang memenuhi standar, sedangkan kelemahan utamanya berada pada tingkat kesadaran dan perilaku pekerja terhadap K3. Di sisi lain, dukungan regulasi dan peluang peningkatan kompetensi melalui pelatihan menjadi faktor yang dapat dimanfaatkan untuk memperkuat penerapan K3,

sementara faktor manusia, kondisi cuaca, serta keterbatasan waktu dan biaya pelatihan menjadi ancaman yang perlu diantisipasi.

REFERENSI

- DataIndonesia.id, 2024. 8 Provinsi dengan Jumlah Kasus Kecelakaan Kerja Terbanyak di Indonesia. Jakarta. https://www.instagram.com/dataindonesia_id/p/DBbQ4_kThO0/?img_index=1
- Indonesiasafetycenter.org, 2024. Kecelakaan Kerja di Indonesia: Data, Penyebab dan Upaya Pencegahan. Jakarta. <https://indonesiasafetycenter.org/kecelakaan-kerja-di-indonesia-data-penyebab-dan-upaya-pencegahan/>
- Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 05/PRT/M/2014 tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja.
- Hidayat, R., 2020. Keselamatan dan Kesehatan Kerja dalam Industri Konstruksi: Tantangan dan Solusi. Jakarta: Penerbit Teknik Sipil.
- Pratama, B., 2021. *Analisis Risiko Keselamatan Kerja pada Proyek Konstruksi Berbasis ISO 45001:2018*. Jurnal Teknik Konstruksi, 9(2), 45-58.
- International Labour Organization (ILO). (2020). *Occupational Safety and Health in Construction Industry*. Geneva: ILO Publications.
- Instruksi Menteri Tenaga Kerja No. 02/M/BW/BK/1984, tentang Pengesahan Alat Pelindung Diri, Jakarta.
- ISO 45001:2018 tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja.
- Marthinus, A.P., Manoppo, F. J., Lumeno, S. S., 2019. *Model Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Proyek Infrastuktur Jalan Tol Manado-Bitung*. Jurnal Sipil Statik Vol. 7 No.4, April 2019 (433-448) ISSN: 2337-6732, Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Rahman, A., 2021. *Evaluasi Efektivitas Penerapan K3 dalam Proyek Konstruksi Gedung Bertingkat di Indonesia*. Jurnal Manajemen Konstruksi, 12(1), 33-47.
- Firmansyah, T., 2022. *Pemanfaatan Teknologi Digital dalam Pengawasan Keselamatan Kerja di Industri Konstruksi*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil, 7(1), 101-115.

Pemodelan Tinggi Muka Air Berdasarkan Debit Aktual Dan Rancangan Pada Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk Menggunakan HEC-RAS

Water Level Modeling Based on Actual and Design Discharge in the Tabuk River Wetland Irrigation Area Using HEC-RAS

Muhammad Rizky Firdaus¹ Nilna Amal²

^{1,2}Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

Jl. Jendral A.Yani Km. 35,5, Banjarbaru, 70714, Indonesia

Email : nilna.amal@ulm.ac.id

Abstrak

Daerah irigasi lahan basah memerlukan pemantauan debit dan ketinggian air yang baik. Analisis ketinggian air dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak, misalnya HEC-RAS. Penelitian ini menganalisis debit aktual dan elevasi muka air di Daerah Lahan Basah Irigasi Sungai Tabuk. Proses analisis data meliputi analisis hidrologi dan hidraulika. Penelitian ini menggunakan data geometri parit sebagai data primer yang meliputi penampang saluran dan kecepatanair di saluran. Curah hujan harian digunakan sebagai data sekunder untuk melakukan analisis hidrologi. Hasil simulasi dengan kondisi aliran tunak menunjukkan adanya variasi ketinggian air pada setiap stasiun pengukuran. Ketinggian air yang disimulasikan mendekati kondisi eksisting pada STA 0+500 dan STA 1+500, dengan nilai error masing-masing sebesar 15% dan 17%. Namun pada STA 0+000 dan STA 1+000 terdapat perbedaan yang signifikan dengan perbedaan mencapai 70% dan 160%. Perbedaan hasil yang besar tersebut bisa jadi disebabkan oleh pengaruh keakuratan data geometri saluran.

Kata Kunci: Debit Aktual; Debit Rancangan; HEC-RAS; Irigasi Rawa

Abstract

Wetland irrigation areas require good monitoring of discharge and water levels. Water level analysis can be done using software, for example, HEC RAS. The research analyzes the actual discharge and water surface elevation in the Tabuk River Irrigation Wetland Area. The data analysis process includes hydrological and hydraulic analysis. The research uses geometric ditch data as primary data, including channel cross-section and channel velocity. Daily rainfall is used as secondary data to analyze the hydrology part. Simulation results using steady flow conditions show variations in water level at each measurement station. The simulated water level is close to existing conditions at STA 0+500 and STA 1+500, with 15% and 17% error values, respectively. However, at STA 0+000 and STA 1+000, there are significant differences with differences of up to 70% and 160%. The significantly different results could be due to the influence of the accuracy of the channel geometry data.

Keywords: Actual Discharge; Design Discharge, HEC-RAS; Wetland Irrigation

PENDAHULUAN

Provinsi Kalimantan Selatan merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki karakter geografis berupa kawasan dataran rendah dan lahan basah. Kondisi tersebut menjadikan pengelolaan lahan rawa, termasuk rawa pasang surut, rawa lebak, dan gambut, sebagai bagian penting dalam pemanfaatan ruang dan pembangunan daerah. Secara administratif, luas wilayah Provinsi Kalimantan Selatan pada tahun 2025 tercatat sebesar 38.744,23 km² atau sekitar 3.874.423 hektare (Badan Pusat

Statistik Provinsi Kalimantan Selatan, 2025). Pemanfaatan lahan rawa untuk kegiatan pertanian masih menghadapi kendala biofisik, seperti kemasaman tanah, kualitas air yang rendah, senyawa toksik, dan keterbatasan unsur hara yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman (Noor et al., 2022). Kendala tersebut menyebabkan produktivitas pertanian di lahan rawa belum selalu optimal, sehingga pengelolaannya perlu disesuaikan dengan karakteristik lahan dan sistem tata air setempat (Abduh et al., 2022). Di sisi lain, kawasan lahan basah juga mengalami perubahan tutupan lahan yang

berpengaruh terhadap kondisi lingkungan, termasuk perubahan suhu permukaan (Nurlina et al., 2023). Kondisi ini menunjukkan perlunya pemantauan spasial dan temporal untuk memahami dinamika perubahan lahan basah secara lebih akurat (Fitriani et al., 2025). Dengan demikian, klasifikasi dan pemetaan lahan rawa berbasis penginderaan jauh menjadi penting untuk mendukung pemanfaatan lahan yang tepat dan berkelanjutan (Ramadhan et al., 2025).

Menurut regulasi yang tercantum dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 29/PRT/M/2015, irigasi rawa merujuk pada usaha penyediaan, pengaturan, dan pengelolaan air melalui sistem irigasi rawa di area pertanian. Pengelolaan air di lahan rawa tidak hanya dimaksudkan untuk mengurangi risiko banjir atau genangan berlebihan pada musim hujan, tetapi juga untuk mencegah kekeringan selama musim kemarau. Hal ini memiliki signifikansi tidak hanya dalam memperpanjang musim tanam, tetapi juga dalam mengurangi risiko kekeringan lahan (Purboyo, 2020).

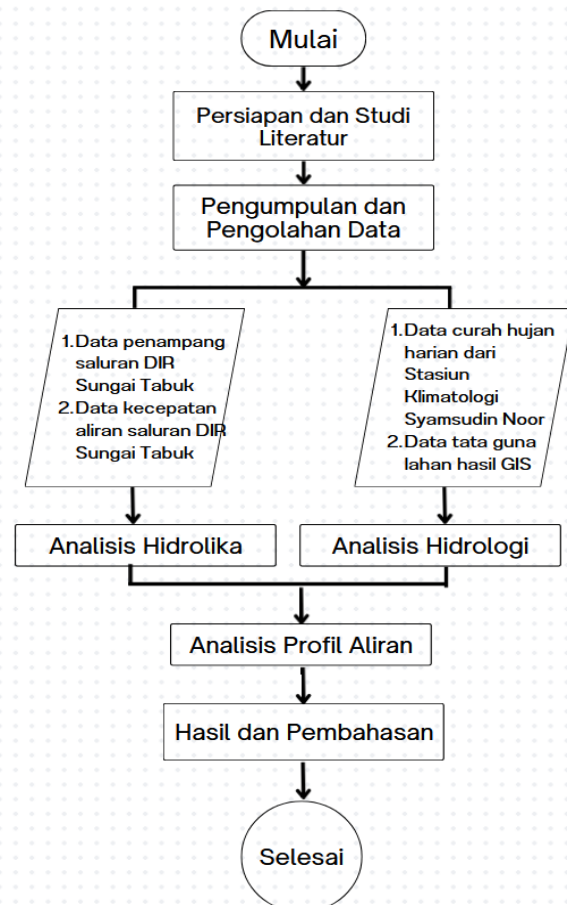
Pengembangan lahan rawa sangat bergantung pada sistem pengelolaan air karena kondisi hidrologi lahan basah dapat berubah mengikuti curah hujan, evapotranspirasi, dan tinggi muka air tanah (Amal et al., 2022). Pada lahan rawa lebak, masalah utama yang sering muncul adalah rejim air yang fluktuatif dan masuknya air ke lahan yang sulit diprediksi, sehingga peninjauan jaringan tata air diperlukan untuk mendukung kegiatan pertanian (Puspitahati et al., 2024). Dalam konteks Kalimantan Selatan, Daerah Irigasi Rawa Antasan Sutun yang berada di Sungai Tabuk memiliki luas lahan sawah sekitar 737,8 ha dan dimanfaatkan oleh petani dengan pola tanam satu kali dalam setahun. Hasil kajian neraca air menunjukkan bahwa ketersediaan air pada daerah irigasi tersebut masih dapat memenuhi kebutuhan air pertanian berdasarkan pola tanam eksisting (Wulandari & Amal, 2024). Meskipun demikian, analisis hidrologi dan hidraulika tetap diperlukan untuk mengetahui kesesuaian debit, tinggi muka air, serta kapasitas saluran terhadap kebutuhan layanan irigasi. Penelitian pada Daerah Irigasi Rawa Dadahup di Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa simulasi hidraulika dapat digunakan untuk menentukan pola operasi pintu air primer dan sekunder dalam menjaga tinggi muka air serta kualitas air pada sistem irigasi rawa (Zevri et al., 2023). Selain itu, pemodelan HEC-RAS juga telah digunakan untuk menganalisis dinamika aliran dan sebaran kualitas air pada saluran irigasi di kawasan rawa pasang surut (Hermawanto, 2023). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan pada daerah rawa di Kalimantan Selatan untuk menganalisis

profil aliran pada saluran sekunder menggunakan perangkat lunak HEC-RAS, sehingga dapat memberikan informasi mengenai kemampuan saluran dalam menampung debit banjir yang terjadi.

METODE

Diagram Alir

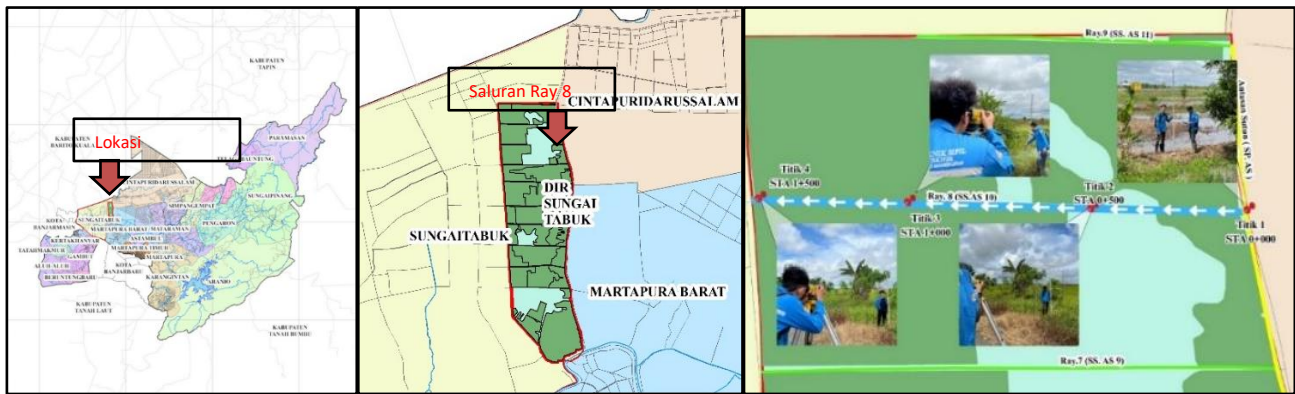
Secara umum tahapan analisis perancangan digambarkan dalam bagan alir penelitian sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Desa Tajau Landung, yang terletak di Kecamatan Sungai Tabuk, Kabupaten Banjar. Wilayah Kabupaten Banjar secara umum tergolong dalam Daerah Aliran Sungai (DAS) Martapura, yang mencakup luas wilayah sebesar 453,88 km². Sungai utama dalam DAS ini berasal dari Sungai Riam Kanan dan mengalir melalui kota Martapura dengan panjang sekitar 36.566 meter. DAS Martapura merupakan sub-DAS dari DAS Barito dan termasuk dalam Wilayah Sungai (WS) Barito yang lebih besar. Bagian hulu DAS Martapura adalah Waduk Riam Kanan. Secara spesifik, Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk merupakan area yang mendapatkan pasokan air dari DAS Martapura. Rincian lokasi penelitian dapat ditemukan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data adalah tahap awal yang memiliki pengaruh cukup besar pada keberhasilan dari penelitian ini. Adapun data-data yang diperlukan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder.

Proses pengumpulan data primer dilakukan dengan pengukuran langsung di lapangan menggunakan *waterpass* untuk memperoleh data penampang saluran dan *current meter* untuk memperoleh data kecepatan aliran di saluran.

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber lain seperti dari instansi pemerintah maupun instansi terkait. Data sekunder yang diperlukan pada penelitian ini berupa data curah hujan harian dari Stasiun Klimatologi Syamsudin Noor dan data luas area pengaliran yang ditinjau diukur menggunakan GIS.

Setelah data berhasil dikumpulkan maka dilakukan proses analisis data. Adapun analisis yang dilakukan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Analisis Hidrologi dan Hidraulika.
2. Membandingkan dan menganalisis tinggi muka air berdasarkan simulasi dan *existing*.

Analisis Data

Pengukuran debit dilakukan dengan beberapa metode baik empiris maupun dengan menggunakan rumus-rumus yang menggunakan hubungan antara transformasi hujan menjadi aliran (Amal and Wiranata, 2023; Rahmah, Amal and Helda, 2023). Debit yang digunakan pada penelitian ini adalah debit maksimum dialihragamkan dari curah hujan maksimum periode tertentu dengan menggunakan metode Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) Nakayasu. Curah hujan maksimum dihitung dengan analisis

frekuensi dengan tujuan untuk memprediksi jumlah curah hujan maksimum pada periode ulang tertentu.

Uji kecocokan distribusi diperlukan untuk menentukan jenis distribusi probabilitas yang paling sesuai dalam analisis frekuensi curah hujan, sehingga hasil perhitungan debit rancangan memiliki dasar statistik yang lebih kuat.

Pengukuran kecepatan dilakukan dengan alat *current meter* untuk kedalaman pada 0,2, 0,6, dan 0,8 dari permukaan air. Dalam menghitung kecepatan rata-rata vertikal dinyatakan dengan rumus berikut:

$$v = \frac{1}{2} \left(0,6v + \frac{(0,2v+0,8v)}{2} \right) \quad [1]$$

Debit aktual dihitung berdasarkan hubungan antara luas penampang basah saluran dan kecepatan rata-rata aliran, sehingga nilai debit diperoleh dari hasil perkalian kedua parameter tersebut. Rumus debit aktual dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = A \times v \quad [2]$$

dimana:

- Q : Debit aktual (m³/s).
A : Luas penampang (m²).
v : Kecepatan (m/s).

Metode Hidrograf Satuan Sintetik (HSS) Nakayasu adalah sebuah teknik yang digunakan untuk menentukan hidrograf banjir rancangan di suatu DAS. Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu dijelaskan dalam bentuk persamaan berikut ini:

$$Q_p = \frac{A \cdot R_0}{3,6(0,3t_p + T_{0,3})} \quad [3]$$

dimana:

Q_p : Debit puncak ($m^3/detik$).

R_o : Hujan satuan (mm).

T_p : Tenggang waktu (jam).

$T_{0,3}$: Waktu yang diperlukan sampai 30% dari debit puncak (jam).

A : Luas daerah aliran sungai (m).

HEC-RAS adalah perangkat lunak yang digunakan untuk analisis aliran sungai dan saluran terbuka. Dalam konteks jenis aliran yang dijelaskan oleh Chow (1992), HEC-RAS memiliki kemampuan untuk memodelkan baik aliran tunak maupun aliran tak tunak.

1. Aliran tunak (*Steady flow*) merupakan aliran direpresentasikan oleh kondisi dimana kedalaman aliran dan parameter lainnya tidak berubah secara signifikan dalam selang waktu tertentu. Dalam analisis aliran tunak menggunakan HEC-RAS, model aliran stabil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan dari waktu ke waktu.
2. Aliran tak tunak (*Unsteady flow*) merupakan aliran dimana kedalaman aliran dan parameter lainnya berubah seiring waktu.

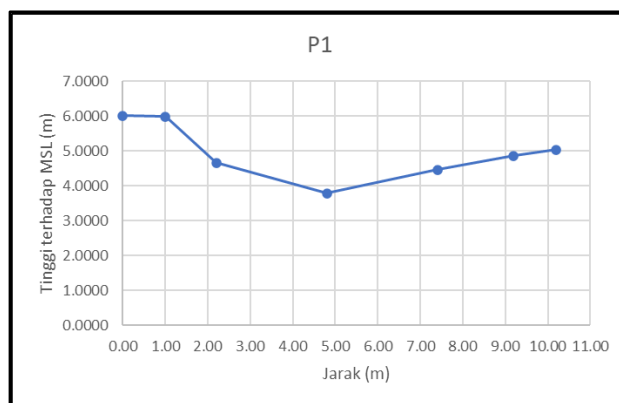
Pemodelan tinggi muka air dilakukan dengan menghitung debit aliran berdasarkan data curah hujan yang tersedia. Selanjutnya, dimensi saluran dihitung berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan digunakan dalam perencanaan melalui aplikasi HEC-RAS. Debit aliran ini kemudian diinput ke dalam model saluran di program HEC-RAS, yang kemudian dijalankan untuk menentukan ketinggian muka air

HASIL DAN PEMBAHASAN

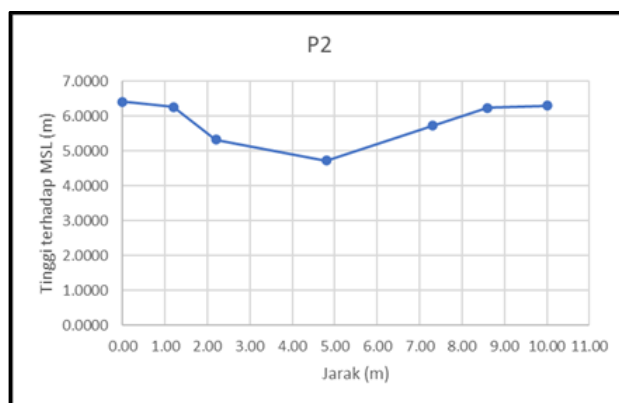
Analisis Penampang Saluran

Analisis penampang didapatkan dari hasil pengukuran langsung di Saluran Ray 8 pada Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk menggunakan alat waterpass. Pengukuran dilakukan pada tanggal 03 Februari 2024. Hasil pengukuran penampang dengan jarak interval per 500 m dapat dilihat pada Gambar 3 sampai Gambar 6 dengan P1 berarti pengukuran di titik 1 dan seterusnya.

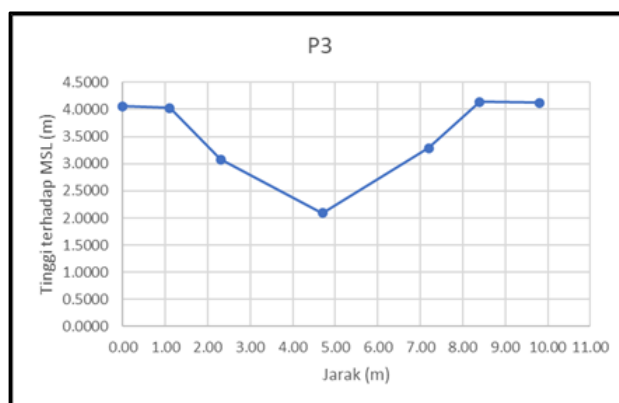
Hasil pengukuran kecepatan aliran dengan alat *Current Meter* dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan analisis penampang yang menghasilkan besaran debit aktual yang besarnya berkisar antara 0,39 hingga 0,46 $m^3/detik$.



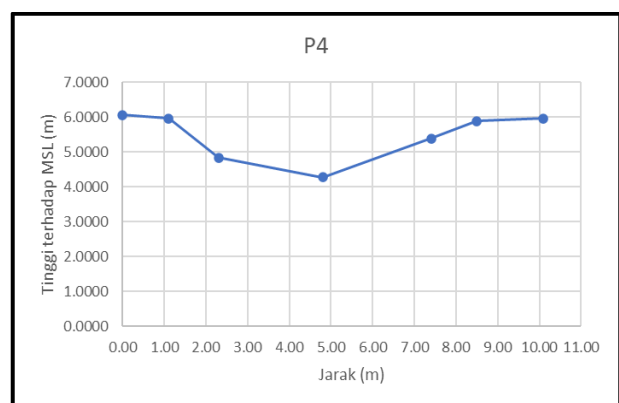
Gambar 3. Profil Penampang Titik 1



Gambar 4. Profil Penampang Titik 2



Gambar 5. Profil Penampang Titik 3



Gambar 6. Profil Penampang Titik 4

Tabel 1. Hasil Kedalaman dan Luas Penampang Saluran Pada Titik Pengukuran

Titik Pengukuran	Lebar Saluran (m)	Kedalaman (H), m				Luas Penampang (A) m ²
		H ₁	H ₂	H ₃	Rata-Rata	
1	5.20	0.20	1.00	0.40	0.53	3.55
2	5.12	0.58	1.18	0.20	0.65	3.89
3	4.94	0.60	1.40	0.40	0.80	4.34
4	5.14	0.67	1.25	0.20	0.71	4.00

Data Curah Hujan

Tahapan awal dalam melakukan analisis hidrologi melibatkan pengumpulan data hidrologi di wilayah lokasi penelitian. Data yang diperlukan mencakup data curah hujan bulanan maksimum pada periode 20 tahun. Informasi curah hujan ini diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) melalui Stasiun Meteorologi Syamsudin Noor.

Tabel 2. Hasil Kecepatan dan Debit Aktual Pada Titik Pengukuran

Titik Pengukuran	Lebar Saluran (m)	Kecepatan (V), m/s				Debit Aktual (Q) m ³ /detik
		V ₁	V ₂	V ₃	Rata-Rata	
1	5.20	0.1073	0.1082	0.1073	0.1076	0.38
2	5.12	0.1073	0.1073	0.1064	0.1070	0.42
3	4.94	0.1064	0.1073	0.1064	0.1067	0.46
4	5.14	0.1064	0.1064	0.1064	0.1064	0.43

Analisis Frekuensi

Parameter statistik yang digunakan dalam analisis frekuensi melibatkan beberapa nilai berupa parameter nilai rerata (\bar{X}), *standard deviation* (S), koefisien variansi (Cv), koefisien *skewness* (Cs) serta koefisien kurtosis (Ck). Berdasarkan Data Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan Stasiun Meteorologi Syamsudin Noor dilakukan perhitungan parameter statistik menggunakan metode aritmatik sebagai berikut:

1. Mengurutkan data curah hujan harian maksimum dari terbesar ke kecil.
2. Menghitung nilai rata-rata: $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$
3. Menghitung nilai simpangan baku:

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

4. Menghitung koefisien variasi: $Cv = \frac{Sd}{\bar{X}}$

5. Menghitung koefisien kemiringan:

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n - 1)(n - 2)(Sd^3)}$$

6. Menghitung koefisien kurtosis:

$$Ck = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n - 1)(n - 2)(n - 3)(Sd^4)}$$

Hasil perhitungan analisis frekuensi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Analisis Curah Hujan Rancangan

Periode Ulang	Normal	Gumbel	Log Normal	Log Pearson Type III
T (Tahun)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2	116.57	111.05	111.99	109.44
5	147.99	150.86	142.08	140.75
10	164.42	177.21	160.89	162.74
25	180.91	210.51	182.29	191.98
50	192.00	235.21	198.27	214.91

Setelah memperoleh hasil perhitungan hujan rancangan menggunakan metode yang disebutkan sebelumnya, langkah berikutnya adalah menguji kecocokan distribusi masing-masing metode untuk menentukan distribusi mana yang paling sesuai. Hal ini dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dengan distribusi yang menghasilkan penyimpangan terkecil.

Data hasil perhitungan ini kemudian akan disesuaikan dengan Uji Chi Kuadrat dan Uji Smirnov-Kolmogorov untuk menentukan data curah hujan rancangan yang paling dapat diandalkan. Informasi detail mengenai proses ini dapat ditemukan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Pengambilan Jenis Distribusi

No	Jenis Distribusi	Hasil Perhitungan	Kesimpulan Perhitungan	Uji Chi Kuadrat	Uji Smirnov-Kolmogorov
1	Distribusi Normal	2.28	Tidak Mewakil	Mewakili	Tidak Mewakili
		11.48	Tidak Mewakil		
2	Distribusi Gumbel	2.28	Tidak Mewakil	Tidak Mewakili	Tidak Mewakili
		11.48	Tidak Mewakil		
3	Distribusi Log Normal	0.49	Tidak Mewakil	Tidak Mewakili	Tidak Mewakili
		6.40	Tidak Mewakil		
4	Distribusi Log Pearson Type III	0.49	Mewakili	Mewakili	Tidak Mewakili

Berdasarkan hasil dari Tabel 4, distribusi Log Pearson Tipe III dapat ditetapkan sebagai pilihan

yang optimal karena memenuhi kriteria dari semua pengujian yang dilakukan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, data curah hujan rancangan maksimum yang akan digunakan adalah yang bersumber dari distribusi Log Pearson Tipe III. Langkah ini diambil untuk memperoleh estimasi debit banjir rancangan yang paling besar.

Intensitas Hujan Rancangan

Penentuan intensitas hujan rancangan menggunakan metode Persamaan Mononobe. Dalam perhitungan ini, curah hujan maksimum didasarkan pada Metode Distribusi Log Pearson Tipe III, dapat dilihat pada Tabel 5.

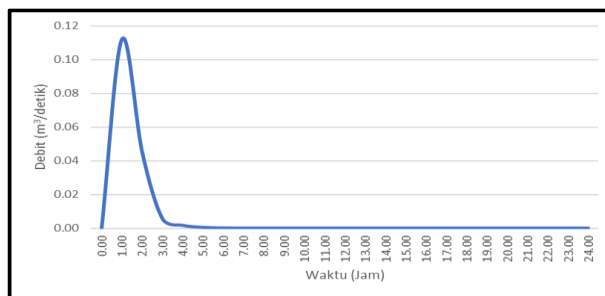
Tabel 5. Intensitas Hujan Harian Maksimum Tahunan

Lama Hujan t (jam)	Intensitas Hujan Dengan Periode Ulang				
	2 Tahun	5 Tahun	10 Tahun	25 Tahun	50 Tahun
1	37.94	48.80	56.42	66.56	74.50
2	23.90	30.74	35.54	41.93	46.93
3	18.24	23.46	27.12	32.00	35.82
4	15.06	19.36	22.39	26.41	29.57
5	12.98	16.69	19.30	22.76	25.48
6	11.49	14.78	17.09	20.16	22.56
7	10.37	13.33	15.42	18.19	20.36
8	9.49	12.20	14.10	16.64	18.63
9	8.77	11.28	13.04	15.38	17.22
10	8.17	10.51	12.16	14.34	16.05
11	7.67	9.87	11.41	13.46	15.06
12	7.24	9.31	10.76	12.70	14.21
13	6.86	8.83	10.20	12.04	13.48
14	6.53	8.40	9.71	11.46	12.83
15	6.24	8.02	9.28	10.94	12.25
16	5.98	7.68	8.89	10.48	11.73
17	5.74	7.38	8.53	10.07	11.27
18	5.52	7.10	8.21	9.69	10.85
19	5.33	6.85	7.92	9.35	10.46
20	5.15	6.62	7.66	9.03	10.11
21	4.98	6.41	7.41	8.74	9.79
22	4.83	6.21	7.19	8.48	9.49
23	4.69	6.03	6.98	8.23	9.21
24	4.56	5.86	6.78	8.00	8.95

Hidrograf Satuan Sintesis (HSS) Nakayasu

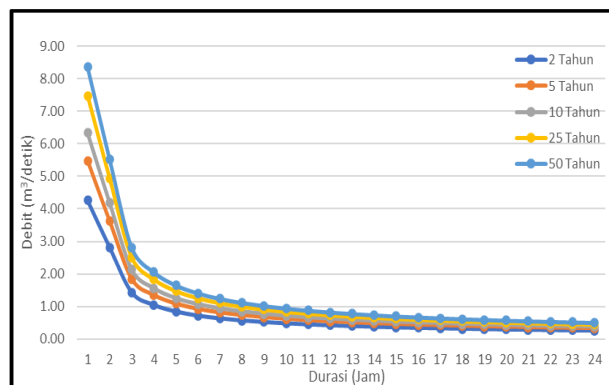
Hidrograf Satuan Sintesis (HSS) Nakayasu, yang merupakan salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam analisis hidrologi untuk menghasilkan estimasi hidrograf aliran permukaan.

Berikut hasil perhitungan HSS Nakayasu pada Gambar 7.



Gambar 7. HSS Nakayasu

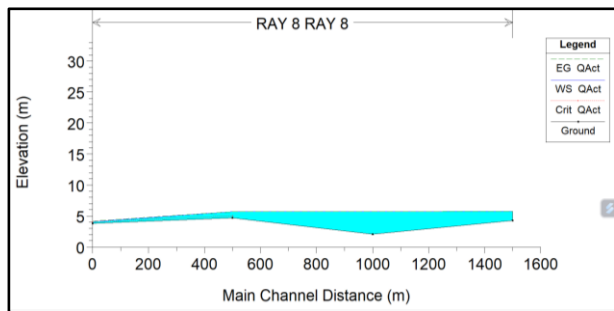
Dalam evaluasi debit banjir rancangan, berbagai tingkat kejadian banjir (Q2, Q5, Q10, Q25, dan Q50) akan dipertimbangkan. Selanjutnya, hasil perhitungan debit banjir rancangan ini akan disesuaikan dengan data debit yang diperoleh dari Analisis Hidraulika. Gambar 8 di bawah ini menunjukkan hasil dari estimasi debit banjir rancangan untuk berbagai tingkat kejadian banjir.



Gambar 8. Debit Rancangan dengan HSS Nakayasu

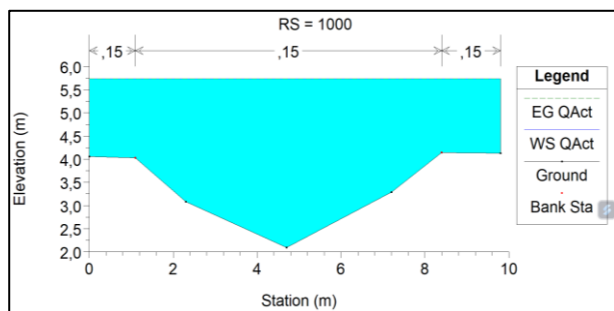
Analisis Hidraulika dengan Debit Aktual menggunakan Software HEC-RAS 6.3.1 (Steady Flow)

Simulasi hidraulika dilakukan menggunakan Software HEC-RAS 6.3.1. dengan analisis *steady flow*. Hal tersebut dilakukan karena saat survei di lapangan aliran pada saluran Ray 8 Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk cukup dalam dan arusnya relatif tenang serta memiliki kemiringan saluran relatif landai. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan tinggi muka air pada kondisi *existing* dengan simulasi menggunakan Software HEC-RAS 6.3.1. berdasarkan debit aktual yang telah diukur menggunakan alat *current meter* yang dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Profil Memanjang

Dari hasil simulasi menggunakan software *HEC-RAS 6.3.1* pada Gambar 9 dari profil memanjang pada Saluran Ray 8 Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk terdapat titik tertentu yang tidak dapat menampung air pada saluran yaitu pada STA 1+000 seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Profil Melintang Pada STA 1+000

Setelah hasil simulasi di lakukan, didapat data tinggi muka air setiap stasiun penampang. Adapun hasil dari simulasi menunjukkan 1 stasiun penampang yaitu pada STA 1+000 yang menyatakan bahwa penampang tidak sanggup menampung debit aktual. Adapun Tabel 6 menunjukkan hasil simulasi tinggi muka air berdasarkan debit aktual sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Simulasi Tinggi Muka Air Software *HEC-RAS 6.3.1* Berdasarkan Debit Aktual

No	STA	Tinggi Muka Air (m)	Status
1	0+000	0.31	Aman
2	0+500	1.01	Aman
3	1+000	3.64	Meluap
4	1+500	1.47	Aman

Perbandingan tinggi muka air berdasarkan kondisi *existing* dengan pengujian *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* untuk hasil simulasi dilakukan untuk mengetahui tingkat keakurasian hasilnya. Adapun Tabel 7 menunjukkan hasil

perbandingan tinggi muka air berdasarkan simulasi dan *existing* sebagai berikut:

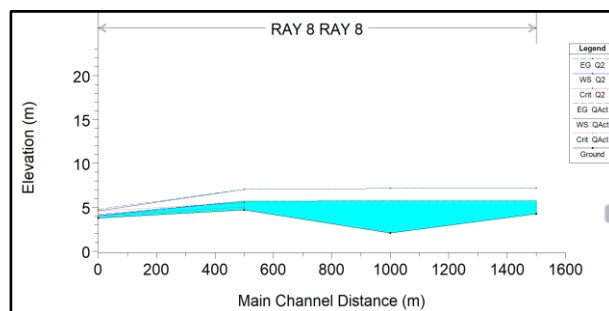
Tabel 7. Perbandingan Tinggi Muka Air Berdasarkan Simulasi dan Existing

No.	STA	Tinggi Muka Air (m)		MAPE
		Simulasi	Existing	
1	0+000	0.31	1.00	70%
2	0+500	1.01	1.18	15%
3	1+000	3.64	1.40	160%
4	1+500	1.47	1.25	17%

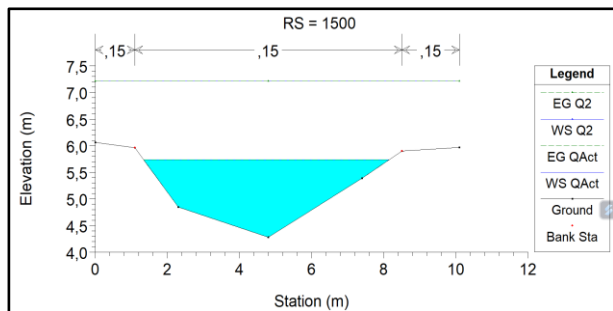
Berdasarkan perbandingan tinggi muka air hasil simulasi dan kondisi *existing* diperoleh hasil bahwa pada STA 0+500 dan STA 1+500, hasil simulasi cenderung mendekati dengan kondisi *existing* dengan nilai MAPE masing-masing sebesar 15% dan 17%. Namun, pada lokasi STA 0+000 dan STA 1+000, hasil simulasi memiliki perbedaan dengan kondisi *existing*, ditunjukkan dengan nilai MAPE masing-masing sebesar 70% dan 160%. Hal ini dapat disebabkan oleh kondisi saluran merupakan tanah lunak sehingga, rambu ukur yang digunakan saat pengukuran dapat menembus jauh ke dalam tanah. Hal ini mempengaruhi akurasi hasil pengukuran. Sehingga, menyebabkan perbedaan besar antara hasil simulasi dan kondisi *existing* yang sebenarnya.

Analisis Hidraulika dengan Debit Rancangan menggunakan Software *HEC-RAS 6.3.1 (Steady Flow)*

Analisis dengan debit rancangan dilakukan untuk memodelkan respons aliran pada saluran terhadap kondisi banjir. Pada analisis ini digunakan kondisi debit rancangan dengan kala ulang 2 tahun yang masuk ke dalam Saluran Ray 8 Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk dari seluruh banjir yang terjadi dengan perbandingan debit aktual. Adapun hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 11 dan 12.



Gambar 11. Profil Memanjang Saat Tinggi Muka Air Maksimum



Gambar 12. Profil Melintang Pada STA 1+500 Saat Tinggi Muka Air Maksimum

Hasil simulasi akibat Q_2 menunjukkan tinggi muka air yang besarnya berbeda pada setiap stasiun penampang dan tinggi muka air juga dapat berubah, karena debit tiap stasiun penampang memiliki perubahan nilai terhadap waktu. Adapun Tabel 8 dan 9 menunjukkan tinggi muka air dari hasil simulasi Q_2 dengan perbandingan Q_{act} sebagai berikut:

Tabel 8. Hasil Simulasi Tinggi Muka Air Software HEC-RAS 6.3.1 Berdasarkan Debit Rancangan Kala Ulang 2 Tahun

No	STA	Tinggi Muka Air (m)	Status
1	0+000	0.80	Aman
2	0+500	2.33	Meluap
3	1+000	5.06	Meluap
4	1+500	2.94	Meluap

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, terlihat bahwa tinggi muka air akibat Q_2 menyebabkan 3 stasiun penampang telah melebihi kapasitas normalnya. Hal tersebut mengindikasikan bahwa saluran tersebut tidak mampu menangani banjir dengan periode ulang 2 tahun secara efektif. Oleh karena itu, diperlukan perhatian lebih lanjut dalam perencanaan dan manajemen sumber daya air, serta peninjauan ataupun perbaikan infrastruktur yang ada pada saluran tersebut.

Tabel 9. Perbandingan Tinggi Muka Air Berdasarkan Debit Aktual dan Debit Rancangan

No.	STA	Tinggi Muka Air (m)	
		Q_2	Q_{act}
1	0+000	0.80	0.31
2	0+500	2.33	1.01
3	1+000	5.06	3.64
4	1+500	2.94	1.47

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada Saluran Ray 8 Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Identifikasi debit aktual pada Saluran Ray 8 Daerah Irigasi Rawa Sungai Tabuk menunjukkan bahwa pada STA 0+000; 0+500; 1+000; 1+500 secara berturut-turut bernilai 0.38 m³/detik, 0.42 m³/detik, 0.46 m³/detik, dan 0.43 m³/detik.
2. Simulasi debit aktual menunjukkan variasi tinggi muka air di setiap stasiun pengukuran. Di STA 0+500 dan STA 1+500, tinggi muka air simulasi hampir sama dengan kondisi sebenarnya, dengan nilai MAPE 15% dan 17%. Namun, di STA 0+000 dan STA 1+000, ada perbedaan besar antara simulasi dan kondisi sebenarnya, ditunjukkan oleh nilai MAPE yang tinggi, yaitu 70% dan 160%. Pada, simulasi debit rancangan dengan periode ulang 2 tahun menunjukkan tinggi muka air di STA 0+000, 0+500, 1+000, dan 1+500 berturut-turut adalah 0.80 m, 2.33 m, 5.06 m, dan 2.94 m. Hal ini mengindikasikan bahwa tiga stasiun penampang (STA 0+500, 1+000, 1+500) telah melebihi kapasitas normal dan tidak dapat menangani banjir dengan periode ulang 2 tahun secara efektif.

REFERENSI

- Abduh, A. M., Masganti, M., & Sari, N. N. (2022). Peningkatan produktivitas padi menggunakan pupuk hayati di lahan pasang surut tipe B. *Ziraa'ah Majalah Ilmiah Pertanian*, 47(3), 394-405.
- Amal, N. (2021). *Analisis Karakteristik Dan Formulasi Rawa Dengan Pendekatan Variabel Hidrologi Rawa* (Vol. 22).
- Amal, N., Helda, N., Rusdiansyah, A., Wijayanto, M. R., & Muammar, F. (2022). Analysis of hydrology parameters in a tropical wetland as an early approach to identify a drought risk in a peatland area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 999, 012011.
- Amal, N., & Wiranata, H. A. (2023). Pengaruh Distribusi Hujan terhadap Perhitungan Debit Banjir pada Daerah Rawa DAS Mastapura. 6(2), 217-231.
- Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Selatan. (2025). *Provinsi Kalimantan Selatan Dalam Angka 2025*. BPS Provinsi Kalimantan

Selatan

- Chow, V. T. (1992). *Hidrolika Saluran Terbuka* (E. V. Nensi Rosalina, Penerj.). Jakarta: Erlangga
- Fitriani, Y., Nurlina, N., & Ridwan, I. (2025). Spatiotemporal analysis of wetland environmental changes using machine learning and remote sensing data. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 16(4), 418-432.
- Hermawanto, H. A. (2023). Kajian sebaran salinitas dengan model HEC-RAS di Daerah Irigasi Tambak Sei Teras Kalimantan Tengah. *Jurnal Sumber Daya Air*, 19(2), 96-107.
- Noor, M., Sukarman, S., Masganti, M., Hairani, A., Khairullah, I., & Alwi, M. (2022). Lima puluh tiga tahun penelitian dan pengembangan lahan rawa untuk pertanian dan produksi pangan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 16(2), 111-118.
- Nurlina, N., Kadir, S., Kurnain, A., Ilham, W., & Ridwan, I. (2023). Impact of land cover changing on wetland surface temperature based on multitemporal remote sensing data. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(3), 2281-2291.
- Purboyo, W. (2020). Penilaian Kinerja dan AKNOP Daerah Irigasi Rawa DR Malind Kabupaten Merauke, Provinsi Papua. *Indonesian Journal of Construction Engineering and Sustainable Development (CESD)*, 3(1), 10–22.
- Puspitahati, Perdana, A., Handayani, P. N. A., & Rahmawati, L. (2024). Sistem tata air, kendala dan potensi lahan rawa lebak di Instalasi Penelitian dan Pengkajian Teknologi Pertanian (IP2TP) Kayuagung Sumatera Selatan. *Jurnal Daun*, 11(2), 207-221.
- Rahmah, N., Amal, A. N., & Helda, N. (2023). Analisis Kapasitas Sungai Debit Terukur dengan Metode Haspers. *Buletin Profesi Insinyur* 6(3), 64–71.
- Ramadhan, A., Herteno, R., & Farmadi, A. (2025). Deep CNN for wetland mapping from satellite imagery. *Jurnal Teknik Informatika (JUTIF)*, 6(5), 3971-3982.
- Wulandari, R.A., & Amal, N. (2024). Analisis Neraca Air Sesuai Pola Tanam Eksisting Padi Lokal pada Daerah Irigasi Rawa (DIR) Antaasan Sutun Kabupaten Banjar. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*. 6(1):94-101.
- Zevri, A., Rahardjo, A. P., & Legono, D. (2023). Efforts to optimize the operation of the Dadahup Lowland Irrigation Area in Central Kalimantan. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(2).

Pemanfaatan QGIS dalam Penentuan Rute dan Lokasi Halte Optimal Feeder Wirawiri FD09 di Kawasan Kampus Unesa Ketintang

The Utilization of QGIS in Determining the Route and Location of the Optimal Feeder Wirawiri FD09 Bus Stop in the Unesa Ketintang Campus Area

Irfan Zhain^{1*}, Prathita Muti'a Yuzaeva²

¹ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Jln. Ketintang Surabaya.

² Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Keputih, Sukolilo, Surabaya, East Java 60117

Email : irfanzhain@unesa.ac.id

Abstrak

Pergerakan mahasiswa menuju Kampus Unesa Ketintang kerap memicu kemacetan akibat dominasi kendaraan pribadi dan keterbatasan transportasi publik. Penelitian ini bertujuan menentukan rute optimal *Feeder* Wirawiri FD09 dan lokasi halte strategis menggunakan analisis Matriks Asal-Tujuan serta *Multi Criteria Analysis* berbasis GIS. Pendekatan spasial kuantitatif deskriptif-analitis dengan QGIS digunakan untuk menganalisis pola perjalanan, potensi permintaan, dan keterjangkauan layanan. Hasil penelitian menunjukkan 67% responden (254 mahasiswa) bersedia beralih ke *feeder* jika rute masuk ke area kampus dan halte berada dekat fakultas. Berdasarkan analisis spasial dengan radius jalan kaki 300–400 meter, direkomendasikan penyesuaian rute alternatif memasuki kampus dan penambahan empat titik halte baru: Halte Teknik Informatika, Halte Lapangan Tennis, Halte Fakultas Ekonomika dan Bisnis, serta Halte Gerbang Depan Kampus. Penggunaan QGIS terbukti efektif dalam menyajikan rekomendasi lokasi terukur berbasis data spasial. Penyesuaian rute dan halte ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi mobilitas civitas akademika serta mendukung sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Transportasi Publik; Feeder Wirawiri; QGIS; Aksesibilitas; Kampus Unesa Ketintang.

Abstract

Student commuting to the Unesa Ketintang Campus often causes traffic congestion due to the dominance of private vehicles and underutilized public transportation. This study aims to determine the optimal route for the Wirawiri FD09 feeder bus and strategic stop locations through Origin-Destination Matrix and GIS-based Multi Criteria Analysis. A quantitative descriptive-analytical approach with spatial analysis using QGIS was employed to analyze travel patterns, demand potential, and service accessibility. The results indicate that 67% of respondents (254 students) are willing to shift to the feeder service if the route enters the campus and stops are located near faculties. Based on spatial analysis with a 300–400meter walking radius, this study recommends adjusting alternative routes into the campus and establishing four new stops: the Informatics Engineering, Tennis Court, Faculty of Economics and Business, and Front Gate stops. The application of QGIS effectively provides measurable, data-driven spatial recommendations. These route and stop adjustments are expected to enhance academic mobility efficiency and support sustainable urban transportation systems.

Keywords: Public Transportation; Wirawiri Feeder; QGIS; Accessibility; Unesa Ketintang Campus

PENDAHULUAN

Pertumbuhan aktivitas pendidikan tinggi di kawasan perkotaan berkontribusi signifikan terhadap peningkatan pergerakan harian, khususnya perjalanan mahasiswa menuju dan dari kampus.. Peningkatan perjalanan pada jam puncak sering kali memicu kemacetan dengan penggunaan kendaraan (pribadi, serta menurunnya kinerja lalu lintas di sekitar kawasan kampus. Menurut Primatama, Mega; Raushanfikra, (2023) Ketergantungan terhadap kendaraan pribadi semakin diperburuk oleh belum optimalnya layanan transportasi publik, yang memicu isu eksklusif sosial bagi kelompok masyarakat tanpa akses kendaraan pribadi. Kualitas layanan yang rendah ini terindikasi dari keterbatasan jangkauan rute, minimnya jumlah armada, serta rendahnya frekuensi operasional. Kondisi ini menunjukkan pentingnya penyediaan sistem angkutan umum yang terintegrasi, mudah diakses, dan mampu melayani kebutuhan mobilitas civitas akademika secara efektif (Vuchic, 2005) dan (Litman, 2020).

Angkutan feeder berperan sebagai penghubung antara kawasan permukiman, pusat aktivitas, dan simpul transportasi utama. Namun, efektivitas layanan feeder sangat dipengaruhi oleh kesesuaian rute dan lokasi halte terhadap pola pergerakan pengguna. Menurut Daniels & Mulley, (2011). Jarak halte yang terlalu jauh, keterbatasan fasilitas pejalan kaki, serta rute yang tidak langsung menuju pusat aktivitas utama dapat menurunkan minat masyarakat untuk menggunakan angkutan umum, khususnya kelompok pengguna pilihan (*choice users*) seperti mahasiswa. Menurut Boarnet et al., 2017; Chandra et al., 2013; Handy et al., (2016) dalam penelitian Kasim & Jihad, (2024). Kemudahan dan kecepatan akses terhadap layanan transportasi publik berkontribusi signifikan terhadap efisiensi biaya perjalanan bagi pengguna. Selain itu, peningkatan aksesibilitas ini berpeluang mengoptimalkan penerimaan pendapatan bagi operator penyedia jasa transportasi.

Aksesibilitas halte merupakan faktor kunci dalam meningkatkan permintaan angkutan umum. Berbagai penelitian menyebutkan bahwa jarak berjalan kaki yang masih dapat diterima menuju halte berkisar antara 300–400 meter, dengan kenyamanan dan keselamatan pejalan kaki sebagai faktor pendukung Kementerian Pekerjaan Umum, (2014). Apabila aksesibilitas tidak terpenuhi, maka potensi permintaan yang sebenarnya ada di sepanjang koridor layanan tidak dapat dimanfaatkan secara optimal.

Potensi *demand* adalah jumlah permintaan yang terdapat di sepanjang koridor pelayanan rute yaitu pada 400 meter di kiri dan 400 di kanan ruas jalan. Jarak ini diambil sebagai dasar pertimbangan bahwa jarak terjauh yang mampu dilalui pengguna angkutan umum dengan berjalan kaki sebelum mencapai lokasi halte/terminal adalah 400 meter (Nursita dkk., 2017). Untuk mengetahui jumlah *demand* tersebut, dilakukan analisis potensi *demand* berdasarkan hasil filter asal-tujuan yang sesuai dengan trayek FD09 menggunakan Matriks Asal-Tujuan (MAT) yang dibebankan pada jaringan jalan, dengan input data jumlah mahasiswa per fakultas, persentase kemauan beralih moda dari survei, dan pola pergerakan perjalanan mahasiswa, guna mengetahui jumlah *demand* calon penumpang Feeder Wirawiri Suroboyo dari Kampus Unesa Ketintang.

Dalam konteks perencanaan dan evaluasi rute angkutan umum, Sistem Informasi Geografis (SIG) telah banyak digunakan sebagai alat analisis spasial untuk mengintegrasikan data jaringan jalan, sebaran aktivitas, serta lokasi pemberhentian angkutan. Pemanfaatan perangkat lunak QGIS memungkinkan analisis berbasis lokasi secara komprehensif, seperti pemetaan daerah tangkapan layanan (*service area*), penentuan rute alternatif, dan evaluasi keterjangkauan halte terhadap pusat aktivitas (Farber & Fu, 2017) dan (Cats dkk., 2016). Menurut Petrus, (2025) Pemanfaatan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) melalui perangkat lunak seperti QGIS memungkinkan konversi data spasial menjadi representasi visual yang tidak hanya akurat, tetapi juga interaktif dan mudah diinterpretasikan. Pendekatan ini dinilai efektif dalam mendukung pengambilan keputusan perencanaan transportasi perkotaan yang berbasis data dan kebutuhan pengguna, dengan ukuran efektivitas berupa akurasi analisis spasial, efisiensi waktu pemrosesan data, dan kemampuan menghasilkan rekomendasi lokasi yang terukur berdasarkan kriteria aksesibilitas.

Oleh karena itu, pemanfaatan QGIS dalam penentuan rute dan lokasi halte optimal pada layanan feeder di kawasan kampus menjadi penting untuk meningkatkan aksesibilitas, mendorong peralihan moda dari kendaraan pribadi ke angkutan umum, serta mendukung sistem transportasi perkotaan yang berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengelola transportasi perkotaan dalam merancang layanan feeder yang lebih responsif terhadap pola perjalanan dan karakteristik kawasan pendidikan.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif deskriptif–analitis dengan pendekatan spasial dan operasional transportasi. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja eksisting Feeder Wirawiri FD09 serta menentukan rute dan lokasi halte optimal dengan memanfaatkan Sistem Informasi Geografis (SIG) menggunakan perangkat lunak QGIS.

➤ Lokasi dan Objek Penelitian

Lokasi penelitian berada pada koridor pelayanan Feeder Wirawiri Suroboyo FD09 rute Terminal Menanggal–Terminal Manukan yang melintasi kawasan Kampus Universitas Negeri Surabaya (Unesa) Ketintang. Objek penelitian meliputi rute feeder eksisting, lokasi halte, aksesibilitas pejalan kaki, serta potensi permintaan (*demand*) mahasiswa Unesa Ketintang.

➤ Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan terdiri atas:

1. Data primer, meliputi:

- Survei kuesioner mahasiswa terkait asal–tujuan perjalanan dan kesediaan menggunakan feeder;
- Pengukuran jarak dan kondisi aksesibilitas halte terhadap kawasan kampus.

2. Data sekunder, meliputi:

- Peta jaringan jalan dan rute feeder;
- Jadwal dan spesifikasi operasional Feeder Wirawiri FD09;
- Ketentuan dan standar teknis transportasi yang berlaku.

➤ Tahapan Analisis Penelitian

Tahapan analisis dalam penelitian ini meliputi:

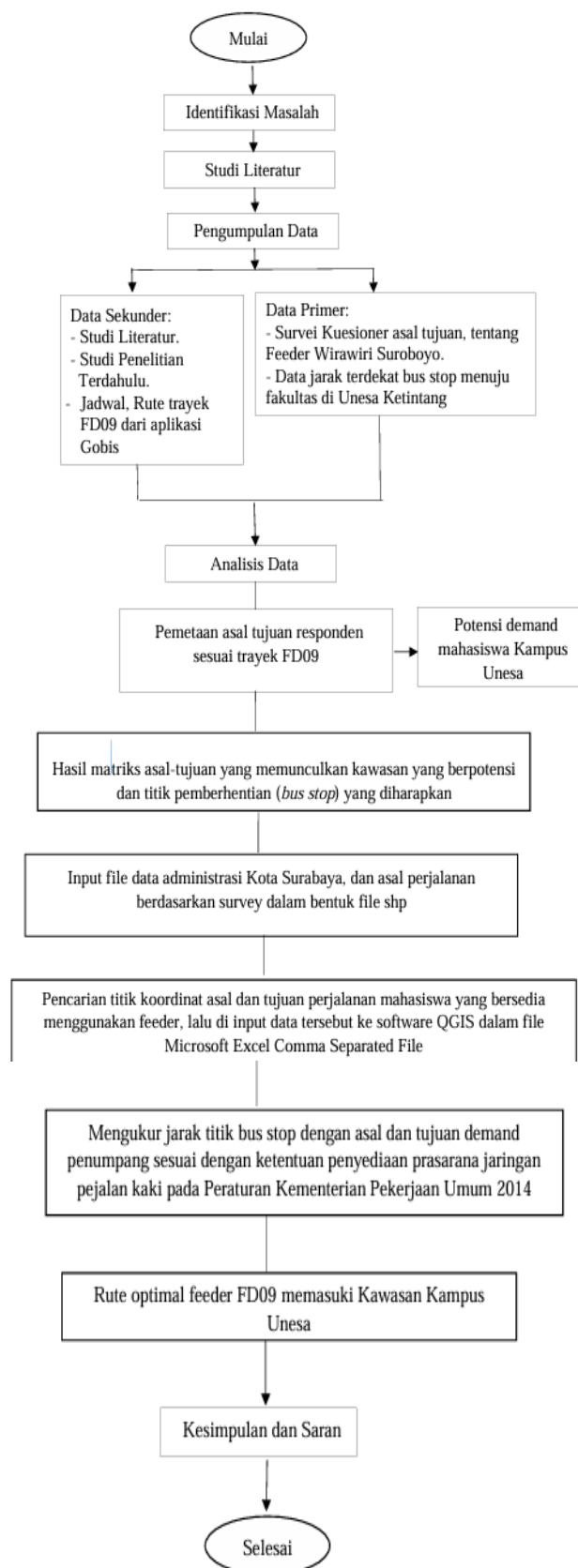
a. Analisis Potensi *Demand*

Analisis permintaan dilakukan berdasarkan hasil kuesioner mahasiswa Unesa Ketintang dan matriks asal–tujuan perjalanan. Potensi *demand* ditentukan pada koridor pelayanan dengan radius akses pejalan kaki maksimal 400 meter dari rute feeder.

b. Analisis Spasial Menggunakan QGIS

Data koordinat rute, halte eksisting, serta sebaran asal–tujuan mahasiswa dipetakan menggunakan QGIS. Analisis spasial dilakukan untuk:

1. Mengidentifikasi jarak halte eksisting terhadap fakultas;
2. Menentukan rute alternatif feeder yang masuk ke kawasan kampus;
3. Menetapkan lokasi halte baru yang optimal berdasarkan keterjangkauan dan aksesibilitas



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan dari hasil analisis penelitian didapatkan sebagai berikut:

1. Potensi Permintaan (*Demand*) Mahasiswa Unesa Ketintang

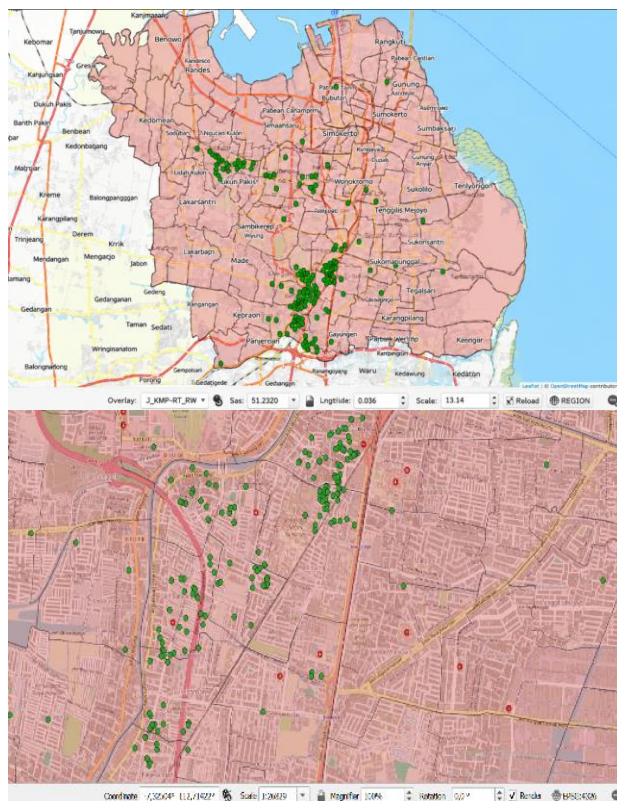
Berdasarkan hasil survei kuesioner dengan menggunakan metode Stated Preference (SP) kepada mahasiswa, diperoleh bahwa 67% responden (254 mahasiswa) menyatakan bersedia menggunakan Feeder Wirawiri FD09 apabila rute feeder masuk ke dalam kawasan kampus dan lokasi halte lebih dekat dengan fakultas. Analisis mode shifting menggunakan pendekatan Stated Preference menunjukkan bahwa atribut aksesibilitas dan cakupan rute merupakan faktor determinan dalam keputusan pemilihan moda. Berdasarkan model logit biner, probabilitas peralihan moda sebesar 0,67 tercapai ketika utilitas moda feeder (yang dipengaruhi waktu tempuh, biaya, kenyamanan, dan aksesibilitas) melebihi utilitas moda kendaraan pribadi. Hasil analisis matriks asal-tujuan menunjukkan bahwa sebagian besar perjalanan mahasiswa berasal dari wilayah yang dilalui oleh rute FD09, sehingga memiliki potensi integrasi yang tinggi apabila aksesibilitas halte ditingkatkan.

2. Hasil Analisis Spasial Menggunakan QGIS

Analisis spasial menggunakan QGIS menghasilkan pemetaan sebaran asal-tujuan mahasiswa, rute feeder eksisting, serta cakupan layanan halte. Untuk kelurahan asal mahasiswa bersedia yang dapat dilalui oleh Feeder Wirawiri FD 09 diantaranya adalah:

- Kelurahan Lontar
- Kelurahan Putat Gede
- Kelurahan Sukomanunggal
- Kelurahan Tanjungsari
- Kelurahan Balongsari
- Kelurahan Manukan Kulon
- Kelurahan Tandés
- Kelurahan Dukuh Kupang
- Kelurahan Gunung Sari
- Kelurahan Dukuh Menanggal
- Kelurahan Gayungan
- Kelurahan Ketintang
- Kelurahan Menanggal
- Kelurahan Jambangan
- Kelurahan Karah
- Kelurahan Kebonsari
- Kelurahan Pagesangan
- Kelurahan Darmo
- Kelurahan Wonokromo

Berikut untuk plotting asal perjalanan mahasiswa Unesa menggunakan QGIS dapat dilihat pada Gambar 2.

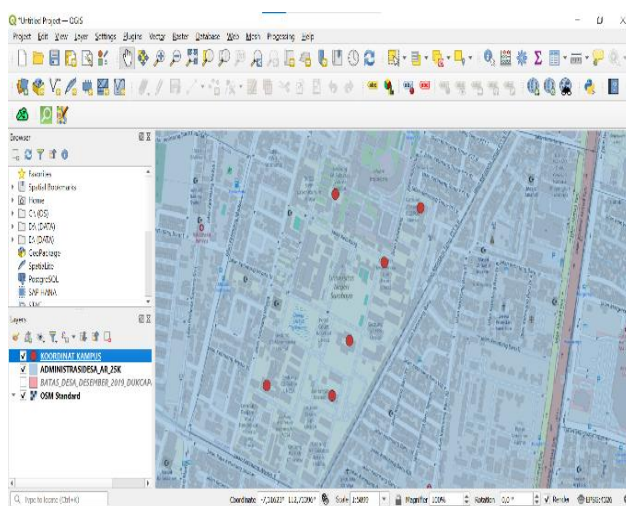


Gambar 2. *Plotting* sebaran asal perjalanan mahasiswa

Untuk tujuan perjalanan mahasiswa bersedia diantaranya adalah:

- Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik
- Fakultas Ekonomika dan Bisnis
- Fakultas Hukum
- Fakultas Teknik
- Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
- Fakultas Vokasi

Berikut untuk plotting tujuan perjalanan mahasiswa Unesa menggunakan QGIS dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. *Plotting* sebaran tujuan perjalanan mahasiswa

Berdasarkan analisis akses pejalan kaki sejauh 400 meter, yang mengacu pada Peraturan Menteri PU No. 03/PRT/M/2014 tentang Pedoman Jaringan Pejalan Kaki dan studi sebelumnya yang menyatakan jarak 300–400 m masih nyaman bagi pejalan kaki, diusulkan rute feeder alternatif yang memasuki kawasan Kampus Unesa Ketintang.

Hasil pemodelan spasial merekomendasikan empat lokasi halte optimal, yaitu Halte Teknik Informatika, Halte Lapangan Tennis, Halte Fakultas Ekonomika dan Bisnis, serta Halte Gerbang Depan Kampus. Empat titik halte ini muncul dari analisis Multi-Criteria Analysis (MCA) berbasis GIS yang mengidentifikasi grid dengan skor tertinggi berdasarkan 4 kriteria: aksesibilitas (jarak ke fakultas), cakupan wilayah (buffer 300–400 m), potensi permintaan (jumlah mahasiswa), dan keterjangkauan (jarak ke rute). Keempat lokasi dipilih karena memiliki skor MCA tertinggi dan memenuhi kriteria minimum jarak antar halte, serta mewakili 4 konsentrasi mahasiswa terbesar di kampus:

a. Halte Teknik Informatika

Untuk tujuan perjalanan/tempat yang dapat dijangkau dari titik halte rencana tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tempat yang dapat dijangkau dari bus stop rencana Teknik Informatika A dan B

No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak	Waktu (menit)		
			dari halte menuju titik tujuan (m)			
1	Teknik Informatika A	Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam	120m	2 menit		
		Teknik Sipil dan PKK	180 m	3 menit		
		Teknik Mesin	240 m	3 menit		
		Teknik Elektro	170 m	2 menit		
		Danau Unesa Ketintang	300 m	4 menit		
		Foodcourt Baseball	280m	4 menit		
		Masjid Baitul Makmur	350m	5 menit		
		Fakultas Matematika dan Ilmu	120m	2 menit		
		2	Teknik Informatika B	Fakultas Matematika dan Ilmu	120m	2 menit

No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak	Waktu (menit)	
			dari halte menuju titik tujuan (m)		
			Pengetahuan Alam		
			Teknik Sipil dan PKK	180 m	3 menit
			Teknik Mesin	240 m	3 menit
			Teknik Elektro	170 m	2 menit
			Danau Unesa Ketintang	300 m	4 menit
			Foodcourt Baseball	280m	4 menit
			Masjid Baitul Makmur	350m	5 menit

Sumber: Data Olahan (2026)

b. Halte Lapangan Tennis

Untuk tujuan perjalanan/tempat yang dapat dijangkau dari titik halte rencana tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tempat yang dapat dijangkau dari bus stop rencana Lapangan Tennis A dan B

No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak	Waktu (menit)
			dari halte menuju titik tujuan (m)	
1	Lapangan Tennis A	Fakultas Teknik	300m	4 menit
		Fakultas Hukum	66m	1 menit
		Fakultas Ekonomika dan Bisnis	150 m	2 menit
		Bank BTN	170m	2 menit
		Foodcourt Baseball	170m	2 menit
		Danau Unesa Ketintang	200m	3 menit
		Masjid Baitul Makmur	350m	5 menit
		UKM Center	210 m	3 menit
		Gedung Serba Guna	280 m	4 menit
		2	Lapangan Tennis B	Fakultas Teknik
		Fakultas Hukum	66m	1 menit

No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak dari halte menuju titik tujuan (m)	Waktu (menit)
		Fakultas Ekonomika dan Bisnis	150 m	2 menit
		Bank BTN	170m	2 menit
		Foodcourt Baseball	170m	2 menit
		Danau Unesa Ketintang	200m	3 menit
		Masjid Baitul Makmur	350m	5 menit
		UKM Center	210 m	3 menit
		Gedung Serba Guna	280 m	4 menit

Sumber: Data Olahan (2026)

No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak dari halte menuju titik tujuan (m)	Waktu (menit)
1.	Gerbang Depan A	Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik	220m	3 menit
		Klinik Unesa	97m	1 menit
2.	Gerbang Depan B	Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik	220m	3 menit
		Klinik Unesa	97m	1 menit

c. Halte Fakultas Ekonomika dan Bisnis

Untuk tujuan perjalanan/tempat yang dapat dijangkau dari titik halte rencana tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

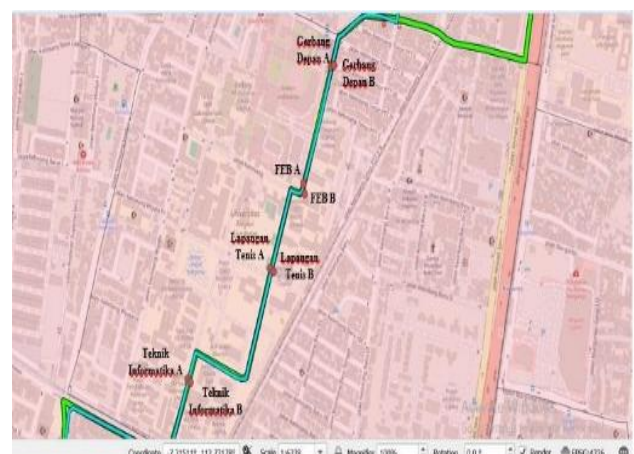
Tabel 3. Tempat yang dapat dijangkau dari bus stop rencana Fakultas Ekonomika dan Bisnis A dan B

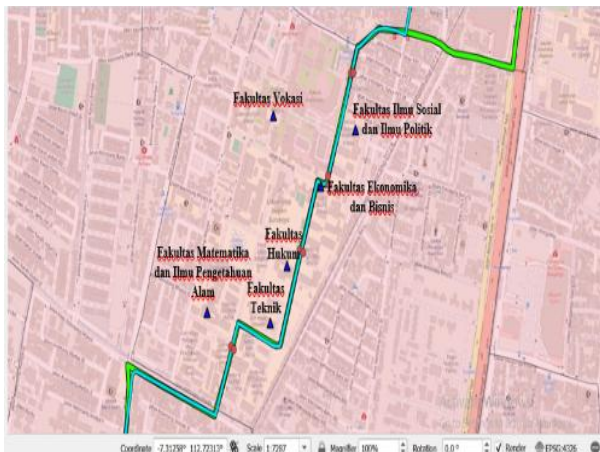
No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak dari halte menuju titik tujuan (m)	Waktu (menit)
1	Fakultas Ekonomika dan Bisnis A	Fakultas Ekonomika dan Bisnis	72 m	1 menit
		Bank BTN	83 m	1 menit
		UKM Center	91m	1 menit

No	Lokasi Rencana Titik Halte	Titik Tujuan/Tempat yang ada Unesa Ketintang	Jarak dari halte menuju titik tujuan (m)	Waktu (menit)
		Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik	150m	2 menit
		Gedung Serba Guna	170m	2 menit
		Fakultas Vokasi	300m	4 menit
		Foodcourt Baseball	400m	5 menit
		Fakultas Ekonomika dan Bisnis	72 m	1 menit
		Bank BTN	83 m	1 menit
		UKM Center	91m	1 menit
2	Fakultas Ekonomika dan Bisnis B	Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik	150m	2 menit
		Gedung Serba Guna	170m	2 menit
		Fakultas Vokasi	300m	4 menit
		Foodcourt Baseball	400m	5 menit

Sumber: Data Olahan (2026)

Tingkat keterjangkauan layanan feeder telah diukur secara objektif melalui indikator seperti penurunan jarak dan waktu tempuh ke halte, peningkatan persentase mahasiswa dalam radius 400 meter, lonjakan penggunaan berbasis data, serta hasil survei pengguna, sehingga dapat disimpulkan bahwa rerouting rute FD09 ke dalam kawasan kampus benar-benar meningkatkan keterjangkauan layanan terhadap pusat aktivitas mahasiswa dan fakultas utama, yang membuat pernyataan tersebut didukung oleh bukti empiris dan terukur. dapat dilihat pada Gambar 4. dan Gambar 5.





Gambar 4. Plotting titik halte dan rute rencana memasuki kawasan Kampus Unesa Ketintang menggunakan software QGIS



Gambar 5. Perbandingan trayek antara rute eksisting dengan rute rencana

KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil analisis tersebut, didapatkan kesimpulan dari pemanfaatan QGIS dalam penentuan rute dan lokasi halte optimal untuk Feeder Wirawiri FD09 di kawasan Kampus Unesa Ketintang sebagai berikut:

1. Potensi Permintaan (*Demand*) 254 mahasiswa bersedia beralih menggunakan Feeder Wirawiri FD09 jika rute tersebut masuk ke dalam area kampus dan lokasi halte diletakkan lebih dekat dengan fakultas. Dengan mayoritas perjalanan mahasiswa berasal dari wilayah yang sudah dilalui oleh rute eksisting FD09, sehingga terdapat potensi integrasi moda yang tinggi jika aksesibilitas ditingkatkan.
2. Optimalisasi aksesibilitas jarak berjalan kaki yang ideal menuju halte adalah antara 300-400 meter. Berdasarkan standar ini, diusulkan rute alternatif yang masuk ke dalam kawasan

kampus dengan rekomendasi lokasi Halte baru melalui analisis spasial menggunakan perangkat lunak QGIS, direkomendasikan empat titik lokasi halte baru yang dinilai optimal untuk menjangkau pusat aktivitas mahasiswa sebagai berikut:

- a. Halte Teknik Informatika (A & B) menjangkau Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Teknik Sipil dan PKK, Teknik Mesin, Teknik Elektro, Danau Unesa Ketintang, Foodcourt Baseball, Masjid Baitul Makmur dengan waktu tempuh rata-rata 2-5 menit jalan kaki
- b. Halte Lapangan Tenis (A & B) menjangkau Fakultas Teknik, Fakultas Hukum, Fakultas Ekonomika dan Bisnis, Bank BTN, Foodcourt Baseball, Danau Unesa Ketintang, Masjid Baitul Makmur, UKM Center, Gedung Serba Guna dengan waktu tempuh rata-rata 1-5 menit jalan kaki
- c. Halte Fakultas Ekonomika dan Bisnis (A & B) menjangkau Fakultas Ekonomika dan Bisnis, Bank BTN, UKM Center, Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, Gedung Serba Guna, Fakultas Vokasi, Foodcourt Baseball dengan waktu tempuh rata-rata 1-5 menit jalan kaki
- d. Halte Gerbang Depan Kampus (A & B) menjangkau Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik dan Klinik Unesa.

Penggunaan QGIS terbukti efektif sebagai alat analisis spasial untuk mengintegrasikan data jaringan jalan dengan sebaran aktivitas pengguna guna mendukung pengambilan keputusan transportasi perkotaan yang berbasis data, karena telah teruji dalam konteks nyata melalui studi kasus di kota seperti Jakarta dan Yogyakarta, di mana QGIS mampu mempercepat proses analisis dari hari menjadi jam, menghasilkan output visual yang mudah dipahami oleh pengambil keputusan, serta memberikan dampak terukur seperti perbaikan rute transportasi umum dan perencanaan infrastruktur yang lebih akurat, yang didukung oleh data lapangan, publikasi ilmiah, dan adopsi berkelanjutan oleh instansi terkait, sehingga kriteria efektivitas terpenuhi: mencapai tujuan, efisien, terukur, dapat direplikasi, dan memberikan dampak nyata pada kebijakan publik.. Penyesuaian rute dan lokasi halte ini diharapkan dapat mendorong peralihan moda dari kendaraan pribadi ke angkutan umum, yang pada akhirnya membantu mengurangi kemacetan di sekitar kawasan pendidikan

REFERENSI

- Cats, O., West, J., & Eliasson, J. (2016). A dynamic stochastic model for evaluating congestion and crowding effects in transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 89, 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.04.001>
- Daniels, R., & Mulley, C. (2011). Explaining walking distance to public transport. *World Symposium on Transport and Land Use Research*, , Whistler Canada, July, 28–30.
- Farber, S., & Fu, L. (2017). Dynamic public transit accessibility using travel time cubes: Comparing the effects of infrastructure (dis)investments over time. *Computers, Environment and Urban Systems*, 62, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.10.005>
- Kasim, M. R., & Jihad, A. (2024). Analisis Integrasi Angkutan Kota sebagai Feeder Angkutan Bus Trans Mamminasata Berdasarkan Tujuan dan Sebaran Pergerakan. *Jurnal Kridatama Sains Dan Teknologi*, 6(01), 99–112. <https://doi.org/10.53863/kst.v6i01.1015>
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2014). Pedoman Perencanaan, Penyediaan, dan Sarana Jaringan Pejalan Kaki di Kawasan Perkotaan. *Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia*, 2013, 8.
- Litman, T. (2020). Evaluating Public Transportation Health Benefits Summary of Findings. *Victoria Transport Policy Institute*, April, 1–36. www.vtpi.orgInfo@vtpi.org
- Nursita, I., Yulianto, B., & Legowo, S. J. (2017). Analisis Potensi Demand, Ability To Pay (ATP) dan Willingness To Pay (WTP) BST Koridor 1 dengan adanya Sistem Contra Flow di Jalan Brigjen Slamet Riyadi pada Sekolah. *E-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL*, 75–82. <https://jurnal.uns.ac.id/matriks/article/view/36940>
- Primatama, Mega; Raushanfikra, A. (2023). Laporan Peningkatan Aksesibilitas. *Institute for Transportation and Development Policy (ITDP)*, November.
- Vuchic, V. R. (2005). *Urban transit operations, planning and economics*.

Perencanaan Geometrik Dan Analisis Kebutuhan Material Badan Jalan Rel *Double Track* Pada Lintasan KM 309+260 – KM 302+600 Divre IV Tanjung Karang

Double Track Railway Planning On the Track KM 309+260 – KM 302+600 Section Divre IV Tanjung Karang

Febriyadi¹, Arif Setyaji¹, Exaudi¹, Nur Anisa Mardhotila¹, Muhammad Riski Arif¹,
Nurwanda Sari¹, Siti Maulidina¹, Hadyan Arifin Bustam²

¹ Jurusan Teknik Perkeretaapian, Fakultas Infrastruktur dan kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera,
Lampung Selatan, Lampung, Indonesia

² Program Studi Teknik sipil , Universitas Teknokrat Indonesia, Lampung, Indonesia

Email: febriyadi@ka.itera.ac.id

Abstrak

Distribusi Batu-Bara pada PT Bukit Asam menggunakan transportasi kereta api. Hal tersebut dinilai cukup efisien sesuai dengan kemampuan kereta api yang mampu mengangkut penumpang maupun barang dalam jumlah muatan besar dalam satu kali perjalanan. Namun dalam hal keunggulan, kereta api hanya bergantung pada sebuah jalur yang mengakibatkan jarak, beban dan kapasitas lintas yang terbatas. Perencanaan jalur *Double Track* memiliki keunggulan dalam menghadapi permasalahan terkait beban dan kapasitas lintas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui solusi terkait beban lintas yang diterima pada sebuah lintasan dengan menambah sebuah jalur Kereta Api (*Double Track*) tanpa merubah *existing* jalur yang telah ada. Pada perencanaan jalan rel menggunakan kelas jalan rel dengan klasifikasi kelas I, lebar sepur 1067 mm dan panjang Trase 6,40 km. Jalan rel ini direncanakan dengan 4 lengkung *Alinyemen Horisontal* menggunakan tipe lengkung *Spiral Circle Spiral* (jari jari 850 m) dan lengkung *Full Circle* (jari jari 1650 m). Perencanaan *Alinyemen Vertikal* terapat 2 lengkung dengan jari-jari rencana 7000 m dengan nilai kelandaian sebesar 6,6%. Kebutuhan material Struktur jalan rel yang direncanakan terdiri dari Rel R60 (497 unit), Penambat elastic ganda (41.400 unit), Bantalan Beton (10.350 unit), Volume Balas (7,173 m³), Volume Balas (15.897 m³), Volume Galian (567.743 m³), dan Volume Timbunan (205.269 m³).

Kata Kunci: *Alinyemen Horizontal; Alinyemen Vertikal; Double Track; Trase, rel.*

Abstract

Coal distribution at PT Bukit Asam uses railway transportation. This is considered quite efficient given the capability of trains to carry both passengers and goods in large quantities in a single trip. However, in terms of advantages, trains on a single track face limitations in distance, load, and traffic capacity. Planning a *Double Track* route offers advantages in addressing issues related to load and traffic capacity. This study aims to find solutions regarding the traffic load on a track by adding a railway line (*Double Track*) without changing the existing track. In rail track planning, the track uses rail classes with a Class I classification, a track gauge of 1067 mm, and a route length of 6.40 km. This railway is planned with 4 Horizontal Alignment curves using the *Spiral Circle Spiral* curve type (radius 850 m) and *Full Circle* curve (radius 1650 m). The Vertical Alignment planning includes 2 curves with a planned radius of 7000 m and a gradient value of 6.6%. The material requirements for the planned railway structure consist of R60 Rails (497 units), Double Elastic Fasteners (41,400 units), Concrete Sleepers (10,350 units), Ballast Volume (7,173 m³), Ballast Volume (15,897 m³), Cut Volume (567,743 m³), and Fill Volume (205,269 m³).

Keywords: *Alinyemen Horisontal; Alinyemen Vertikal; Double Track; Trase.*

PENDAHULUAN

Kereta api merupakan moda transportasi darat massal yang memiliki keunggulan komparatif berupa kapasitas angkut yang besar dan efisiensi energi yang tinggi dibandingkan transportasi jalan raya. Di Indonesia, pengembangan infrastruktur kereta api menjadi prioritas nasional guna mendukung konektivitas dan logistik, sebagaimana tercantum dalam Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNas) hingga tahun 2030 (Danang, 2021). Salah satu pilar penting logistik nasional berbasis kereta api berada di wilayah Divisi Regional (DIVRE) IV Tanjung Karang, Lampung. Bersama DIVRE III Palembang, wilayah ini melayani angkutan komoditas strategis berupa batu bara pasokan energi nasional menggunakan Kereta Api Batu Bara Rangkaian Panjang (Babaranjang). Setiap rangkaian Babaranjang mampu menarik 50–60 gerbong berkapasitas 40–60 ton per gerbong dengan dukungan 2–3 lokomotif berat seperti seri CC 202 yang berbobot hingga 108 ton.

Peningkatan volume angkutan batu bara yang terus dipacu untuk memenuhi kebutuhan energi nasional berdampak langsung pada tingginya frekuensi perjalanan (*headway*) kereta api. Pada kondisi eksisting, lintasan KM 309+260 sampai dengan KM 302+600 yang menghubungkan Stasiun Tanjung Rambang dan Stasiun Sukamerindu masih beroperasi sebagai jalur tunggal (*single track*). Keterbatasan jalur tunggal ini memicu kejenuhan kapasitas lintas (*capacity bottleneck*), tingginya waktu tunggu antar-kereta (*delay time*), serta risiko penurunan keandalan struktur jalan rel akibat beban gandar (*axle load*) yang masif dan berulang dari kereta Babaranjang. Sebagai solusinya, dapat direncanakan konversi jalur tunggal menjadi jalur ganda (*double track*).

Meskipun konversi menjadi *double track* secara teoritis dapat meningkatkan kapasitas lintas, proses desain geometri menghadapi tantangan teknis yang kompleks. Beberapa penelitian terdahulu umumnya melakukan evaluasi geometri jalan rel secara standar menggunakan parameter teknis konvensional tanpa mempertimbangkan optimasi terintegrasi antara geometri, daya dukung material, dan dampak riil terhadap kapasitas lintas. belum ada studi yang secara komprehensif mengintegrasikan analisis spasial desain geometrik jalur ganda dengan optimasi kebutuhan material struktur atas-bawah rel yang secara spesifik dirancang untuk menahan beban ekstrem kereta Babaranjang (beban gandar hingga 18–25 ton) pada lintas Tanjung Rambang – Sukamerindu.

Oleh karena itu, lintasan KM 309+260 – KM 302+600 menjadi sangat krusial untuk diteliti karena merupakan urat nadi logistik energi yang memiliki

karakteristik pembebanan ekstrem yang tidak ditemui pada jalur kereta penumpang maupun barang. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk menghasilkan desain geometrik jalur ganda yang tidak hanya memenuhi aspek regulasi, tetapi juga optimal dari segi daya tahan material terhadap degradasi balas dan penurunan rel akibat beban Babaranjang, sekaligus meminimalkan biaya konstruksi melalui pemilihan trase yang presisi.

pendekatan analisis terintegrasi yang menggabungkan:

1. Pemilihan trase secara sistematis berbasis analisis dengan metode SAW.
2. Optimasi desain geometri (lengkung horizontal dan vertikal) yang diselaraskan dengan simulasi peningkatan kapasitas lintas (*line capacity upgrade*) berdasarkan pemilihan trase terbaik.
3. Tahapan permodelan kontur untuk perhitungan lengkung vertikal dan horizontal.
4. Estimasi kebutuhan material yang didasarkan pada perhitungan prediksi degradasi komponen jalan rel akibat beban dinamis ekstrem.

Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan model perencanaan geometri *double track* yang lebih efisien dan berkelanjutan, yang dapat menjadi rujukan ilmiah bagi pengembangan jalur kereta api logistik berat (*heavy haul railway*) di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian terdahulu

Penelitian terkait perencanaan trase dan komponen badan jalan rel perkeretaapian dalam lima tahun terakhir menunjukkan fokus pada perencanaan trase jalur rel tanpa memilih alternatif trase sesuai dengan efisiensi jalur, keselamatan, serta dampak sosial dan lingkungan. Beberapa Studi sebelumnya antara lain oleh Kevin et al (2025) menyoroti aspek perencanaan struktur jalan kereta api berdasarkan kekuatan struktur bawah jalan kereta api pada lapisan ballast, lapisan sub-ballast dan lapisan subgrade dengan penambahan lapisan geotekstil. Sari et al (2024) menunjukkan bahwa Perbedaan cakupan wilayah penelitian dengan perbandingan dua trase alternatif Lokasi dan kebutuhan transportasi penumpang dan Batubara, serta analisis demand penumpang dan barang. Clarissa et al (2024) Perbedaan cakupan wilayah dan rancangan geometri trase teknis, serta

pemilihan alternatif trase yang dibuat dengan AutoCad dan Civil 3D., Zhang et al. (2020) meneliti pengembangan jalur ganda di Tiongkok sebagai solusi kapasitas lintas, sementara Ilham (2022) merencanakan Penelitian ini merancang geometri untuk jalur baru pada lintas Gorontalo – Bandara Djalaludin Gorontalo, memiliki beberapa alternatif trase dan menggunakan kelas jalan III dan kelas jalan IV namun dengan metode pemilihan yang belum detail.

Spesifikasi Perencanaan Jalur Kereta

Spesifikasi perencanaan adalah dokumen yang berisi tentang persyaratan teknis dan standar yang harus dipenuhi dalam melaksanakan sebuah pekerjaan proyek atau kegiatan lainnya. Spesifikasi yang digunakan terdiri dari Undang Undang Republik Indonesia No 23 Tahun 2007 tentang perkeretaapian, Peraturan Dinas No 10 tahun 1986, Peraturan Menteri No 60 Tahun 2012, Peraturan KU.203/SK.298/DJKA/12/15, Rancangan Induk Perkeretaapain Nasional (RIPNas), TCRP 155 dan beberapa buku terkait perencanaan jalan rel.

Daya Angkut Lintas

Tonase atau Daya angkut lintas Kereta api di dapat dengan menganalisa jumlah beban angkutan kereta api melewati suatu lintasan dalam jangka waktu satu tahun.

Tabel 1 Kelas Jalan Rel

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintasan (ton/tahun)	V maks (km/jam)	Beban maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan	Penambatan Elastis	Tebal Balas Atas
I	20.10 ⁶ - >	120	18 ton	R.60/R.54	60 cm	Ganda	30 cm
II	10.10 ⁶ - 20.10 ⁶	110	18 ton	R.54/R.50	60 cm	Ganda	30 cm
III	5.10 ⁶ - 10.10 ⁶	100	18 ton	R.54/R.50/R.42	60 cm	Ganda	30 cm
IV	2.5.10 ⁶ - 5.10 ⁶	90	18 ton	R.54/R.50/R.42	60 cm	Tunggal	25 cm
V	< 2.5.10 ⁶	80	18 ton	R.42	60 cm	Tunggal	25 cm

Klasifikasi jalan rel dan beban tonase merupakan bagian yang saling terkait dimana

besarnya jumlah daya angkut yang dilalui sebuah lintasan menentukan kelas jalan rel yang sesuai(Andry Yuliyanto et al., 2024).

Kecepatan Rencana

Perencanaan jalur kereta api memiliki beberapa dasar pertimbangan salah satunya kecepatan, kecepatan kereta api bertujuan sebagai pertimbangan dalam mendesain atau memperhitungkan geometrik jalan rel terutama pada pelebaran dan pertinggian jalan pada saat melintasi lengkung. Perencanaan kecepatan terdiri dari perencanaan struktur jalan rel, peninggian dan jari jari lengkung peralihan(Sari et al., 2021).

Ruang Perencanaan Jalur Kereta

Ruang Bangun pada jalur kereta api adalah ruang yang digunakan pada sisi jalan rel memiliki kriteria bebas dari segala hambatan untuk menghindari terjadinya gangguan pada saat kereta api ketika bergerak atau beroperasi. Ruang Bangun terdiri dari Ruang manfaat jalur kereta api (RUMAJA), Ruang milik Jalur kereta api (RUMIJA), dan Ruang pengawasan jalur kereta api (RUWASJA).

Ruang Bebas kereta api adalah sebuah ukuran ruang yang digunakan untuk menetapkan dimensi yang akan dilalui kereta agar tidak menghambat perjalanan kereta api. Fungsi dari ruang tersebut agar tidak terdapat benda yang menghalangi perjalanan kereta api. Ruang bebas kereta api telah ditetapkan dalam sebuah aturan salah satunya PM 60 Tahun 2012.

Perencanaan Trase

Salah satu bagian dari merencanakan geometrik jalan rel adalah menganalisa Trase. Trase adalah rencana tapak jalur kereta api dengan titik koordinat yang diketahui. Menurut PM Nomor 11 Tahun 2011, ada empat komponen yang harus dievaluasi yaitu: teknis, hukum, keuangan, dan perencanaan(Danang, 2021).

Perencanaan Geometri Jalan Rel

Perencanaan Geometri jalan rel adalah perencanaan jalur yang mengatur terkait bentuk, ukuran, dan tata letak lintasan rel secara horizontal dan vertikal guna menjamin keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi operasi kereta api sesuai dengan kecepatan rencana(Oktavia et al., 2023).

Tujuan utama dari geometrik jalan rel untuk mengendalikan gaya vertikal, gaya sentrifugal, dan

gaya lateral (Utomo, 2009). Berikut merupakan hal-hal yang di perhitungkan dalam merencanakan geometri jalan rel:

1. Kecepatan Rencana.
2. Lebar sepur.
3. Trase.
4. Alinyemen Horizontal.
5. *Cant* (Peninggian Jalur).
6. *Widening* (Pelebaran Jalur).
7. Alinyemen Vertikal.

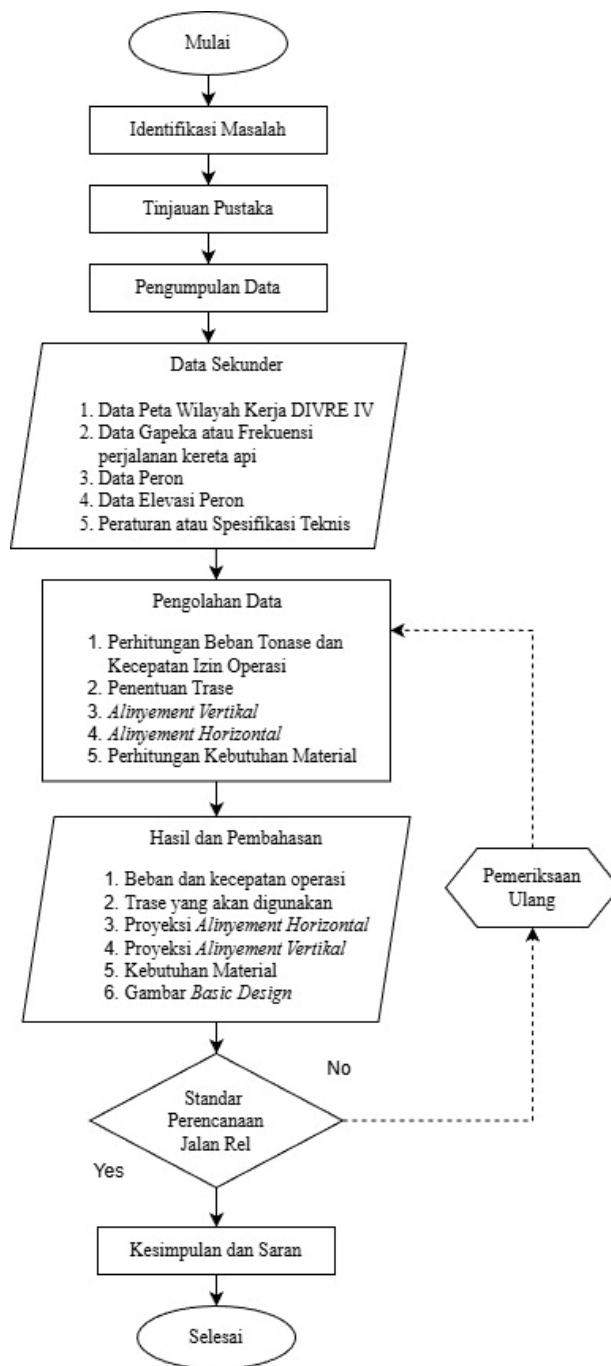
Kebutuhan Material

Pada perencanaan jalan rel, analisis kebutuhan material menjadi salah satu langkah penting untuk mengetahui jenis dan jumlah material yang dibutuhkan selama proses pembangunan. Komponen utama seperti rel, bantalan, ballast, sub-ballast, hingga lapisan tanah dasar harus diperhitungkan dengan teliti agar sesuai dengan standar teknis yang telah ditetapkan.

Dasar dalam menentukan kebutuhan material hanya menggunakan rumus Volume (Balas dan Sub balas), dan aplikasi Civil 3d yang membantu perhitungan kebutuhan material galian dan timbunan (Wiarco & Aghastya, 2023).

METODE

Penelitian penelitian ini berfokus pada metode kuantitatif, Metodologi kuantitatif merupakan metodologi mengukur suatu fenomena secara objektif melalui pengolahan data berupa angka dan menguji hubungan antar variable. Penelitian penelitian ini terdiri dari beberapa analisis yang saling berhubungan hal tersebut sangat sesuai dengan metode kuantitatif. Metode yang digunakan untuk menentukan prioritas dalam penentuan trase terpilih dengan menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW) berdasarkan multi kriteria dengan dasar pembobotan melalui wawancara para ahli kereta api seperti PT. KAI praktisi dan akedemisi di bidang kereta api. Serta menggunakan GIS dalam melakukan digitasi penentuan trase dan kordinat. Berikut merupakan gambar diagram alir dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 1. Diagram Alir.

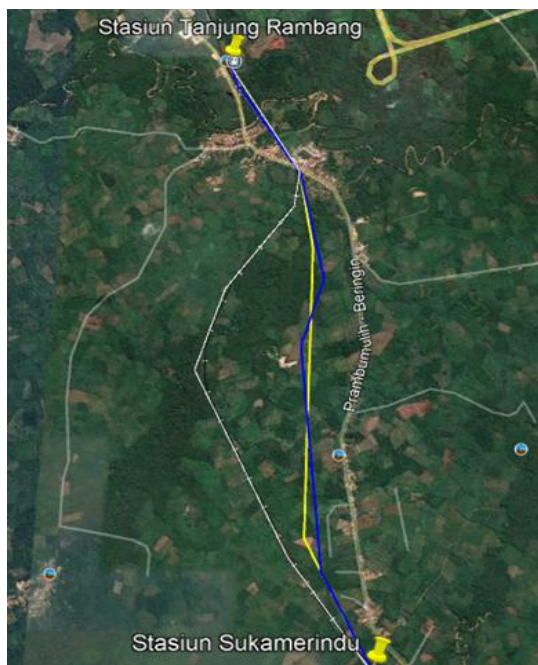
Metode kuantitatif numerik pada penelitian ini berupa perhitungan dimana data saling berhubungan satu dengan yang lain dan seluruh perhitungan menjadi dasar dari sebuah perencanaan atau pemodelan.

Pengumpulan data sekunder dilakukan dengan mengumpulkan beberapa dokumen pendukung terkait perencanaan jalur kereta api, dimana data tersebut sebagai dasar dalam menganalisis perhitungan dalam melakukan perencanaan jalur kereta api. Berikut data yang di perlukan dalam pengerjaan penelitian:

- Peta wilayah kerja DIVRE IV Tanjung Karang bertujuan memastikan batas operasi antar stasiun.
- Data Gapeka adalah data grafik perjalanan kereta api. Data Gapeka bertujuan untuk mengetahui karakteristik jalur yang direncanakan baik dari beban mau pun kecepatan operasi.
- Data regulasi atau Peraturan perencanaan jalur rel adalah dokumen mengenai standar atau peraturan dalam merencanakan dan mendesaian jalur kereta api. Peraturan perencanaan jalur rel bertujuan untuk memastikan bahwa desain jalur kereta api sesuai standar yang berlaku dan menajdi acuan dalam mendesain jalur kereta api.

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada wilayah DIVRE IV Tanjung Karang pada petak jalan rel KM 309+260 – KM 302+600. Lintasan ini berada pada stasiun Tanjung Rambang hingga stasiun Sukamerindu.



Gambar 2. Peta Jalur Kereta api stasiun tanjung Rambang - Stasiun Sukamerindu
Sumber: Qgis Peta Jalur Kereta Api.

Berdasarkan Gambar 2. Peta Jalur Kereta api Stasiun tanjung Rambang - Stasiun Sukamerindu, Terdapat beberapa jalur yang menjadi pertimbangan pada penelitian penelitian, pada jalur dengan pola berwarna biru merupakan trase 1, pada jalur dengan pola berwarna biru merupakan trase 2, dan pada jalur yang mengikuti eksisting dengan pola berwarna putih merupakan trase 3.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kelas Jalan Rel

Pada perencanaan jalan rel dari Stasiun Tanjung Rambang hingga Stasiun Suka Merindu beroperasi menggunakan jalur *single track* namun pada perencanaan jalan rel *double track* diperlukan perhitungan beban tonase.

- $$TP = (\text{beban kereta penumpang (ton) x unit})$$

$$TP = ((1 \times 52) + (42 \times 6) + (40 \times 1))$$

$$TP = 344 \text{ ton/hari.}$$
- $$TB = (\text{beban kereta barang (ton) x unit})$$

$$TB = (48 \times 18)$$

$$TB = 864 \text{ ton/hari.}$$
- $$TI = (\text{beban Lokomotif barang dan penumpang (ton) x unit})$$

$$TI = (84 \times 3)$$

$$TI = 252 \text{ ton/hari.}$$
- $$TE = TP + (KB \times TB) + (K1 \times TI)$$

$$TE = 344 \text{ ton/hari} + (1,3 \times 864 \text{ ton/hari}) + (1,4 \times 252 \text{ ton/hari})$$

$$TE = 344 \text{ ton/hari} + 1.123,2 \text{ ton/hari} + 352,8 \text{ ton/hari} = 1.820 \text{ ton/hari.}$$
- $$T = 360 \times S \times TE$$

$$T = 360 \text{ hari} \times 1 \times 1.820 \text{ ton/hari} = 655.200 \text{ ton/tahun.}$$

Dari perhitungan yang dilakukan total beban tonase tahunan dengan rute Tiga Gajah (TJH) – Kertapati (KPT) sebesar 1.820 ton /hari dan beban tonase dalam satu tahun sebesar 655.200 ton/tahun.

Pada perencanaan jalan rel Tanjung Rambang – Sukamerindu yang dilalui oleh beberapa rute KA yaitu: Tiga Pati (Stasiun Tiga Gajah – Stasiun Kertapati), Jahpati (Stasiun Tiga Gajah – Stasiun Kertapati), Nitahan (Stasiun Nitu – Stasiun Prabumuli X6 – Stasiun Tarahan), Baratarah (Stasiun Tanjung Enim Baru – Stasiun Prabumuli Baru X6 - Stasiun Tarahan) dan Raja Basa (Stasiun Tanjung Karang – Stasiun Kertapati). Maka dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, total nilai TE = 284.331 Ton/hari dan nilai T = 102.359.484 Ton/Tahun.

apa bila beban jalan rel yang di rencanakan sebagai rute kereta api tidak bermuatan maka beban tonase yang diperoleh dengan grafik perjalanan 2025 sebesar 93.107,1 Ton/hari atau setara dengan 33.518.556 Ton/tahun.

Penentuan Trase

Pemilihan trase double track dengan metode Simple Additive Weighting (SAW) dilakukan melalui pemberian poin pada setiap alternatif trase berdasarkan hasil wawancara para ahli, di mana tiap kriteria seperti panjang trase, jumlah lengkung, kebutuhan lahan, kawasan pemukiman, dan perlintasan sebidang memiliki bobot kepentingan yang berbeda. Nilai poin dari tiap trase kemudian dinormalisasi sesuai sifat kriteria (cost atau benefit), dikalikan dengan bobot kepentingan, lalu dijumlahkan untuk memperoleh skor akhir. Alternatif dengan skor tertinggi dianggap sebagai trase terbaik karena paling memenuhi kombinasi efisiensi biaya, keselamatan, dan dampak sosial. Hasilnya dapat di lihat pada tabel di bawah ini

Tabel 2. Penentuan Trase

<i>cost benefit</i>	<i>cost</i>	<i>benefit</i>	<i>cost</i>	<i>cost</i>	<i>cost</i>	<i>cost</i>
Kepentingan	0.2	0.15	0.1	0.2	0.25	0.1
KRITERIA	Panjang Trase (m)	kawasan pemukiman	Jumlah lengkung	perlintasan sebidang	Kebutuhan lahan (m ²)	Jembatan
Rencana Trase 1	6210	331	5	2	56070	1
Rencana Trase 2	6400	392	4	2	55890	1
Rencana Trase 3	6660	425	6	2	59940	1
Pembagi	6210	425	4	2	55890	1
Normalisasi	1	0.778823	0.8	1	0.996789	1
	0.970312	0.922352	1	1	1	1
	0.932432	1	0.6666	1	0.932432	1
	432	1	66667	1	432	1

Alternatif Terbaik: Trase 2		0.9824
Hasil		rank
0.946020961	Rencana Trase 1	2
0.982415441	Rencana Trase 2	1
0.936261261	Rencana Trase 3	3

Berdasarkan analisis metode SAW di atas maka trase 2 di pilih menjadi prioritas dalam menentukan trase terbaik. Pada tabel di bawah ini juga dilakukan penentuan trase berdasarkan hasil wawancara

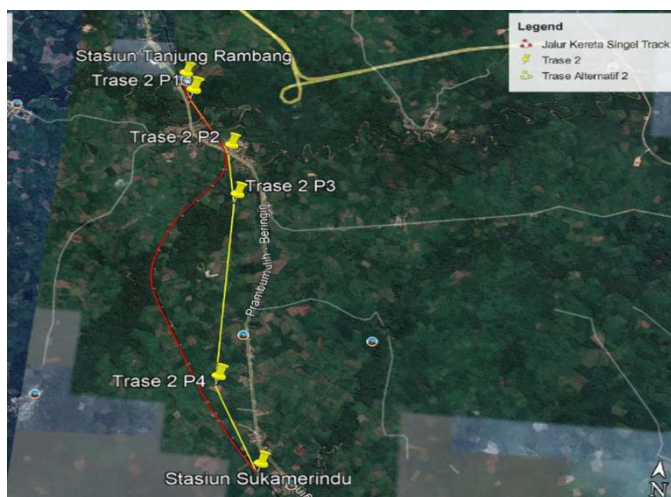
Tabel 3. Penentuan Trase

Klasifikasi	Trase 1	poin	Trase 2	poin	Trase 3	poin
Teknis						
Panjang Trase	6,21 km	3	6,40 km	2	6,66 km	1

Klasifikasi	Trase 1	poin	Trase 2	poin	Trase 3	poin
Jumlah					6	1
Tikungan	5	2	4	3		
Kecepatan operasi	80 km/jam	1	80 km/jam	1	80 km/jam	1
Sosial						
Jarak rel dengan pemukiman	1.331 m	1	1.392 m	2	1.1092 m	3
Perpotongan sungai	1	1	1	1	1	1
Perpotongan jalan raya	2	1	2	1	2	1
Ekonomi						
Kebutuhan Lahan	56.070 m ²	2	55.890 m ²	3	59.940 m ²	1
Integrasi jaringan						
Termin al Bus	Tidak ada	1	Tidak ada	1	Tidak ada	1
total	14 Point		17 Point		11 Point	

Sumber: Data Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil evaluasi pada ketiga alternatif trase, diperoleh bahwa Trase kedua merupakan pilihan yang paling optimal dengan total nilai tertinggi yaitu 17 poin. Dari aspek teknis, Trase kedua memiliki panjang lintasan 6,40 km dengan jumlah tikungan yang lebih sedikit dibandingkan trase lainnya, sehingga memberikan geometri jalur yang lebih baik untuk mendukung kecepatan operasi hingga 80 km/jam (Ibie, 2018). Berikut rencana trase ter pilih



Gambar 3. Trase terpilih
Alinyemen Horizontal

Perhitungan peninggian jalur dilakukan secara teliti berdasarkan kecepatan rencana, jari-jari lengkung, dan standar teknis yang berlaku agar sesuai dengan aspek keselamatan dan operasional kereta api. berikut merupakan perhitungan peninggian jalur kereta api:

Tabel 4. Lengkung SCS (*Spiral Circle Spiral*)

Lengkung SCS				
R rencana	R min	$0,078 \times V^2$	m	780
	R min	$0,054 \times V^2$	m	540
	R maks	$0,164 \times V^2$	m	1640
Jari Jari rencana			m	700
Lengkung Spiral	Lh / Ls	$0,01 \times h \times V$	m	85
Lengkung Cricel	Lc	$\frac{\theta c \times \pi \times R \text{ rencana}}{180}$	m	209.975

Tabel 5. Lengkung FC (*Full Circle*)

Lengkung FC				
R rencana	R min	$0,164 \times V^2$	m	1640
	R regulasi	100 km/jam	m	1650
	jari jari rencana		m	1650
Lengkung Cricel	Tc	$Rmin \times \tan \frac{1}{2} \times \Delta$	m	312.1
Panjang Tangent	Lc	$2 \times \pi \times R \left(\frac{\Delta \text{ Trase } 2p1}{360^\circ} \right)$	m	156.5

Perhitungan Peninggian jalur kereta api

Dari perhitungan lengkung SCS dan FS yang telah dilakukan, berikut merupakan hasil perhtiungan proyeksi peninggian jalan rel yang di ditampilkan dibawah ini:

- a. Peninggian Rel (*Spiral-Circel-Spiral*)

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \times \frac{(V\text{rencana})^2}{R}$$

$$= 5,95 \times \frac{(100)^2}{850}$$

$$= 70 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Maksimum}} = 110 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 1} = \frac{1}{4} \frac{85}{85} \times 70 \text{ mm} = 17,5 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 2} = \frac{2}{85} \frac{85}{85} \times 70 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 3} = \frac{3}{85} \frac{85}{85} \times 70 \text{ mm} = 52,5 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 4} = \frac{85}{85} \times 70 \text{ mm} = 70 \text{ mm}$$

- b. Peninggian Rel (*Full Circel*)

$$h_{\text{normal}} = 5,95 \times \frac{(V\text{rencana})^2}{R}$$

$$= 5,95 \times \frac{(100)^2}{1650}$$

$$= 36 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Maksimum}} = 110 \text{ mm}$$

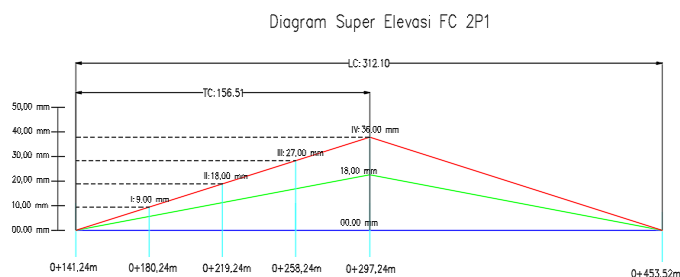
$$\text{Titik 1} = \frac{1}{4} \frac{156}{156} \times 36 \text{ mm} = 9 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 2} = \frac{2}{156} \frac{156}{156} \times 36 \text{ mm} = 18 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 3} = \frac{3}{156} \frac{156}{156} \times 36 \text{ mm} = 27 \text{ mm}$$

$$\text{Titik 4} = \frac{156}{156} \times 36 \text{ mm} = 36 \text{ mm}$$

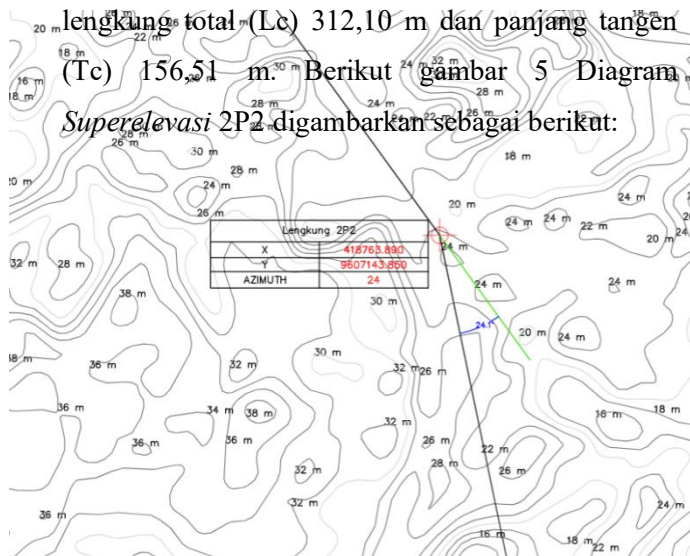
Peninggian lengkung dilakukan dengan menambah tinggi rel bagian luar dan rel bagian dalam sebagai acuan. Berikut gambar 4 Diagram *Superelevasi 2P1* digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram Superelevasi 2P1

Berdasarkan diagram *superelevasi FC 2P1*, peninggian rel direncanakan secara bertahap mulai dari 0 mm pada STA 0+141,24 hingga mencapai

maksimum 36 mm pada STA 0+297,24. Setelah titik maksimum nilai peninggian kembali diturunkan hingga 0 mm di STA 0+453.52. Proses transisi ini dibagi menjadi beberapa tahap yaitu 9 mm, 18 mm, 27 mm hingga puncak 36 mm dengan panjang lengkung total (L_c) 312,10 m dan panjang tangen (T_c) 156,51 m. Berikut gambar 5 Diagram Superelevasi 2P2 digambarkan sebagai berikut:



Gambar 5. Diagram Superelevasi 2P2

Berdasarkan diagram *superelevasi* SCS 2P2, peninggian rel dilakukan secara bertahap mulai dari 0 mm pada STA 1+116,27 hingga mencapai maksimum 70 mm. pada STA 1+201,27 Nilai elevasi ini kemudian dipertahankan sepanjang lengkung utama ($L_c = 209,9$ m) sebelum akhirnya diturunkan kembali secara bertahap hingga 0 mm pada STA 1+496,24. Proses transisi peninggian dibagi dalam beberapa tahap yaitu 17,5 mm, 35 mm, 52,5 mm, dan mencapai puncak 70 mm. Berikut hasil gambar trase lengkung horizontal 2P2.

Alinyemen Vertikal

Pemodelan elevasi permukaan tanah merupakan tahap penting dalam proses perencanaan penambahan jalur kereta api dimana tujuan pemodelan ini untuk menggambarkan kondisi

topografi eksisting secara akurat dalam bentuk model dua dimensi. Melalui pemodelan ini perencana dapat menganalisis perbedaan ketinggian, kemiringan lahan, serta menentukan kebutuhan pekerjaan tanah seperti galian dan timbunan secara presisi. Berikut merupakan Tabel 6 Proses pemodelan elevasi permukaan tanah dapat terlihat pada diagram dibawah ini:

Tabel 6. Tahapan Pemodelan Peta Kontur

Proses		Aplikasi	
Data Batas lahan yang akan direncanakan menggunakan Data Polygon Tertutup	Input	Google Earth Pro	Polygon Tertutup
Penentuan area yang akan digunakan sesuai dengan UTM		Web Demnas	Data Demnas
Pengolahan data demnas dan data Polygon tertutup menjadi Data kountur.	Proses	Global Mapper	Data Kontur
Penogolahan Data Kontur (Global Mapper) ke dalam bentuk (DWG File)	Output	Civil 3D	Gambar Kountur

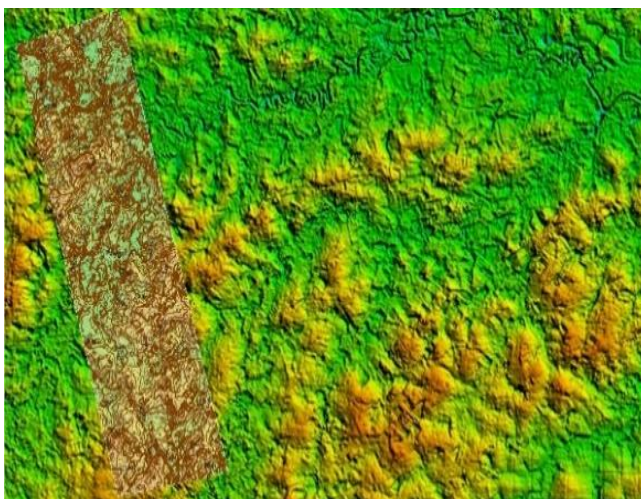
Berdasarkan Tahapan Pemodelan Peta Kontur pada tabel 6, Polygon tertutup yang dibuat menggunakan *Google Earth* merupakan data yang digunakan untuk menentukan batas wilayah perencanaan seperti koridor trase, zona pekerjaan tanah, atau area survei topografi. Setelah file *polygon* diekspor dalam format KML, file ini diimpor ke dalam *Global Mapper* untuk menjadi batas kerja (*boundary*) pengolahan data elevasi. Fungsi utama data DEM adalah sebagai basis data ketinggian yang digunakan untuk menganalisis dan memvisualisasikan bentuk

permukaan tanah secara akurat dalam batas wilayah yang telah ditentukan oleh polygon tertutup (Wiarco & Aghastya, 2023). Untuk memahami lebih dalam dapat dilihat pada gambar 6. Poligon Tertutup (Area Rencana) dan Gambar 7. Surface Model sebagai berikut:

PVI (*Point of Vertical Intersection*), serta pembuatan lengkung vertikal (*Vertical Curve*) untuk memastikan kelandaian dan kenyamanan lintasan sesuai standar perkeretaapian. Berikut merupakan hasil dari penentuan Alinyement Vertikal pada Gambar 8 Trase Alinyement Vertikal, dibawah ini.

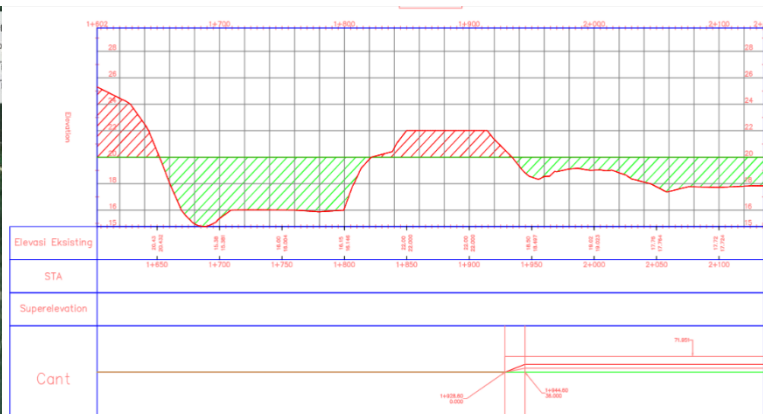


Gambar 6. Poligon Tertutup (Area Rencana)



Gambar 7 Surface Model

Data kontur dan diubah menjadi *surface model* menggunakan fitur *Create Surface* dan *Add Contour*, sehingga menghasilkan model tiga dimensi dari kondisi lapangan yang sebenarnya seperti pada gambar 4. 16 Trase Alinyement Vertikal. Setelah data kontur diperoleh dilakukan proses penentuan trase rencana (*alinyement*) yang meliputi perencanaan garis sumbu (*centerline*), penentuan



Gambar 8. Trase Alinyement Vertikal

Berdasarkan PM 60 Tahun 2012 dalam penentuan lengkung vertikal, kecepatan rencana yang digunakan sebesar 100 km/jam dengan jari-jari minimum 7000 m ($R_{min} = 6000$ m). Berikut merupakan contoh perhitungan lengkung vertikal:

- a. Perhitungan θ

$$\theta = \frac{(g1 - g2)}{100} \times 1000$$

$$= \frac{(0.00\% - 0.66\%)}{100} \times 1000$$

$$= 0,66\%$$
- b. Perhitungan L_v

$$L_v = R \times \theta$$

$$= 7000 \times 0,0066$$

$$= 46,2 \text{ m}$$
- c. Perhitungan E_v

$$E_v = \frac{A - L}{800}$$

$$= \frac{0,66 - 46,2}{800}$$

$$= 0,038 \text{ mm}$$
- d. Perhitungan Elevasi PVC dan Elevasi PVT
$$PVC = \text{Elevasi PVI} - G1 \times \frac{1}{2} \times L_v$$

$$= 20,00 \text{ m} - (0,00 \times \frac{1}{2} \times 46,2 \text{ m})$$

$$= 20,00 \text{ m}$$

$$PVT = \text{Elevasi PVI} + G2 \times \frac{1}{2} \times L_v$$

$$= 20,00 \text{ m} + (0,66 \times \frac{1}{2} \times 46,2 \text{ m})$$

$$= 20,15 \text{ m}$$

- e. Perhitungan STA Elevasi PVC dan STA Elevasi PVT

$$\begin{aligned} STA\ PVC &= STA\ PVI - 0,5 \times Lv \\ &= 2.300,00 - (0,5 \times 46,2\ m) \\ &= 2.276,9\ m\ (STA\ 2 + 276,9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} STA\ PVT &= STA\ PVI + 0,5 \times Lv \\ &= 2.300,00 + 0,5 \times 46,2\ m \\ &= 2.323,1\ m\ (STA\ 2 + 323,1) \end{aligned}$$

Hal ini menunjukkan bahwa desain lengkung vertikal dibuat menyesuaikan peraturan yang berlaku, dimana pada kelas jalan rel 1 nilai landai maksimum sebesar 10 ‰, bertujuan untuk menjaga elevasi trase yang cukup curam.

Kebutuhan Material

Pada perencanaan jalan rel, analisis kebutuhan material menjadi salah satu langkah penting untuk mengetahui jenis dan jumlah material yang dibutuhkan selama proses pembangunan. Komponen utama seperti rel, bantalan, ballast, sub-ballast, hingga lapisan tanah dasar harus diperhitungkan dengan teliti agar sesuai dengan standar teknis yang telah ditetapkan. Berikut perhitungan kebutuhan material.

$$\begin{aligned} a.\ Kebutuhan\ Rel &= \frac{Panjang\ Track}{panjang\ rel/batang} \times 2 \\ &= \frac{6120\ m}{24\ m} \times 2 \\ &= 496,8\ \text{atau}\ 497\ \text{Unit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b.\ penambat &= \frac{Panjang\ Track}{Jarak\ antar\ penambat} \times 4 \\ &= \frac{6120\ m}{0,6\ m} \times 4 \\ &= 41.400\ \text{Unit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c.\ Kebutuhan\ Bantalan &= \frac{Panjang\ Track}{jarak\ bantalan} \\ &= \frac{6120\ m}{0,6\ m} \\ &= 10.350\ \text{unit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d.\ Kebutuhan\ Balas &= \\ &= \text{Jarak}\ Track \times \text{luas}\ penampang\ balas \\ &= 6120\ m \times \left(\frac{3\ m + 4,7\ m}{2} \times 0,3\ m \right) \\ &= 7.172,5\ m^3\ \text{atau}\ 7173\ m^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e.\ Kebutuhan\ Sub\ Balas &= \\ &= \text{Panjang}\ jalur \times \text{luas}\ penampang\ balas \\ &= 6120\ m \times \left(\frac{5,3\ m + 7,5\ m}{2} \times 0,4\ m \right) \\ &= 15.897,56\ m^3\ \text{atau}\ 15.897\ m^3 \end{aligned}$$

Volume Galian Timbunan

Perhitungan volume galian dan timbunan pada jalur kereta api dilakukan menggunakan perangkat

lunak *Civil 3D* dengan interval setiap 0,5 km. Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam bentuk tabel untuk menunjukkan besarnya volume galian dan timbunan pada setiap segmen jalur.

Tabel 7 Volume *Cut and Fill*

Station	Fill Area	Cut Area	Fill Vol	Cut Vol	Cumulativ e Fill Volume	Cumulativ e Fill Volume
0+100.0	0.00	88.72	0.00	0.00	0.00	0.00
0+150.0	0.00	86.92	0.00	4390	0.00	4390
0+200.0	0.00	69.35	0.00	3905	0.00	8296
0+300.0	0.00	86.74	0.00	3900	0.00	12197

Berdasarkan hasil perhitungan volume material galian dan timbunan pada STA 0+100 hingga STA 0+150 diperoleh bahwa volume galian sebesar 4.390,94 m³ sedangkan volume timbunan bernilai 0 m³. Hal ini menunjukkan bahwa pada segmen jalur tersebut seluruh pekerjaan berupa galian tanpa adanya kebutuhan timbunan, sehingga kontur alami di area tersebut berada lebih tinggi dari elevasi rencana trase rel.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, Adapun kesimpulan yang penulis dapatkan sebagai berikut:

1. Trase kedua lebih dominan dibandingkan Trase pertama dan Trase ketiga. Berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan metode SAW Trase kedua menunjukkan keunggulan antara aspek teknis, sosial, dan ekonomi, dengan panjang jalur 6,40 km. Jumlah tikungan yang lebih sedikit nilai sudut yang besar menjadi daya Tarik mengingat aspek teknis merupakan tujuan utama pada perencanaan penelitian ini serta kebutuhan lahan yang relatif efisien. Selain itu, jarak trase ini terhadap pemukiman dan elemen lingkungan lainnya masih dalam batas aman sehingga meminimalisir dampak sosial dan biaya konstruksi.
2. Pada perencanaan jalur *double track* menggunakan metode kuantitatif numerik dengan beberapa metode Perencanaan dilakukan dengan menambah jalur tanpa merubah eksisting rel yang telah ada sebelumnya, pada perencanaan Alinyemen horizontal terdapat 4 lengkung dimana pada lengkung menggunakan dua tipe lengkung (*Spiral-Circle-Spiral* dan *Full Circle*),

- terdapat dua lengkung vertikal dengan nilai kelandaian 6,6‰ dengan jari jari 7000 m.
- Perhitungan menunjukkan kebutuhan konstruksi yang signifikan, meliputi 497 batang rel, 41.400 penambat, 10.350 bantalan beton, 7.173 m³ ballast, 15.897 m³ sub-ballast, 567.743 m³ galian, dan 205.269 m³ timbunan. Estimasi ini memberikan gambaran realistis mengenai skala pekerjaan dan dapat dijadikan acuan dalam perencanaan anggaran serta pelaksanaan proyek jalur ganda.
 - Jalur optimal adalah arah Sukamerindu–Tanjung Rambang pada trase 2 karena sesuai dengan distribusi beban terbesar (284.331,9 ton/hari). Pembangunan double track meningkatkan kapasitas lintas, mengurangi antrian perjalanan, memperlancar distribusi batubara, serta memungkinkan peningkatan frekuensi layanan penumpang. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan perkeretaapian nasional melalui peningkatan efisiensi logistik dan kualitas layanan transportasi.

REFERENSI

- Andry Yuliyanto, Galih Rio Prayogi, Michael, Frans Dermanto Hutabarat, & Muhammad Abi Berkah Nadi. (2024). Evaluasi rel dan bantalan berdasarkan beban angkut lintas dan kinerja operasi kereta api (studi kasus: jalan rel Tanjung Karang-Rejosari). *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(1), 26–35. <https://doi.org/10.22225/pd.13.1.9159.26-35>
- Danang, parikesit. (2021). *Perencanaan Jalan Rel* (W. Sony S (ed.)). Scopindo Media Pustaka.
- Ibie, E. (2018). Tinjauan Geometrik Jalan Rel Kereta Api Trase Puruk Cahu–Bangkuang–Batangjungs (Sta 212+ 000–Sta 213+ 000). *Jurnal Teknika: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang ...*, 1(April), 136–145.
- Oktavia, A., Michael, M., & Situmeang, M. J. (2023). Perencanaan Desain Geometri Jalan Rel Rute Rejosari - Tarahan. *Cived*, 10(2), 730–737. <https://doi.org/10.24036/cived.v10i2.429>
- idho, A.M.,”Perencanaan Geometri Jalan Rel Trase Bakauheni-Sidomulyo”. *Journal of Science and Applicative Tecnology*. Vol. 5 No. 1. p. 148-147. 2021.
- Yustikasari, M., “Manajemen Sarana Prasarana dan Prasarana Perkeretaapian di PT. Kereta Api Indonesia (Persero) Daerah Operasi (Daop) VII Madiun”. Surakarta: Universitas Sebelas Maret. 2011.
- Wasanta, Tilaka., “Desain Jalan Rel untuk Transportasi Batu Bara Rangkaian Panjang (Studi Kasus : Sumatera Selatan)”. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan. 2017.
- Rosadi, R.S, dkk.,”Perencanaan Geometri Jalan Rel Antara Banyuwangi-SitubondoProbolinggo”. *Jurnal Teknik Pomits*. Vol. 2 No. 1. 2013.
- Murniati & Desriantomy,”Tinjauan Geometri Jalan Kereta Api Trase Puruk CahuBangkuang-Batangjungs (STA 212+000 – 213+000)”. *Jurnal Teknika*. Vol. 1 No. 2. p. 136-145. 2018.
- Aziz, W.A. et al.,”Perencanaan Geometri Jalan Rel Berdasarkan Trase Terpilih Lintas Dolopo-Surodikraman”. *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-23*. Oktober 2020.
- Harjono, S., “Analisis Karakteristik Angkutan Kereta Api Stasiun Bandar Tinggi-Kuala Tanjung (Studi Kasus)”. Medan: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. 2019.
- [Raihan, et al., ‘Evaluasi Geometrik dan Struktur Jalan Rel Kereta Api pada Stasiun Jember-Rambipuji-dan Arjasa’. Jawa Timur: Universitas Muhammadiyah Jember. 2015.
- Sari, W. N., Nadi, M. A. B., & Ridho, A. M. (2021). Perencanaan Geometri Jalan Rel Trase Bakauheni – Sidomulyo. *Journal of Science and Applicative Technology*, 5(1), 148. <https://doi.org/10.35472/jsat.v5i1.407>
- Utomo, S. H. (2009). *Perencanaan Jalan Rel*. Beta offset Yogyakarta.
- Wiarco, Y., & Aghastya, A. (2023). Perencanaan Jalur Kereta Api Lintas Kamal-Suramadu Dengan Global Mapper dan Autocad Civil 3dD. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, 7(2), 53–60. <https://doi.org/10.37367/jpi.v7i2.309>

The Effect of Variations in Fly Ash and Metakaolin Binders on The Compressive Strength of Geopolymer Mortar

Aufa Fitria¹, Tira Roesdiana²

¹Civil Engineering Study Program, Faculty of Engineering, Swadaya Gunung Jati University, Jl. Pemuda No. 32, Cirebon, West Java 45132. Telp (0231) 246664. Email : aufa.122130052@ugj.ac.id

²Civil Engineering Study Program, Faculty of Engineering, Swadaya Gunung Jati University, Jl. Pemuda No. 32 Cirebon, West Java 45132. Telp (0231) 246664. Email : tira.roesdiana@gmail.com

Abstract

The purpose of this study was to examine the effect of varying the binder ratio between fly ash and metakaolin on the compressive strength of geopolymer mortar, as well as to determine the optimum binder mixture composition that would yield the highest compressive strength at room temperature curing. This study uses a quantitative approach with laboratory experiments, using variations in the fly ash : metakaolin binder ratio, namely 100% : 0%, 70% : 30%, 50% : 50%, 30% : 70% and 0% : 100%, as well as 8 M NaOH and Na₂SiO₃ activator solutions using a sand : binder ratio of 2,5 : 1. Sixty 5×5×5 cm³ cube shaped test specimens were then tested for compressive strength at 7, 14, 21, and 28 days. This study proves that the combination of fly ash and metakaolin increases the strength of geopolymer mortar. The mixture of 70% fly ash : 30% metakaolin produced the most optimal compressive strength at 28 days, indicating that the reactivity of metakaolin and the aluminosilicate content in fly ash can enhance the geopolymerization process and make the microstructure of the mortar more compact. This study proves that combining fly ash and metakaolin binders can be a more environmentally friendly alternative to portland cement while maintaining its mechanical strength.

Keywords: binders variations ; compressive strength ; fly ash ; geopolymer mortar ; metakaolin ; room temperature curing

INTRODUCTION

The construction industry is one of the largest carbon emitters in the world, largely due to the use of OPC (Ordinary Portland Cement) as the main ingredient in mortar. The production of portland cement generates large amounts of carbon dioxide (CO₂) emissions, particularly during the burning of clinker. To address this issue Supplementary Cementitious Materials (SCM) as fly ash and metakaolin can be utilized, which have been proven to reduce carbon footprints and improve material performance when used optimally as an alternative to reduce the use of portland cement (Lestianingrum & al., 2022).

The cement industry in Indonesia can contribute significantly to national energy intensity and emissions. Various studies that substituting part of the cement with SCM can increase the strength and durability of mortar (Yudatama & Fafurida, 2022). Various studies have been conducted to find environmentally friendly alternative materials to replace or supplement the use of portland cement. One of the most widely developed is the use of

geopolymer materials, which are known as low carbon materials because they do not require the calcination of limestone as in conventional cement production.

Geopolymer are materials derived from the reactions of silica (SiO₂) and alumina (Al₂O₃) with alkaline solutions such as sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃). The polymerization reaction produces a dense structure with high strength and good resistance to heat and chemical attack. The characteristics of geopolymer have been extensively studied as an alternative binding material in the manufacture of mortar, so that can be used as a substitute or additive for portland cement (Thoriq et al., 2025).

In Indonesia, fly ash from coal fired power plants is a highly potential source of geopolymer precursor due to its silica and alumina which is relatively high. Its use not only reduce carbon emissions in the cement industry, but also help manage coal fired power plant waste. Performance in geopolymer mortar is greatly influenced by the fly ash ratio, additional composition, at the ratio and concentration of the activator.

Metakaolin is useful a more sustainable alternative to replace the use of cement. This replacement is important because the main raw material for cement is limestone. Limestone is a non-renewable natural resource and its continuous mining will lead to scarcity. The main advantage of metakaolin lies in its excellent pozzolanic properties and very fine particles. This compound plays an important role in increasing compressive strength and reducing mortar porosity through its filling effect. The use of metakaolin can reduce the use of portland cement, thereby reducing carbon emissions in the construction industry and making it a more environmentally friendly option than using pure portland cement.

The combination of fly ash and metakaolin generally results in lower porosity and higher strength compared to the use of fly ash alone. However, the addition of metakaolin must be optimized so as not to cause an increase in mixture viscosity and a decrease in workability.

Geopolymer mortar is defined as the latest material in the construction world used as an adhesive. Geopolymer mortar is similar to normal mortar, but the difference is that it uses geopolymer material as its main binder to replace portland cement. This material is a more environmentally friendly solution because it utilizes materials that contain silica and alumina, such as metakaolin and fly ash, which are industrial waste products that are activated through a chemical reaction with an alkaline solution NaOH and Na₂SiO₃ so that it can accelerate the polymer bond formation process and increase the compressive strength of geopolymer mortar.

Considering the above, a solution is needed to innovate in reducing the use of cement in mortar production. In this study, fly ash and metakaolin will be used to determine the effect of fly ash and metakaolin binder variations on the compressive strength of geopolymer mortar, so that the optimal composition that can produce the best strength can be determined. This research is expected to provide an alternative construction material that can reduce carbon emissions from cement production and have more efficient and sustainable properties, while also being a step in supporting environmentally friendly development in the field of civil engineering.

METHODS

This research was conducted at the Materials Technology Laboratory, Faculty of Engineering, Swadaya Gunung Jati University. The research began with the preparation of tools & materials, material testing, sample preparation, the curing

process and compressive strength testing of geopolymer mortar, which was carried out from December 23, 2025 to February 16, 2026.

The approach used was quantitative with an experimental research method. The independent variable was the compressive strength of geopolymer mortar (Mpa) and the control variables were the sand : binder ratio of 2,5 : 1, NaOH concentration of 8 mol and the ratio Na₂SiO₃ : NaOH of 2,5 : 1, fine aggregate, a mix design of test specimens in the form 5×5×5 cm³ cubes and curing at room temperature.



Figure 1. Metakaolin dan Fly Ash

The variables analyzed in this study were independent variables, including fly ash and metakaolin as cement substitutes in mortar mixtures, dependent variables using comparisons and control variables including material test, mortar density and geopolymer mortar compressive strength test.

Variations in binder ratios limited to 5 compositions, in Table 1.

Table 1. Variations in binder ratios

No	Variations Binder Ratio	Fly Ash (%)	Metakaolin (%)
1	100% FA : 0% MK	100	0
2	70% FA : 30% MK	70	30
3	50% FA : 50% MK	50	50
4	30% FA : 70% MK	30	70
5	0% FA : 100% MK	0	100

This study tested geopolymer mortar consisting of :

Mortar Density Test

The weight of mortar is the ratio between the mass of an object and its volume.

$$\gamma_m = \frac{B_m}{V}$$

Description :

γ_m = Weight of contents

B_m = Weight of test object

V = Volume of test object

Mortar Compressive Strength Test

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Description :

$f'c$ = Compressive Strength (Mpa)

P = Maximum test load (failure) indicated by the compressive strength test (N)

A = Cross sectional area of test specimen (mm²)

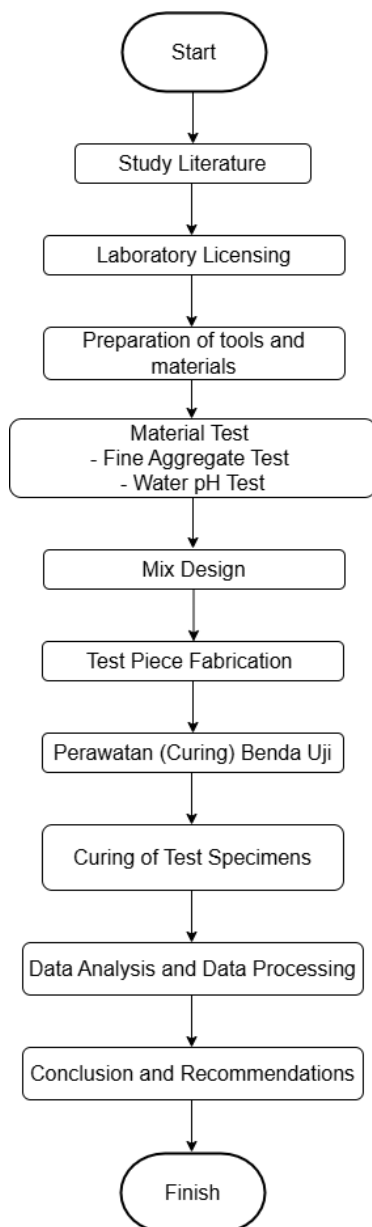


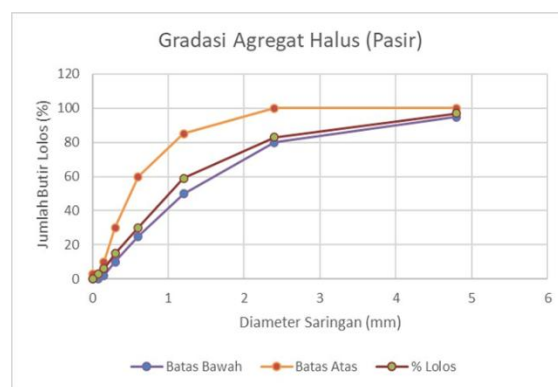
Figure 2. Flowchart

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the fine aggregate used was river sand. The test conducted included aggregate sieve analysis, specific gravity & water absorption, moisture content, mud content and organic matter content test in Table 2. and Graph 1. (Badan Standardisasi Nasional, 2002c) (Badan Standardisasi Nasional, 2002a) (Badan Standardisasi Nasional, 2002b)

Table 2. Sand test results

No	Type of Examination	Examination Results	Unit
1	Grading zone	I	-
2	Fineness modulus (MHB)	2,91	%
3	Bulk specific gravity	2,676	-
4	SSD	2,703	-
5	Absorption	0,010	%
6	Silt and clay content test	2,47	%
7	Organic matter content test	0 (Jernih)	%
8	Moisture content	11,99	%



Graph 1. Fine Aggregate Gradation (Sand)

Mix Design Geopolymer Mortar

The geopolymer mortar mix ratio used in this study was 2,5 : 1 sand : binder, an 8 M NaOH activator solution and Na₂SiO₃ with ratio 2,5 : 1.

During the test specimen manufacturing process, water is added to aid the mixing process so that the materials are evenly mixed and to facilitate the filling of the mortar into the test specimen mold. Water is added after the binder and fine aggregate have been mixed with alkali activator solution, then stirred until the mixture is homogeneous. By maintaining a constant amount of water in each variation, the differences in the test results obtained can affect the variation in the composition of fly ash and metakaolin on the physical and mechanical properties of geopolymer mortar. The results of adding water to Table 3.

Table 3. Results of adding water to each variation

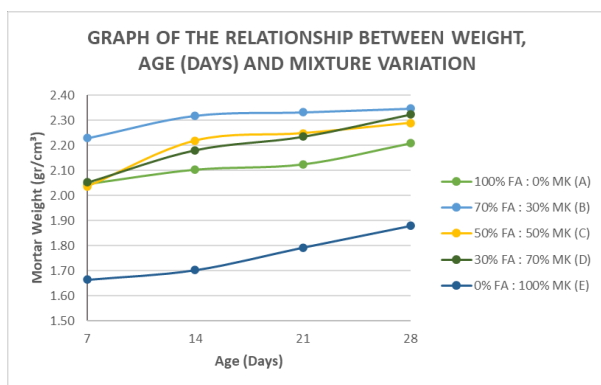
Variation Binder Ratio	Amount of Water (ml)
70% fly ash : 30% metakaolin	220
50% fly ash : 50% metakaolin	120
30% fly ash : 70% metakaolin	300
0% fly ash : 100% metakaolin	440

Geopolymer Mortar Density Test

The results of density mortar to Table 4. and Graph 2.

Table 4. Recapitulation of geopolymer mortar density test

Variation binder	7 days (gr/cm ³)	14 days (gr/cm ³)	21 days (gr/cm ³)	28 days (gr/cm ³)
100% FA : 0% MK (A)	2,05	2,10	2,12	2,21
70% FA : 30% MK (B)	2,23	2,32	2,33	2,35
50% FA : 50% MK (C)	2,04	2,22	2,25	2,29
30% FA : 70% MK (D)	2,05	2,18	2,23	2,32
0% FA : 100% MK (E)	1,66	1,70	1,79	1,88



Graph 2. Relationship between weight, age (days) and mix variation

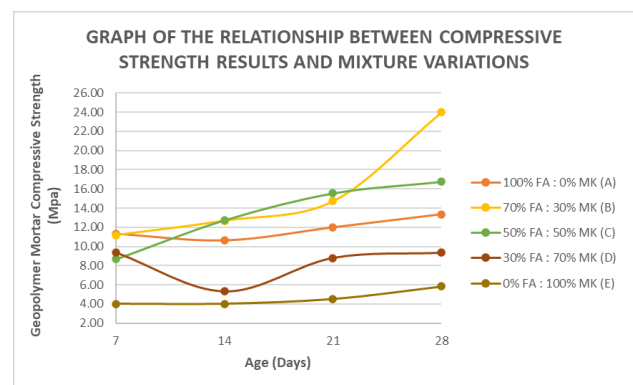
From graph 2. Shows that all geopolymer mortar mixture variations experienced an increase in bulk density as the test age increased from 7,14, 21 and 28 days. This increase indicates that the geopolymerization process that occurs during the room temperature curing process causes the geopolymer mortar structure to become denser. In the 100% FA : 0% MK (A) variation there was a gradual and not too significant increase in bulk density. In the 70% FA : 30% MK (B) variation the highest bulk density values were observed at each test age. It can be concluded that this binder variation produced a denser structure. The 50% FA : 50% MK (C) and 30% FA : 70% MK (D) variation showed a gradual increase but with slightly lower bulk density values. The 0% FA : 100% MK (E) variation showed the lowest bulk density value at all test age, although it still showed an increase in bulk density value. This is because the particle characteristics of metakaolin are finer than those of fly ash, thereby affecting the final density. Overall, the graph above shows that the mixture composition combination of fly ash and metakaolin binder produces optimal bulk density.

Geopolymer Mortar Compressive Strength Test

The results of compressive strength mortar geopolymer to Table 5. And Graph 3.

Table 5. Recapitulation of geopolymer mortar compressive strength test

Variation binder	7 days (Mpa)	14 days (Mpa)	21 days (Mpa)	28 days (Mpa)
100% FA : 0% MK (A)	11,33	10,67	12,00	13,33
70% FA : 30% MK (B)	11,16	12,67	14,71	24,00
50% FA : 50% MK (C)	8,67	12,73	15,53	16,73
30% FA : 70% MK (D)	9,33	5,33	8,80	9,33
0% FA : 100% MK (E)	4,00	4,00	4,51	5,84



Graph 3. Relationship between compressive strength and mix variation

From graph 3. It was found that the compressive strength of geopolymer mortar is influenced by the percentage ratio of fly ash and metakaolin used as cement substitutes. The compressive strength of geopolymer mortar was found to be most optimal at a binder variation of 70% fly ash : 30% metakaolin (B) with the highest bulk density and compressive strength at 28 days with an average compressive strength of 24,00 Mpa. This indicates that this binder variation produces a denser structure and more effective geopolymerization compared to other binder variations.

Analysis of The Relationship Between Bulk Density Test and Compressive Strength Test of Geopolymer Mortar

From Table 3. and 4. there is a positive correlation between the fly ash and metakaolin ratio and the test age. Shows a direct relationship between the two parameters, results in an increase in bulk density followed by an increase in compressive strength for each mixture variation and test age. This

indicates that geopolymer mortar with a higher density has a denser internal structure and lower porosity, enabling it to withstand compressive loads well. With increase test age, there was a relatively consistent increase in bulk density and compressive strength values. This was due to the gradual geopolymerization reaction process, which resulted in an increasingly dense structure. It can be concluded that the bulk density has a good correlation with the compressive strength of geopolymer mortar, where the higher the bulk density, the greater the compressive strength produced.

CONCLUSIONS

The results of the study show that variations in the composition of fly ash and metakaolin binders can have a significant effect on the bulk density and compressive strength of geopolymer mortar at room temperature curing. The bulk density test results show an increase at each test age due to the ongoing geopolymerization process, which forms a denser mortar structure. The binder variation of 70% fly ash : 30% metakaolin produced the highest bulk density value, indicating the most dense mortar structure. Meanwhile the use of a 100% metakaolin binder variation produced the lowest bulk density value. The results of geopolymer mortar compressive strength at the test age show that the binder composition greatly affects the development of geopolymer mortar strength. The 70% fly ash : 30% metakaolin variation produced the most optimal compressive strength value of 24.00 Mpa at 28 days of age and showed a stable and consistent pattern of strength increase. The 50% fly ash : 50% metakaolin variation showed fairly good strength development reaching 16,73 Mpa at 28 days, while the 100% fly ash variation obtained a compressive strength value of 13,33 Mpa. Variations with higher metakaolin the 30% fly ash : 70% metakaolin produced a compressive strength value of 9,33 Mpa and 100% metakaolin produced a compressive strength value of 5,84 Mpa at 28 days of age, so that the compressive

strength value in these variations showed the lowest value compared to the variations.

Overall, the combination of fly ash and metakaolin in balanced proportions, especially in the 70% fly ash : 30% metakaolin variation has been proven to produce the most optimal mechanical performance and density of geopolymer mortar. This shows that this proportion provides a balance between initial reactivity and the formation of denser aluminosilicate gel structure, so that the geopolymerization process is more effective than over variations.

REFERENCES

- Indonesian Nasional Standard, 2002. (2002a). "Portland cement mortar compressive strength testing method for civil works."
- Indonesian Nasional Standard, 2002. (2002b). *SNI 03-2461-2002 "Specification for Lightweight Aggregates for Lightweight Structural Concrete."*
- Indonesian Nasional Standard, 2002. (2002c). "Specifications for fine aggregate for mortar and plastering work with cement as the base material."
- Lestianingrum, L., & al., et. (2022). "Supplementary Cementitious Materials Utilization in Indonesia." *Journal of Engineering Science*.
- Thoriq, M., Kencanawati, N. N., Fajrin, J., Studi, P., Sipil, T., Teknik, F., & Mataram, U. (2025). "Analysis of the physical and mechanical properties of fly ash based geopolymer mortar with a combination of metakaolin and silica fume." 1–10.
- Yudatama, D. S., & Fafurida, F. (2022). "Determinants of Carbon Dioxide Emissions in the Five Asia Pacific Countries." *Efficient Indonesian Journal of Development Economics*, 5(3), 242–253.
<https://doi.org/10.15294/efficient.v5i3.54738>

Analisis Kepuasan Penghuni terhadap Fasilitas Umum dan Kondisi Fisik Bangunan Menggunakan Metode *Importance Performance Analysis* (IPA) (Studi Kasus Perumahan Green Semanggi Mangrove)

Analysis of Resident Satisfaction with Public Facilities and Building Physical Conditions Using the Importance Performance Analysis (IPA) Method (Case Study: Green Semanggi Mangrove Housing Estate)

Andreas Septian Danuwarta¹, Rizki Astri Apriliani^{2*}, Wisnu Abiarto Nugroho³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Dr. Soetomo Surabaya Jln. Semolowaru No. 84, Surabaya
Email : rizki.apriliani@unitomo.ac.id

Abstrak

Kebutuhan akan hunian yang layak di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perubahan pola hidup masyarakat. Namun demikian, penyediaan sarana dan prasarana perumahan masih menghadapi berbagai kendala yang berpengaruh terhadap kualitas hunian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat kepuasan penghuni terhadap kondisi fisik bangunan dan fasilitas umum pada Perumahan Green Semanggi Mangrove dengan menggunakan metode Importance Performance Analysis (IPA). Data penelitian diperoleh melalui penyebaran kuesioner dengan skala Likert kepada 106 responden. Hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat kesesuaian antara kinerja dan kepentingan mencapai rata-rata 84,05%, yang mengindikasikan bahwa secara umum kondisi fasilitas dan bangunan telah cukup memenuhi harapan penghuni. Meskipun demikian, masih terdapat beberapa atribut yang memerlukan perhatian khusus. Berdasarkan analisis diagram kartesius, aspek sanitasi dalam rumah, yang meliputi fungsi toilet, wastafel, serta kondisi yang tidak menimbulkan bau, berada pada kuadran prioritas utama. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara tingkat kepentingan dan kinerja pada atribut tersebut. Oleh karena itu, diperlukan upaya peningkatan melalui perbaikan sistem ventilasi, instalasi pipa dan saluran pembuangan, pemasangan water trap yang sesuai standar, serta pemeliharaan rutin guna meningkatkan kenyamanan dan kualitas hunian secara berkelanjutan.

Kata Kunci : kondisi fisik bangunan; fasilitas umum perumahan; *Importance Performance Analysis* (IPA)

Abstract

The demand for adequate housing in Indonesia continues to increase along with population growth and changes in community lifestyles. However, the provision of housing infrastructure and facilities still faces various challenges that affect housing quality. This study aims to analyze residents' satisfaction with building physical conditions and public facilities in Green Semanggi Mangrove Housing using the Importance-Performance Analysis (IPA) method. The data were collected through a Likert-scale questionnaire distributed to 106 respondents. The results indicate that the average level of conformity between performance and importance reached 84.05%, suggesting that, in general, the condition of facilities and buildings has fairly met residents' expectations. Nevertheless, several attributes still require special attention. Based on the Cartesian diagram analysis, in-house sanitation, including the functionality of toilets and sinks as well as the absence of unpleasant odors, falls into the main priority quadrant. This finding indicates a gap between the level of importance and performance for this attribute. Therefore, improvements are necessary through enhancing ventilation systems, repairing plumbing and drainage installations, installing standard water traps, and conducting routine maintenance to improve comfort and ensure the sustainability of housing quality.

Keywords: *building physical condition; public housing facilities; importance performance analysis (IPA)*

PENDAHULUAN

Hunian yang layak merupakan salah satu faktor penting dalam meningkatkan kesejahteraan serta kenyamanan hidup masyarakat. Seiring dengan pesatnya pembangunan, kebutuhan akan perumahan tidak hanya terbatas sebagai tempat tinggal, tetapi juga harus didukung oleh ketersediaan fasilitas yang memadai. Selain itu, kondisi fisik bangunan yang baik serta pelayanan yang mampu memenuhi harapan penghuni menjadi aspek penting dalam menunjang kualitas hunian (Rina Ayuni et al., 2023).

Perumahan Green Semanggi Mangrove yang terletak di Kecamatan Rungkut, Kota Surabaya, merupakan salah satu kawasan permukiman yang berkembang di wilayah pinggiran kota. Perkembangan ini dipengaruhi oleh keterbatasan lahan di pusat kota yang mendorong masyarakat untuk memilih kawasan suburban sebagai alternatif hunian yang lebih terjangkau serta memiliki peluang pengembangan di masa mendatang (Hadi et al., 2021). Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 03-1733-2004), fasilitas perumahan meliputi prasarana dan sarana seperti jalan lingkungan, drainase, penyediaan air bersih, jaringan listrik, pengelolaan sampah, telekomunikasi, ruang terbuka hijau, serta fasilitas sosial dan keagamaan. Keberadaan dan kualitas fasilitas tersebut memiliki peran penting dalam mendukung kesejahteraan serta kesehatan masyarakat, sekaligus menjadi indikator dalam menilai kualitas suatu kawasan permukiman (Simamora et al., 2023).

Dalam perkembangannya, Perumahan Green Semanggi Mangrove menunjukkan peningkatan jumlah penghuni yang cukup signifikan. Namun demikian, kondisi ini juga diikuti oleh munculnya berbagai keluhan terkait fasilitas umum dan kondisi fisik bangunan yang belum optimal. Hal tersebut mengindikasikan adanya perbedaan antara harapan penghuni dengan kondisi yang dirasakan secara langsung di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian yang mampu mengidentifikasi aspek-aspek yang perlu diprioritaskan untuk perbaikan guna meningkatkan kepuasan penghuni (Runtuwarow et al., 2021).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji tingkat kepuasan penghuni perumahan menggunakan metode Importance Performance Analysis (IPA). (Runtuwarow et al., 2021) meneliti kepuasan penghuni pada Perumahan Bukit Kawanua Golf Residence, sedangkan (Anggara et al., 2024) mengevaluasi kepuasan penghuni perumahan bersubsidi di Purwokerto. (Supriani et al., 2024) juga melakukan analisis kepuasan penghuni terhadap fasilitas dan kualitas bangunan pada Perumahan

Megah Residence Kota Bengkulu. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada pengukuran tingkat kepuasan secara umum dan belum secara khusus mengintegrasikan penilaian fasilitas umum perumahan dan kondisi fisik bangunan dalam satu model evaluasi untuk menentukan prioritas peningkatan kualitas hunian.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat research gap terkait kajian yang menghubungkan tingkat kepentingan dan kinerja atribut fasilitas umum serta kondisi fisik bangunan secara terpadu pada kawasan perumahan yang berkembang di wilayah pinggiran Kota Surabaya. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan berupa pengintegrasian atribut fasilitas umum dan kondisi fisik bangunan dalam analisis kepuasan penghuni menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA) untuk menentukan prioritas peningkatan kualitas hunian berdasarkan persepsi penghuni. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi akademik berupa pengayaan kajian kepuasan penghuni perumahan serta menjadi dasar rekomendasi praktis bagi pengembang dalam meningkatkan kualitas lingkungan hunian.

Penelitian ini menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA) untuk menganalisis tingkat kepuasan penghuni. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran mengenai tingkat kepentingan dan kinerja dari masing-masing atribut yang diteliti, sehingga dapat diketahui prioritas perbaikan yang perlu dilakukan. Melalui pemetaan ke dalam kuadran IPA, hasil analisis diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam meningkatkan kualitas fasilitas dan kondisi fisik bangunan sesuai dengan kebutuhan dan harapan penghuni (Anggara et al., 2024).

TINJAUAN PUSTAKA

Kepuasan Pelanggan

Kepuasan pelanggan (*customer satisfaction*) merupakan bentuk respons yang muncul setelah konsumen membandingkan antara harapan terhadap suatu produk atau layanan dengan kinerja yang mereka rasakan. Menurut Philip Kotler dan Kevin Lane Keller (2016), kepuasan mencerminkan tingkat perasaan seseorang setelah mengevaluasi kesesuaian antara hasil yang diterima dengan ekspektasi yang dimiliki. Ketika kinerja yang dirasakan sesuai dengan harapan, konsumen cenderung merasa puas. Sebaliknya, apabila kinerja melebihi harapan, tingkat kepuasan akan meningkat, sedangkan kinerja yang berada di bawah harapan dapat menimbulkan kekecewaan (Yuliana & Punama, 2021).

Dalam konteks hunian, penghuni sebagai pengguna memiliki harapan tertentu terhadap kualitas kondisi fisik bangunan serta ketersediaan fasilitas pendukung. Tingkat kepuasan penghuni terhadap lingkungan tempat tinggalnya menjadi aspek yang penting karena berkaitan dengan kenyamanan, kecenderungan untuk tetap tinggal, serta penilaian terhadap kualitas pengembang. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kepuasan penghuni dapat memberikan gambaran mengenai sejauh mana kondisi hunian mampu memenuhi kebutuhan dan harapan penggunanya.

Fasilitas Umum Perumahan

Fasilitas umum perumahan merupakan salah satu komponen penting dalam menunjang kualitas hidup penghuni di suatu kawasan permukiman. Keberadaannya tidak hanya berfungsi untuk memenuhi kebutuhan dasar hunian, tetapi juga turut memengaruhi tingkat kenyamanan, kepuasan, serta persepsi penghuni terhadap nilai properti yang dimiliki. Dengan kata lain, kualitas fasilitas yang tersedia dapat mencerminkan tingkat kelayakan suatu lingkungan tempat tinggal.

Mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 03-1733-2004), fasilitas umum perumahan mencakup berbagai prasarana dan sarana, antara lain jalan lingkungan, sistem drainase, penyediaan air bersih, jaringan listrik, pengelolaan sampah, layanan telekomunikasi, ruang terbuka hijau, serta fasilitas sosial dan keagamaan. Ketersediaan dan kualitas dari masing-masing fasilitas tersebut memiliki peran yang signifikan dalam mendukung kesejahteraan serta kesehatan masyarakat. Selain itu, kelengkapan fasilitas juga kerap dijadikan sebagai salah satu indikator dalam menilai keberhasilan pengembangan suatu kawasan permukiman (Simamora et al., 2023).

Kondisi Fisik Bangunan

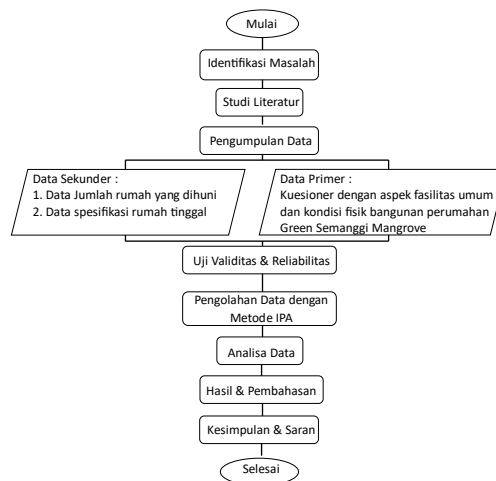
Kondisi fisik bangunan merupakan salah satu aspek utama yang memengaruhi tingkat kenyamanan, keamanan, serta kelayakan suatu hunian. Secara umum, kondisi ini mencakup berbagai elemen teknis dan struktural, seperti kekuatan konstruksi, ketahanan material, kualitas pelaksanaan pembangunan, serta kemampuan bangunan dalam menghadapi pengaruh lingkungan, termasuk cuaca, kelembapan, dan potensi bencana.

Bangunan dengan kondisi fisik yang baik tidak hanya berfungsi sebagai pelindung bagi penghuninya, tetapi juga mampu memberikan rasa aman dan kenyamanan dalam aktivitas sehari-hari. Selain itu, kualitas fisik bangunan turut menentukan

keberlanjutan fungsi hunian dalam jangka panjang, sehingga menjadi salah satu faktor penting dalam menilai kualitas suatu kawasan permukiman (Supriani et al., 2024).

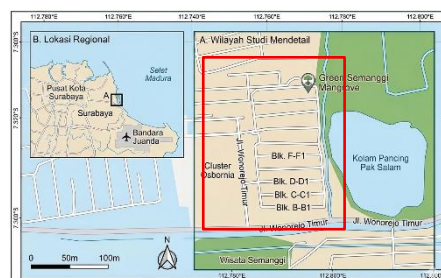
METODE PENELITIAN

Flowchart pengolahan data dapat dilihat dari diagram alir berikut ini :



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Perumahan Green Semanggi Mangrove, Rungkut, Surabaya



Gambar 2. Lokasi Penelitian Atribut Penelitian

Tabel 1. Atribut Fasilitas Umum

No	Atribut	Sumber
1	Kondisi jalan (kebersihan, kelayakan, lebar)	1,3,4,5
2	Sistem drainase (efektivitas, bebas genangan)	1,2,3
3	Ketersediaan air bersih (kuantitas, kelancaran)	2,3
4	Ketersediaan listrik (stabilitas pasokan, daya memadai)	3
5	Pengelolaan sampah (ketersediaan bak sampah, jadwal pengangkutan)	4
6	Jaringan telekomunikasi (sinyal, ketersediaan internet)	5
7	Keamanan lingkungan (keberadaan pos keamanan, patroli, rasa aman)	1,3,4,5

8	Kenyamanan lingkungan (ketenangan, kebersihan umum)	2
9	Kondisi bebas banjir (tidak pernah tergenang air)	3
Ket.	1 = (Simamora et al., 2023) 2 = (Nastiti et al., 2025) 3 = (Supriani et al., 2024) 4 = (Anggara et al., 2024) 5 = (Runtuwarow et al., 2021)	

Sumber : Hasil Olah Data (2025)

Tabel 2. Atribut Kondisi Fisik Bangunan

No	Atribut	Sumber
1	Penampilan luar rumah (estetika, modernitas)	5
2	Ukuran bangunan rumah (kesesuaian dengan kebutuhan, fungsionalitas ruang)	2
3	Tata ruang (efisiensi, kenyamanan sirkulasi)	1
4	Sistem ventilasi (sirkulasi udara yang baik)	5
5	Pencahayaan alami (kecukupan cahaya matahari masuk)	4
6	Tinggi langit-langit (kesan luas, kenyamanan terhadap suhu dalam rumah)	3
7	Kualitas material bangunan secara keseluruhan (daya tahan, kerapian)	1,3,5
8	Saluran air hujan (efektivitas, tidak bocor)	2
9	Sanitasi dalam rumah (fungsi toilet, wastafel, tidak bau)	2
10	Kualitas atap dan plafon (tidak bocor, tidak berjamur)	2,5
Ket	1 = (Simamora et al., 2023) 2 = (Nastiti et al., 2025) 3 = (Supriani et al., 2024) 4 = (Anggara et al., 2024) 5 = (Runtuwarow et al., 2021)	

Sumber : Hasil Olah Data (2025)

Populasi Dan Sampel

Penentuan jumlah sampel dalam penelitian ini dilakukan menggunakan rumus Slovin, yang digunakan untuk memperoleh ukuran sampel minimum berdasarkan jumlah populasi dan tingkat kesalahan yang ditetapkan. Rumus Slovin dinyatakan sebagai berikut:

$$n = \frac{N}{1+N(e)^2} \dots\dots\dots 1$$

Keterangan:

n = jumlah sampel minimal yang dibutuhkan

N = jumlah populasi

e = tingkat kesalahan (*margin of error*)

Pada penelitian ini, tingkat kepercayaan yang digunakan sebesar 90% dengan batas kesalahan (e) sebesar 10%. Jumlah populasi yang diteliti adalah sebanyak 600 unit rumah. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh jumlah sampel minimum sebanyak 86 responden. Dalam pelaksanaannya, data berhasil dikumpulkan dari 106 responden, sehingga

jumlah sampel yang digunakan telah melampaui batas minimum dan dinilai cukup representatif dalam menggambarkan kondisi populasi penelitian.

Uji Coba Kuesioner

Kuesioner yang telah disebarakan kepada penghuni kemudian diuji melalui uji validitas dan reliabilitas. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap butir pertanyaan dapat dipahami dengan baik oleh responden serta mampu mengukur variabel penelitian secara tepat. Apabila terdapat butir pertanyaan yang tidak memenuhi kriteria, maka dilakukan perbaikan sebelum digunakan pada tahap analisis. Sebaliknya, jika seluruh item dinyatakan layak, maka kuesioner dapat langsung digunakan dalam proses penelitian.

Uji Validitas

Uji validitas dilakukan untuk mengetahui sejauh mana instrumen penelitian mampu mengukur variabel yang diteliti secara tepat. Pengujian ini dilakukan dengan melihat nilai korelasi antara skor masing-masing butir pertanyaan dengan skor total. Nilai korelasi tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai r tabel sebagai dasar penentuan valid atau tidaknya suatu item pertanyaan. Item yang memiliki nilai r hitung lebih besar dari r tabel dinyatakan valid dan dapat digunakan dalam analisis selanjutnya.

Uji Reliabilitas

Uji reliabilitas dilakukan untuk mengetahui tingkat konsistensi instrumen penelitian dalam mengukur variabel yang diteliti. Suatu kuesioner dinyatakan reliabel apabila jawaban responden terhadap setiap butir pertanyaan menunjukkan kestabilan atau konsistensi dalam pengukuran.

Pengujian reliabilitas dalam penelitian ini menggunakan koefisien *Cronbach's Alpha* (α), yang bertujuan untuk menilai sejauh mana item-item dalam kuesioner memiliki konsistensi internal. Nilai *Cronbach's Alpha* yang tinggi menunjukkan bahwa instrumen penelitian memiliki tingkat keandalan yang baik dan dapat digunakan secara berulang pada kondisi yang relatif sama.

Secara umum, suatu instrumen dikatakan reliabel apabila memiliki nilai Cronbach's Alpha lebih dari 0,60. Semakin mendekati nilai 1, maka

tingkat reliabilitas instrumen tersebut semakin baik, sehingga hasil pengukuran yang diperoleh dapat dipercaya untuk digunakan dalam analisis selanjutnya.

Analisis Data Penelitian

Setelah data dinyatakan valid dan reliabel, langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan dan analisis data kuesioner menggunakan metode *Importance Performance Analysis* (IPA). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kepuasan penghuni serta menentukan prioritas perbaikan berdasarkan perbandingan antara tingkat kepentingan dan kinerja dari setiap atribut yang diteliti.

IPA (*Importance Performance Analysis*)

Metode IPA merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian antara tingkat kepentingan (*importance*) dan tingkat kepuasan (*performance*) suatu layanan atau produk. Melalui metode ini, dapat diketahui atribut-atribut yang perlu diprioritaskan untuk ditingkatkan serta aspek yang perlu dipertahankan kinerjanya.

Dalam penerapannya, analisis IPA dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Menghitung Nilai Rata-rata Kepentingan dan Kinerja. Nilai rata-rata digunakan untuk mengetahui persepsi responden terhadap masing-masing atribut, baik dari sisi kepentingan maupun kinerja.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \dots\dots\dots 2$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n} \dots\dots\dots 3$$

Keterangan:

- \bar{X} = rata-rata tingkat kepuasan
- \bar{Y} = rata-rata tingkat kepentingan
- X_i = skor kinerja responden
- Y_i = skor kepentingan responden
- n = jumlah responden

2. Tingkat kesesuaian digunakan untuk mengetahui seberapa besar konsumen merasa puas terhadap kinerja pelayanan, rumus yang digunakan sebagai berikut:

$$TK = \frac{X}{Y} \times 100\% \dots\dots\dots 4$$

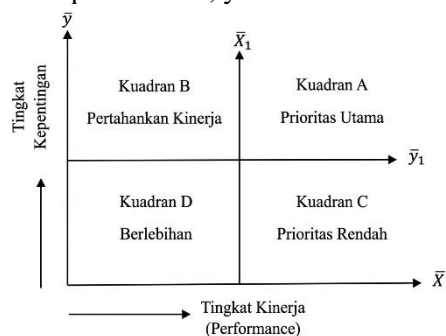
Keterangan:

- TK = Tingkat Kesesuaian
- X = skor rata-rata tingkat kepuasan
- Y = skor rata-rata tingkat kepentingan

3. Menentukan Nilai Rata-rata Total
Nilai rata-rata total dari seluruh atribut digunakan sebagai garis pembagi dalam diagram kartesius, yaitu:

Rata-rata kinerja (\bar{X}) sebagai sumbu horizontal
Rata-rata kepentingan (\bar{Y}) sebagai sumbu vertikal

4. Analisis Diagram Kartesius (Kuadran IPA)
Hasil perhitungan kemudian dipetakan ke dalam diagram kartesius untuk mengetahui posisi masing-masing atribut berdasarkan tingkat kepentingan dan kinerjanya. Diagram ini terbagi menjadi empat kuadran, yaitu:



Gambar 3. Diagram Kartesius

- **Kuadran A (Prioritas Utama)**
Atribut dengan tingkat kepentingan tinggi tetapi kinerjanya masih rendah, sehingga perlu segera dilakukan perbaikan.
- **Kuadran B (Pertahankan Kinerja)**
Atribut dengan tingkat kepentingan dan kinerja yang sama-sama tinggi, sehingga perlu dipertahankan.
- **Kuadran C (Prioritas Rendah)**
Atribut dengan tingkat kepentingan dan kinerja yang sama-sama rendah, sehingga bukan menjadi prioritas utama.
- **Kuadran D (Berlebihan)**
Atribut dengan tingkat kepentingan rendah namun kinerjanya tinggi, sehingga terdapat kemungkinan alokasi sumber daya yang kurang efisien.

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Uji Coba Kuesioner

Berdasarkan hasil uji validitas dan reliabilitas, diperoleh bahwa 19 atribut dalam kuesioner telah memenuhi kriteria valid dan reliabel. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *r* hitung pada seluruh item pertanyaan yang lebih besar dibandingkan *r* tabel, serta nilai *Cronbach's Alpha* untuk 19 item tersebut yang berada di atas 0,6 sehingga dinyatakan reliabel seperti tabel di bawah ini.

Tabel 3. Uji Validitas Atribut

No	r_{hitung}		r_{tabel}	Keterangan $r_{hitung} > r_{tabel} = \text{valid}$
	Kepuasan	Kepentingan		
1	0,480	0,729	0,1909	Valid
2	0,528	0,542	0,1909	Valid
3	0,533	0,653	0,1909	Valid
4	0,587	0,567	0,1909	Valid
5	0,398	0,605	0,1909	Valid
6	0,480	0,665	0,1909	Valid
7	0,501	0,464	0,1909	Valid
8	0,478	0,765	0,1909	Valid
9	0,567	0,706	0,1909	Valid
10	0,474	0,765	0,1909	Valid
11	0,573	0,710	0,1909	Valid
12	0,699	0,770	0,1909	Valid
13	0,721	0,737	0,1909	Valid
14	0,583	0,643	0,1909	Valid
15	0,476	0,621	0,1909	Valid
16	0,645	0,755	0,1909	Valid
17	0,659	0,773	0,1909	Valid
18	0,590	0,693	0,1909	Valid
19	0,638	0,741	0,1909	Valid

Sumber : Hasil Olah Data (2025)

Tabel 4. Cronbach's Alpha uji reliabilitas kepuasan

Reliability Statistics	
Cronbach's Alpha	N of Items
0,873	19

Sumber : Hasil Olah Data (2025)

Tabel 5. Cronbach's Alpha uji reliabilitas kepentingan

Reliability Statistics	
Cronbach's Alpha	N of Items
0,933	19

Sumber : Hasil Olah Data (2025)

Analisis Data

IPA (Importance Performance Analysis)

1. Menentukan Tingkat Kesesuaian

Tabel 6. Perhitungan Tingkat Kesesuaian

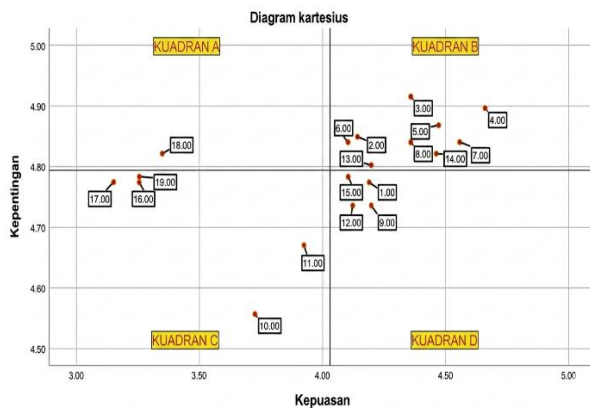
No	Total Skor		Kesesuaian
	Kepuasan	Kepentingan	
1	444	506	87,75%
2	439	514	85,41%
3	462	521	88,68%
4	494	519	95,18%
5	474	516	91,86%
6	435	513	84,80%
7	483	513	94,15%
8	462	513	90,06%
9	445	502	88,65%
10	395	483	81,78%
11	416	495	84,04%
12	437	502	87,05%
13	445	509	87,43%
14	473	511	92,56%
15	435	507	85,80%
16	345	506	68,18%
17	334	506	66,01%
18	355	511	69,47%
19	345	507	68,05%
Nilai Rata - rata			84,05%

Sumber : Hasil Pengolahan Data (2025)

Tingkat kesesuaian digunakan untuk mengetahui sejauh mana kinerja yang dirasakan oleh penghuni telah memenuhi tingkat kepentingan yang diharapkan. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai rata-rata tingkat kesesuaian sebesar 84,05%.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa secara umum kinerja fasilitas dan kondisi fisik bangunan di Perumahan Green Semanggi Mangrove telah cukup mampu memenuhi harapan penghuni, meskipun masih terdapat beberapa atribut yang memerlukan perhatian lebih.

2. Diagram Kartesius



Gambar 4. Diagram Kartesius
Sumber :Hasil Pengolahan Data (2025)

Berdasarkan hasil pemetaan ke dalam diagram kartesius, atribut-atribut penelitian terbagi ke dalam empat kuadran sebagai berikut:

Kuadran I (Prioritas Utama)

Kuadran I menunjukkan atribut yang memiliki tingkat kepentingan tinggi, namun tingkat kepuasannya masih berada di bawah harapan penghuni sehingga memerlukan perhatian dan perbaikan segera. Berdasarkan hasil analisis, atribut yang termasuk dalam kuadran ini adalah sanitasi dalam rumah yang meliputi fungsi toilet, wastafel, dan kondisi sanitasi yang tidak menimbulkan bau. Hasil ini menunjukkan bahwa sanitasi merupakan kebutuhan dasar penghuni yang memiliki pengaruh langsung terhadap kenyamanan dan kesehatan penghuni. Rendahnya tingkat kepuasan pada atribut ini mengindikasikan masih adanya permasalahan pada sistem pembuangan air limbah, ventilasi ruang sanitasi, maupun pemeliharaan fasilitas sanitasi rumah. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Supriani et al., 2024) yang menyatakan bahwa kualitas fasilitas bangunan menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi kepuasan penghuni. Selain itu, (Runtuwarow et al., 2021) menemukan bahwa atribut yang berkaitan langsung dengan kenyamanan penghuni cenderung memiliki tingkat kepentingan yang tinggi dalam penilaian kualitas hunian. Oleh karena itu, peningkatan kualitas sanitasi perlu menjadi prioritas utama melalui perbaikan sistem ventilasi, saluran pembuangan, dan pemeliharaan berkala guna meningkatkan kualitas lingkungan hunian secara berkelanjutan.

Kuadran II (Pertahankan Kinerja)

Kuadran ini berisi atribut yang memiliki tingkat kepentingan dan kinerja yang sama-sama tinggi, sehingga perlu dipertahankan

Atribut dalam kuadran ini meliputi:

- Nomor 2: Sistem drainase (efektivitas, bebas genangan)
- Nomor 3: Ketersediaan air bersih (kuantitas, kelancaran)
- Nomor 4: Ketersediaan listrik (stabilitas pasokan, daya memadai)
- Nomor 5: Pengelolaan sampah (ketersediaan bak sampah, jadwal pengangkutan)
- Nomor 6: Jaringan telekomunikasi (sinyal, ketersediaan internet)
- Nomor 7: Keamanan lingkungan (pos keamanan, patroli, rasa aman)
- Nomor 8: Kenyamanan lingkungan (ketenangan, kebersihan umum)
- Nomor 13: Sistem ventilasi (sirkulasi udara yang baik)
- Nomor 14: Pencahayaan alami (cahaya matahari masuk)

Keberadaan atribut-atribut tersebut pada Kuadran II menunjukkan bahwa fasilitas dasar perumahan telah mampu memenuhi harapan penghuni dan memiliki tingkat kepuasan yang baik. Drainase, air bersih, listrik, keamanan lingkungan, dan kenyamanan lingkungan merupakan fasilitas yang secara langsung mendukung aktivitas sehari-hari penghuni sehingga keberadaannya menjadi faktor penting dalam membentuk kepuasan penghuni terhadap lingkungan tempat tinggalnya.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Anggara et al., 2024) yang menyatakan bahwa kualitas fasilitas dasar perumahan memiliki kontribusi yang signifikan terhadap tingkat kepuasan penghuni. Selain itu, (Simamora et al., 2023) menjelaskan bahwa ketersediaan fasilitas umum yang memadai dapat meningkatkan persepsi positif penghuni terhadap kualitas kawasan permukiman. Dengan demikian, atribut yang berada pada Kuadran II perlu dipertahankan melalui program pemeliharaan yang berkelanjutan agar kualitas layanan tetap terjaga dan kepuasan penghuni dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

Kuadran III (Prioritas Rendah)

Kuadran ini menunjukkan atribut dengan tingkat kepentingan dan kinerja yang relatif rendah, sehingga bukan menjadi prioritas utama dalam

perbaikan.

Atribut yang termasuk di dalamnya adalah:

- Nomor 10: Penampilan luar rumah (estetika, modernitas)
- Nomor 11: Ukuran bangunan rumah (kebutuhan, fungsionalitas ruang)
- Nomor 16: Kualitas material bangunan (daya tahan, kerapian)
- Nomor 17: Saluran air hujan (efektivitas, tidak bocor)
- Nomor 19: Kualitas atap dan plafon (tidak bocor, tidak berjamur)

Atribut yang berada pada Kuadran III menunjukkan bahwa tingkat kepentingan dan tingkat kinerja keduanya relatif rendah menurut persepsi penghuni. Kondisi ini mengindikasikan bahwa atribut-atribut tersebut belum menjadi perhatian utama penghuni dalam menilai kualitas hunian. Meskipun demikian, pengembang tetap perlu melakukan pemantauan dan pemeliharaan secara berkala agar kualitas atribut tersebut tidak mengalami penurunan yang dapat memengaruhi tingkat kepuasan penghuni pada masa mendatang. Dengan demikian, peningkatan pada atribut dalam Kuadran III dapat dilakukan secara bertahap setelah kebutuhan yang berada pada Kuadran I terpenuhi.

Kuadran IV (Berlebihan)

Kuadran ini menunjukkan atribut dengan kinerja tinggi namun tingkat kepentingannya relatif rendah, sehingga terdapat kemungkinan alokasi sumber daya yang kurang efisien.

Atribut dalam kuadran ini meliputi:

- Nomor 1: Kondisi jalan lingkungan (kebersihan, kelayakan, lebar)
- Nomor 9: Kondisi bebas banjir (tidak pernah tergenang air)
- Nomor 12: Tata ruang rumah (efisiensi, sirkulasi udara)
- Nomor 15: Tinggi langit-langit (kenyamanan suhu dalam rumah)

Atribut yang berada pada Kuadran IV menunjukkan bahwa tingkat kinerja yang diberikan relatif tinggi dibandingkan tingkat kepentingannya menurut penghuni. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sumber daya yang dialokasikan pada atribut tersebut telah melebihi tingkat harapan penghuni. Hasil ini tidak menunjukkan bahwa kualitas atribut perlu diturunkan, melainkan menjadi bahan pertimbangan bagi pengembang untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya sehingga perhatian dan investasi dapat lebih difokuskan pada atribut yang memiliki tingkat kepentingan tinggi namun kinerjanya masih rendah, terutama atribut yang berada pada Kuadran I.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Tingkat kesesuaian antara kinerja dan kepentingan menunjukkan nilai rata-rata sebesar 84,05%. Hal ini mengindikasikan bahwa fasilitas umum serta kondisi fisik bangunan di Perumahan Green Semanggi Mangrove secara umum telah mampu memenuhi harapan penghuni, meskipun belum sepenuhnya optimal.
2. Hasil analisis diagram kartesius menunjukkan bahwa atribut sanitasi dalam rumah, yang meliputi fungsi toilet, wastafel, serta kondisi yang tidak menimbulkan bau, berada pada Kuadran I (prioritas utama). Atribut ini memiliki tingkat kepentingan tinggi namun kinerjanya masih rendah, sehingga memerlukan penanganan segera.
3. Atribut-atribut yang berada pada Kuadran II, seperti sistem drainase, ketersediaan air bersih, listrik, pengelolaan sampah, jaringan telekomunikasi, keamanan, kenyamanan lingkungan, ventilasi, serta pencahayaan alami, menunjukkan kinerja yang telah sesuai dengan harapan penghuni sehingga perlu dipertahankan.
4. Atribut yang berada pada Kuadran III dan Kuadran IV menunjukkan bahwa tidak seluruh aspek memiliki tingkat prioritas yang sama. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan yang lebih efektif dengan memfokuskan sumber daya pada atribut yang memiliki tingkat kepentingan tinggi.
5. Penelitian ini menunjukkan bahwa atribut sanitasi dalam rumah merupakan aspek yang paling membutuhkan perhatian karena memiliki tingkat kepentingan yang tinggi namun tingkat kepuasannya masih rendah. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas fasilitas yang berkaitan langsung dengan kesehatan dan kenyamanan penghuni memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tingkat kepuasan penghuni perumahan.

Saran

1. Pihak pengembang perlu memprioritaskan peningkatan kualitas sanitasi dalam rumah melalui perbaikan sistem ventilasi atau

pemasangan exhaust fan (Sarumaha & Sugondo, 2021), perbaikan instalasi pipa dan saluran pembuangan, pemasangan water trap sesuai standar, serta pelaksanaan pemeliharaan rutin seperti pembersihan saluran dan pengurasan septic tank (Pamungkas et al., 2022). Penggunaan material sanitasi yang berkualitas juga perlu diperhatikan untuk menjamin keberlanjutan fungsi fasilitas (Warasanti et al., 2025).

2. Atribut-atribut yang telah memiliki tingkat kepentingan dan kinerja tinggi perlu dipertahankan melalui pemeliharaan yang konsisten agar kualitas layanan tetap stabil dan kepuasan penghuni dapat terjaga.
3. Pihak pengelola disarankan untuk mengevaluasi atribut yang berada pada kategori berlebihan, sehingga alokasi sumber daya dapat dioptimalkan dan lebih difokuskan pada aspek yang memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan kepuasan penghuni.

REFERENSI

- Anggara, M. H., Juanita, J., & Sari, C. A. N. (2024). Analisis Tingkat Kepuasan Penghuni Perumahan Bersubsidi di Purwokerto. *Surya Beton : Jurnal Ilmu Teknik Sipil*, 8(1), 18–27. <https://doi.org/10.37729/suryabeton.v8i1.4095>
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 03-1733-2004 Tata Cara Perencanaan Lingkungan Perumahan di Perkotaan.
- Hadi, A. K., Musa, R., & Nurbaya. (2021). Analisis Tingkat Kepuasan Penghuni Perumahan Terhadap Konsumen Perumahan Pada Perumahan Fakultas Teknik Unhas Di Kab. Gowa. *Jurnal Universitas Muslim Indonesia*, 4(1), 29–38.
- Nastiti, A. D., Dewantoro, F., & Safitri, D. (2025). Analisis Kepuasan Penghuni Terhadap Kualitas Bangunan dan Prasarana Perumahan Menggunakan Metode CSI dan IPA. *Jurnal Konstruksi*, 23(1), 34–44. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-1.2298>
- Pamungkas, D. S., Awwali, N., Fadillah, Z., Julia, A., & Ferbianty, D. (2022). Strategi Peningkatan Kualitas Sanitasi Layak Bagi Rumah Tangga Di Kecamatan Sukajadi Kota Bandung. *Jurnal Planologi*, 19(1), 37–59.
- Rina Ayuni, Jaelan, Usman, & Rahim, S. (2023). Manajemen Perencanaan Pembangunan Perumahan Kabupaten Bulukumba. *Journal Unismuh*, 4, 931–943.
- Runtuwarow, T. C., Dundu, A. K. T., & Supit, C. J. (2021). Analisis Kepuasan Penghuni Perumahan Bukit Kawanua Golf Residence. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 11(1), 41–50.
- Sarumaha, Y. K. A., & Sugondo, A. (2021). Optimasi Penempatan Exhaust Fan dalam Rumah dengan CFD. *Jurnal Teknik Mesin*, 18(1), 12–19. <https://doi.org/10.9744/jtm.18.1.12>
- Simamora, R. H., Kadri, M. K., Astha, D. P., & Nugroho, R. A. (2023). Tingkat Kepuasan Penghuni Perumahan berdasarkan Perspektif Penghuni Perumahan. *COMPACT: Spatial Development Journal*, 2(2), 47–55. <https://doi.org/10.35718/compact.v2i2.909>
- Supriani, F., Kiando, P., & Islam, M. (2024). Analisis Tingkat Kepuasan Pemilik Perumahan Terhadap Fasilitas Dan Kualitas Bangunan Perumahan Megah Residence Kota Bengkulu Menggunakan Metode Importance Performance Analysis (Ipa). *Teknosia*, 18(1), 1–11. <https://doi.org/10.33369/teknosia.v18i1.33973>
- Warasanti, E. S., Rianto, A., Nugroho, B., Maharani, Y. N., Purwanta, J., & Paripurno, E. T. (2025). Impact of Housing Quality on Acute Respiratory Infections in Flood-Prone Urban Settlements : A Mixed-Methods Study in Dukuh Kupang , Surabaya , Indonesia. *Sanus Medical Journal*, 7(1), 73–87.
- Yuliana, & Punama, I. (2021). Pengaruh Kualitas Pelayanan, Kepuasan Pelanggan Dan Nilai Pelanggan Dalam Meningkatkan Loyalitas Pelanggan Pada PO. Titian Mas Cabang Bima. *Jurnal Ilmiah Manajemen dan Bisnis*, 4(2), 96.

Analisis Perubahan Dinamika Garis Pantai Watu Gedek dan Muara Gede Kabupaten Lumajang Menggunakan Data Satelit Multi-Temporal dan Analisis Spasial

Analysis of Changes in the Coastal Dynamics of Watu Gedek and Muara Gede in Lumajang Regency Using Multi-Temporal Satellite Data and Spatial Analysis

Anna Rosytha¹, Zainal Abidin, Arifien Nursandah

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Jl. Sutorejo No. 59
Surabaya Email : anna.rosytha@ft.um-surabaya.ac.id

Abstrak

Wilayah pesisir selatan Kabupaten Lumajang memiliki dinamika garis pantai yang tinggi akibat pengaruh gelombang Samudera Hindia, arus laut, sedimentasi muara sungai, dan aktivitas manusia. Perubahan garis pantai berupa abrasi dan akresi berdampak pada geomorfologi pantai, ekosistem pesisir, serta aktivitas sosial ekonomi masyarakat. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan dinamika garis pantai di kawasan Watu Gedek dan Muara Gede, Kecamatan Tempursari, Kabupaten Lumajang menggunakan citra Landsat periode 2020–2025. Metode yang digunakan meliputi ekstraksi garis pantai dengan MNDWI, analisis kuantitatif menggunakan Digital Shoreline Analysis System (DSAS), serta pendekatan prediksi menggunakan QSCAT dan machine learning Random Forest. Parameter yang dianalisis meliputi NSM, EPR, LRR, dan SCE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa abrasi mendominasi sekitar $\pm 74\%$ transek dengan laju maksimum $-11,49$ m/tahun. Zona abrasi terkuat berada pada segmen tengah, sedangkan akresi terbatas terjadi di bagian timur dan barat dengan laju hingga $+2,45$ m/tahun akibat suplai sedimen lokal. Hasil QSCAT dan Random Forest menunjukkan pola yang konsisten dengan DSAS. Temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan pesisir yang adaptif dan berbasis data spasial.

Kata Kunci: Garis pantai; Abrasi; Akresi; DSAS; Random Forest.

Abstract

The southern coastal area of Lumajang Regency experiences high shoreline dynamics due to Indian Ocean waves, ocean currents, river mouth sedimentation, and human activities. Shoreline changes in the form of erosion and accretion affect coastal geomorphology, ecosystem stability, and socio-economic activities. This study aims to analyze shoreline dynamics in the Watu Gedek and Muara Gede areas, Tempursari District, Lumajang Regency, using Landsat imagery from 2020–2025. The methods include shoreline extraction using MNDWI, quantitative analysis with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), and prediction approaches using QSCAT and Random Forest machine learning. The analyzed parameters include NSM, EPR, LRR, and SCE. The results show that erosion dominates approximately $\pm 74\%$ of the transects, with a maximum rate of -11.49 m/year. The most severe erosion occurs in the central segment, while limited accretion occurs in the eastern and western parts with rates up to $+2.45$ m/year due to local sediment supply. QSCAT and Random Forest results show consistent patterns with DSAS. These findings highlight the importance of adaptive and spatial-data-based coastal management.

Keywords: Shoreline; Erosion; Accretion; DSAS; Random Forest

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan zona transisi yang sangat dinamis karena menjadi area pertemuan antara proses daratan dan lautan. Dinamika tersebut dipengaruhi oleh interaksi gelombang, arus laut, pasang surut, angin, sedimentasi, serta proses erosi yang berlangsung secara terus-menerus (Bird, 2008;

Boak, E. H., & Turner, 2005). Perubahan garis pantai merupakan salah satu indikator utama dari dinamika pesisir yang dapat terjadi dalam bentuk abrasi maupun akresi. Abrasi terjadi ketika material pantai mengalami pengikisan akibat energi gelombang dan arus yang tinggi, sedangkan akresi terjadi ketika proses pengendapan sedimen lebih dominan dibandingkan proses erosi. Kedua proses tersebut

secara langsung memengaruhi bentuk geomorfologi pantai, stabilitas ekosistem pesisir, serta keberlanjutan aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat yang bergantung pada wilayah pantai (Bird, 2008; Hapke, C. J., Himmelstoss, E. A., Kratzmann, M. G., List, J. H., & Thieler, 2013).

Selain faktor alami, perubahan garis pantai juga dipercepat oleh aktivitas antropogenik seperti pembangunan infrastruktur pesisir, reklamasi, konversi lahan, eksploitasi sumber daya pesisir, serta perubahan tata guna lahan di wilayah hulu. Aktivitas tersebut dapat mengubah keseimbangan suplai sedimen dan meningkatkan kerentanan terhadap abrasi maupun banjir rob. Menurut Hapke et al. (2013), perubahan penggunaan lahan dan pembangunan yang tidak terencana di wilayah pesisir menjadi salah satu penyebab utama percepatan perubahan morfologi pantai di berbagai wilayah dunia. Oleh karena itu, pemantauan perubahan garis pantai secara periodik menjadi sangat penting sebagai dasar dalam perencanaan pengelolaan wilayah pesisir yang berkelanjutan.

Kabupaten Lumajang yang terletak di Provinsi Jawa Timur memiliki garis pantai sepanjang kurang lebih ± 25 km yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia. Kondisi ini menyebabkan wilayah pesisir Lumajang menerima energi gelombang tinggi sepanjang tahun, sehingga memiliki tingkat kerentanan yang cukup besar terhadap abrasi pantai. Karakteristik pesisir selatan Jawa yang berhadapan langsung dengan laut lepas menjadikan dinamika garis pantai lebih kompleks dibandingkan wilayah pesisir utara Jawa yang relatif terlindungi. Kawasan pesisir Watu Gedek hingga Muara Gede di Kecamatan Tempursari merupakan salah satu wilayah yang menunjukkan indikasi perubahan garis pantai yang signifikan akibat kombinasi faktor oseanografi, sedimentasi muara sungai, dan aktivitas manusia di sekitar kawasan pesisir.

Meskipun demikian, kajian mengenai dinamika perubahan garis pantai di wilayah pesisir selatan Jawa, khususnya Kabupaten Lumajang, masih relatif terbatas dibandingkan penelitian di wilayah pesisir utara Jawa seperti Semarang, Pekalongan, maupun Surabaya. Keterbatasan data jangka panjang dan minimnya pemantauan spasial menyebabkan pemahaman terhadap pola perubahan garis pantai di wilayah ini belum optimal. Padahal, informasi mengenai tren abrasi, akresi, dan lokasi hotspot perubahan sangat diperlukan untuk mendukung kebijakan mitigasi bencana pesisir dan pengelolaan ruang wilayah pantai secara adaptif.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) memberikan solusi yang efektif dalam menganalisis perubahan

garis pantai secara multi-temporal. Citra satelit Landsat menjadi salah satu sumber data yang paling banyak digunakan karena memiliki cakupan temporal panjang, resolusi spasial yang memadai, serta ketersediaan data historis sejak tahun 1970-an (Gens, 2010). Melalui pendekatan indeks air seperti *Normalized Difference Water Index* (NDWI) dan *Modified NDWI* (MNDWI), batas darat-laut dapat diidentifikasi secara lebih akurat sehingga memudahkan proses ekstraksi garis pantai (Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, 2012; Xu, Z., 2023).

Untuk menghitung laju perubahan garis pantai secara kuantitatif, metode Digital Shoreline Analysis System (DSAS) banyak digunakan karena mampu menghasilkan parameter statistik seperti *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), dan *Linear Regression Rate* (LRR) (Hapke, C. J., Himmelstoss, E. A., Kratzmann, M. G., List, J. H., & Thieler, 2013; Himmelstoss, E. A., 2018). Metode ini memungkinkan identifikasi lokasi-lokasi yang mengalami abrasi dan akresi secara signifikan dalam periode waktu tertentu. Selain itu, integrasi pendekatan machine learning seperti Random Forest dapat meningkatkan akurasi klasifikasi spasial dan mendukung pengembangan model prediksi abrasi di masa mendatang. *Random Forest* dikenal efektif dalam menangani data spasial multi-variabel dan memiliki performa tinggi dalam analisis lingkungan pesisir (Belgiu, M., & Drăguț, 2016; Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, 2018).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis dinamika perubahan garis pantai di pesisir Kabupaten Lumajang, khususnya kawasan Watu Gedek hingga Muara Gede, Kecamatan Tempursari, selama periode 1990–2025. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan garis pantai secara multi-temporal, menghitung laju abrasi dan akresi, mengidentifikasi hotspot perubahan, serta mengembangkan model prediksi abrasi berbasis *Artificial Intelligence* (AI). Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung pengelolaan wilayah pesisir yang adaptif, berkelanjutan, dan berbasis data spasial.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi: (1) bagaimana pola perubahan garis pantai di Lumajang periode 1990–2025; (2) berapa laju abrasi dan akresi serta lokasi hotspot perubahan; (3) faktor-faktor apa yang memengaruhi perubahan garis pantai; dan (4) bagaimana implikasi perubahan tersebut terhadap pengelolaan wilayah pesisir. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berorientasi pada analisis historis perubahan garis pantai, tetapi juga pada

penyusunan strategi pengelolaan pesisir yang lebih adaptif terhadap dinamika lingkungan pantai di masa mendatang.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Dinamika Garis Pantai

Garis pantai merupakan batas dinamis antara daratan dan laut yang terus berubah akibat interaksi proses oseanografi, geomorfologi, dan aktivitas manusia (Bird, 2008; Boak & Turner, 2005). Perubahan ini dikontrol oleh keseimbangan antara energi gelombang, transport sedimen, dan kondisi morfologi pantai. Ketidakseimbangan sistem tersebut menyebabkan perubahan berupa abrasi (kemunduran garis pantai) dan akresi (penambahan daratan) (Hapke et al., 2013).

Faktor alami utama meliputi gelombang, arus sejajar pantai (longshore current), pasang surut, serta ketersediaan sedimen. Di sisi lain, faktor antropogenik seperti pembangunan struktur pantai, reklamasi, penambangan pasir, serta perubahan tata guna lahan dapat mengganggu keseimbangan sistem pesisir dan mempercepat abrasi (Hapke et al., 2013).

Secara temporal, perubahan garis pantai dapat terjadi dalam skala jangka pendek (harian–musiman), menengah (tahunan–dekadal), hingga jangka panjang (multi-dekade), sehingga diperlukan pendekatan analisis berbasis data multi-temporal untuk memahami tren perubahan secara komprehensif (Gens, 2010; Pardo-Pascual et al., 2012).

2. Penginderaan Jauh untuk Analisis Garis Pantai

Pendekatan Penginderaan Jauh menjadi metode utama dalam analisis dinamika garis pantai karena mampu menyediakan data spasial multi-temporal secara luas dan konsisten (Gens, 2010; Pardo-Pascual et al., 2012). Citra Landsat banyak digunakan karena memiliki resolusi spasial 30 m, resolusi temporal 16 hari, serta ketersediaan data historis yang panjang (Gens, 2010). Ekstraksi garis pantai dilakukan dengan membedakan daratan dan perairan berdasarkan karakteristik spektral menggunakan indeks seperti NDWI dan MNDWI (Xu, 2006). Proses ini melibatkan tahapan koreksi citra, masking awan, komposit data, hingga klasifikasi darat–laut dan ekstraksi vektor garis pantai (Pardo-Pascual et al., 2012; Gens, 2010).

3. Analisis Kuantitatif dengan DSAS

Digital Shoreline Analysis System (DSAS) merupakan tool berbasis GIS yang digunakan untuk menghitung perubahan garis pantai secara kuantitatif

melalui pendekatan transek (Thieler et al., 2009; Himmelstoss et al., 2018). Metode ini bekerja dengan membandingkan posisi garis pantai pada berbagai waktu untuk menghasilkan parameter seperti:

- *Net Shoreline Movement (NSM)*
- *End Point Rate (EPR)*
- *Linear Regression Rate (LRR)*
- *Shoreline Change Envelope (SCE)*

DSAS memungkinkan analisis perubahan secara spasial dan temporal dengan tingkat akurasi yang tinggi, serta telah menjadi standar internasional dalam studi dinamika garis pantai.

4. Integrasi Metode dan Perkembangan Teknologi

Integrasi antara citra Landsat dan DSAS merupakan pendekatan umum dalam analisis perubahan garis pantai, yang memungkinkan identifikasi tren abrasi dan akresi secara kuantitatif (Thieler et al., 2009; Himmelstoss et al., 2018; Gens, 2010). Selain itu, perkembangan kecerdasan buatan seperti Random Forest meningkatkan akurasi ekstraksi garis pantai serta memungkinkan analisis pola non-linear dan prediksi perubahan di masa depan (Belgiu & Drăguț, 2016; Maxwell et al., 2018).

Pendekatan integratif ini memberikan keunggulan dalam menghasilkan informasi yang lebih akurat, sistematis, dan berbasis data, sehingga sangat relevan untuk mendukung mitigasi bencana pesisir dan perencanaan wilayah (Hapke et al., 2013; Gens, 2010).

5. State of the Art dan Research Gap

Studi global menunjukkan bahwa pemanfaatan citra Landsat dan metode DSAS efektif dalam menganalisis perubahan garis pantai secara kuantitatif dalam jangka panjang (Thieler et al., 2009; Himmelstoss et al., 2018; Gens, 2010; Pardo-Pascual et al., 2012). Di Indonesia, penelitian umumnya terfokus pada pesisir utara Jawa, sementara pesisir selatan—termasuk Lumajang—masih relatif minim kajian berbasis data spasial (Santoso, A., & Hidayat, 2020; Supriyadi, I. H., & Setiawan, 2019; Wicaksono, P., & Lazuardi, 2018). Selain itu, sebagian besar penelitian berfokus pada analisis jangka panjang (≥ 10 tahun), sedangkan kajian perubahan cepat dalam periode pendek (± 5 tahun) masih terbatas (Gens, 2010; Hapke et al., 2013). Padahal, perubahan garis pantai dapat terjadi secara signifikan dalam waktu singkat akibat kondisi

METODOLOGI

1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di pesisir selatan Desa Bulurejo, Kecamatan Tempursari, Kabupaten Lumajang, Provinsi Jawa Timur. Area pengamatan mencakup segmen pantai sepanjang $\pm 1,5$ km yang membentang antara Pantai Watu Gedek hingga Muara Gede. Wilayah ini merupakan bagian dari sistem pantai terbuka (*open coast*) yang terpapar langsung oleh dinamika perairan Samudra Hindia, dicirikan oleh energi gelombang yang relatif tinggi, dinamika sedimentasi yang aktif, serta keberadaan muara sungai yang turut mempengaruhi distribusi sedimen dan perubahan garis pantai secara lokal.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (sumber: Google Earth, 2026)

2. Data dan Sumber Data

Data utama berupa citra satelit Landsat (Landsat 8 dan 9) periode 2020 – 2025, yang dipilih berdasarkan kualitas citra dan tutupan awan rendah. Data ini digunakan untuk analisis perubahan garis pantai secara multi-temporal.

3. Tahapan Penelitian

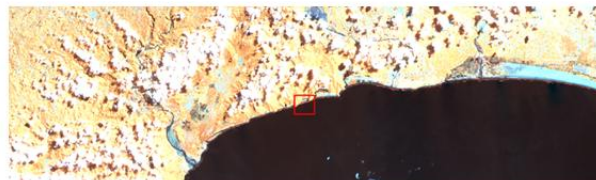
Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Pra-Proses Citra, meliputi masking awan, komposit median tahunan, dan pengolahan berbasis cloud menggunakan Google Earth Engine (GEE) untuk menghasilkan citra yang bebas dari tutupan awan sehingga permukaan bumi dapat terekam dan teridentifikasi secara jelas dan konsisten.
2. Ekstraksi Garis Pantai, dilakukan menggunakan indeks spektral NDWI/MNDWI untuk memisahkan darat dan laut, dilanjutkan dengan klasifikasi dan konversi menjadi data vektor garis pantai tiap tahun.
3. Analisis Perubahan Garis Pantai, Analisis dilakukan menggunakan Digital Shoreline Analysis System (DSAS) melalui pendekatan baseline dan transek (interval $\pm 10-25$ m). Parameter yang dihitung meliputi:
 - NSM (*Net Shoreline Movement*)
 - EPR (*End Point Rate*)

- LRR (*Linear Regression Rate*)
- SCE (*Shoreline Change Envelope*)



Gambar Citra Lokasi Studi tahun 2020



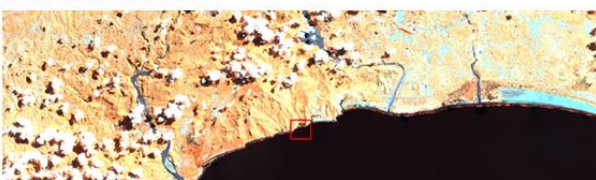
Gambar Citra Lokasi Studi tahun 2021



Gambar Citra Lokasi Studi Tahun 2022



Gambar Citra Lokasi Studi tahun 2023



Gambar Citra Lokasi Studi tahun 2024



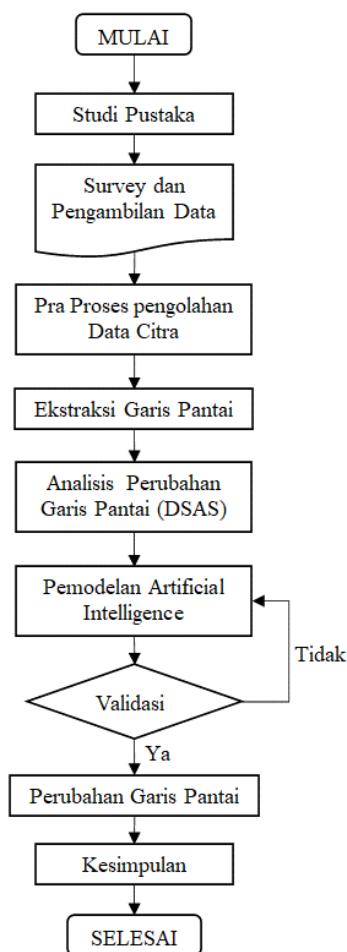
Gambar Citra Lokasi Studi tahun 2025

Gambar 2. Citra Landsat Lokasi Studi Tahun 2020 - 2025 (Sumber : Landsat, pengolahan data, 2026)

4. Pemodelan *Artificial Intelligence*, Pendekatan machine learning menggunakan Random Forest digunakan untuk meningkatkan akurasi klasifikasi dan memprediksi perubahan garis pantai.
5. Validasi, dilakukan menggunakan citra resolusi tinggi dan/atau data lapangan, dengan metode evaluasi seperti RMSE untuk menilai akurasi posisi garis pantai.
6. Penyajian Hasil, hasil analisis disajikan dalam bentuk spasial dan kuantitatif yang meliputi:

- Peta perubahan garis pantai : Menyajikan visualisasi spasial posisi garis pantai dari waktu ke waktu.
- Peta abrasi dan akresi : Menggambarkan sebaran wilayah yang mengalami kemunduran garis pantai (abrasi) maupun penambahan daratan (akresi)
- Identifikasi hotspot perubahan : Menentukan segmen-segmen pantai yang mengalami perubahan paling signifikan
- Analisis statistik laju perubahan : Menyajikan besaran laju perubahan garis pantai

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 3 di bawah ini :



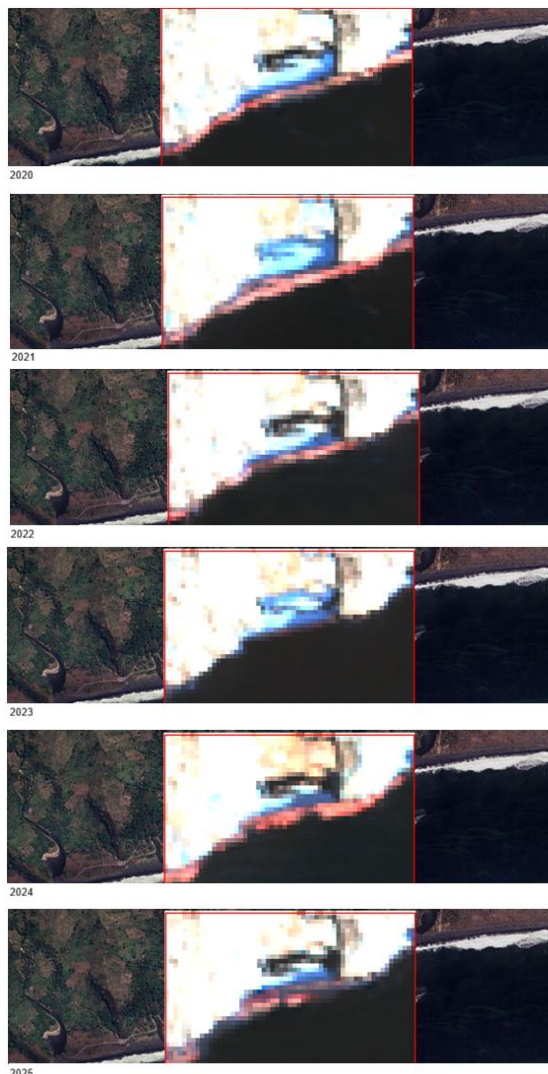
Gambar 3. Diagram alir penelitian analisa dinamika perubahan garis pantai

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan Garis Pantai

Analisis awal dilakukan secara visual terhadap citra satelit Landsat periode tahun 2020 hingga 2025 pada wilayah studi pesisir Kabupaten Lumajang

daerah Watu Gedek dan Muara Gede, Kabupaten Lumajang. Berdasarkan rangkaian citra multi-temporal yang telah ditampilkan, terlihat bahwa wilayah studi mengalami dinamika garis pantai yang cukup signifikan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir, khususnya pada area sekitar muara sungai (ditandai kotak merah).



Gambar 4. Garis Pantai Lokasi Studi tahun 2020 - 2025 (Sumber : Landsat, pengolahan data, 2026)

Analisis Detail Area Studi (Crop AOI Landsat 2020–2025)

Berdasarkan hasil cropping citra Landsat pada area studi (Watu Gedek dan Muara Gede), dilakukan analisis lebih detail terhadap dinamika garis pantai dalam skala lokal. Area cropping difokuskan pada segmen sepanjang $\pm 1,5$ km yang mencakup zona pantai aktif dan area muara sungai.

1. Identifikasi batas darat–laut. Dari citra cropping terlihat kontras spektral yang cukup jelas antara area laut dengan berwarna gelap (biru tua–hitam), zona pantai (surf zone),

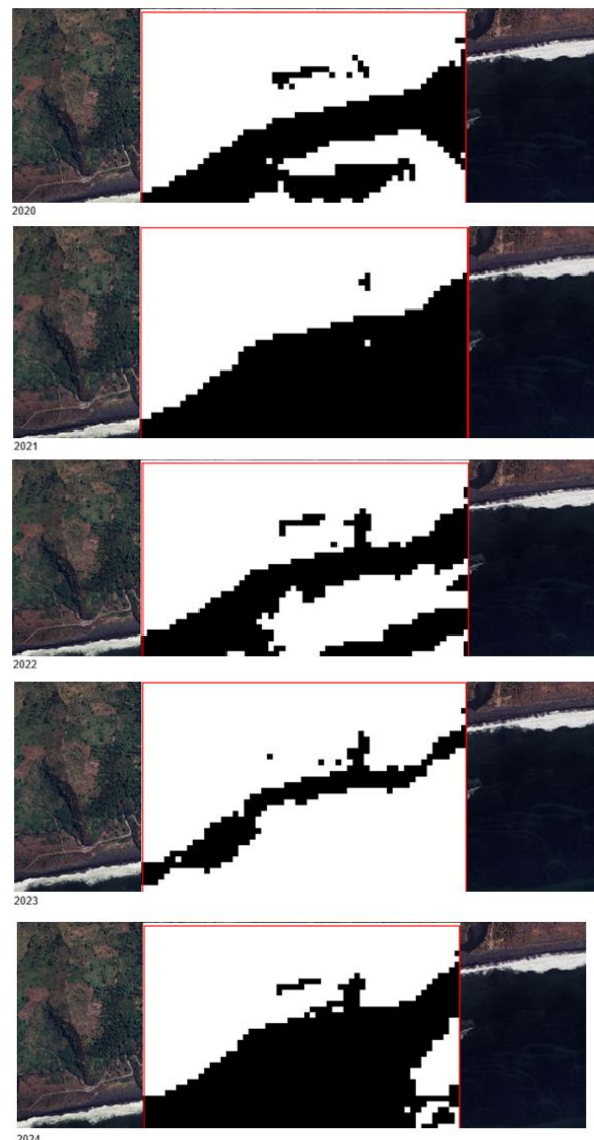
- warna terang (putih/abu), daratan, warna cerah hingga kehijauan
2. Dinamika garis pantai (indikasi visual). Dari perbandingan antar tahun (2020–2025), terlihat bahwa :
 - a. Garis pantai batas antara laut dan daratan mengalami pergeseran yang cukup jelas tetapi pergeseran ini tidak seragam di seluruh segmen. Hal ini menjadi indikasi terjadinya abrasi dan akresi secara bersamaan (*spatial variability*).
 - b. Perubahan intensitas *zona surf*. Zona gelombang (warna putih) terlihat kadang lebih lebar dan kadang lebih sempit. Hal ini mengindikasikan terdapat variasi energi gelombang serta kemungkinan perubahan kemiringan pantai (*beach slope*).
 3. Aktivitas sedimentasi di sekitar muara. Pada area tengah (dekat muara sungai) yang menunjukkan ciri khas warna kebiruan terang / keruh, pola menyebar ke arah laut dan bentuk yang tidak stabil antar tahun. Hal ini menunjukkan terjadi plume sedimen dari aliran sungai, terdapat proses deposisi (akresi) dan sekaligus redistribusi oleh gelombang.
 4. Indikasi abrasi. Pada beberapa segmen garis pantai tampak “mundur” ke arah darat, zona gelombang lebih masuk ke daratan yang menunjukkan terjadinya proses abrasi dominan pada segmen tertentu.
 5. Indikasi akresi. Sebaliknya, pada beberapa bagian yang terlihat penambahan area daratan dengan zona terang (pantai) melebar, hal ini mengindikasikan proses akresi akibat suplai sedimen
 6. Pola perubahan spasial. Perubahan garis pantai menunjukkan karakter:
 - Tidak homogen
 - Satu segmen mengalami abrasi
 - Segmen lain mengalami akresiHal ini merupakan tipikal pantai dengan kontrol muara sungai (*river-influenced coast*).
 7. Pengaruh resolusi citra. Dari hasil cropping terlihat piksel yang cukup besar (*blocky*), yang merupakan karakteristik resolusi Landsat (30 m). Untuk itu diperlukan kehati-hatian pada saat melakukan digitasi dan *smoothing* garis pantai.
 8. Indikasi perubahan cepat (*rapid change*). Perubahan visual antar tahun menunjukkan variasi bentuk garis pantai yang signifikan dengan perubahan yang terjadi dalam waktu relatif singkat (≤ 5 tahun). Hal ini menguatkan bahwa wilayah ini termasuk zona dinamika tinggi (*high dynamic shoreline*)

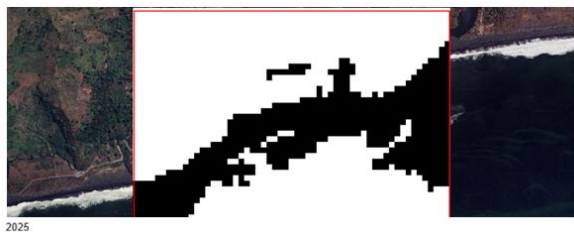
Ekstraksi Garis Pantai dan Evaluasi Metode (NDWI vs MNDWI)

Ekstraksi garis pantai pada penelitian ini dilakukan menggunakan dua pendekatan indeks spektral, yaitu NDWI (*Normalized Difference Water Index*) dan MNDWI (*Modified NDWI*). Kedua metode diuji untuk menentukan pendekatan terbaik dalam memisahkan area darat dan perairan pada wilayah studi.

Ekstraksi NDWI

Ekstraksi garis pantai dengan indeks spektral NDWI dapat dilihat pada gambar 5 di bawah ini :

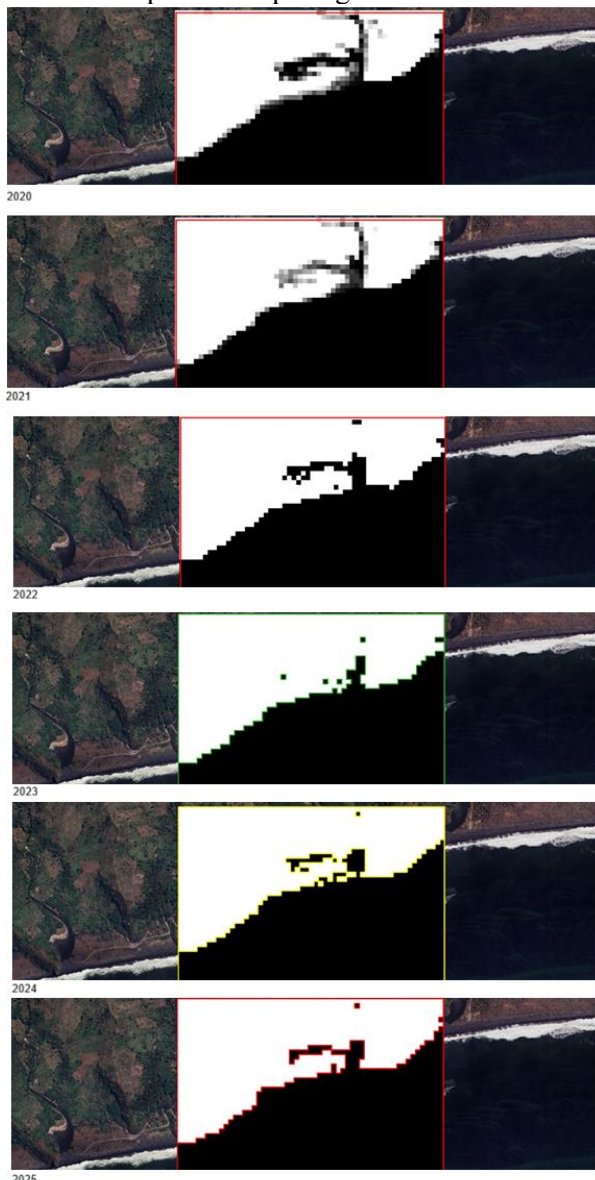




Gambar 5. Ekstrak NDWI tahun 2021-2025
(Sumber : Pengolahan Data, 2026)

Ekstraksi MNDWI

Ekstraksi garis pantai dengan indeks spektral MNDWI dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 7. Ekstrak MNDWI tahun 2020-2025
(Sumber : Pengolahan Data, 2026)

Analisa Hasil Ekstraksi NDWI vs MNDWI

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa metode NDWI tidak memberikan hasil yang optimal, sedangkan metode MNDWI menghasilkan

klasifikasi yang lebih akurat dan representatif terhadap kondisi garis pantai aktual.

Metode MNDWI menunjukkan hasil yang jauh lebih baik, dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Pemisahan Darat–Laut Lebih Jelas
 - Air laut dan daratan dapat dibedakan dengan kontras tinggi
 - Zona pantai lebih terdefinisi
1. Reduksi noise yang signifikan karena Menggunakan band SWIR yang lebih sensitif terhadap kelembaban, sehingga mengurangi kesalahan klasifikasi pada:
 - Pasir basah
 - Vegetasi
 - Sedimen
2. Representasi Garis Pantai Lebih Akurat dengan garis pantai lebih halus dan kontinu, minim fragmentasi dan lebih sesuai dengan kondisi visual citra.
3. Konsistensi Antar Tahun, yakni hasil ekstraksi stabil pada seluruh periode (2020–2025) dimana hal ini sangat penting untuk analisis multi-temporal.

Vektorisasi Garis Pantai

Berdasarkan hasil proses polygonize dari citra MNDWI tahun 2020–2025, diperoleh layer vektor yang merepresentasikan batas antara daratan dan perairan. Hasil vektorisasi menunjukkan bahwa garis pantai berhasil diekstraksi pada seluruh periode pengamatan. Untuk meningkatkan kualitas data sebelum analisis DSAS, dilakukan beberapa tahapan koreksi:

1. Seleksi Polygon
2. Ekstraksi Boundary
3. Editing Manual
4. Smoothing Garis Pantai

Analisis Garis Pantai

Hasil dari perbaikan dan smoothing pada polygonize masing-masing foto citra dapat dilihat pada gambar 8-13 berikut :



Gambar 8. Garis Pantai tahun 2020 (Sumber : Analisa, 2026)



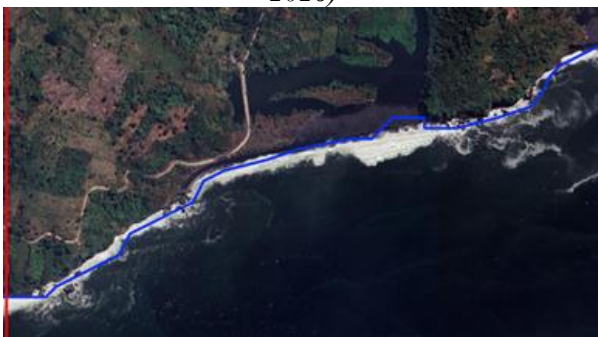
Gambar 9. *Garis Pantai tahun 2021 (Sumber : Analisa, 2026)*



Gambar 13. *Garis Pantai tahun 2025 (Sumber : Analisa, 2026)*



Gambar 10. *Pantai tahun 2022 (Sumber : Analisa, 2026)*



Gambar 11. *Garis Pantai tahun 2023 (Sumber : Analisa, 2026)*



Gambar 12. *Garis Pantai tahun 2024 (Sumber : Analisa, 2026)*

Analisis Perubahan Garis Pantai Menggunakan DSAS

Pembuatan Baseline dan Transect

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan QGIS dan DSAS, dibuat baseline yang sejajar dengan garis pantai dan berada di sisi laut. Baseline ini berfungsi sebagai acuan dalam analisis perubahan garis pantai. Selanjutnya, dibuat transect yang tegak lurus terhadap baseline dengan interval tertentu (seragam sepanjang pantai). Transect tersebut digunakan untuk mengukur perubahan posisi garis pantai dari tahun 2020 hingga 2025.



Gambar 14. *Baseline dan Transect Garis Pantai 2020-2025 (Sumber: Analisa, 2026)*

Pada Gambar 14, terlihat bahwa:

1. Garis kuning sebagai baseline
2. Garis merah sebagai transect
3. Garis berwarna (biru tua, biru muda, hijau, ungu) sebagai garis pantai tiap tahun

Analisis Perubahan Garis Pantai

Hasil overlay garis pantai tahun 2020–2025 menunjukkan adanya dinamika perubahan garis pantai di sepanjang wilayah studi.

- a. Pola umum perubahan. Secara umum, perubahan garis pantai terbagi menjadi dua pola utama:

1. Abrasi (kemunduran garis pantai), garis pantai bergerak ke arah darat
 2. Akresi (penambahan daratan), garis pantai bergerak ke arah laut
- b. Variasi spasial. Perubahan tidak terjadi secara merata di seluruh wilayah:
1. Bagian Barat
 - Garis pantai relatif stabil
 - Jarak antar garis tahun tidak terlalu signifikan
 - Menunjukkan energi gelombang yang lebih rendah atau perlindungan alami
 2. Bagian Tengah
 - Terjadi perubahan fluktuatif
 - Beberapa transect menunjukkan maju dan mundur bergantian
 - Mengindikasikan pengaruh musiman (gelombang & arus)
 3. Bagian Timur (dekat muara sungai)
 - Terlihat perubahan paling signifikan
 - Cenderung mengalami akresi yang diduga dipengaruhi oleh suplai sedimen dari sungai dan proses sedimentasi di muara

Validasi Visual dan Keterbatasan

Meskipun analisis DSAS memberikan hasil kuantitatif, terdapat beberapa keterbatasan:

- Ketelitian dipengaruhi oleh resolusi citra
- Posisi garis pantai dipengaruhi kondisi pasang surut saat perekaman
- Proses smoothing dapat sedikit menggeser posisi garis

Namun demikian, secara keseluruhan metode ini cukup representatif untuk menggambarkan tren perubahan garis pantai.

Klasifikasi Perubahan Garis Pantai Berdasarkan Nilai EPR

Berdasarkan hasil pengolahan menggunakan DSAS, nilai End Point Rate (EPR) diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama untuk mempermudah interpretasi perubahan garis pantai, yaitu abrasi, akresi, dan kondisi stabil.

a. Kriteria Klasifikasi

Klasifikasi dilakukan berdasarkan rentang nilai EPR dapat dilihat pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Perubahan Garis Pantai Berdasar EPR

Kategori	Rentang EPR (m/tahun)	Keterangan
Abrasi	< -0,25	Terjadi kemunduran garis pantai

Konstan	-0,25 s.d. 0,25	Tidak mengalami perubahan signifikan
Akresi	> 0,25	Terjadi penambahan daratan

b. Visualisasi Klasifikasi

Pada hasil simbolisasi pada program QGIS:

- Merah (Abrasi), Menunjukkan wilayah yang mengalami kemunduran garis pantai
- Hijau (Akresi), Menunjukkan wilayah yang mengalami penambahan daratan
- Biru (Konstan), Menunjukkan wilayah yang relatif stabil

Penggunaan warna ini bertujuan untuk mempermudah identifikasi pola perubahan secara spasial di sepanjang garis pantai.

c. Interpretasi Hasil Klasifikasi

Berdasarkan hasil klasifikasi diperoleh dominasi warna tertentu pada transect menunjukkan kecenderungan perubahan di area tersebut.

Jika banyak transect berwarna:

- Merah : wilayah rawan abrasi
- Hijau : wilayah mengalami sedimentasi
- Biru : wilayah stabil

Pada lokasi penelitian :

1. Bagian dekat muara cenderung menunjukkan akresi
2. Beberapa bagian lain menunjukkan stabilitas
3. Terdapat titik-titik tertentu yang mengalami abrasi lokal

d. Kesimpulan Analisis EPR

Berdasarkan nilai EPR:

1. Wilayah penelitian mengalami perubahan garis pantai yang dinamis
2. Abrasi merupakan proses yang dominan di beberapa segmen
3. Akresi terjadi terutama di area dengan suplai sedimen tinggi
4. Sebagian wilayah menunjukkan kondisi stabil

Prediksi Perubahan Garis Pantai Menggunakan machine learning dengan QSCAT (Random Forest)

Berdasarkan hasil pengolahan QSCAT:

1. Garis merah, baseline prediksi / area analisis
2. Garis kuning (transect prediksi), arah proyeksi perubahan
3. Titik/orange, posisi prediksi garis pantai di masa depan

Hasil prediksi menunjukkan bahwa beberapa segmen pantai akan mengalami kemunduran garis pantai secara signifikan dalam 20 tahun ke depan,

yang mengindikasikan dominasi proses abrasi akibat energi gelombang yang tinggi. Interpretasi spasial berdasarkan peta hasil QSCAT:

1. Bagian Barat, Cenderung mengalami abrasi berkelanjutan dan Risiko kehilangan garis pantai cukup tinggi
2. Bagian Tengah, Bersifat dinamis, Terjadi kombinasi abrasi dan akresi
3. Bagian Timur (Muara), Didominasi akresi, Terjadi penumpukan sedimen

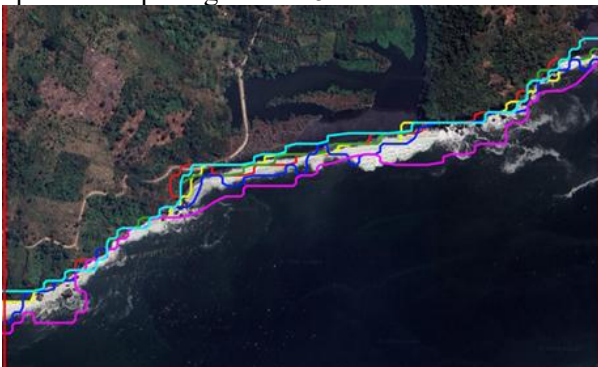
Analisis Pembandingan Garis Pantai Menggunakan *Machine Learning (Random Forest)*

Metode *Machine Learning* yang digunakan dalam penelitian ini yakni pendekatan berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) diterapkan melalui metode *machine learning* menggunakan algoritma *Random Forest* untuk mengekstraksi garis pantai sebagai pembandingan terhadap metode DSAS dan QSCAT. *Random Forest* dipilih karena:

- Mampu menangani data spektral multi-band
- Robust terhadap noise
- Tidak memerlukan asumsi linear

Implementasi dilakukan menggunakan perangkat lunak QGIS dengan bantuan tool klasifikasi raster berbasis machine learning. Data yang digunakan adalah citra Landsat periode 2020–2025 yang sama dengan analisis sebelumnya.

Hasil ekstraksi dengan *Random Forest* menunjukkan bahwa metode *Random Forest* mampu menghasilkan garis pantai yang mengikuti kondisi alami dengan baik. Garis pantai yang dihasilkan relatif halus dan kontinu, serta mampu menangkap detail morfologi pantai seperti lekukan, tanjung kecil, dan area muara sungai. Hasil ekstraksi garis pantai hasil dari machine learning, *Random Forest* dapat dilihat pada gambar 15 berikut :



Gambar 15 Garis Pantai 2020 - 2025 Hasil RF
(Sumber: Analisa Data, 2026)

Analisis Spasial Perubahan Garis Pantai dengan *Machine Learning*

Berdasarkan overlay garis pantai tahun 2020–2025, diperoleh pola perubahan sebagai berikut:

1. Zona Barat menunjukkan kecenderungan mundurnya garis pantai ke arah darat, yang mengindikasikan dominasi proses abrasi.
2. Zona Tengah relatif stabil dengan perubahan garis pantai yang tidak signifikan, menunjukkan keseimbangan antara erosi dan sedimentasi.
3. Zona Timur (dekat muara) menunjukkan pergeseran garis pantai ke arah laut, yang mengindikasikan terjadinya akresi akibat suplai sedimen dari aliran sungai.

Analisis Perbandingan metode DSAS dengan QSCAT

Hasil ekstraksi garis pantai menggunakan *Random Forest* menunjukkan kesesuaian pola dengan hasil analisis DSAS, khususnya dalam mengidentifikasi zona abrasi dan akresi. Selain itu, pola perubahan yang dihasilkan juga sejalan dengan prediksi QSCAT dalam jangka panjang.

Validasi dan Konsistensi

Hasil menunjukkan bahwa:

1. Pola garis pantai *Random Forest* konsisten dengan DSAS
2. Perbedaan masih dalam toleransi resolusi citra Landsat

Metode *Random Forest* menunjukkan hasil yang konsisten dengan metode DSAS, sehingga dapat digunakan sebagai pendekatan alternatif dalam ekstraksi garis pantai.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perubahan garis pantai menggunakan metode DSAS, QSCAT, dan *Artificial Intelligence (Random Forest)*, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dominasi Abrasi. Garis pantai pada lokasi studi didominasi oleh proses abrasi dengan proporsi sekitar $\pm 74\%$ transect, dengan laju maksimum mencapai $-11,49$ m/tahun. Hal ini menunjukkan kondisi pesisir yang berada dalam tekanan hidrodinamika tinggi dan defisit suplai sedimen.
2. Zona Kritis. Segmen tengah transect $\pm 36-80$ m merupakan zona abrasi sangat kuat, yang berpotensi menyebabkan kerusakan infrastruktur pesisir, kehilangan lahan, serta gangguan terhadap ekosistem pantai.

3. Zona Akresi Lokal. Akresi terjadi terbatas pada bagian timur dan sebagian barat, dengan nilai hingga +2,45 m/tahun, yang dipengaruhi oleh suplai sedimen lokal (kemungkinan dari muara sungai).
4. Konsistensi Metode. Ketiga pendekatan (DSAS, QSCAT, RF) menunjukkan hasil yang konsisten secara spasial, sehingga meningkatkan keandalan analisis.
5. Prediksi Masa Depan. Berdasarkan simulasi QSCAT, tanpa intervensi teknis :
 - zona abrasi akan terus mundur signifikan
 - zona akresi berkembang terbatas
 - keseimbangan pantai semakin terganggu

REFERENSI

- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114(24–31).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Bird, E. C. F. (2008). *Coastal geomorphology: An introduction (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688–703.
- Gens, R. (2010). Remote sensing of coastlines: Detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7), 1819–1836.
- Hapke, C. J., Himmelstoss, E. A., Kratzmann, M. G., List, J. H., & Thieler, E. R. (2013). *National assessment of shoreline change: Historical shoreline change along the New England and Mid-Atlantic coasts*. U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Himmelstoss, E. A., et al. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) v5.0*. USGS.
- Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9), 2784–2817.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>
- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123, 1–11.
- Santoso, A., & Hidayat, R. (2020). Analisis perubahan garis pantai menggunakan citra Landsat multi temporal di wilayah pesisir Jawa Timur. *Urnal Teknik ITS*, 9(2), C123–C129.
- Supriyadi, I. H., & Setiawan, K. T. (2019). Analisis perubahan garis pantai menggunakan metode DSAS di pesisir utara Jawa. *Jurnal Kelautan Nasional*, 14(2), 87–98.
- Wicaksono, P., & Lazuardi, W. (2018). Mapping shoreline changes using Landsat imagery and DSAS in coastal area of Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 50(2), 145–155.
- Xu, Z., et al. (2023). Deep learning rainfall estimation. *Remote Sensing*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15092345>

Hubungan Antara *Liquid Limit* dan Sudut Geser *Fully Softened* dan *Residual* pada *High Plasticity Stiff Overconsolidated Clay*

The Relationship Between Liquid Limit and the Fully Softened and Residual Friction Angles in High-Plasticity Stiff Overconsolidated Clays

Muhammad Nafi' Mulyono¹ Kresno Wikan Sadono² Sri Prabadiyani Retno Wardani²

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Teknik Kimia, Surabaya. Email: nafimulyono@its.ac.id

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto S. H., Semarang.

Abstrak

Longsoran pada *high plasticity stiff overconsolidated clay* sering terjadi meskipun analisis berbasis *undrained shear strength* menghasilkan faktor keamanan tinggi. Hal ini disebabkan karena parameter analisis yang digunakan kurang merepresentasikan kondisi lereng akibat deformasi berulang dan pelapukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai *fully softened* dan *residual shear strength*, mengkaji hubungannya dengan *liquid limit* (LL) pada jenis tanah tersebut, dan mengetahui kesesuaian grafik hubungan tersebut dengan yang sudah dikembangkan oleh Stark & Hussain. Nilai *fully softened* dan *residual shear strength* diperoleh melalui uji *direct shear slow reversal*. Sampel yang digunakan merupakan sampel *remoulded* dengan metode *slurry* yang dikonsolidasi secara normal. Sampel diambil dari tiga lokasi longsor di Kota Semarang. Hasil pengujian menunjukkan nilai LL sangat tinggi (94-105%) dengan *clay fraction* >50% untuk ketiga lokasi sampel. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan kekonsistensian dengan batas regresi hubungan LL dengan sudut geser *fully softened* dan *residual* yang sudah dikembangkan oleh Stark & Hussain. Korelasi tersebut menunjukkan kesesuaian yang baik dan dapat diaplikasikan dengan tanah *clayshale* lokal.

Kata Kunci: *direct shear; fully softened shear strength; high plasticity; longsoran; residual shear strength*

Abstract

Landslide in high plasticity stiff overconsolidated clays frequently occur despite high safety factors obtained from analyses based on undrained shear strength. This is because the parameters used in such analyses do not adequately represent slope conditions subjected to repeated deformation and weathering. This study aims to identify the fully softened and residual shear strength parameters, to examine their relationship with the liquid limit (LL) for this soil type, and to find out the suitability of the relationship graph with that developed by Stark & Hussain. Fully softened and residual shear strengths were obtained from direct shear slow reversal test. Remoulded specimens prepared using the slurry method and consolidated under normally consolidated conditions were used. Soil samples were collected from three landslide sites in Semarang. The test results indicate very high LL values (94-105%) with clay fractions exceeding 50% at all sampling locations. Overall, the results show consistency with the regression bounds relating LL to fully softened and residual friction angles developed by Stark & Hussain. The correlation demonstrates good agreement and is applicable to local clayshales.

Keywords: *direct shear; fully softened shear strength; high plasticity; landslide; residual shear strength*

PENDAHULUAN

Longsoran lereng merupakan peristiwa geoteknik yang sering terjadi dan dapat mengakibatkan kerusakan serius pada infrastruktur dan lingkungan. Salah satu jenis tanah yang rentan terhadap longsoran adalah *high plasticity stiff overconsolidated clay*. *Marine shale* umumnya disebut juga sebagai *clayshale* maupun *stiff*

overconsolidated clay (Andriansyah et al., 2025). Hunt (2006) menyebutkan bahwa *Marine shale*, terutama pada periode *tertiary*, *cretaceous*, dan *permian*, biasanya mengandung *montmorillonite*. *Marine shale* adalah *shale* yang paling bermasalah dari sudut pandang *engineering* karena kecenderungannya membentuk lereng yang tidak stabil dalam penggalian (Hunt, 2006). *Clayshale* kadang-kadang dianggap sebagai batu yang sangat

keras ketika berada di dalam tanah namun dapat terurai dengan cepat apabila terkena udara dan air (Andriansyah et al., 2025; Adisurya & Makarim, 2022; Walkinshaw & Santi, 1996). Pelapukan yang terjadi pada *high plasticity stiff overconsolidated clay* atau *clayshale* menyebabkan ikatan antarpartikel melemah sehingga mengalami penurunan kekuatan. Kuat geser tanah tersebut akan berkurang secara signifikan hingga mencapai kondisi *fully softened* apabila mengalami pembasahan dan pengeringan serta dalam kondisi terekspos (Adisurya & Makarim, 2022; Alatas et al., 2015; Stark & Duncan, 1991). Pernyataan tersebut didukung oleh Rogers & Wright (1986) dalam Wright (2005) dengan melakukan pengujian pada *high plasticity* yang mengalami siklus pembasahan dan pengeringan berulang. Hasilnya menunjukkan bahwa siklus pembasahan dan pengeringan menyebabkan hilangnya kekuatan geser signifikan khususnya pada nilai kohesi efektif (c'). Hal ini juga sesuai dengan pernyataan Hunt (2006) yang menyebutkan formasi *Marine shale* secara karakteristik telah ditekan sebelumnya oleh tekanan lapisan penutup yang tinggi (*overburden pressures*). Ketika terjadi *uplift* dan erosi, *stress release* dan regangan yang dihasilkan menyebabkan rekahan intens. Air memasuki rekahan dan mineral tanah lempung *montmorillonite* mengembang memecah massa menjadi banyak fragmen kecil sehingga mengakibatkan rentan terhadap pelapukan dan reduksi tanah (Hunt, 2006).

Beberapa formasi bermasalah yang terkenal adalah Formasi *Cucaracha*, *Culebra* dan *LaBoca* sebagai penyebab longsor selama masa pembangunan hingga masa operasional Terusan Panama (Lutton, 1975). Terusan Panama adalah jalur air buatan di Panama yang menghubungkan Laut Karibia dengan Samudra Pasifik. Formasi-formasi tersebut mengandung mineral lempung *montmorillonite* dan *kaolinitic* dengan proporsi sekitar 55% dan 22% serta mengandung tanah lempung *smectite* yang mengalami *strength loss* yang signifikan saat digeser (Rogers, 2014). Berdasarkan Rogers (2014), hilangnya kekuatan geser ini bersamaan dengan meningkatnya gerakan. Ahli geoteknik menyebut hilangnya kekuatan ini sebagai *residual strength loss*.

Kekuatan geser tanah adalah kekuatan tanah untuk menahan beban atau gaya yang dapat menyebabkan kelongsoran, keruntuhan, gelincir, dan pergeseran tanah. Kuat geser tanah terdiri dari dua parameter yaitu kohesi tanah (c) dan sudut geser tanah (ϕ). Kedua parameter tersebut dapat dicari dengan melakukan pengujian geser langsung, triaksial, dan pengujian lainnya (Das & Sobhan, 2016). Skempton (1964) menyatakan bahwa pada

kasus longsor *high plasticity stiff overconsolidated clay*, penggunaan kohesi tanah (c) dan sudut geser tanah (ϕ) pada *peak strength* dinilai terlampaui optimis. Penyelidikan tanah pada jenis tanah tersebut baik dengan sondir maupun *standard penetration test* (SPT) menghasilkan angka keamanan yang tinggi karena termasuk lempung kaku/keras utamanya jika q_c dan NSPT dikorelasikan dengan *undrained strength* untuk perhitungan stabilitas lereng. Kenyataannya jenis tanah tersebut seringkali ditemukan kasus longsor. Salah satu upaya yang dapat dilakukan dalam mencegah kelongsoran pada tanah *high plasticity stiff overconsolidated clay* adalah dengan mengidentifikasi nilai kekuatan geser *fully softened* dan *residual*.

Residual shear strength merupakan kekuatan geser tanah setelah mencapai puncaknya. *Slow drained test* berhenti setelah kekuatan puncak diperoleh dan disebut dengan “kekuatan geser tanah” tanpa kualifikasi lebih lanjut, namun apabila pengujian tersebut dilanjutkan, maka akan tercapai kekuatan yang stabil yang disebut dengan *residual shear strength* (Skempton, 1964). Kekuatan geser di banyak lereng lebih rendah dari kekuatan puncak, namun lebih tinggi dari kekuatan *residual*. Kekuatan yang terletak di antara kekuatan geser puncak dan *residual* inilah yang disebut dengan *fully softened shear strength* (Wright, 2005; Wright et al., 2007). Menurut Mesri & Shahien (2003), *fully softened strength* sering didefinisikan untuk tanah lempung dan *shale* yang kaku dengan kekuatan puncak spesimen yang dikonsolidasikan secara normal.

Skempton (1970) dalam Wright et al. (2007) merekomendasikan *fully softened shear strength* sebagai kekuatan yang dapat diterapkan untuk longsor pertama kali pada penggalan *homogenous stiff fissured clays*. Namun, Mesri & Shahien (2003) menyatakan bahwa sebagian permukaan gelincir mungkin berada pada kondisi *residual strength* bahkan untuk kelongsoran pertama pada penggalan *stiff clays* dan *shales*. Parameter *fully softened* dan *residual shear strength* dapat diperoleh dengan melakukan pengujian *direct shear slow reversal* (Head, 1994).

Stark & Eid (1994) dalam penelitiannya mencetuskan korelasi antara *liquid limit* (LL) terhadap sudut geser *residual* dari 32 tanah lempung alami. Penelitian selanjutnya, Stark & Eid (1997) membuat grafik hubungan antara LL terhadap sudut geser *fully softened*. Kedua korelasi tersebut dikembangkan oleh Stark et al. (2005) dengan menambahkan beberapa jenis tanah kemudian disempurnakan oleh Stark & Hussain (2013) dengan menambah jumlah titik data, memperluas korelasi kekuatan *residual* hingga mencakup tegangan normal efektif 50 kPa dan menyajikan persamaan

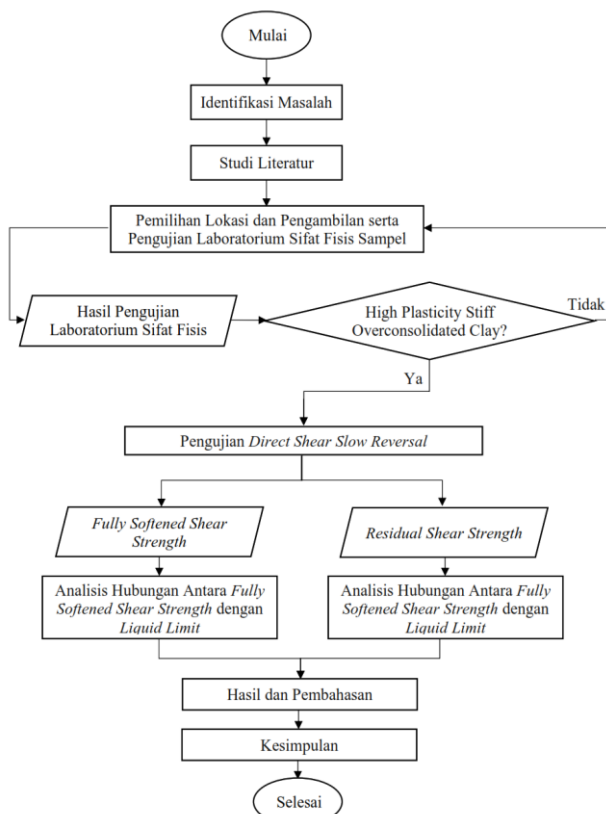
empiris untuk menyatakan korelasi empiris berdasarkan nilai LL dan fraksi ukuran tanah lempung.

Kebutuhan praktis memunculkan pendekatan korelasi empiris tersebut. Namun, korelasi tersebut dibangun dari basis data tanah di luar Indonesia, sehingga verifikasi pada tanah *clayshale* lokal dengan LL menjadi sangat penting untuk mengetahui apakah korelasi tersebut relevan dengan kondisi tanah lokal. Beberapa formasi *clayshale* di Indonesia, termasuk di Kota Semarang, telah dilaporkan mengalami degradasi kuat geser akibat pelapukan dan siklus lingkungan. Kondisi ini memperkuat urgensi untuk memperoleh parameter yang lebih representatif untuk analisis stabilitas lereng jangka panjang pada tanah lokal.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, perlu dilakukan penelitian untuk mencari hubungan antara sudut geser *fully softened* dan *residual* dengan batas cair (*liquid limit*) pada *high plasticity stiff overconsolidated clay* dan mengevaluasi kesesuaian hasil pengujian dengan grafik korelasi yang sudah dikembangkan.

METODE

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



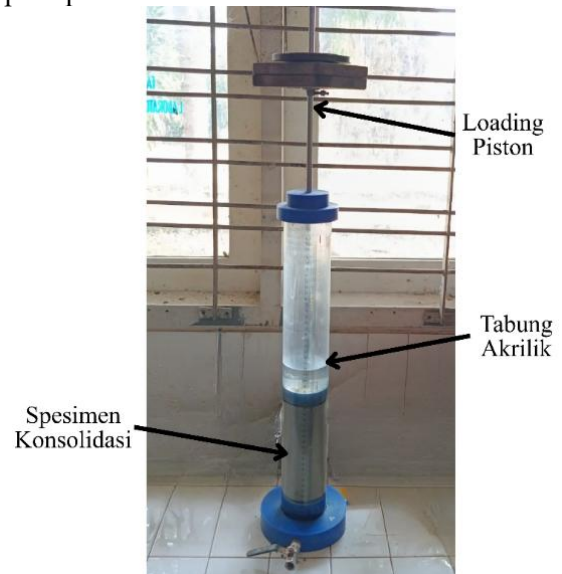
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pemilihan Lokasi dan Pengambilan Sampel

Pemilihan lokasi pada penelitian ini berdasarkan lokasi-lokasi yang mengalami longsor. Sampel tanah diambil dari tiga lokasi yang mengalami longsor di Kota Semarang, yaitu Jalan Gombel Lama, Jalan Tembus Jangli-Undip dan Jalan Kalialang Lama. Sampel dipilih dengan ciri khas *clayshale* dan dilakukan pengujian sifat fisis untuk memastikan klasifikasi plastisitas tinggi dan fraksi lempung signifikan.

Persiapan Sampel Uji

Sampel disiapkan dengan metode yang dikenal sebagai *slurry* dapat diterapkan dalam uji geser langsung untuk mengukur kekuatan geser tanah. Metode ini dipilih karena literatur menunjukkan bahwa sampel yang dipreparasi dengan metode *slurry* dengan sampel yang mengalami proses pembasahan dan pengeringan menghasilkan *mohr failure envelope* yang serupa (Kayyal & Wright 1991). Pelaksanaan konsolidasi dilakukan menggunakan alat *apparatus consolidation* yang terdiri dari beberapa bagian seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rakitan Tabung Konsolidasi dan Spesimen Konsolidasi

Sampel tanah dibiarkan mengendap sendiri sebelum kemudian diberi beban pada piston secara bertahap hingga tekanan konsolidasi efektif akhir yang ditargetkan tercapai. Spesimen membutuhkan waktu sekitar 25 hingga 30 hari untuk terkonsolidasi dalam tabung konsolidasi dan tekanan konsolidasi akhir sebesar 2 psi atau sekitar 6 kg (Wright et al., 2007).

Pengujian *Direct Shear Slow Reversal*

Parameter sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) diperoleh melalui uji *direct shear slow reversal* dengan *sample preparation* metode *slurry*. Pengujian dilakukan pada kondisi jenuh dan *drained* sehingga laju geser ditentukan berdasarkan hasil konsolidasi agar tidak memicu kenaikan tekanan air pori yang signifikan selama penggeseran. Perbandingan kuat geser *peak*, *fully softened*, dan *residual* dapat dilihat pada Gambar 3.

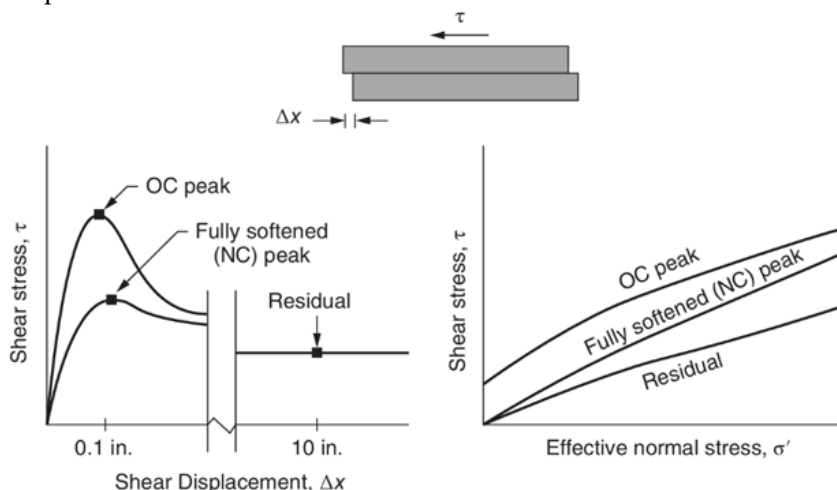
$$t_f = 50t_{50} \dots \dots \dots [2]$$

$$t_f = 11,6t_{90} \dots \dots \dots [3]$$

di mana:

t_{50} = waktu yang diperlukan sampel untuk mencapai konsolidasi 50% (menit)

t_{90} = waktu yang diperlukan sampel untuk mencapai konsolidasi 90% (menit)



Gambar 3. Perbandingan Antara Tegangan Geser Puncak, *Fully Softened* dan *Residual* (Duncan et al., 2014)

Berdasarkan Gambar 3, kekuatan *fully softened* merupakan nilai puncak dari spesimen yang dikonsolidasikan secara normal. Pada pengujian *direct shear* dengan *shear box*, kekuatan *residual* dapat dicapai dengan mengembalikan *shear box* ke posisi awalnya setelah mencapai pergeseran puncak (*reversal*) dan melakukan penggeseran kembali. Proses ini dapat diulangi beberapa kali untuk mendapatkan nilai kuat geser yang stabil atau *residual* (Head, 1994). Proses inilah yang disebut dengan *direct shear slow reversal test*.

Penentuan kecepatan penggeseran ditentukan setelah melalui pengujian konsolidasi dengan pembebanan tertentu. Berdasarkan ASTM D3080/D3080M-11, kecepatan penggeseran (R_d) dapat dihitung dengan dengan Persamaan 1.

$$R_d = \frac{d_f}{t_f} \dots \dots \dots [1]$$

Perkiraan perpindahan lateral relatif pada saat keruntuhan (d_f) menggunakan asumsi 10 mm jika material adalah *normally consolidated-fine grained soils* dan 5 mm untuk jenis tanah lainnya. Perkiraan total waktu sampai keruntuhan (t_f) dihitung menggunakan Persamaan 2 atau Persamaan 3.

Persamaan 2 digunakan pada kondisi konsolidasi maksimum menghasilkan deformasi normal yang terdefinisi dengan baik pada kurva *log-time* yang diperpanjang hingga kompresi sekunder. Persamaan 3 digunakan apabila kurva *log-time* tidak memenuhi persyaratan tetapi terdefinisi dengan baik pada kurva akar waktu.

Analisis Hubungan antara *Fully Softened* dan *Residual Shear Strength* dengan *Liquid Limit (LL)*

Analisis hubungan antara *fully softened* dan *residual shear strength* dengan LL bertujuan untuk mengetahui pengaruh LL terhadap sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) serta pengaruh gaya normal terhadap kekuatan geser. Nilai ϕ'_{fs} dan ϕ'_r yang diperoleh melalui pengujian *direct shear slow reversal* akan disandingkan dengan grafuk hubungan antara ϕ'_{fs} dan ϕ'_r dengan LL yang telah ada. Selain itu, grafik yang hubungan antara kekuatan geser dan tegangan normal akan dilakukan analisis perbandingan dengan grafik yang telah ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Titik koordinat sampel tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Titik Koordinat Sampel Tanah

Lokasi	Latitude	Longitude
Jalan Gombel Lama	7° 2'28.50"S	110°25'11.38"E
Jalan Tembus Jangli-Undip	7° 2'26.89"S	110°26'17.28"E
Jalan Kalialang Lama	7° 1'32.97"S	110°22'46.51"E

Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah

Tabel 2 merupakan hasil pengujian sifat fisis tanah.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah

No	Pengujian	Satuan	Lokasi		
			Gombel Lama	Jangli	Kalialang Lama
1	Kadar Air	%	33,29	34,63	29,09
2	Specific Gravity (Gs)	-	2,677	2,671	2,650
3	Tanah Basah Berat Isi (γ_b)	gr/cm ³	1,683	1,742	1,764
4	Liquid Limit (LL)	%	93,59	102,49	105,36
5	Plastic Limit (PL)	%	34,73	32,45	31,57
6	Platicity Index (PI)	%	58,86	70,04	73,79
7	Clay Fraction	%	54,22	64,33	51,87
8	Free Swell	%	160	355	300

Berdasarkan Tabel 2, nilai LL pada ketiga lokasi sampel sangat tinggi, yaitu antara 93,59% hingga 105,36% sehingga ketiga lokasi tersebut termasuk ke dalam kategori *high plasticity* menurut sistem klasifikasi USCS (Das & Sobhan, 2016). Sampel tanah pada ketiga lokasi juga memiliki nilai *clay fraction* lebih dari 50%.

Hasil Pengujian *Direct Shear Slow Reversal*

Kecepatan penggeseran pengujian *direct shear slow reversal* diperoleh dari fase konsolidasi. Masing-masing lokasi memiliki kecepatan penggeseran yang berbeda sesuai dengan hasil

konsolidasi. Kecepatan penggeseran untuk masing-masing lokasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kecepatan Penggeseran (Vg) Pengujian *Direct Shear Slow Reversal*

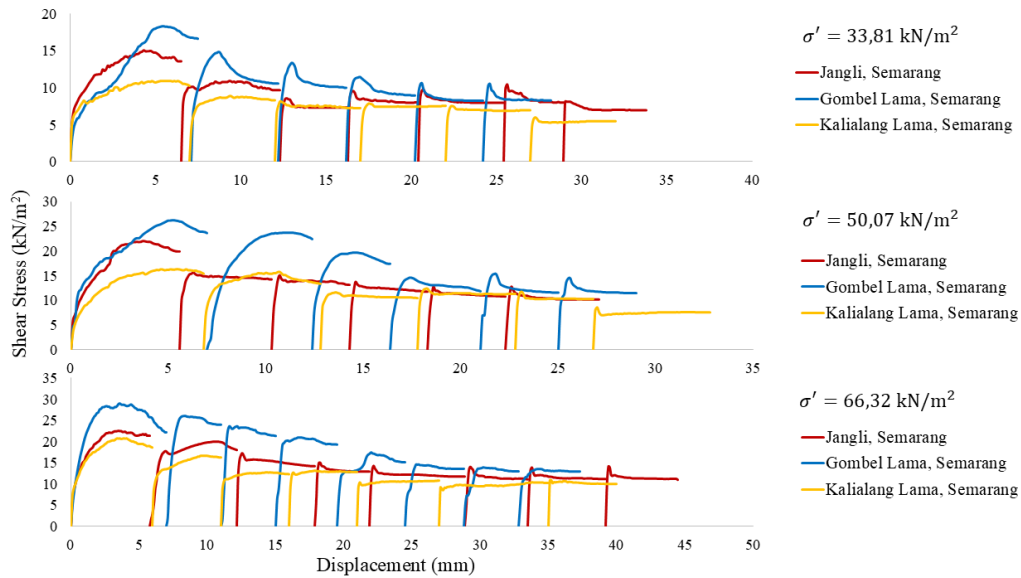
Lokasi	Beban (kg)	Vg (mm/menit)
Jangli	10,4	0,00059
	15,4	0,00089
	20,4	0,00093
Gombel Lama	10,4	0,00326
	15,4	0,00405
	20,4	0,00696
Kalialang	10,4	0,00072
	15,4	0,00094
	20,4	0,00079

Berdasarkan kecepatan penggeseran yang diperoleh, lama peengujian pada siklus pertama setiap penggeseran berkisar antara empat sampai dengan delapan hari untuk satu siklus. Setelah siklus pertama, dilakukan proses reversal. Siklus kedua dan seterusnya menggunakan kecepatan 0,024 mm per menit karena kecepatan penggeseran tidak memberikan pengaruh terhadap nilai *residual shear strength*. Hal ini dilakukan untuk menghemat waktu pengujian sehingga lama pengujian bisa dipercepat menjadi sekitar empat sampai enam jam untuk satu siklus.

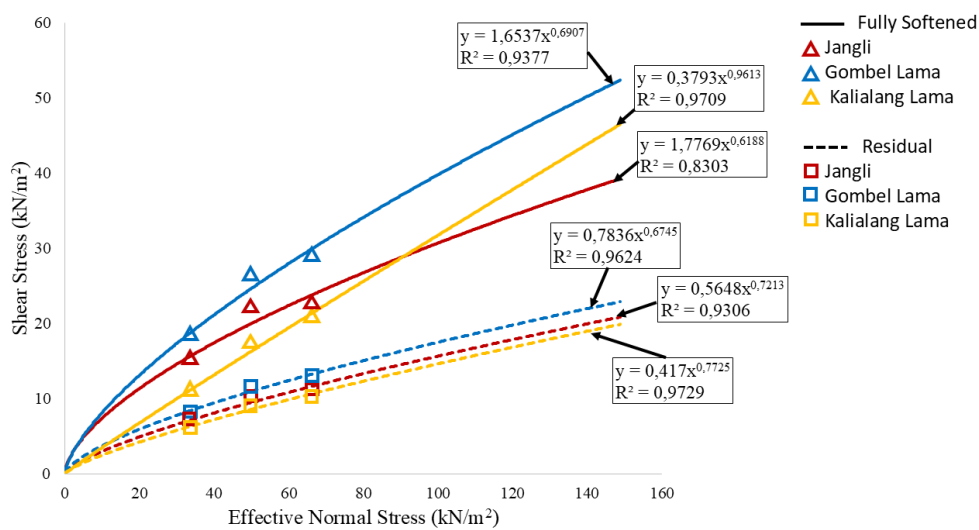
Hasil pengujian *direct shear slow reversal* untuk masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 4. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa setiap meningkatnya tegangan normal, maka nilai kuat geser akan meningkat. Nilai *fully softened shear strength* diperoleh dari nilai puncak kuat geser pada siklus pertama. Nilai *residual shear strength* mulai terlihat setelah siklus ketiga dan mulai stabil pada siklus kelima dan keenam. Nilai yang stabil tersebut yang disebut dengan nilai *residual shear strength*.

Hubungan antara nilai tegangan normal dengan kuat geser *fully softened* dan *residual* pada Gambar 4 disajikan dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Berdasarkan grafik dan persamaan Gambar 5 yang telah diekstrapolasi dan interpolasi untuk berbagai nilai tegangan normal diperoleh nilai tegangan geser dan sudut geser *fully softened* dan *residual* pada tegangan normal 50kN/m² dan 100 kN/m², hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 4. Hasil Pengujian Direct Shear Slow Reversal



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Effective Normal Stress dengan Kuat Geser Fully Softened dan Residual

Tabel 4. Sudut Geser Fully Softened dan Residual pada Tegangan Normal 50 dan 100 kN/m²

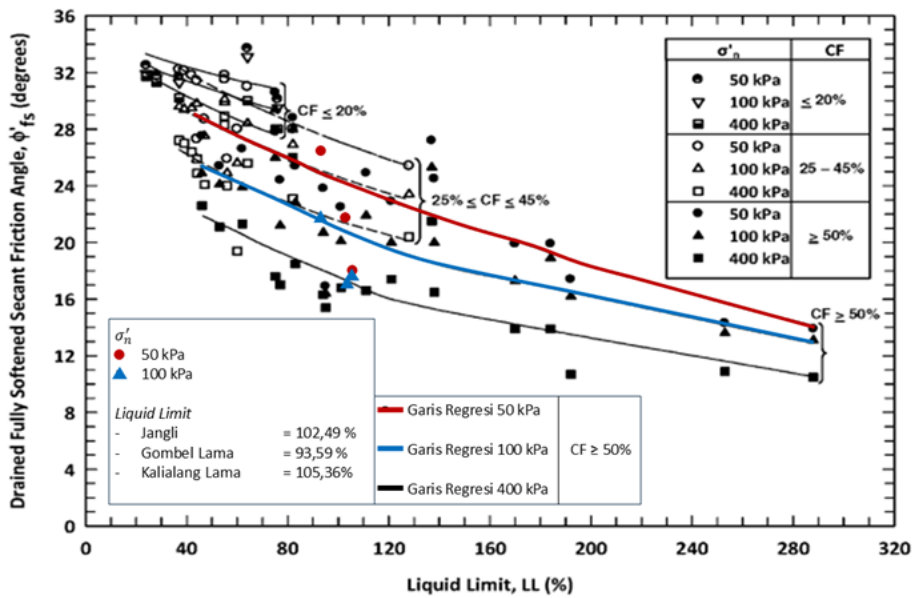
Lokasi	Tegangan Normal (σ') kN/m ²	Fully Softened		Residual	
		Tegangan Geser (τ) kN/m ²	Sudut Geser Fully Softened (ϕ'_s) Deg	Tegangan Geser (τ) kN/m ²	Sudut Geser Residual (ϕ'_r) Deg
Jangli, Semarang	50	19,998	21,799	9,492	10,749
	100	30,709	17,071	15,649	8,894
Gombel Lama, Semarang	50	24,657	26,249	10,966	12,370
	100	39,798	21,701	17,502	9,928
Kialialang Lama, Semarang	50	16,301	18,057	8,562	9,717
	100	31,738	17,609	14,626	8,321

Hasil Analisis Hubungan antara Fully Softened dan Residual Shear Strength dengan Liquid Limit

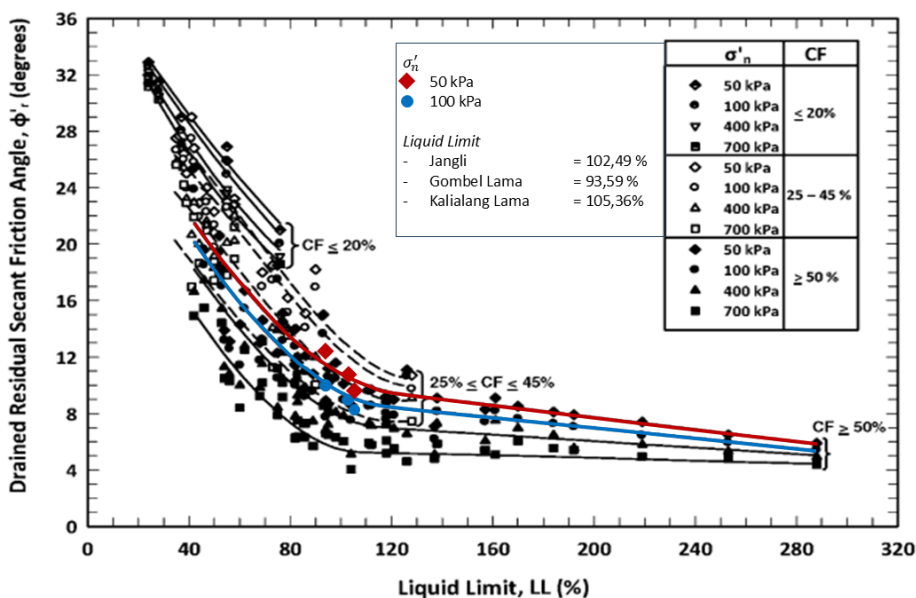
Nilai sudut geser yang diperoleh dari pengujian *direct shear slow reversal* dibandingkan dengan grafik hubungan antara *liquid limit* dengan sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) yang telah ada. Hasilnya disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Gambar 6 menunjukkan plot nilai ϕ'_{fs} yang diperoleh dari pengujian *direct shear slow reversal* pada tegangan normal 50 kPa (ditandai dengan lingkaran merah) dan tegangan normal 100 kPa

(ditandai dengan segitiga biru), berada di atas dan di bawah garis tren yang telah dibuat oleh Stark & Hussain (2013) namun masih berada dalam batas garis regresi. Hal ini ditunjukkan dengan posisi data hasil pengujian masih mengikuti sebaran data dan tren garis regresi yang ada, yaitu merah untuk tegangan normal 50 kPa dan garis biru untuk tegangan normal 100 kPa. Dengan demikian, hasil pengujian ini mendukung model empiris yang telah ada dan menunjukkan bahwa hubungan antara LL dan ϕ'_{fs} tetap konsisten dengan prediksi regresi yang telah dibuat.



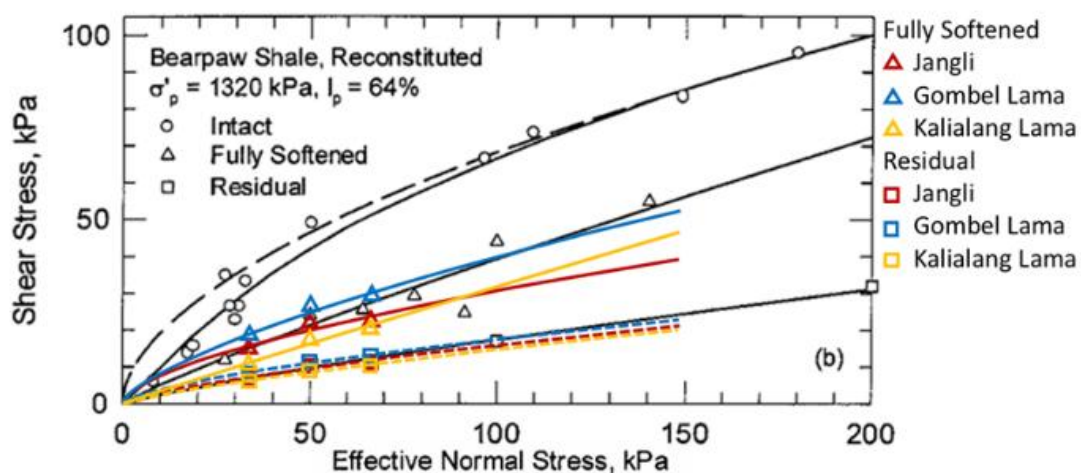
Gambar 6. Plot Hasil Pengujian *Direct Shear Slow Reversal* pada Grafik Hubungan Antara *Drained Fully Softened Secant Friction Angle* dengan LL, CF, Dan σ'_n untuk 73 Tanah Alami (Stark & Hussain, 2013)



Gambar 7. Plot Hasil Pengujian *Direct Shear Slow Reversal* pada Grafik Hubungan Antara *Drained Residual Secant Friction Angle* dengan LL, CF, Dan σ'_n untuk 73 Tanah Alami (Stark & Hussain, 2013)

Gambar 7 menunjukkan nilai ϕ'_r untuk tegangan normal 50 kPa (ditandai dengan belah ketupat merah) dan tegangan normal 100 kPa (ditandai dengan lingkaran biru) pada grafik hubungan antara LL dengan ϕ'_r yang telah ada. Nilai ϕ'_r yang diperoleh masih berada dalam batas garis regresi yang ada. Garis merah merepresentasikan tegangan normal 50 kPa dan garis biru untuk tegangan normal 100 kPa. Hal ini mengindikasikan bahwa hubungan LL dengan ϕ'_r masih mengikuti pola yang telah dikembangkan sehingga mendukung keakuratan model regresi yang digunakan.

Gambar 5 yang telah diekstrapolasi dan interpolasi untuk berbagai nilai tegangan normal dibandingkan dengan grafik hubungan antara kekuatan geser dan tegangan normal efektif pada *Bearpaw shale*. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Plot Gambar 4.3 Pada Grafik Hubungan Antara Kekuatan Geser dan Tegangan Normal Efektif pada *Bearpaw Shale*

Hasil yang ditampilkan pada Gambar 8 menunjukkan bahwa seluruh lokasi memiliki pola kurva tegangan geser yang meningkat seiring dengan kenaikan tegangan normal, memiliki bentuk dan tren kurva yang serupa dengan tanah *Bearpaw shale* yaitu non-linier dengan kecenderungan mendekati garis lurus pada tegangan normal yang lebih tinggi sehingga bisa dikatakan bahwa secara umum perilaku geser tanah antar lokasi memiliki kemiripan pola dengan tanah *Bearpaw shale* meskipun nilai kekuatannya berbeda.

KESIMPULAN

Hasil pengujian *direct shear slow* menunjukkan nilai hubungan antara LL dengan ϕ'_{fs} masih cukup menyebar namun nilai-nilai tersebut masih dianggap mengikuti sebaran/*scatter* data yang sudah ada. Nilai hubungan antara LL dengan ϕ'_r cenderung lebih dekat dengan garis regresi yang

telah ada pada *effective normal stress* 50 kPa dan 100 kPa dengan *clay fraction* $\geq 50\%$. Berdasarkan hasil plot dan analisis, nilai-nilai ϕ'_{fs} dan ϕ'_r tersebut masih dalam batas garis regresi dan masih mengikuti sebaran data dari grafik yang ada, sehingga secara keseluruhan hubungan antara *liquid limit* terhadap sudut geser *fully softened* (ϕ'_{fs}) dan *residual* (ϕ'_r) adalah semakin tinggi nilai *liquid limit* maka semakin rendah atau kecil nilai ϕ'_{fs} dan ϕ'_r sesuai dengan tren garis yang sudah ada.

Kesesuaian hasil pengujian *direct shear slow reversal* dengan korelasi Stark & Hussain diperoleh dalam ruang lingkup penelitian ini, namun generalisasi hasil masih terbatas karena jumlah sampel yang relatif sedikit. Jumlah sampel yang terbatas menyebabkan hasil ini masih bersifat awal dan memerlukan verifikasi lebih lanjut dengan jumlah data yang lebih banyak

REFERENSI

- Adisurya, H. & Makarim, C. A. 2022. "Perilaku kegagalan konstruksi jalan raya yang bertumpu pada fondasi tiang di tanah *clay shale*," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 55–70.
- Alatas, I. M., Kamaruddin, S. A., Nazir, R., Irsyam, M. & Himawan, A. 2015. "Shear strength degradation of Semarang–Bawen clay shale due to weathering process," *Jurnal Teknologi*, vol. 77, no. 11, pp. 109–118.
- Andriansyah, A., Mulyono, M. N. & Aulia, M. R. 2025. "Slope stability in Gombel Lama: A Comparative Analysis of Peak, Fully Softened, and Residual Conditions", *Bentang: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 161–170.

- sDas, B. M. & Sobhan, K. 2016. “*Principles of Geotechnical Engineering*”, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L. 2014. “*Soil Strength and Slope Stability*”, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Head, K. H. 1994. “*Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*”, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hunt, R. E. 2006. “*Characteristics of Geologic Materials and Formations: A Field Guide for Geotechnical Engineers*”, Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Kayyal, M. K. & Wright, S. G. 1991. “Investigation of long-term strength properties of Paris and Beaumont clays in earth embankments,” *Research Rep. 1195-2F*, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- Lutton, R. J. 1975. “*Study of Clay Shale Slopes along the Panama Canal, Report 2: History, Geology, and Mechanics of Development of Slides in Gaillard Cut, Vol. I: Text*”, Soils and Pavements Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, USA.
- Mesri, G. & Shahien, M. 2003. “Residual shear strength mobilized in first-time slope failures,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129, no. 1, pp. 12–30.
- Rogers, J. D. 2014. “The American engineers that built the Panama Canal,” in *Proc. Sessions Honoring the 100th Anniversary of the Panama Canal at the ASCE Global Engineering Conference*, Panama City, Panama, Oct. 7–11, 2014, pp. 112–349.
- Skempton, A. W. 1964. “Long-term stability of clay slopes,” *Géotechnique*, vol. 14, no. 2, pp. 77–102.
- Stark, T. D., Choi, H. & McCone, S. 2005. “Drained shear strength parameters for analysis of landslides,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, no. 5, pp. 575–588.
- Stark, T. D. & Duncan, J. M. 1991. “Mechanisms of Strength Loss in Stiff Clays,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 1, pp. 139–154.
- Stark, T. D. & Eid, H. T. 1997. “Slope stability analyses in stiff fissured clays,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 4, pp. 335–343.
- Stark, T. D. & Hussain, M. 2013. “Empirical correlations: Drained shear strength for slope stability analyses,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 6, pp. 853–862.
- Walkinshaw, J. L. & Santi, P. M. 1996. “Shales and Other Degradable Materials”, *Special Report—National Research Council, Transportation Research Board*, no. 247, pp. 555–576.
- Wright, S. G. 2005. “Evaluation of Soil Shear Strengths for Slope and Retaining Wall Stability Analyses with Emphasis on High Plasticity Clays”, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- Wright, S. G., Zornberg, J. G. & Aguetant, J. E. 2007. “The fully softened shear strength of high plasticity clays,” Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA.

Kajian Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) pada Perusahaan Konstruksi Bangunan (Studi Kasus: K3 Pembangunan Gedung Showroom Viar)

*Study of the Occupational Safety and Health Management System in a
Building Construction Companies
(Case Study: Occupational Safety and Health in the Construction of the Viar
Showroom Building)*

Maulidya Octaviani Bustamin¹, Wisnu Abiarto Nugroho², Petrus Para Mite³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Dr. Soetomo Surabaya, Jln. Semolowaru No.84,
Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60283. Telp (031) 5925970. Email: lidyaocta@unitomo.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Dr. Soetomo Surabaya, Jln. Semolowaru No.84,
Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60283. Telp (031) 5925970. Email: wisnu.abiarto@gmail.com

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Dr. Soetomo Surabaya, Jln. Semolowaru No.84,
Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60283. Telp (031) 5925970.

Abstrak

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek penting dalam pelaksanaan proyek konstruksi karena berhubungan dengan keselamatan pekerja, pencegahan kecelakaan kerja, serta peningkatan kualitas kerja. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3), upaya pencegahan kecelakaan kerja, dan pengaruh kesehatan kerja terhadap kualitas kerja pada proyek pembangunan gedung showroom Viar. Penelitian ini menggunakan metode observasional dengan pendekatan deskriptif kuantitatif. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi, wawancara, dan penyebaran kuisioner kepada 31 responden yang terdiri dari pekerja lapangan, mandor, staf teknik, dan petugas *Health Safety Environment* (HSE). Analisis data dilakukan menggunakan program SPSS secara deskriptif kuantitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan SMK3 pada proyek pembangunan gedung showroom Viar telah berjalan dengan sangat baik dan efektif. Sebagian besar pekerja (92,3%) mengetahui adanya sistem manajemen K3 yang diterapkan serta tersedianya alat pelindung diri (APD) seperti helm, rompi, sarung tangan, dan sepatu. Selain itu, sebanyak 88,4% pekerja dilibatkan dalam perencanaan program K3 sebagai bentuk komitmen manajemen terhadap pencegahan kecelakaan kerja. Penerapan K3 yang baik, khususnya penggunaan APD secara konsisten, terbukti mampu mengurangi risiko kecelakaan kerja dan memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan kualitas kerja pekerja konstruksi.

Kata Kunci: Konstruksi; Keselamatan dan Kesehatan Kerja; Kecelakaan Kerja; Kualitas Kerja.

Abstract

Occupational Safety and Health (OHS) is an important aspect in the implementation of construction projects because it is related to worker safety, prevention of work accidents, and improving work quality. This study aims to analyze the implementation of the Occupational Safety and Health Management System (OHSMS), efforts to prevent work accidents, and the influence of occupational health on work quality in the Viar showroom building construction project. This study uses an observational method with a quantitative descriptive approach. Data collection was carried out through observation, interviews, and distribution of questionnaires to 31 respondents consisting of field workers, foremen, technical staff, and Health Safety Environment (HSE) officers. Data analysis was carried out using the SPSS program using a quantitative descriptive method. The results of the study indicate that the implementation of the OHSMS in the Viar showroom building construction project has been running very well and effectively. Most workers (92.3%) are aware of the OHS management system being implemented and the availability of personal protective equipment (PPE) such as helmets, vests, gloves, and safety shoes. In addition, 88.4% of workers were involved in the OHS program planning as a form of management commitment to preventing work accidents. Good implementation of K3, especially the consistent use of PPE, has been proven to reduce the risk of work accidents and has a real impact on improving the quality of work of construction workers.

Keywords: Construction; Occupational Safety and Health; Work Accidents; Work Quality.

PENDAHULUAN

Kemajuan industri di Indonesia yang semakin pesat, penerapan SMK3 wajib diterapkan di seluruh perusahaan untuk meningkatkan efektifitas dalam perlindungan K3 yang terencana, terukur, terstruktur, dan terintegrasi. Berdasarkan PP No. 50 Tahun 2012 pasal 5 ayat 2 bahwa setiap perusahaan dalam penerapan SMK3 wajib berpedoman pada Peraturan Pemerintah ini dan ketentuan peraturan Perundang-undangan serta memperhatikan konversi atau standar internasional (Annisa, 2024)

Proyek konstruksi memiliki risiko kecelakaan kerja yang tinggi akibat berbagai aktivitas seperti pekerjaan di ketinggian, penggunaan alat berat, dan penanganan material bangunan. Pada pembangunan Gedung Showroom Viar masih terdapat potensi bahaya yang dapat mengancam keselamatan pekerja, seperti ketidakpatuhan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), kurangnya kesadaran terhadap prosedur K3, serta kondisi lingkungan kerja yang dinamis.

Kualitas kerja menurut Siagian (2007) sebagai upaya yang sistematis dalam kehidupan organisasional melalui cara para karyawan diberi kesempatan untuk turut berperan menentukan cara mereka bekerja dan sumbangan yang mereka berikan kepada organisasi dalam rangka pencapaian tujuan dan berbagai sasarnya.

Faktor keamanan dan perlindungan dalam bekerja menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas kerja. Diharapkan karyawan perusahaan yang seperti ini akan memiliki kualitas dan kinerja yang maksimal, dengan melaksanakan program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan bidang yang berkaitan dengan kesehatan, keselamatan, dan kesejahteraan manusia yang bekerja di sebuah institusi maupun di sebuah lokasi proyek.

Apabila penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) tidak dilakukan secara optimal, risiko kecelakaan kerja dapat meningkat dan berdampak pada keselamatan pekerja, keterlambatan proyek, serta kerugian perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan kajian terhadap penerapan SMK3 pada proyek pembangunan Gedung Showroom Viar untuk mengevaluasi efektivitas pelaksanaan K3 dan mengidentifikasi upaya perbaikan yang diperlukan.

Tujuan penelitian ini untuk memelihara Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), melindungi rekan kerja, keluarga pekerja, konsumen, dan orang lain yang mungkin juga terpengaruh kondisi lingkungan kerja, juga sangat penting bagi moral, legalitas, dan finansial berupa: pencegahan, penyembuhan luka dan perawatan untuk pekerja, serta menyediakan perawatan kesehatan.

Pemerintah mengeluarkan peraturan-peraturan: UU RI No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja; Undang-undang No. 3 tahun 1992 Tentang Jaminan Sosial Tenaga Kerja (JAMSOSTEK), dan; Peraturan Menteri Tenaga Kerja No: PER.05/MEN/1996 mengenai Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3). Sistem pengendalian keselamatan dan kesehatan kerja (K3) memperhitungkan aspek keteknikan, juga harus membangun aspek moral, karakter dan sikap pikir pekerja untuk bekerja dengan selamat (Departemen Tenaga Kerja RI, 1970, 1996).

Manusia merupakan sumber daya paling penting dalam usaha organisasi mencapai keberhasilan. Betapapun sempurnanya aspek teknologi dan ekonomi, tanpa aspek manusia sulit kiranya tujuan-tujuan organisasi dapat dicapai. Dalam sebuah perusahaan, kesehatan, keselamatan dan kesejahteraan para pekerja harus dijunjung tinggi dan bekerja dengan selamat harus lebih diutamakan dari pada hasil produksi. Karena itu Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK-3) diperlukan (Amperajaya & Stefany, 2005).

Kecelakaan kerja dapat terjadi pada semua bidang kerja, termasuk di bidang industri. Menurut peraturan menteri tenaga kerja nomor 3 tahun 1998, kecelakaan kerja adalah suatu kejadian yang tidak dikehendaki dan tidak terduga yang dapat menimbulkan korban manusia dan atau harta benda (Irawan, 2023)

Tinjauan Pustaka

Definisi K3 Konstruksi

Keselamatan dan Kesehatan Kerja di sektor Konstruksi (K3 Konstruksi) mencakup semua aktivitas yang bertujuan untuk memastikan dan melindungi keselamatan serta kesehatan para pekerja konstruksi dan individu lain yang berada di area proyek. Hal ini dilakukan melalui upaya pencegahan terhadap kecelakaan kerja dan penyakit yang disebabkan oleh pekerjaan di semua tahap kegiatan konstruksi. Peraturan Menteri PUPR No. 10 Tahun 2021 mengenai Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) menegaskan bahwa setiap pelaksanaan pekerjaan konstruksi harus menerapkan prinsip-prinsip K3 untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman, sehat, dan bebas dari risiko kecelakaan (Anggana, 2025)

Prinsip Dasar Sistem Manajemen K3

Peraturan Menteri Tenaga Kerja No.05/ MEN/1996 pasal 3, prinsip Dasar Sistem Manajemen K3 terdiri dari 5 yang dilaksanakan secara berkesinambungan yaitu:

1. Komitmen dan Kebijakan

Komitmen adalah tekad, keinginan dan penyertaan tertulis pengusaha atau pengurus dalam pelaksanaan K3. Dalam komitmen ada 3 hal yang perlu menjadi perhatian penting, yaitu kepemimpinan dan komitmen, tinjauan awal K3 dan kebijakan K3.

2. Perencanaan

Perencanaan K3 adalah suatu perencanaan guna mencapai keberhasilan penerapan SMK3 dengan sasaran yang jelas dan dapat diukur. Perencanaan yang dibuat oleh perusahaan harus efektif dengan memuat sasaran yang jelas dari kebijakan K3 tempat kerja dan indikator kinerja. Hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan adalah identifikasi sumber bahaya, penilaian dan pengendalian resiko serta hasil tinjauan awal terhadap K3.

3. Penerapan

Setelah membuat komitmen dan perencanaan maka dilanjutkan dengan tahap penting yaitu penerapan SMK3. Yang perlu diperhatikan oleh perusahaan pada tahap ini adalah :

- Adanya jaminan kemampuan
- Kegiatan pendukung
- Identifikasi sumber bahaya, penilaian dan pengendalian resiko

4. Pengukuran dan Evaluasi

Pengukuran atau evaluasi ini merupakan alat yang berguna untuk:

- Mengetahui keberhasilan penerapan SMK3
- Melakukan identifikasi tindakan perbaikan
- Mengukur, memantau dan mengevaluasi kinerja SMK3

Menurut Jula (2013) untuk menjaga tingkat kepercayaan terhadap data yang akan diperoleh maka harus dilakukan kalibrasi alat dan pengujian peralatan. Ada 3 (tiga) kegiatan dalam melakukan pengukuran dan evaluasi yang diperkenalkan oleh peraturan ini:

(1) Inspeksi dan Pengujian.

Harus ditetapkan dan dijaga konsistensi dari prosedur inspeksi, pengujian dan pemantauan yang berkaitan dengan kebijakan K3.

(2) Audit SMK3.

Audit SMK3 adalah suatu alat untuk mengukur besarnya keberhasilan pelaksanaan dan penerapan SMK3 di tempat kerja secara sistematis dan independen (berdiri sendiri), guna membuktikan apakah penerapan SMK3 di tempat kerja telah dilaksanakan secara efektif untuk mencapai kebijakan dan tujuan perusahaan.

(3) Tindakan Perbaikan dan Pencegahan.

Merupakan hasil temuan dari audit dan diteruskan dan harus disetujui oleh pihak manajemen dan dijamin pelaksanaannya secara sistematis dan efektif.

5. Tinjauan Ulang

Tinjauan ulang pelaksanaan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) secara berkesinambungan dengan tujuan untuk meningkatkan efektivitas keselamatan dan kesehatan kerja. Tinjauan ulang harus meliputi :

- Evaluasi terhadap penerapan kebijakan K3
- Tujuan, sasaran dan kinerja K3
- Hasil temuan audit SMK3
- Evaluasi efektifitas penerapan SMK3
- Kebutuhan untuk mengubah SMK3

Pengaruh Keselamatan Kerja Terhadap Kualitas Kerja

Keselamatan kerja yang baik akan menciptakan lingkungan kerja yang aman dan kondusif, yang pada akhirnya berdampak positif terhadap kualitas kerja tenaga kerja. Beberapa pengaruh penting adalah:

1. Meningkatkan Produktivitas

Pekerja yang merasa aman akan bekerja lebih fokus dan efektif, mengurangi waktu terbuang akibat cedera atau rasa takut bekerja di lingkungan berisiko.

2. Menurunkan Angka Absensi dan *Turnover*

Lingkungan kerja yang memperhatikan K3 menurunkan angka kecelakaan, absensi, dan pergantian tenaga kerja yang disebabkan oleh rasa tidak aman.

3. Meningkatkan Kepuasan dan Loyalitas Karyawan

Ketika perusahaan peduli terhadap keselamatan, pekerja merasa dihargai dan dilindungi, yang berkontribusi pada semangat kerja yang tinggi. Menurut Abdullah (2018), terdapat korelasi positif antara penerapan keselamatan kerja dengan kinerja individu, khususnya dalam sektor konstruksi yang memiliki risiko tinggi terhadap kecelakaan kerja

Pengendalian Kecelakaan Kerja dalam SMK3

Pengendalian kecelakaan kerja merupakan bagian krusial dari penerapan SMK3. Menurut Peraturan Pemerintah No. 50 Tahun 2012, pengendalian risiko kerja dilakukan melalui pendekatan sistematis yang meliputi (Pemerintah RI, 2012):

1. Identifikasi Bahaya

Dilakukan untuk mengenali semua potensi bahaya di tempat kerja, termasuk bahaya fisik, kimia, biologi, ergonomi, dan psikososial.

2. Penilaian Risiko (*Risk Assessment*)

Menentukan tingkat risiko dari bahaya yang telah diidentifikasi dan menilai potensi dampaknya terhadap pekerja dan operasional proyek.

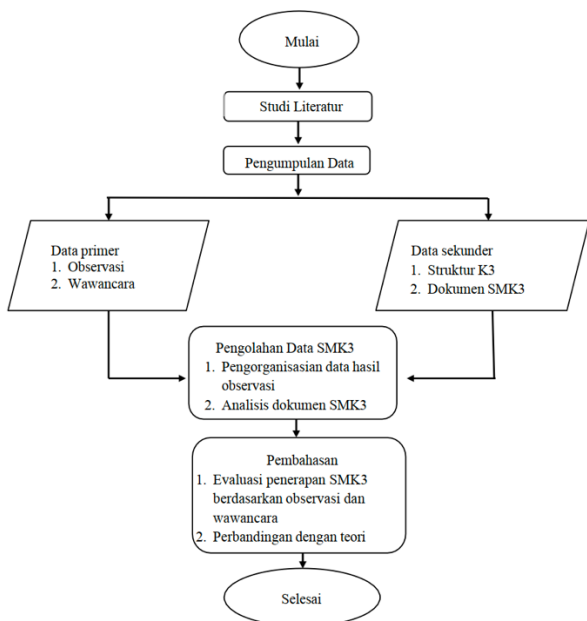
Pengendalian Risiko (*Risk Control*) Pengendalian dilakukan secara bertingkat:

- 1) Eliminasi (menghilangkan sumber bahaya);
- 2) Substitusi (mengganti dengan bahan atau proses yang lebih aman);
- 3) Rekayasa teknis (misalnya sistem ventilasi atau pelindung mesin);
- 4) Administrasi (jadwal kerja, SOP, pelatihan);
- 5) APD (alat pelindung diri).

Ramli (2018) menjelaskan bahwa pelaksanaan kontrol risiko dalam SMK3 tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga memerlukan komitmen manajemen, pelatihan berkelanjutan, dan pengawasan langsung di lapangan.

METODE

Penelitian diselesaikan dengan metode Systematic Literature Review (SLR) menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif untuk meninjau penerapan SMK3 pada sektor konstruksi di Indonesia serta menilai kesesuaiannya terhadap regulasi yang berlaku. Pendekatan deskriptif kualitatif digunakan untuk menggambarkan dan menginterpretasikan temuan penelitian terdahulu secara naratif, khususnya terkait bentuk implementasi, kesenjangan regulasi praktik, serta hambatan dominan yang muncul di lapangan (Kembarajaya, 2025). Sejumlah literatur ditelaah secara terstruktur untuk memperoleh temuan yang dapat dianalisis dan dibandingkan secara konsisten



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Sumber Data

Berupa data primer berupa hasil observasi, inspeksi harian ke lapangan, maupun wawancara dengan bagian departemen *Health Safety and Environment*

(HSE) pada perusahaan konstruksi bangunan, data sekunder berupa data perusahaan dan literatur dari sumber atau data lain sebagai pelengkap penelitian.

Jumlah dan Karakteristik Responden

Responden sebagai sampel adalah para pekerja, staf teknis, mandor, dan petugas HSE (*Health Safety Environment*) yang bekerja pada proyek Pembangunan Gedung Showroom Viar, di Jalan Tembok Duku, Surabaya sebanyak 31 orang responden.

Profil Responden

Tabel 1. Profil Responden

No	Jabatan	Jumlah Responden
1	Pekerja Lapangan	15 orang
2	Mandor	5 orang
3	Staf Teknik	6 orang
4	Petugas <i>HSE/Safety</i>	5 orang
Total		31 orang

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data berupa observasi, wawancara atau *interview*, dan studi pustaka.

Variabel Penelitian

Tabel 2. Variabel Penelitian

No	Faktor	Variabel
1	Penerapan/pelaksanaan K3	X1 – X7
2	Kecelakaan kerja dan tindakan pencegahan (komitmen manajemen terhadap K3)	X8 – X12

Skala Pengukuran

Skala pengukuran menggunakan skala *Likert*.

Tabel 3. Teknik Pengukuran Penelitian

No	Jawaban	Skor
1	Sangat Setuju (SS)	5
2	Setuju (S)	4
3	Ragu-Ragu (RG)	3
4	Tidak Setuju (TS)	2
5	Sangat Tidak Setuju (STS)	1

Kemudian penggunaan program SPSS dengan uji validitas yang digunakan untuk mendapatkan data (mengukur) itu valid dan digunakan uji reliabilitas (keandalan) untuk mengetahui konsistensi alat ukur instrument, yang dapat dilakukan secara bersama-sama terhadap seluruh butir pertanyaan dan jika nilai Alpha >0,60 maka reliabel.

Analisis Data

Pada penelitian ini, pendekatan analisis menggunakan analisis kuantitatif secara deksriptif, juga menggunakan program SPSS. Hasil pengolahan tersebut, selanjutnya dipaparkan dalam bentuk angka-angka sehingga memberikan suatu kesan lebih mudah ditangkap maknanya oleh siapapun yang membutuhkan informasi tentang keberadaan gejala tersebut. Berikut faktor-faktor yang mempengaruhi kajian berupa penerapan SMK3 pada proyek pembangunan gudang showroom viar yaitu:

1. Penerapan/pelaksanaan K3, terdapat 7 pertanyaan;
2. Kecelakaan kerja dan tindakan pencegahan (komitmen manajemen terhadap K3) terdapat 4 pertanyaan.

Sehingga ada 2 faktor terdapat 11 item pertanyaan yang menjadi indikator variabel pada penelitian ini, format kuisisioner pada Tabel 4 yang merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi kajian berupa penerapan SMK3 pada proyek pembangunan gudang showroom viar berupa format isi kuisisioner yaitu:

Tabel 4. Daftar Pertanyaan Kuisisioner

No	Pertanyaan
Penerapan/pelaksanaan K3	
1.	Pekerja menerima pelatihan tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)
2.	Pekerja mengetahui adanya sistem manajemen K3 yang diterapkan di proyek ini
3.	Alat pelindung diri (APD) seperti helm, rompi, sarung tangan, dan sepatu safety selalu tersedia
4.	Kuantitas pekerja menggunakan APD saat bekerja
5.	Pengawasan atau inspeksi rutin oleh petugas HSE di proyek ini

No	Pertanyaan
6.	Adanya rambu-rambu K3 atau poster peringatan di area kerja
7.	Ada fasilitas P3K atau pos kesehatan di lokasi proyek
Kecelakaan kerja dan tindakan pencegahan (komitmen manajemen terhadap K3)	
1.	Pekerja dilibatkan dalam perencanaan program K3
2.	Pekerja melaporkan jika terjadi kecelakaan atau situasi berbahaya
3.	Pekerja melaporkan jenis kecelakaan yang dialami
4.	Pengetahuan dan informasi tentang SOP (<i>Standard Operating Procedure</i>) dalam kondisi darurat

Keterangan:

- a. SS: Sangat setuju diberi skor 5 (persentase 81% - 100%);
- b. ST: Setuju diberi skor 4 (persentase 61% - <80%);
- c. N: Netral diberi skor 3 (persentase 41% - <60%);
- d. TS: Tidak setuju diberi skor 2 (persentase 21% - <40%);
- e. STS: Sangat tidak setuju diberi skor 1 (persentase <21%).

Hasil penilaian dibuatkan tabulasi data:

$$Skor = \frac{total\ skor\ (A)}{nilai\ total\ (B)} \times 100\%$$

Penilaian menggunakan rumus indeks:

$$Rumus\ indeks\ \% = \frac{total\ skor}{nilai\ tertinggi\ (X)} \times 100\%$$

Tabel 5. Klasifikasi Keberhasilan SMK3 Menggunakan Rumus Indeks

No	Pencapaian	Kategori
1	75%-100%	SMK3 proyek berhasil dengan sangat baik dan efektif
2	50%-74,99%	SMK3 proyek cukup baik dan efektif
3	25%-49,99%	SMK3 proyek kurang baik
4	0%-24,99%	SMK3 proyek belum berhasil/gagal

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian Penerapan/Pelaksanaan K3

Tabel 6. Distribusi Jawaban Responden Untuk Penerapan/Pelaksanaan K3

Item Pertanyaan	SS		S		N		TS		STS		Jumlah Skor
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	
P1	58,1	18	41,9	13	0	0	0	0	0	0	142
P2	64,5	20	35,5	11	0	0	0	0	0	0	144
P3	64,5	20	35,5	11	0	0	0	0	0	0	144
P4	38,7	12	38,7	12	0	0	22,6	7	0	0	122
P5	29,0	9	0,7	22	0	0	0	0	0	0	133
P6	35,5	11	0,6	20	0	0	0	0	0	0	135
P7	41,9	13	58,1	18	0	0	0	0	0	0	137
Jumlah	332,2	103	211	107	0	0	22,6	7	0	0	957
Rataan	47,5	14,7	30,1	15,3	0	0	3,2	1	0	0	136,7

Sumber: Data Primer Diolah, 2025

$$\begin{aligned} \text{Indek Skor (\%)} &= \frac{TS}{Y} \times 100\% \\ &= \frac{144}{155} \times 100\% = 92,3\% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan indeks skor diketahui bahwa item pertanyaan tentang pekerja mengetahui adanya sistem manajemen K3 yang diterapkan di proyek ini (P2) dan alat pelindung diri (APD) seperti helm, rompi, sarung tangan, dan sepatu *safety* selalu tersedia (P3) mencapai indeks skor tertinggi sebesar 92,3%, sehingga dapat disimpulkan yang paling dominan dengan kategori SMK3 proyek berhasil dengan sangat baik dan efektif dalam penerapan/pelaksanaan K3 pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar).

Kajian Kecelakaan Kerja dan Tindakan Pencegahan (Komitmen Manajemen Terhadap K3)

Tabel 7. Distribusi Jawaban Responden Untuk Kecelakaan Kerja dan Tindakan Pencegahan (Komitmen Manajemen Terhadap K3)

Item Pertanyaan	SS		S		N		TS		STS		Ju s
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	
P1	41,9	13	58,1	18	0	0	0	0	0	0	1
P2	35,5	11	64,5	20	0	0	0	0	0	0	1
P3	35,5	11	64,5	20	0	0	0	0	0	0	1
P4	38,7	12	38,7	12	0	0	22,6	7	0	0	1
Jumlah	151,6	47	225,8	70	0	0	22,6	7	0	0	5
Rataan	37,9	11,8	56,5	17,5	0	0	3,2	1	0	0	1

Sumber: Data Primer Diolah, 2025

Pekerja dilibatkan dalam perencanaan program K3 (P1). Item pertanyaan tentang pekerja dilibatkan dalam perencanaan program K3 (P1), maka untuk perhitungan indeks skor yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Indek Skor (\%)} &= \frac{TS}{Y} \times 100\% \\ &= \frac{137}{155} \times 100\% = 88,4\% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan indeks skor diketahui bahwa item pertanyaan tentang pekerja dilibatkan dalam

perencanaan program K3 (P1) mencapai indeks skor tertinggi sebesar 88,4%, sehingga dapat disimpulkan yang paling dominan dengan kategori SMK3 proyek berhasil dengan sangat baik dan efektif dalam kecelakaan kerja dan tindakan pencegahan (komitmen manajemen terhadap K3) pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan Gedung Showroom Viar).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa: Kajian sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar) bahwa kajian penerapan/pelaksanaan K3 diketahui hampir seluruh pekerja (92,3%) telah mengetahui adanya sistem manajemen K3 yang diterapkan didukung alat pelindung diri (APD) seperti helm, rompi, sarung tangan, dan sepatu *safety* selalu tersedia pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar), lalu kajian kecelakaan kerja dan tindakan pencegahan (komitmen manajemen terhadap K3) diketahui hampir seluruh pekerja (88,4%) telah dilibatkan dalam perencanaan program K3 pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar); Cara untuk mengatasi terjadinya kecelakaan kerja pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar) bahwa hasil kajian penerapan/pelaksanaan K3 maka seluruh pekerja (92,3%) telah menerapkan penggunaan ketersediaan alat pelindung diri (APD) seperti helm, rompi, sarung tangan, dan sepatu *safety* pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar); Pengaruh kesehatan kerja terhadap kualitas kerja pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar) bahwa seluruh pekerja (92,3%) telah mengetahui adanya sistem manajemen K3 yang diterapkan maka kesehatan kerja berpengaruh nyata terhadap kualitas kerja, maka disarankan bahwa Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) untuk lebih dikembangkan dan ditingkatkan lagi kualitasnya, khususnya pada perusahaan konstruksi bangunan (studi kasus: K3 pembangunan gedung showroom viar) dan edukasi masyarakat Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) tetap dilakukan secara berkelanjutan.

REFERENSI

Abdullah, Z. (2018). Analisis Pengaruh Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Terhadap Kinerja Pekerja Konstruksi (Studi Kasus Proyek The Manhattan Mall & Condominium). *Teras*

- Jurnal*. <https://doi.org/10.29103/tj.v8i1.144>
- Amperajaya, M. D., & Stefany. (2005). Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK-3) pada PT.X Tangerang. *Jurnal Inovisi*, 4(2).
- Anggana M, Johari GJ, Saptiansyah R. Evaluasi Penerapan Sistem Manajemen K3 pada Proyek Konstruksi Gedung Bertingkat. *J Konstruksi*. 2025;23(2):1–14.
- Annisa NU, Widiani DR, Disrinama AM, Santoso Y. Kesiapan Implementasi PP No. 50 Tahun 2012 di Perusahaan Jasa Layanan Konstruksi dengan Metode Gap Analysis. *J Teknol Marit*. 2024;6(2):22–27.
- Departemen Tenaga Kerja RI. (1970). *Undang-Undang No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja*. Depnaker RI.
- Departemen Tenaga Kerja RI. (1996). *Peraturan Menteri Tenaga Kerja RI No. Per-05/MEN/1996 tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*. Depnaker RI.
- Irawan CN, Widiawan K. Perancangan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) di PT X Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012. *J Titra*. 2023;11(2):127–134.
- Jula. (2013). *Klasifikasi Dengan Metode Pembobotan (Scoring)*.
- Kembarajaya IK, Pamungkas TH, Partama IGNE. Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja Konstruksi di Indonesia: Studi Literatur. *J Tek Gradien*. 2025;18(1):1–12.
- Pemerintah RI. (2012). *Peraturan Pemerintah No. 50 Tahun 2012 tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*.
- Ramli, S. (2018). *Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja OHSAS 18001*. PT. Dian Rakyat.
- Siagian, S. (2007). *Manajemen Sumber daya Manusia*. PT. Bumi Aksara.

*Panjang kolom di halaman terakhir kurang lebih harus sama,
Template penulisan ini dapat diakses di: <https://journal.unesa.ac.id/index.php/proteksi/index>*

Penghilangan Ampicillin Resistance Genes dengan Karbon Aktif pada Pengolahan Air Bersih

Removal of Ampicillin Resistance Genes using Activated Carbon in Drinking Water Treatment

Sri Anggreini^{1*}, Ade Jaya Saputra², Syaiba Suci Ramadhini³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Internasional Batam, Jl. Gajah Mada Tiban Indah Batam, Telp. (0778) 7437111. Email: sri.anggreini@uib.ac.id

^{2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Internasional Batam, Jl. Gajah Mada Tiban Indah Batam, Telp. (0778) 7437111.

Abstrak

Keberadaan *antibiotic resistance genes* (ARGs) dalam air baku menjadi perhatian penting dalam pengolahan air bersih karena berpotensi mempercepat penyebaran resistensi antimikroba. Proses pengolahan konvensional umumnya belum mampu menghilangkan kontaminan genetik secara efektif. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi perilaku dan kapasitas adsorpsi *ampicillin resistance genes* (*amp^R*) yang dikodekan oleh plasmid menggunakan berbagai jenis karbon aktif. Eksperimen dilakukan secara *batch* menggunakan sepuluh jenis karbon aktif, terdiri atas lima berbasis batubara dan lima berbasis kayu. Analisis kinetika adsorpsi dilakukan menggunakan model *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi *amp^R* pada karbon aktif mengikuti model *pseudo-second-order*. Nilai konstanta laju adsorpsi berkisar antara $8,10 \times 10^{-12}$ – $6,19 \times 10^{-11}$ copies mg⁻¹ min⁻¹ untuk karbon aktif berbasis batubara dan $3,32 \times 10^{-11}$ – $2,66 \times 10^{-10}$ copies mg⁻¹ min⁻¹ untuk karbon aktif berbasis kayu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif berpotensi efektif sebagai adsorben untuk menghilangkan *amp^R* dalam sistem pengolahan air bersih serta mendukung pengembangan teknologi pengolahan air yang lebih efektif.

Kata Kunci: Adsorpsi; *Antibiotic Resistance Genes*; *Ampicillin Resistance Genes*; Karbon Aktif; Pengolahan Air Bersih

Abstract

The presence of antibiotic resistance genes (ARGs) in raw water has become a major concern in water treatment due to their role in accelerating the spread of antimicrobial resistance. Conventional treatment processes are often unable to effectively remove these genetic contaminants. This study aimed to evaluate the adsorption behavior and capacity of plasmid-encoded ampicillin resistance genes (amp^R) using various types of activated carbon. Batch adsorption experiments were conducted using ten types of activated carbon, consisting of five coal-based and five wood-based carbons. Adsorption kinetics were analyzed using pseudo-first-order and pseudo-second-order models. The results showed that amp^R adsorption on activated carbon followed the pseudo-second-order model. The adsorption rate constants ranged from 8.10×10^{-12} to 6.19×10^{-11} copies mg⁻¹ min⁻¹ for coal-based activated carbon and from 3.32×10^{-11} to 2.66×10^{-10} copies mg⁻¹ min⁻¹ for wood-based activated carbon. The findings demonstrate that activated carbon has strong potential as an adsorbent for removing amp^R in water treatment systems and support the development of more effective water treatment technologies

Keywords: Adsorption; *Antibiotic Resistance Genes*; *Ampicillin Resistance Genes*; *Activated Carbon*; *Drinking Water Treatment*

PENDAHULUAN

Penggunaan antibiotik yang berlebihan telah menyebabkan penyebaran *antibiotic resistance genes* (ARGs) di lingkungan perairan. Secara global, lebih dari 700.000 kematian setiap tahun dikaitkan dengan resistensi antibiotik (Chang et al., 2017; Kumar et al., 2020; Tian et al., 2022). Bakteri mengembangkan resistensi terhadap antibiotik untuk meningkatkan kemampuan bertahan hidupnya. Hal ini menyebabkan berkurangnya pilihan pengobatan untuk infeksi bakteri dan meningkatkan angka kematian pada manusia. *World Health Organization* (WHO) telah menetapkan daftar prioritas sedang hingga kritis patogen *antibiotic resistant bacteria* (ARB) yang memerlukan pengembangan antibiotik baru untuk mengobati infeksi dan mengusulkan pemantauan global terhadap ARB di lingkungan (Sanganyado et al., 2019). Jika tidak ada upaya untuk mengendalikan dan mengurangi penyebaran ARB dan ARGs, diperkirakan resistensi antibiotik akan menyebabkan 10 juta kematian dan beban ekonomi global sebesar US\$100 triliun pada tahun 2050 (Li et al., 2021).

Saat ini, ampicilin, yang termasuk dalam golongan antibiotik beta-laktam, merupakan agen antibakteri yang paling banyak digunakan untuk mengobati infeksi bakteri pada manusia dan ternak karena efektif membunuh bakteri dan relatif rendah toksisitasnya (Balsalobre et al., 2019). Namun, penggunaan ampicilin yang berlebihan untuk mengobati infeksi telah menyebabkan muncul dan menyebarnya *ampicillin resistance genes* (amp^R) di lingkungan. WHO melaporkan bahwa resistensi terhadap ampicilin termasuk dalam kategori bakteri resisten prioritas tinggi yang perlu diwaspadai dalam air minum (Sanganyado et al., 2019). Gen amp^R telah ditemukan pada air permukaan, air limbah, dan air minum, serta penyebarannya terus meningkat dalam beberapa tahun terakhir (Zhan et al., 2020; Xu et al., 2016). Xu et al. (2016) melaporkan bahwa dari 285 gen resistensi antibiotik yang diteliti, gen resistensi beta-laktam merupakan yang paling banyak ditemukan dalam air keran. Oleh karena itu, pengendalian dan pengurangan penyebaran gen amp^R sangat penting untuk menjaga keamanan lingkungan dan kesehatan manusia.

ARGs umumnya berada dalam *mobile genetic elements*, seperti plasmid, integron, dan transposon, serta dapat menyebar melalui *horizontal gene transfer* (HGT) di lingkungan (Jeon et al., 2023; Zhao et al., 2021; Cheng et al.,

2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penanda genetik yang digunakan untuk menilai tingkat resistensi antibiotik di lingkungan sebaiknya berkaitan dengan *mobile genetic elements* (Yoon et al., 2021). ARGs yang terencode dalam plasmid merupakan salah satu jalur utama penyebaran gen resistensi, karena plasmid dapat bereplikasi secara mandiri (Nihemaiti et al., 2020). Menurut Cheng et al. (2022), lebih dari 40% ARB yang ditemukan di air sungai mengandung plasmid, dan sekitar 70% dari plasmid tersebut membawa amp^R . Gen ini sering ditemukan dalam plasmid dan dapat ditransfer oleh bakteri patogen. Beberapa penelitian telah menggunakan gen amp^R berbasis plasmid untuk mengevaluasi perilaku ARGs dalam berbagai proses pengolahan air, seperti fotodegradasi oleh sinar matahari, ozonisasi, klorinasi, dan iradiasi UV (Anggreini et al., 2025; Su et al., 2018; Hu et al., 2019; Wan et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa amp^R dapat digunakan sebagai indikator keberadaan resistensi antibiotik di lingkungan.

ARGs telah terdeteksi dalam limbah rumah sakit, limbah peternakan, serta efluen dari instalasi pengolahan air limbah (Li et al., 2021; Michael et al., 2019; Agarwal et al., 2017). Berbagai sumber limbah tersebut berkontribusi terhadap keberadaan ARGs dalam sumber air baku untuk air minum. ARGs kemudian terbawa bersama air baku menuju instalasi pengolahan air minum, namun proses pengolahan yang ada saat ini belum mampu menghilangkan ARGs secara sempurna (Yu et al., 2017). Akibatnya, ARGs masih berpotensi ditemukan dalam air hasil olahan. Perilaku ARGs dalam berbagai proses pengolahan air, seperti koagulasi, klorinasi, dan adsorpsi menggunakan karbon aktif (Activated Carbon/AC), masih belum sepenuhnya dipahami. Pada proses adsorpsi dengan AC, beberapa studi lapangan menunjukkan hasil yang beragam. Penggunaan *biological activated carbon* (BAC) dilaporkan dapat meningkatkan jumlah ARGs dalam instalasi pengolahan air minum, karena biofilm yang terbentuk pada permukaan karbon aktif menjadi lingkungan yang ideal untuk terjadinya HGT serta mendukung pertumbuhan ARB (Li et al., 2019; Moseley et al., 2018). Wu et al. (2022) menemukan sebanyak 178 jenis ARG dalam biofilm BAC dengan konsentrasi berkisar antara $4,48 \times 10^7$ hingga $3,09 \times 10^9$ copies/g-AC, dan jumlahnya meningkat setelah proses pencucian balik (*backwashing*), yang menunjukkan adanya akumulasi ARGs pada permukaan karbon aktif. Di sisi lain, penggunaan *powdered activated carbon* (PAC) dalam

pengolahan air minum hanya mampu menurunkan 27 jenis ARGs target sebesar 0,23 log dari konsentrasi awal yang berkisar antara $1,83 \times 10^9$ hingga $3,51 \times 10^9$ copies L⁻¹ (Yu et al., 2017).

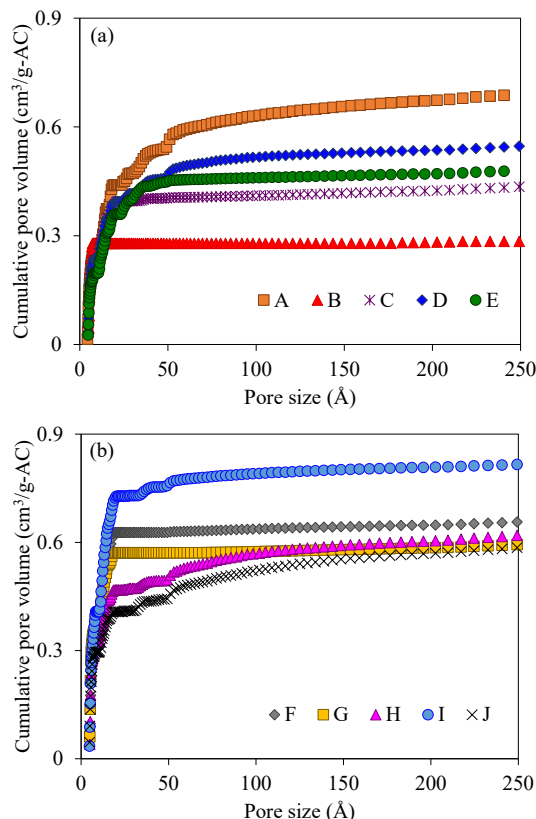
Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada efisiensi penghilangan total ARGs selama proses adsorpsi menggunakan karbon aktif (Su et al., 2018; Nihemaiti et al., 2020; Hu et al., 2019), dengan perhatian yang masih terbatas terhadap perilaku adsorpsi dan mekanisme penyerapan gen tersebut. Secara khusus, masih terdapat kekurangan kajian yang secara sistematis mengevaluasi kinetika adsorpsi ARGs yang terencode dalam plasmid pada berbagai jenis karbon aktif. Padahal, pemahaman terhadap aspek-aspek tersebut sangat penting untuk menilai kelayakan serta mengoptimalkan proses pengolahan berbasis karbon aktif dalam upaya pengendalian ARGs. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perilaku adsorpsi *amp^R* berbasis plasmid pada berbagai jenis karbon aktif. Eksperimen adsorpsi dilakukan secara *batch* untuk mengevaluasi perubahan jumlah gen yang teradsorpsi terhadap waktu serta kapasitas adsorpsi pada berbagai kondisi. Data hasil percobaan dianalisis menggunakan *pseudo-first-order reaction* dan *pseudo-second-order reaction*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendasar mengenai karakteristik adsorpsi *amp^R* pada karbon aktif serta berkontribusi dalam pengembangan strategi pengolahan air yang lebih efektif dalam mengendalikan kontaminan genetik.

METODE

Karbon Aktif

Sepuluh karbon aktif (*activated carbon/AC*) komersial digunakan dalam penelitian ini, yaitu karbon A, B, C, D, E, F, G, H, I, dan J. Karbon A, B, C, D, dan E merupakan AC berbasis batubara, sedangkan karbon F, G, H, I, dan J merupakan AC berbasis kayu. Seluruh AC diaktivasi menggunakan uap. Distribusi ukuran pori dari AC diukur menggunakan teknik adsorpsi nitrogen menggunakan instrumen Micromeritics (Micromeritics 3Flex, USA). Distribusi ukuran pori dari seluruh AC ditunjukkan pada Gambar 1. Luas permukaan total tertinggi ditunjukkan oleh karbon A untuk AC berbasis batubara dan karbon I untuk AC berbasis kayu. Luas permukaan total karbon A dan karbon I masing-masing sebesar 956 dan 1485 cm² g⁻¹. Selain itu, karbon A dan karbon I juga memiliki volume pori total tertinggi, masing-masing sebesar 0,69 dan 0,82 cm³ g⁻¹. Dibandingkan dengan jenis AC lainnya, karbon B,

F, dan G bersifat sangat mikropori dengan persentase volume pori sebesar 98,1; 96,4; dan 96,1% pada ukuran pori di bawah 20 Å. Luas permukaan pori dari AC tersebut juga lebih tinggi pada ukuran pori dibawah 20 Å. Sementara itu, jenis AC lainnya memiliki distribusi ukuran pori yang lebih luas, mencakup mikropori (< 20 Å) dan mesopori (20-500 Å).

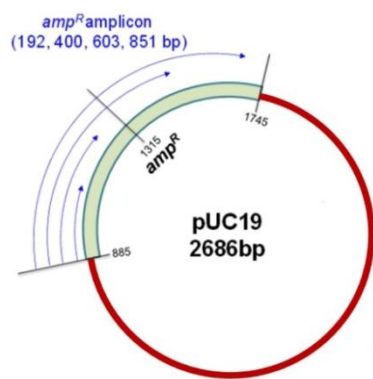


Gambar 1. Distribusi ukuran pori dari (a) AC berbasis batubara (A, B, C, D, E) dan (b) AC berbasis kayu (F, G, H, I, J)

Gen Resistensi Ampisilin (*amp^R*) yang Dikodekan oleh Plasmid

Plasmid pUC19 (2686 bp) merupakan vektor *E. coli* yang tersedia secara komersial dan membawa *amp^R*. Peta vektor pUC19 disajikan pada Gambar 2. Preparasi plasmid dilakukan berdasarkan metode transformasi bakteri yang telah dijelaskan pada penelitian sebelumnya (Nihemaiti et al., 2020). Plasmid ini diperbanyak pada *E. coli DH5α* sebagai sel kompeten. Sebanyak 100 μL *E. coli DH5α* dicampurkan dengan 10 μL plasmid. Campuran tersebut diinkubasi di atas es selama 30 menit, kemudian segera dipindahkan ke inkubator pada suhu 42 °C selama 45 detik dan diletakkan kembali di atas es selama 2 menit. Setelah proses *heat shock*,

campuran ditambahkan ke dalam 890 μL media *Super Optimal broth* (SOC) dan dikultur dalam *shaking incubator* (200 rpm) pada suhu 37 °C selama 1 jam. Sampel hasil inkubasi kemudian ditanam pada media agar LB yang mengandung 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ampisilin dan dikultur semalaman. Selanjutnya, koloni yang mengandung plasmid dikultur semalaman menggunakan media LB dan ampisilin. Plasmid diekstraksi dari *E. coli DH5 α* menggunakan kit ekstraksi plasmid (Macherey-Nagel, Jerman), dan konsentrasi plasmid hasil pemurnian ditentukan menggunakan analisis *Quantus Fluorometer*. Selanjutnya, plasmid murni diencerkan menggunakan air deionisasi steril untuk memperoleh larutan *amp^R* dan digunakan dalam percobaan adsorpsi.



Gambar 2. Peta vektor pUC19

Tabel 1. Primer yang digunakan dalam penelitian ini dan kondisi qPCR

Primer pair*	Primer sequence (5'-3')	Annealing temp. (°C)	Amplicon size (bp)
<i>amp^R</i> -F	GTA TTC AAC ATT TCC GTG TCG C	55	192
<i>amp^R</i> -R	TTG GAA AAC GTT CTT CGG GG		

* F: forward; R: reverse

Eksperimen Adsorpsi

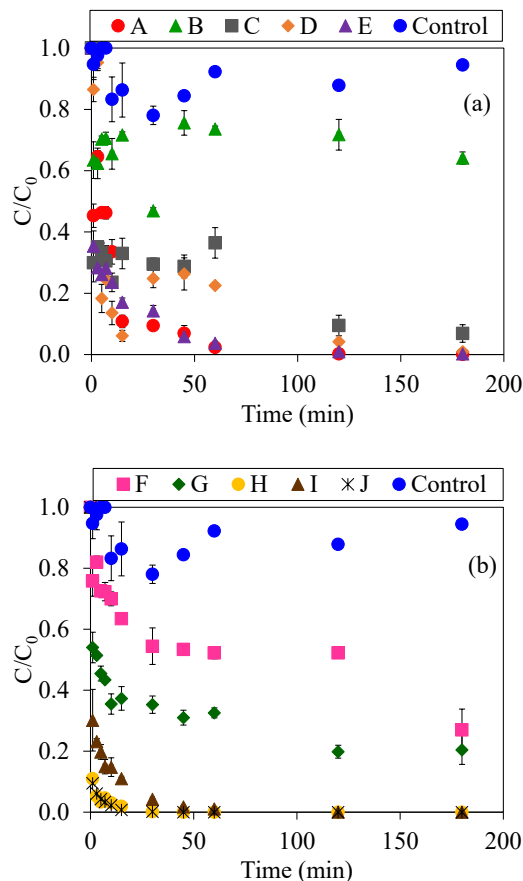
Eksperimen adsorpsi dilakukan secara *batch* di dalam vial berukuran 5 mL pada suhu 20 °C. Konsentrasi awal *amp^R* diatur pada rentang 0,001–0,03 $\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$ ($3,40 \times 10^{11} - 1,02 \times 10^{13}$ copies L^{-1}). Air deionisasi yang hanya mengandung *amp^R* digunakan sebagai kontrol. Dosis AC dan konsentrasi awal *amp^R* yang digunakan masing-masing sebesar 1 $\text{g } \text{L}^{-1}$ dan 0,01 $\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$. Proses adsorpsi dilakukan selama 180 menit hingga mencapai kesetimbangan. Setelah proses adsorpsi selama 180 menit, dilakukan sentrifugasi selama 10 menit pada 12.000g untuk memisahkan partikel AC.

Konsentrasi *amp^R* sebelum dan sesudah adsorpsi diukur menggunakan analisis *Quantitative Polymerase Chain Reaction* (qPCR) dengan menggunakan SYBR® Premix Ex Taq™ (TaKaRa, Jepang) berdasarkan protokol dari produsen (Li et al., 2021). Informasi primer dan kondisi qPCR disajikan pada Tabel 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan Konsentrasi *amp^R* terhadap Waktu

Konsentrasi residu *amp^R* selama kontak dengan berbagai jenis AC ditunjukkan pada Gambar 3. Proses adsorpsi berlangsung cepat pada tahap awal dan kemudian menurun secara bertahap seiring bertambahnya waktu kontak hingga mencapai kesetimbangan dalam 120 menit. Untuk memastikan kesetimbangan tercapai secara sempurna, data eksperimen dianalisis hingga 180 menit.



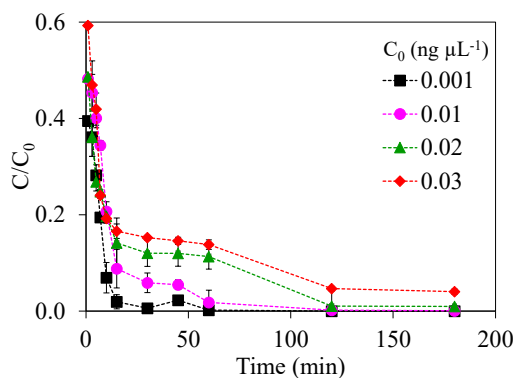
Gambar 3. Perubahan konsentrasi *amp^R* terhadap waktu oleh (a) activated carbon berbasis batubara dan (b) activated carbon berbasis kayu (konsentrasi awal *amp^R* = 0,01 $\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$, dosis AC = 1 $\text{g } \text{L}^{-1}$)

Konsentrasi residu terendah pada AC berbasis batubara dan berbasis kayu diperoleh

pada karbon A dan H. Rata-rata penurunan amp^R pada menit ke-180 mencapai 99,9% dan 100% masing-masing untuk karbon A dan H. Namun, konsentrasi residu tertinggi ditemukan pada karbon B untuk AC berbasis batubara dan karbon F untuk AC berbasis kayu. Konsentrasi residu pada karbon B dan F pada menit ke-180 masing-masing sebesar 0,64 dan 0,27. Konsentrasi residu pada AC berbasis batubara dan berbasis kayu setelah 180 menit mengikuti urutan karbon $B > C > D > E > A$ dan karbon $F > G > I > J > H$. Perbedaan laju adsorpsi amp^R tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan sifat permukaan AC.

Pengaruh Konsentrasi Awal amp^R

Gambar 4 menunjukkan pengaruh konsentrasi awal terhadap adsorpsi amp^R pada AC. Konsentrasi residu amp^R meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi awal amp^R , yang mengindikasikan terbatasnya jumlah situs aktif yang tersedia pada AC untuk mengadsorpsi konsentrasi gen yang lebih tinggi. Kapasitas adsorpsi kesetimbangan AC juga meningkat seiring meningkatnya konsentrasi awal amp^R karena gaya pendorong perpindahan massa menjadi lebih besar pada konsentrasi awal yang lebih tinggi (Michael et al., 2019).



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi awal amp^R terhadap konsentrasi residunya setelah adsorpsi oleh AC (karbon A, dosis AC = 1 g L⁻¹).

Ditemukan bahwa waktu kontak yang dibutuhkan amp^R dengan konsentrasi awal 0,001–0,03 ng µL⁻¹ untuk mencapai kesetimbangan adalah 120 menit. Adsorpsi amp^R berlangsung cepat pada tahap awal, kemudian melambat, dan akhirnya mencapai keadaan setimbang. Laju adsorpsi amp^R yang tinggi pada tahap awal disebabkan oleh adanya situs aktif pada AC yang mampu mengadsorpsi amp^R dengan cepat. Namun, jumlah situs aktif tersebut secara bertahap

berkurang seiring bertambahnya waktu adsorpsi dan jumlah amp^R yang teradsorpsi pada AC. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, waktu kesetimbangan tidak bergantung pada konsentrasi awal gen. Baik pada konsentrasi awal tinggi maupun rendah, kesetimbangan adsorpsi tercapai dalam waktu 120 menit. Hal ini menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan selama proses adsorpsi relatif konstan terlepas dari konsentrasi awal gen.

Kinetika Adsorpsi amp^R pada Karbon Aktif

Mekanisme adsorpsi yang terlibat dalam adsorpsi amp^R pada AC dapat dijelaskan menggunakan model kinetika adsorpsi. Kinetika adsorpsi dianalisis menggunakan model kinetika *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*. Persamaan dari kedua model tersebut dinyatakan sebagai berikut (Agarwal et al., 2017):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \dots\dots\dots (2)$$

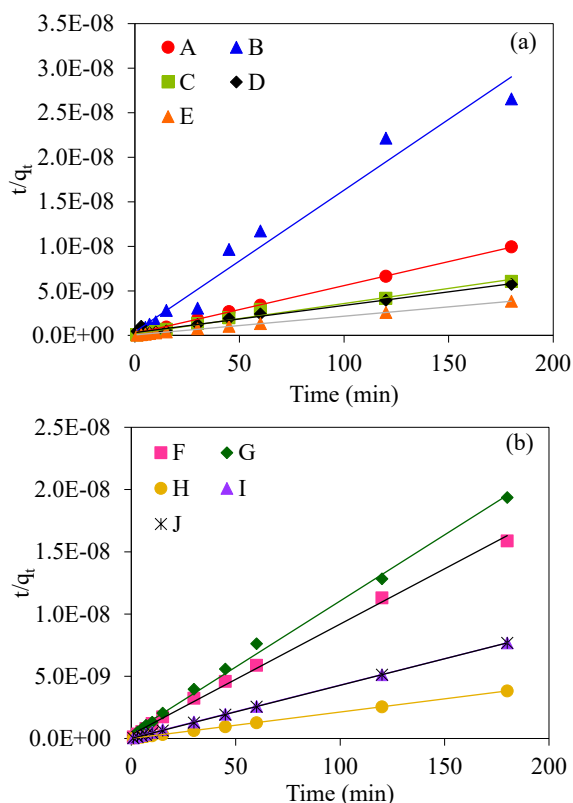
di mana q_t (copies mg⁻¹) adalah jumlah amp^R yang teradsorpsi pada AC pada waktu t , q_e (copies mg⁻¹) adalah kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang, sedangkan k_1 (min⁻¹) dan k_2 (copies mg⁻¹ min⁻¹) masing-masing merupakan konstanta laju model *pseudo-first-order* dan *pseudo-second-order*.

Analisis model menunjukkan bahwa model kinetika *pseudo-second-order* memberikan kecocokan yang jauh lebih baik terhadap seluruh data eksperimen dibandingkan model *pseudo-first-order*. Model kinetika *pseudo-second-order* untuk amp^R pada AC berbasis batubara dan berbasis kayu ditunjukkan pada Gambar 5.

Nilai R² dari model *pseudo-second-order* sangat tinggi (R² > 0,97), dan nilai q_e hasil perhitungan sesuai dengan nilai eksperimen sebagaimana disajikan pada Tabel 2, yang menunjukkan bahwa model kinetika *pseudo-second-order* dapat digunakan untuk menggambarkan kinetika adsorpsi amp^R pada AC. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai adsorpsi ARGs pada lembaran *nanosheet graphene oxide* (Yu et al., 2017), yang menunjukkan bahwa model kinetika *pseudo-second-order* lebih sesuai dengan data eksperimen dibandingkan model *pseudo-first-order*, serta mengindikasikan bahwa kinetika adsorpsi ARGs

didominasi oleh proses kemisorpsi (*chemisorption*) (Yu et al., 2017).

Model *pseudo-second-order* mengasumsikan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh kemisorpsi, yang melibatkan gaya valensi melalui pembagian atau pertukaran elektron antara adsorben dan adsorbat (Li et al., 2019). AC tersusun atas lembaran aromatik datar yang pada beberapa bagian dipisahkan oleh pori berbentuk celah. Heteroatom (misalnya oksigen dan nitrogen) terdapat pada partikel-partikel individual yang tersisip di antara lembaran aromatik atau terikat sebagai gugus fungsi (Moseley et al., 2018). Dengan demikian, interaksi π - π dapat terjadi antara struktur aromatik AC dan basa DNA dari *amp^R*. Seluruh basa DNA bersifat aromatik sehingga dapat dengan mudah berinteraksi dengan AC melalui mekanisme tersebut. Mekanisme serupa juga dilaporkan oleh peneliti lain pada adsorpsi ARGs menggunakan berbagai jenis adsorben (Yu et al., 2017; Wu et al., 2022).



Gambar 5. Analisis laju adsorpsi *amp^R* berdasarkan model kinetika *pseudo-second-order* pada (a) AC berbasis batubara dan (b) AC berbasis kayu

Tabel 2. Parameter kinetika hasil estimasi dari analisis data menggunakan model kinetika *pseudo-second-order* untuk

AC types	k_2 (copies $\text{mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	q_e (copies mg^{-1})	R^2
A	1.42×10^{-11} (1.00×10^{-11} – 1.89×10^{-11})	1.86×10^{10} (1.71×10^{10} – 2.15×10^{10})	1.00
B	6.19×10^{-11} (1.25×10^{-11} – 6.34×10^{-11})	6.29×10^9 (4.95×10^9 – 7.77×10^9)	0.97
C	5.86×10^{-12} (5.27×10^{-12} – 6.14×10^{-12})	2.95×10^{10} (2.03×10^{10} – 3.89×10^{10})	0.98
D	2.86×10^{-12} (2.23×10^{-12} – 6.05×10^{-12})	3.29×10^{10} (3.18×10^{10} – 4.01×10^{10})	0.97
E	8.10×10^{-12} (7.64×10^{-12} – 8.52×10^{-12})	4.76×10^{10} (4.36×10^{10} – 5.15×10^{10})	1.00
F	2.52×10^{-11} (2.40×10^{-11} – 2.62×10^{-11})	1.13×10^{10} (1.05×10^{10} – 1.20×10^{10})	1.00
G	2.59×10^{-11} (2.38×10^{-11} – 3.32×10^{-11})	9.42×10^9 (8.63×10^9 – 9.80×10^9)	1.00
H	1.05×10^{-10} (1.03×10^{-10} – 1.07×10^{-10})	4.72×10^{10} (4.32×10^{10} – 5.12×10^{10})	1.00
I	3.32×10^{-11} (2.88×10^{-11} – 3.81×10^{-11})	2.36×10^{10} (2.33×10^{10} – 2.39×10^{10})	1.00
J	2.66×10^{-10} (2.58×10^{-10} – 2.74×10^{-10})	2.34×10^{10} (2.31×10^{10} – 2.37×10^{10})	1.00

adsorpsi *amp^R* pada berbagai jenis AC

KESIMPULAN

Perilaku adsorpsi *amp^R* yang dikodekan oleh plasmid pada sepuluh jenis AC berbasis batubara dan kayu dalam sistem pengolahan air bersih telah dievaluasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses adsorpsi *amp^R* berlangsung cepat pada tahap awal dan mencapai kondisi kesetimbangan dalam waktu sekitar 120 menit. Efektivitas penghilangan *amp^R* dipengaruhi oleh karakteristik permukaan dan distribusi ukuran pori AC, di mana karbon A dan H menunjukkan kinerja adsorpsi terbaik dengan penurunan *amp^R* hingga 99,9–100%.

Analisis kinetika menunjukkan bahwa adsorpsi *amp^R* pada seluruh jenis AC mengikuti model *pseudo-second-order* dengan nilai R^2 lebih dari 0,97, yang mengindikasikan bahwa mekanisme adsorpsi didominasi oleh proses kemisorpsi. Interaksi π - π antara struktur aromatik

AC dan basa DNA *amp^R* diduga berperan penting dalam proses adsorpsi. Selain itu, peningkatan konsentrasi awal *amp^R* menyebabkan meningkatnya kapasitas adsorpsi, meskipun waktu untuk mencapai kesetimbangan relatif tetap.

Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan pemahaman mendasar mengenai kinetika dan perilaku adsorpsi ARGs berbasis plasmid pada berbagai jenis AC, yang selama ini masih terbatas dikaji secara sistematis. Temuan ini memperkuat potensi AC sebagai adsorben efektif untuk mengendalikan kontaminan genetik dalam pengolahan air bersih serta dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan air yang lebih efektif dalam mengurangi penyebaran resistensi antibiotik di lingkungan.

REFERENSI

- Agarwal, S., & Rani, A. (2017). Adsorption of resorcinol from aqueous solution onto CTAB/NaOH/flyash composites: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 526–538. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.035>.
- Anggreini, S., Saputra, A. J., & Sanjaya, L. Q. P. (2025). Characteristics of organic matter released from water treatment sludge in water treatment facilities. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 6(1), 149–159. <https://doi.org/10.37253/JCEP.V6I1.10441>
- Balsalobre, L., Blanco, A., & Alarcón, T. (2019). Beta-lactams. In *Antibiotic drug resistance* (1st ed., pp. 57–72). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119282549.ch3>
- Chang, P. H., Juhrend, B., Olson, T. M., Marrs, C. F., & Wigginton, K. R. (2017). Degradation of extracellular antibiotic resistance genes with UV254 treatment. *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6185–6192. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01120>
- Chen, J., Wang, T., Zhang, K., Luo, H., Chen, W., Mo, Y., & Wei, Z. (2021). The fate of antibiotic resistance genes (ARGs) and mobile genetic elements (MGEs) from livestock wastewater (dominated by quinolone antibiotics) treated by microbial fuel cell (MFC). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 218, 112–267. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112267>
- Cheng, C. F., Lin, H. H. H., Tung, H. H., & Lin, A. Y. C. (2022). Enhanced solar photodegradation of a plasmid-encoded extracellular antibiotic resistance gene in the presence of free chlorine. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106–984. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106984>
- Hu, Y., Zhang, T., Jiang, L., Luo, Y., Yao, S., Zhang, D., Lin, K., & Cui, C. (2019). Occurrence and reduction of antibiotic resistance genes in conventional and advanced drinking water treatment processes. *Science of the Total Environment*, 669, 777–784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.143>
- Huang, L., Xu, Y., Xu, J., Ling, J., Zheng, L., Zhou, X., & Xie, G. (2019). Dissemination of antibiotic resistance genes (ARGs) by rainfall on a cyclic economic breeding livestock farm. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 138, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.01.009>
- Jeon, J. H., Jang, K.-M., Lee, J. H., Kang, L.-W., & Lee, S. H. (2023). Transmission of antibiotic resistance genes through mobile genetic elements in *Acinetobacter baumannii* and gene-transfer prevention. *Science of the Total Environment*, 857, 159–497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159497>
- Kumar, S. B., Arnipalli, S. R., & Ziouzenkova, O. (2020). Antibiotics in food chain: The consequences for antibiotic resistance. *Antibiotics*, 9(10), 688. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9100688>
- Li, S., Li, Z., Ke, B., He, Z., Cui, Y., Pan, Z., Li, D., Huang, S., Lai, C., & Su, J. (2019). Magnetic multi-walled carbon nanotubes modified with polyaluminium chloride for removal of humic acid from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.016>
- Li, S., Zhang, C., Li, F., Hua, T., Zhou, Q., & Ho, S.-H. (2021). Technologies towards antibiotic resistance genes (ARGs) removal from aquatic environment: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125–148. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125148>
- Li, W., Li, J., Bhat, S. A., Wei, Y., Deng, Z., & Li, F. (2021). Elimination of antibiotic resistance genes from excess activated sludge added for effective treatment of fruit and vegetable waste in a novel vermireactor. *Bioresource Technology*, 325, 124–695. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124695>
- Michael, S. G., Michael-Kordatou, I., Beretsou, V. G., Jäger, T., Michael, C., Schwartz, T., & Fatta-Kassinos, D. (2019). Solar photo-Fenton oxidation followed by adsorption on activated carbon for the minimisation of antibiotic resistance determinants and toxicity present in urban wastewater. *Applied Catalysis B:*

- Environmental*, 244, 871–880.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.030>
- Moseley, P. T., Rand, D. A. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Understanding the functions of carbon in the negative active-mass of the lead–acid battery: A review of progress. *Journal of Energy Storage*, 19, 272–290.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.003>
- Nihemaiti, M., Yoon, Y., He, H., Dodd, M. C., Croué, J.-P., & Lee, Y. (2020). Degradation and deactivation of a plasmid-encoded extracellular antibiotic resistance gene during separate and combined exposures to UV254 and radicals. *Water Research*, 182, 115–921.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115921>
- Sanganyado, E., & Gwenzi, W. (2019). Antibiotic resistance in drinking water systems: Occurrence, removal, and human health risks. *Science of the Total Environment*, 669, 785–797.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.162>
- Sari, Y. A., & Rifai, A. I. (2020). Innovative solutions for sewage using food chain reaction (FCR) in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1655(1), 012–117.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012117>
- Su, H.-C., Liu, Y.-S., Pan, C.-G., Chen, J., He, L.-Y., & Ying, G.-G. (2018). Persistence of antibiotic resistance genes and bacterial community changes in drinking water treatment system: From drinking water source to tap water. *Science of the Total Environment*, 616–617, 453–461.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.318>
- Tian, Y., Yao, S., Zhou, L., Hu, Y., Lei, J., Wang, L., Zhang, J., Liu, Y., & Cui, C. (2022). Efficient removal of antibiotic-resistant bacteria and intracellular antibiotic resistance genes by heterogeneous activation of peroxydisulfate on hierarchical macro-mesoporous Co₃O₄-SiO₂ with enhanced photogenerated charges. *Journal of Hazardous Materials*, 430, 127–414.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127414>
- Wan, K., Guo, L., Ye, C., Zhu, J., Zhang, M., & Yu, X. (2021). Accumulation of antibiotic resistance genes in full-scale drinking water biological activated carbon (BAC) filters during backwash cycles. *Water Research*, 190, 116–744.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116744>
- Wu, C., Fu, L., Li, H., Liu, X., Wan, C., & Using Biochar to Strengthen the Removal of Antibiotic Resistance Genes: Performance and Mechanism. (2022). *Science of the Total Environment*, 816, 151–554.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151554>
- Xu, L., Ouyang, W., Qian, Y., Su, C., Su, J., & Chen, H. (2016). High-throughput profiling of antibiotic resistance genes in drinking water treatment plants and distribution systems. *Environmental Pollution*, 213, 119–126.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.013>
- Yoon, Y., He, H., Dodd, M. C., & Lee, Y. (2021). Degradation and deactivation of plasmid-encoded antibiotic resistance genes during exposure to ozone and chlorine. *Water Research*, 202, 117–408.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117408>
- Yu, W., Zhan, S., Shen, Z., Zhou, Q., & Yang, D. (2017). Efficient removal mechanism for antibiotic resistance genes from aquatic environments by graphene oxide nanosheet. *Chemical Engineering Journal*, 313, 836–846.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.107>
- Zhan, H., Wang, Y., Mi, X., Zhou, Z., Wang, P., & Zhou, Q. (2020). Effect of graphitic carbon nitride powders on adsorption removal of antibiotic resistance genes from water. *Chinese Chemical Letters*, 31(11), 2843–2848.
<https://doi.org/10.1016/j.cclet.2020.08.015>
- Zhao, R., Feng, J., Huang, J., Li, X., & Li, B. (2021). Responses of microbial community and antibiotic resistance genes to the selection pressures of ampicillin, cephalexin and chloramphenicol in activated sludge reactors. *Science of the Total Environment*, 755, 142–632.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142632>

Analisis Skala Prioritas Pembangunan Rumah Pasca Bencana Hidrometeorologi Kabupaten Aceh Barat

Analysis of Priority Scale for Post Hydrometeorological Disaster Housing Reconstruction in West Aceh Regency

**Ade Dwinta¹, Hilma Erliana¹, Cut Liliiza Yusra¹, Raina Parmitalia Dinda²,
Intan Wulan Sari³**

¹Konstruksi Pondasi Beton dan Pengaspalan Jalan, Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat.

²Jurusan Teknik Sipil, Universitas Teuku Umar.

³Instalasi Pemeliharaan dan Jaringan Listrik, Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat.

Email : adedwinta@aknacehbarat.ac.id

Abstrak

Bencana hidrometeorologi seperti banjir bandang di Kabupaten Aceh Barat pada November 2025 menyebabkan kerusakan parah pada rumah warga korban bencana. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi ekonomi, sosial, fisik, dan kelayakan huni serta menetapkan prioritas intervensi perumahan pasca bencana. Metode deskriptif kuantitatif dengan analisis persentase digunakan pada 187 kepala keluarga terdampak. Hasil menunjukkan 51,3% berpendapatan sangat rendah (<Rp500.000), 71,1% tidak menabung, 58,3% tidak memiliki tanah, dan 55,1% tidak memiliki ternak. Kondisi sosial rentan: 40,1% rasio kamar padat, 54,5% memiliki lansia/balita, 56,1% pendidikan kepala keluarga rendah. Kondisi fisik rumah sangat rusak: atap bocor (68,4%), dinding tidak rapat (65,2%), lantai lemah (63,1%). Kelayakan huni rendah: sistem limbah tidak layak (76,5%), keamanan kebakaran (70,1%), keamanan struktural (69,0%). Berdasarkan integrasi keempat variabel, ditetapkan tiga tingkat prioritas penanganan rumah: prioritas tinggi (50 KK) memerlukan bedah rumah total, prioritas sedang (30 KK) rehabilitasi berat, prioritas rendah (107 KK) perbaikan ringan. Dengan keterbatasan anggaran, prioritas utama diberikan kepada 50 KK dengan kondisi terburuk. Penelitian ini menyediakan dasar objektif untuk prioritas intervensi perumahan pasca bencana.

Kata Kunci: Bencana hidrometeorologi; banjir bandang; perumahan; analisis persentase; prioritas bantuan

Abstract

Hydrometeorological disasters, such as the flash flood in West Aceh Regency in November 2025, caused severe damage to the houses of affected residents. This study aims to analyze economic, social, physical, and livability conditions and to establish post-disaster housing intervention priorities. A quantitative descriptive method with percentage analysis was used on 187 affected households. Results show that 51.3% have very low income (<Rp500,000), 71.1% never save, 58.3% own no land, and 55.1% own no livestock. Social conditions are vulnerable: 40.1% have a very crowded room ratio, 54.5% have elderly/children under five, and 56.1% have low education level. Physical house conditions are severely damaged: leaky roofs (68.4%), poorly installed walls (65.2%), and weak floors (63.1%). Livability is very low: inadequate waste disposal (76.5%), fire hazards (70.1%), and structural hazards (69.0%). Based on the integration of the four variables, three priority levels for housing intervention were established: high priority (50 households) require total house reconstruction, medium priority (30 households) require heavy rehabilitation, and low priority (107 households) require light repairs. Given budget constraints, priority is given to the 50 households with the worst conditions. This study provides an objective basis for post-disaster housing intervention priorities.

Keywords: *Hydrometeorological disaster; flash flood; housing; percentage analysis; assistance priority*

PENDAHULUAN

Bencana hidrometeorologi seperti banjir, banjir bandang, dan cuaca ekstrem merupakan salah satu ancaman yang semakin sering terjadi di Indonesia. Intensitas kejadian bencana tersebut meningkat seiring perubahan iklim, degradasi lingkungan, dan tingginya tekanan terhadap kawasan permukiman (Rosyida & Nurmasari, 2019).

Provinsi Aceh termasuk wilayah yang memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana hidrometeorologi karena dipengaruhi oleh curah hujan yang tinggi, kondisi topografi pegunungan, serta sistem aliran sungai yang berpotensi menimbulkan genangan dan banjir bandang pada wilayah permukiman masyarakat (Azizah et al., 2021; NR & Pinuji, 2023). Pada akhir November 2025, banjir bandang melanda sejumlah kabupaten di Aceh, mengakibatkan 456 orang meninggal dunia dan ribuan rumah mengalami kerusakan parah. Kabupaten Aceh Barat menjadi salah satu daerah dengan dampak paling signifikan, dimana genangan air setinggi 1–1,5 meter berdampak pada 3.866 jiwa atau 2.652 kepala keluarga (Serambi News, 2025).

Peristiwa banjir yang terjadi pada akhir tahun 2025 mengakibatkan ribuan kepala keluarga terdampak dan menyebabkan gangguan terhadap kondisi fisik hunian masyarakat, khususnya rumah dengan kualitas konstruksi rendah (Nelson Hiwy, 2022; Pamungkas & Bawono, 2025). Rumah tidak layak huni (RTLH) merupakan kelompok hunian yang paling rentan terhadap risiko bencana karena umumnya memiliki keterbatasan pada aspek struktur bangunan, sanitasi, ventilasi, serta akses terhadap fasilitas dasar yang mendukung kenyamanan dan keamanan penghuni. Kelayakan huni merupakan indikator penting dalam menilai kualitas suatu rumah. Rumah yang layak huni tidak hanya ditentukan oleh kekuatan fisik bangunan, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi ekonomi keluarga, kondisi sosial penghuni, dan kualitas lingkungan tempat tinggal (Kahar, 2019; Sarbaini et al., 2022). Keterbatasan ekonomi seringkali menyebabkan masyarakat tidak mampu melakukan perbaikan rumah secara memadai, sementara kondisi sosial seperti tingkat pendidikan, jumlah tanggungan keluarga, serta akses terhadap layanan dasar turut memengaruhi kualitas hunian. Oleh karena itu, evaluasi kelayakan rumah perlu dilakukan secara menyeluruh agar dapat memberikan gambaran yang objektif mengenai kondisi masyarakat (Malang et al., 2025; Winarno, 2018).

Selama ini, penilaian terhadap rumah tidak layak huni pada banyak program bantuan masih cenderung bersifat administratif dan belum sepenuhnya didukung oleh data lapangan yang

terukur. Akibatnya, penentuan prioritas bantuan sering kali belum menggambarkan kondisi riil masyarakat (Maulani et al., 2025; Rusman, 2023). Pendekatan analisis deskriptif melalui metode persentase menjadi salah satu cara yang efektif untuk menggambarkan distribusi kondisi responden secara kuantitatif, sehingga dapat menunjukkan kecenderungan dominan pada setiap indikator penelitian. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan teknik analisis persentase. Data dikumpulkan melalui kuesioner terstruktur berskala *Likert* 1–5 dan observasi lapangan terhadap 187 kepala keluarga pemilik Rumah Tidak Layak Huni (RTLH) di Kecamatan Pante Ceureumen, Sungai Mas, Panton Reu, dan sekitarnya, Kabupaten Aceh Barat wilayah yang terdampak banjir bandang November 2025. Kuesioner mencakup empat variabel utama: kondisi ekonomi (pendapatan, aset produktif, stabilitas pekerjaan), kondisi sosial (rasio kamar/penghuni, keberadaan lansia/balita, pendidikan, akses layanan dasar), kondisi fisik rumah (dinding, lantai, atap, ventilasi), dan kelayakan huni (kesehatan lingkungan, kenyamanan, keamanan struktural).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji aspek kelayakan rumah dan bantuan perumahan bagi masyarakat rentan. (Kahar, 2019) menerapkan metode *Fuzzy Multicriteria Decision Making* untuk seleksi penerima bantuan rumah layak huni di Desa Singkawang Jambi, yang menunjukkan bahwa pendekatan multikriteria efektif untuk pemeringkatan namun belum mengintegrasikan kondisi pasca bencana secara spesifik.

(Winarno, 2018) melakukan evaluasi program penyediaan rumah layak huni bagi masyarakat miskin di Kabupaten Belitung, dengan fokus pada aspek administratif dan ketepatan sasaran, tetapi belum menyertakan analisis kondisi fisik bangunan secara mendetail. Kemudian (Pamungkas & Bawono, 2025) mengembangkan konsep rumah sehat dalam konteks rumah tidak layak huni (RTLH), menekankan pentingnya ventilasi, pencahayaan, dan sanitasi, namun belum menghubungkannya dengan prioritas intervensi pasca bencana hidrometeorologi.

Sementara itu, (Maulani et al., 2025) menganalisis kelayakan rumah hunian pasca banjir menggunakan *Decision Support System* (DSS) untuk pengambilan keputusan yang lebih efisien, namun sistem tersebut masih bersifat umum dan belum dirancang khusus untuk menentukan skala prioritas pembangunan rumah pasca bencana hidrometeorologi berdasarkan data persentase dari kondisi ekonomi, sosial, fisik, dan kelayakan huni secara simultan.

Dengan demikian, studi-studi terdahulu masih bersifat parsial karena hanya berfokus pada satu atau

dua aspek tertentu (misalnya hanya aspek administratif, atau hanya kondisi fisik bangunan, atau hanya metode pemeringkatan tanpa konteks pasca bencana). Belum ada penelitian yang secara simultan mengintegrasikan keempat variabel utama (ekonomi, sosial, fisik, dan kelayakan huni) dalam satu kerangka penentuan prioritas bantuan RTLH pasca bencana hidrometeorologi. Selain itu, sebagian besar studi dilakukan pada kondisi normal (non-bencana) sehingga tidak mencerminkan urgensi dan kompleksitas pemulihan pasca bencana yang membutuhkan alokasi sumber daya terbatas secara cepat dan tepat sasaran.

Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada tiga hal utama. Pertama, penelitian ini mengintegrasikan empat variabel secara simultan (ekonomi, sosial, fisik, kelayakan huni) dalam satu metode penentuan prioritas bantuan RTLH pasca bencana. Kedua, penelitian ini mengembangkan metode klasifikasi prioritas yang sederhana, transparan, dan mudah direplikasi, yaitu dengan memberikan skor (1–4) pada setiap variabel berdasarkan tingkat keparahan. Metode ini berbeda dari studi sebelumnya yang cenderung menggunakan pendekatan kompleks (seperti *fuzzy* atau DSS) tetapi tidak dirancang khusus untuk konteks keterbatasan data pasca bencana. Ketiga, penelitian ini menggunakan data primer terkini (pasca banjir bandang November 2025 di Kabupaten Aceh Barat) dengan jumlah sampel 187 kepala keluarga, yang merepresentasikan kondisi riil masyarakat terdampak di wilayah dengan karakteristik geografis dan sosial-ekonomi spesifik. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kekosongan akademik tetapi juga menyediakan instrumen praktis bagi pemerintah daerah dalam menentukan prioritas bantuan perumahan pasca bencana secara objektif dan tepat sasaran.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan penilaian prioritas terhadap rumah-rumah yang berhak menerima bantuan pasca bencana hidrometeorologi di Kabupaten Aceh Barat, dengan menggunakan pendekatan deskriptif berbasis persentase berdasarkan 187 responden pemilik Rumah Tidak Layak Huni (RTLH) pasca bencana. Secara khusus, tujuan penelitian adalah: (1) mengidentifikasi persentase kondisi ekonomi keluarga (pendapatan, aset produktif, stabilitas pekerjaan) sebagai indikator kemampuan mandiri dalam perbaikan rumah; (2) mengidentifikasi persentase kondisi sosial keluarga (rasio kamar/penghuni, keberadaan lansia/balita, pendidikan, akses layanan dasar) yang meningkatkan tingkat kerentanan; (3) mengidentifikasi persentase kondisi fisik rumah (kekuatan dinding, lantai, atap, ventilasi) yang menjadi indikator utama

ketidaklayakan; (4) mengidentifikasi persentase tingkat kelayakan huni (kesehatan lingkungan, kenyamanan, keamanan struktural) sebagai ukuran akhir urgensi bantuan; dan (5) menyusun rekomendasi prioritas bantuan (bedah rumah total, rehabilitasi berat, atau perbaikan ringan) berdasarkan indikator dengan persentase ketidaklayakan tertinggi, sehingga bantuan pemerintah dapat tepat sasaran kepada rumah tangga paling rentan pasca bencana.

METODE

Gambaran Umum Kondisi Bencana

Bencana di Kabupaten Aceh Barat pada akhir tahun 2025 diawali oleh terbentuknya bibit siklon 95B di wilayah Selat Malaka sejak 21 November 2025 yang kemudian berkembang menjadi Badai Siklon Tropis Senyar pada 26 November 2025 (BMKG 2025, n.d.). Fenomena meteorologis ini memicu terjadinya hujan dengan intensitas lebat hingga ekstrem disertai gelombang tinggi yang melanda wilayah Aceh (Albukhori, n.d.; Sekaranom, 2021). Di Kabupaten Aceh Barat, curah hujan yang sangat tinggi menyebabkan meluapnya sejumlah daerah aliran sungai, khususnya DAS Meureubo dan DAS Woyla, sehingga pada tanggal 27 November 2025 pukul 11.20 WIB desa-desa di kawasan tersebut mulai tergenang banjir.

Ketinggian air bervariasi antara 1 hingga 3 meter dan membawa material lumpur serta kayu gelondongan yang memperparah dampak kerusakan. Bencana ini menyebabkan rumah-rumah warga terendam selama beberapa hari, merusak berbagai infrastruktur seperti jalan dan jembatan hingga mengakibatkan beberapa desa terisolasi. Selain itu, erosi tebing sungai semakin mendekati kawasan permukiman, jaringan listrik mengalami kerusakan yang menyebabkan terputusnya pasokan listrik, serta ribuan hektar lahan pertanian dan perkebunan mengalami kerusakan dengan hilangnya ratusan hewan ternak milik masyarakat. Kondisi ini menunjukkan bahwa bencana yang terjadi tidak hanya menimbulkan kerusakan fisik yang luas, tetapi juga berdampak serius terhadap aspek sosial, ekonomi, dan kelayakan hunian masyarakat terdampak (AntaraNews, 2025; JPNN.com, 2025).



Gambar 1. Kondisi Pasca Banjir Bandang

Banjir bandang yang melanda Kabupaten Aceh Barat mengakibatkan sebagian rumah warga hilang tersapu arus, sementara lainnya mengalami kerusakan berat dengan dinding ambruk, lantai longsor, dan atap runtuh.



Gambar 2. Kondisi Rumah Warga

Sebagai respons terhadap bencana banjir dan longsor yang melanda Kabupaten Aceh Barat pada akhir tahun 2025, pemerintah daerah menetapkan status darurat bencana melalui Surat Keputusan Bupati Aceh Barat Nomor 695 Tahun 2025 yang berlaku sejak 27 November hingga 10 Desember 2025, kemudian diperpanjang melalui SK Nomor 732 Tahun 2025 dan SK Nomor 768 Tahun 2025 hingga 31 Desember 2025. Selama masa tanggap darurat, pemerintah melakukan berbagai upaya penanganan cepat, meliputi evakuasi warga terdampak, pendirian pos pengungsian, penyaluran bantuan logistik, penyediaan tenda darurat bagi masyarakat yang kehilangan tempat tinggal, serta perbaikan infrastruktur jalan dan jembatan oleh instansi teknis untuk membuka kembali akses ke wilayah yang terisolasi. Selain itu, dilakukan pula pembersihan lumpur pada sarana ibadah dan fasilitas pendidikan sebagai bagian dari pemulihan awal pascabencana.



Gambar 3. Penanganan Darurat
(sumber : dok. BPBD Aceh Barat)

Skala kerusakan rumah akibat banjir bandang sangat besar dan bervariasi, mulai dari rusak ringan hingga hancur total, namun tanpa data terukur bantuan berisiko tidak tepat sasaran. Keterbatasan dana dan tenaga rehabilitasi, kondisi geografis sulit dengan desa terisolir, serta melemahnya ekonomi masyarakat akibat rusaknya lahan pertanian dan ternak, semakin memperparah kebutuhan akan prioritas yang jelas. Upaya darurat yang ada masih

fokus pada evakuasi dan logistik, belum menyentuh penilaian kelayakan huni secara sistematis. Padahal, dengan potensi bencana terulang akibat perubahan iklim, penilaian prioritas pembanguna rumah pasca bencana yang tepat sasaran sangat mendesak. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada sektor perumahan sebagai urgensi paling penting bagi masyarakat pasca bencana.

Populasi dan Sampel

Populasi penelitian adalah seluruh rumah tangga terdampak banjir di Kabupaten Aceh Barat berdasarkan data BPBD Aceh Barat tahun 2025 (13.826 KK). Penentuan jumlah sampel menggunakan rumus Slovin dengan tingkat kesalahan 5%, sehingga diperoleh ukuran sampel minimal 187 rumah tangga. Teknik pengambilan sampel adalah *purposive-proportional sampling* dengan kriteria: (1) rumah tangga terdampak banjir, (2) memiliki indikasi kerusakan rumah (sedang hingga berat), (3) berada pada wilayah rawan banjir berulang.

Variabel Penelitian

Digunakan empat variabel utama, yaitu kondisi ekonomi, kondisi sosial, kondisi fisik rumah, dan kelayakan huni. Setiap variabel dijabarkan ke dalam sejumlah indikator, dan setiap indikator diukur melalui tiga pertanyaan dalam kuesioner, total seluruh pertanyaan dalam kuesioner adalah 39 pertanyaan.

Tabel 1. Indikator Variabel Penelitian

Variabel	Indikator	Ket
Kondisi Ekonomi	pendapatan, aset produktif (tanah, kendaraan, ternak), stabilitas pekerjaan.	9
Kondisi Sosial	rasio kamar/penghuni, keberadaan lansia/balita, pendidikan kepala keluarga, akses kesehatan, air bersih, listrik.	9
Kondisi Fisik Rumah	kekuatan dan kerapian dinding, kondisi lantai dan atap, ventilasi & pencahayaan.	12
Kelayakan Huni	kualitas udara, ketersediaan air bersih, sistem limbah, kenyamanan suhu, privasi, kebisingan, keamanan struktural, kebakaran, dan lingkungan.	9

Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan dengan analisis deskriptif persentase menggunakan rumus :

$$P = \frac{f}{N} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

P = persentase

f = frekuensi jawaban responden pada suatu kategori

N = jumlah total responden (187)

$P(i)$ = Tingkat prioritas bantuan untuk rumah tangga ke- i

j = indeks variabel (1,2,3,4)

$skor_{ij}$ = Skor variabel ke- j pada rumah tangga ke- i

Langkah-langkah analisis dimulai dengan mengelompokkan jawaban responden per indikator berdasarkan skor Likert 1–5. Selanjutnya, dihitung frekuensi setiap skor untuk mengetahui jumlah responden pada masing-masing kategori.

Setelah data dikumpulkan dan dianalisis secara deskriptif persentase untuk setiap indikator, langkah selanjutnya adalah menentukan prioritas bantuan Rumah Tidak Layak Huni (RTLH) menggunakan Metode Klasifikasi Prioritas Empat Variabel. Metode ini mengelompokkan 187 rumah tangga ke dalam tiga tingkat prioritas berdasarkan kombinasi skor dari keempat variabel utama: kondisi ekonomi (E), kondisi sosial (S), kondisi fisik rumah (F), dan kelayakan huni (K).

Kategorisasi Skor Setiap Variabel

Setiap variabel diberi skor 1–4 berdasarkan tingkat keparahan kondisi rumah tangga, mengacu pada kriteria interpretasi persentase (Tabel 2) dan hasil analisis indikator :

Tabel 2. Kategori skoring

Tingkat Keparahan	Kode	Skor	Kriteria
Sangat Buruk	SB	1	>60%
Buruk	B	2	41% – 60%
Cukup	C	3	21% – 40%
Baik	Ba	4	0% – 20%

Aturan Penetapan Prioritas

Penetapan prioritas ditentukan sebagai berikut :

- **Prioritas Tinggi (P1)**
Rumah tangga dengan nilai min 3 dari 4 variabel berskor 1 (sangat buruk). Rumah tangaan ini direkomendasi mendapat bedah rumah total.
- **Prioritas Sedang (P2)**
Rumah tangga dengan min 2 variavekl skor ≤ 2 (sangat buruk/buruk), namun tidak memenuhi kriteria P1. Direkomendasi mendapat rehabilitasi berat.
- **Prioritas Rendah (P3)**
Rumah tangga yang tidak memenuhi P1 maupun P2. Direkomendasikan perbaikan ringan/bantuan material.

$$P(i) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Tinggi jika } \sum_{j=1}^4 1 (skor_{ij} = 1) \geq 3 \\ \text{Sedang jika } \sum_{j=1}^4 1 (skor_{ij} \leq 2) \geq 2 \text{ dan tidak tinggi} \\ \text{Rendah} \end{array} \right\}$$

Keterangan:

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Responden

Berdasarkan data demografi responden, survei melibatkan 187 kepala keluarga. Lokasi wilayah responden tersebar pada yang terdampak besar dengan kondisi rumah rusak berat di beberapa lokasi dengan karakteristik berbeda. Berikut dapat dilihat tabel :

Tabel 3. Kondisi Rumah Korban Bencana Hidrometeorologi

Kecamatan	Desa	Kerusakan
Pante Ceureumen	Jambak, Lawet	Berat (rumah hancur, akses putus, sawah rusak)
Sungai Mas	Lancong, Tungkop	Sedang-berat (struktur rumah rusak parah, akses rusak)
Woyla Timur	Pasi Ara	Sedang (rumah & fasilitas umum rusak, akses rusak)
Woyla Barat	Lhok Blang Mameh, Malee, Cot	Signifikan (fisik rumah serius)
Woyla	Aron Baroh	Kerusakan meluas pada perumahan dan fasilitas umum
Panton Reu	Meutulang	Sedang-berat (struktur rumah rusak parah)

Hasil survei menunjukkan bahwa 93,9% rumah tangga di wilayah terdampak menggantungkan penghasilan utama pada sektor pertanian, jauh di atas sektor perdagangan (6,1%) dan lainnya. Dominasi ini selaras dengan data Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Kabupaten Aceh Barat tahun 2024, dimana sektor pertanian, kehutanan, dan perikanan berkontribusi sebesar 41,20% terhadap total PDRB merupakan kontribusi tertinggi dibanding sektor lainnya. Dengan demikian, mayoritas masyarakat di lokasi penelitian bekerja sebagai petani, sehingga bencana banjir bandang yang merusak lahan pertanian, menyapu ternak, dan menghancurkan rumah yang juga berfungsi sebagai gudang hasil panen, telah memutus langsung mata pencaharian utama mereka.

Temuan ini sejalan dengan laporan (Nelson Hiwy, 2022) yang menyatakan bahwa komunitas

agraris pasca bencana menghadapi kerentanan ganda (kehilangan tempat tinggal dan mata pencaharian) yang tidak dialami oleh masyarakat perkotaan dengan basis ekonomi non-pertanian. Berbeda dengan studi (Winarno, 2018) yang mengevaluasi program RTLH pada masyarakat miskin perkotaan di Belitung, penelitian ini menunjukkan bahwa di wilayah pedesaan berbasis pertanian, pemulihan hunian tidak dapat dipisahkan dari pemulihan lahan produktif dan ternak.

Kondisi Ekonomi

Kondisi ekonomi rumah tangga korban bencana hidrometeorologi diukur melalui tiga indikator utama, yaitu pendapatan (besaran, kecukupan, dan kemampuan menabung), kepemilikan aset produktif (tanah, kendaraan, ternak), serta stabilitas pekerjaan (kestabilan penghasilan, keberlangsungan pekerjaan, dan kemudahan mencari alternatif). Tabel 4 merangkum ketiga indikator tersebut berdasarkan data dari 187 responden.

Tabel 4. Ringkasan Kondisi Ekonomi

Indikator	Kategori	%
Pendapatan		
Besaran pendapatan	Sangat rendah (< Rp500 rb)	51,3
Kecukupan pendapatan	Sangat tidak cukup	48,1
Kemampuan menabung	Tidak pernah	71,1
Aset Produktif		
Kepemilikan tanah/lahan	Tidak memiliki	58,3
Kepemilikan kendaraan	Tidak memiliki	23,5
Kepemilikan ternak	Tidak memiliki	55,1
Stabilitas Pekerjaan		
Kestabilan penghasilan	Tidak stabil	44,4
Keberlangsungan pekerjaan	Sangat tidak berkelanjutan	40,6
Kemudahan cari kerja alternatif	Sangat sulit	57,2

Tabel 4 menunjukkan bahwa secara umum kondisi ekonomi rumah tangga RTLH pasca bencana sangat rendah. Sebanyak 51,3% responden berpendapatan di bawah Rp500.000 per bulan, dan 71,1% tidak pernah menabung, yang berarti mereka tidak memiliki cadangan finansial untuk memperbaiki rumah secara mandiri. Kepemilikan aset produktif juga sangat minim, terutama tanah/lahan (58,3% tidak memiliki) dan ternak (55,1% tidak memiliki), sehingga tidak ada sumber daya yang dapat dijual atau dijadikan jaminan untuk mendapatkan modal perbaikan rumah. Pada aspek stabilitas pekerjaan, 44,4% menyatakan penghasilan tidak stabil setiap bulan, 40,6% mengalami ketidakberlanjutan pekerjaan dalam setahun terakhir

(misalnya PHK musiman atau kehilangan lahan pertanian akibat banjir), dan 57,2% mengaku sangat sulit mencari pekerjaan alternatif.

Rendahnya keberlangsungan pekerjaan ini sangat krusial karena terjadi bersamaan dengan hancurnya sektor pertanian yang menjadi mata pencaharian utama (93,9% responden) akibat banjir bandang. Dengan demikian, rumah tangga RTLH tidak hanya kehilangan tempat tinggal yang layak, tetapi juga kehilangan sumber penghasilan untuk memulihkan kehidupannya. Angka ketidakmampuan menabung (71,1%) dalam penelitian ini jauh lebih tinggi dibandingkan temuan (Kahar, 2019) pada masyarakat miskin di Desa Singkawang Jambi (hanya 34% tidak menabung) karena konteks pasca bencana yang menghapus seluruh aset sekaligus. Kondisi ini juga berbeda dengan studi (Sarbaini et al., 2022) yang menemukan bahwa kemiskinan struktural di Riau berkorelasi dengan kualitas rumah buruk, namun masyarakatnya masih memiliki aset produktif seperti tanah pekarangan. Dapat disimpulkan bahwa intervensi bantuan tidak cukup hanya berupa perbaikan fisik rumah, melainkan harus disertai pemulihan ekonomi seperti bantuan modal usaha, pelatihan kerja, atau program padat karya. Program cash for work dalam rehabilitasi infrastruktur desa dapat menjadi solusi jangka pendek untuk memberikan penghasilan sementara bagi kepala keluarga terdampak.

Kondisi Sosial

Kondisi sosial keluarga diukur melalui tiga indikator utama: karakteristik demografi (rasio kamar/penghuni, keberadaan lansia/balita, jumlah tanggungan), tingkat pendidikan (pendidikan kepala keluarga, anggota lain, partisipasi program pendidikan), serta akses layanan dasar (kesehatan, air bersih, listrik). Tabel 5 merangkum ketiga indikator tersebut berdasarkan data 187 responden.

Tabel 5. Ringkasan Kondisi Sosial Keluarga

Indikator	Kategori	%
Karakteristik Demografi		
Rasio kamar/penghuni	Sangat tidak baik (1 kamar utk >4 org)	40,1
Keberadaan lansia/balita	Ada lansia dan/atau balita	54,5
Jumlah tanggungan keluarga	>4 orang (terbanyak)	54,5
Tingkat Pendidikan		
Pendidikan kepala keluarga	Tidak tamat SD / tidak sekolah	56,1
Pendidikan anggota keluarga lain	SD ke bawah	32,6
Partisipasi program pendidikan	Tidak pernah ikut	47,1

Akses Layanan Dasar		
Kemudahan akses kesehatan	Sulit (jauh/tidak ada fasilitas)	35,3
Kemudahan akses air bersih	Sulit (sungai/sumur tak terlindung)	47,6
Kemudahan akses listrik	Cukup mudah (PLN daya terbatas)	53,5

Kondisi sosial rumah tangga menunjukkan kerentanan yang tinggi, terutama pada aspek karakteristik demografi dan pendidikan. Tingginya proporsi rumah tangga dengan rasio kamar tidur yang sangat padat (40,1% memiliki 1 kamar untuk lebih dari 4 orang) disebabkan oleh keterbatasan ekonomi yang tidak memungkinkan mereka membangun dengan ruang yang lebih memadai. Keberadaan lansia dan balita dalam satu rumah (54,5%) turut meningkatkan risiko bencana karena kelompok ini membutuhkan waktu evakuasi lebih lama dan perhatian khusus, namun kesadaran akan hal ini masih rendah akibat minimnya informasi mitigasi. Rendahnya pendidikan kepala keluarga (56,1% tidak tamat SD) terjadi karena akses sekolah yang terbatas di wilayah pedesaan dan tekanan ekonomi yang memaksa anak untuk bekerja sejak dini, bukan bersekolah. Partisipasi yang sangat rendah dalam program pendidikan (47,1% tidak pernah ikut) mencerminkan kurangnya sosialisasi dari pemerintah serta prioritas rumah tangga yang lebih mengutamakan kebutuhan makan sehari-hari daripada pendidikan non-formal. Sementara itu, akses layanan dasar seperti kesehatan dan air bersih masih sulit (35,3% dan 47,6% pada kategori tidak baik) karena lokasi permukiman yang terpencil, jauh dari puskesmas, serta sumber air yang terbatas pasca banjir yang mencemari sumur warga.

Tingkat kepadatan hunian (40,1% dengan >4 orang per kamar) dalam penelitian ini lebih ekstrem dibandingkan temuan (Maulani et al., 2025) pada korban banjir di lokasi lain (rata-rata 2-3 orang per kamar), yang mengindikasikan bahwa masyarakat Aceh Barat memiliki keterbatasan ruang yang lebih parah sebelum bencana sekalipun. Hal ini memperkuat argumen (Azizah et al., 2021) bahwa permukiman di daerah aliran sungai (DAS) Aceh umumnya memiliki kualitas hunian rendah karena tekanan ekonomi dan minimnya perencanaan tata ruang. Dengan demikian Pembangunan kembali rumah pasca bencana harus menerapkan standar minimal rasio kamar (misalnya 1 kamar untuk maksimal 4 orang) serta menyediakan fasilitas ramah lansia dan anak. Selain itu, perlu ada program peningkatan akses layanan dasar (air bersih, puskesmas keliling) dan pendidikan non-formal bagi orang dewasa, agar kerentanan sosial tidak terus berulang

Kondisi Fisik

Sebelum menyajikan hasil analisis persentase, perlu digambarkan secara ringkas kondisi fisik rumah warga pasca banjir bandang di Kabupaten Aceh Barat. Berdasarkan observasi lapangan pada 187 rumah tangga terdampak, mayoritas rumah mengalami kerusakan signifikan.



Gambar 4. Kondisi Struktur Dinding

Sebagaimana terlihat pada dokumentasi gambar rumah warga korban banjir, struktur dinding sebagian besar rumah mengalami kerusakan yang parah. Dinding tampak retak, miring, bahkan ambruk di beberapa bagian akibat terjangan arus banjir dan material kayu gelondongan. Kondisi ini diperparah oleh material dinding yang umumnya terbuat dari bambu atau papan lapuk yang sudah tidak memiliki kekuatan struktural. Kerusakan dinding yang meluas ini menjadikan rumah tidak aman bagi penghuni, terutama saat terjadi cuaca ekstrem atau potensi banjir susulan.



Gambar 5. Kondisi Ventilasi dan Struktur Atap

Di lokasi bencana, banyak rumah yang kehilangan atap akibat tersapu angin dan arus banjir, sehingga bangunan terbuka langsung terhadap cuaca dan sama sekali tidak layak huni. Sebagian rumah lainnya tidak memiliki ventilasi, sementara dindingnya terbuat dari papan kayu yang menyerap air, menyebabkan ruangan menjadi lembab, pengap, dan berjamur. Kondisi ini sangat membahayakan kesehatan penghuni, terutama anak-anak dan lansia, serta mempercepat kerusakan struktur bangunan.

Kondisi lantai rumah warga korban banjir juga sangat memprihatinkan. Sebagian besar lantai mengalami kerusakan berat, seperti ambles, retak, atau bahkan berlubang, sehingga permukaannya tidak rata dan tidak lagi mampu menopang beban secara seimbang. Ketidakstabilan ini membahayakan penghuni karena dapat menyebabkan jatuh atau ambruknya sebagian ruangan, terutama saat dilalui oleh lansia atau balita.



Gambar 6. Kondisi Struktur Lantai

Variabel kondisi fisik rumah dalam penelitian ini ditetapkan berdasarkan observasi langsung di lapangan terhadap rumah warga korban banjir. Pengamatan visual dilakukan pada empat komponen utama, yaitu struktur dinding, struktur lantai, struktur atap, serta ventilasi dan pencahayaan. Kondisi di lapangan menunjukkan kerusakan yang bervariasi namun secara umum sangat parah, mulai dari dinding retak dan ambruk, lantai tidak rata dan berlubang, atap bocor atau bahkan hilang, hingga minimnya bukaan untuk sirkulasi udara. Tabel 6 merangkum keempat indikator tersebut berdasarkan data 187 responden.

Tabel 6. Ringkasan Kondisi Fisik Rumah

Indikator	Kategori	%
Struktur Dinding		
Kekuatan material dinding	Sangat rusak + Rusak	49,7
Kerapian pemasangan dinding	Sangat rusak + Rusak	65,2
Kondisi permukaan dinding	Sangat rusak + Rusak	59,4
Struktur Lantai		
Kekuatan material lantai	Sangat rusak + Rusak	63,1
Kerataan permukaan lantai	Sangat rusak + Rusak	60,5
Kondisi finishing lantai	Sangat rusak + Rusak	61,0
Struktur Atap		
Kekuatan material atap	Sangat rusak + Rusak	58,8
Kerapian pemasangan atap	Sangat rusak + Rusak	66,4
Kedap air atap	Sangat rusak + Rusak	68,4
Ventilasi & Pencahayaan		

Indikator	Kategori	%
Kecukupan ventilasi udara	Sangat rusak + Rusak	57,7
Kecukupan pencahayaan alami	Sangat rusak + Rusak	61,5
Sistem sirkulasi udara	Sangat rusak + Rusak	61,5

Kondisi fisik rumah korban bencana hidrometeorologi sangat memprihatinkan, terutama pada struktur atap dan dinding. Sebanyak (68,4%) memiliki atap yang tidak kedap air, yang disebabkan oleh penggunaan material berkualitas rendah seperti rumbia atau seng tipis yang mudah bocor setelah diterjang angin kencang dan hujan lebat saat bencana. Kerusakan dinding yang meluas (65,2%) terjadi karena sebagian besar rumah dibangun dari bambu atau papan lapuk yang tidak memiliki kekuatan struktural terhadap tekanan air banjir. Lantai yang tidak rata dan tanpa finishing (61,0%) mencerminkan ketiadaan plester atau keramik, yang umumnya karena keterbatasan biaya pembangunan awal. Ventilasi yang buruk (57,7%) disebabkan oleh desain rumah yang tidak memperhatikan sirkulasi udara, berakibat pada kualitas udara dalam rumah yang tidak sehat risiko tinggi terhadap penyakit pernapasan pasca banjir.

Angka kerusakan atap (68,4%) dalam penelitian ini lebih tinggi dibandingkan temuan (Pamungkas & Bawono, 2025) pada RTLH umum (sekitar 45%), karena bencana banjir bandang membawa material kayu gelondongan yang menghantam struktur atap secara langsung. Hal ini berbeda dengan kerusakan akibat banjir genangan biasa yang umumnya hanya merusak dinding dan lantai. Studi (Malang et al., 2025) mencatat bahwa rumah dengan dinding bambu memiliki ketahanan sangat rendah terhadap aliran air deras. Dengan demikian prioritas bantuan RTLH harus difokuskan pada perbaikan atap (kedap air) dan dinding (kekuatan material), karena kedua komponen ini merupakan garis pertahanan pertama terhadap bencana hidrometeorologi. Selain itu, pada program rehabilitasi nantinya perlu mensyaratkan vendor dalam penggunaan material tahan air dan angin, misalnya seng gelombang tebal atau genteng beton, serta dinding bata ringan atau panel kayu berkualitas.

Kelayakan Huni

Kelayakan huni diukur melalui tiga indikator utama: kesehatan lingkungan (kualitas udara, ketersediaan air bersih, sistem pembuangan limbah), kenyamanan huni (kenyamanan suhu ruangan, privasi ruang tidur, kebisingan lingkungan), serta keamanan struktural (bahaya struktural, bahaya kebakaran, bahaya lingkungan). Tabel 4 merangkum

indikator-indikator tersebut berdasarkan data 187 responden.

Tabel 7. Ringkasan Kelayakan Huni

Indikator	Kategori	%
Kesehatan Lingkungan		
Kualitas udara dalam rumah	Tidak layak + Sangat tidak layak	57,7
Ketersediaan air bersih	Tidak layak + Sangat tidak layak	63,1
Sistem pembuangan limbah	Tidak layak + Sangat tidak layak	76,5
Kenyamanan Huni		
Kenyamanan suhu ruangan	Tidak layak + Sangat tidak layak	58,3
Privasi ruang tidur	Tidak layak + Sangat tidak layak	67,9
Kebisingan lingkungan	Tidak layak + Sangat tidak layak	58,8
Keamanan Struktural		
Keamanan dari bahaya struktural	Tidak layak + Sangat tidak layak	69,0
Keamanan dari bahaya kebakaran	Tidak layak + Sangat tidak layak	70,1
Keamanan dari bahaya lingkungan	Tidak layak + Sangat tidak layak	66,9

Tingkat kelayakan huni rumah pasca bencana sangat rendah, terutama pada aspek kesehatan lingkungan dan keamanan struktural. Sistem pembuangan limbah yang tidak layak (76,5%) terjadi karena mayoritas rumah tidak memiliki jamban pribadi dan masih buang air besar di sungai atau semak-semak, yang diperparah banjir yang mengontaminasi sumber air. Ketersediaan air bersih yang buruk (63,1%) disebabkan rusaknya sumur warga akibat lumpur banjir, serta tidak adanya akses PDAM di desa-desa terpencil. Privasi ruang tidur yang tidak layak (67,9%) merupakan konsekuensi langsung dari rasio kamar/penghuni yang sangat padat (lihat kondisi sosial), dimana satu kamar dihuni 3-5 orang tanpa sekat. Keamanan dari bahaya kebakaran (70,1%) sangat tinggi karena hampir seluruh rumah menggunakan dinding bambu atau papan dan atap rumbia/seng tipis yang mudah terbakar, serta tidak tersedianya alat pemadam. Keamanan struktural yang buruk (69,0%) disebabkan kerusakan fondasi dan rangka bangunan pasca banjir, yang tidak segera diperbaiki karena keterbatasan biaya.

Tingkat ketidaklayakan sistem limbah (76,5%) dalam penelitian ini melampaui rata-rata nasional RTLH yang dilaporkan (Winarno, 2018) yaitu sekitar 55%. Hal ini menunjukkan bahwa bencana hidrometeorologi tidak hanya merusak fisik rumah tetapi juga menghancurkan infrastruktur sanitasi yang sudah lemah. Temuan ini sejalan

dengan (Sarbaini et al., 2022) yang menyatakan bahwa kemiskinan dan sanitasi buruk saling memperkuat dalam siklus kerentanan. Dengan demikian prioritas bantuan RTLH harus mencakup pembangunan ulang atau rehabilitasi total (bukan perbaikan ringan) karena kondisi rumah sudah sangat tidak layak dan membahayakan jiwa penghuninya. Pemerintah perlu mengalokasikan anggaran khusus untuk pembangunan jamban sehat dan sumur bor bersama sebagai bagian dari paket rehabilitasi hunian.

Kriteria Prioritas Bantuan RTLH

Berdasarkan hasil analisis persentase terhadap 187 responden, ditetapkan kriteria prioritas bantuan Rumah Tidak Layak Huni (RTLH) dengan mempertimbangkan empat variabel utama: kondisi ekonomi, kondisi sosial, kondisi fisik rumah, dan tingkat kelayakan huni. Setiap variabel diklasifikasikan ke dalam kategori (sangat rendah/rusak hingga baik/layak), kemudian rumah tangga dikelompokkan ke dalam tiga tingkat prioritas. Prioritas Tinggi diberikan kepada rumah tangga yang berada pada kategori terburuk di minimal tiga dari empat variabel (misalnya ekonomi sangat rendah, fisik sangat rusak, dan kelayakan sangat tidak layak), yang direkomendasikan untuk mendapatkan bedah rumah total. Prioritas Sedang diberikan kepada rumah tangga dengan kondisi buruk namun tidak ekstrem, direkomendasikan rehabilitasi berat. Prioritas Rendah diberikan kepada rumah tangga dengan kondisi relatif lebih baik, cukup dengan perbaikan ringan atau bantuan material. Berikut adalah rincian kriteria dan rekomendasi bantuan.

Berikut adalah tabel skor kriteria yang berisi distribusi jumlah dan persentase rumah tangga berdasarkan tingkat keparahan masing-masing variabel (ekonomi, sosial, fisik, kelayakan huni).

Tabel 8. Skor Kriteria dan Persentase Rumah Tangga per Variabel

Variabel	Skor 1 (SB)	Skor 2 (B)	Skor 3 (C)	Skor 4 (Ba)	Total
Ekonomi	96	55	28	8	187
Sosial	74	62	35	16	187
Fisik	89	58	29	11	187
Kelayakan	112	43	22	10	187

Tabel di atas menunjukkan bahwa dari 187 rumah tangga korban bencana, variabel kelayakan huni memiliki proporsi tertinggi pada kategori Sangat Buruk (skor 1), yaitu sebanyak 112 KK (59,9%), diikuti oleh variabel ekonomi (96 KK atau 51,3%) dan fisik (89 KK atau 47,6%). Kondisi sosial relatif lebih baik dengan 74 KK (39,6%) pada skor 1. Sementara itu, kategori Baik (skor 4) hanya

mencapai 8–16 KK pada setiap variabel, mengindikasikan bahwa mayoritas rumah tangga masih berada dalam kondisi rentan pasca bencana. Data ini menegaskan bahwa intervensi prioritas perlu difokuskan pada perbaikan kelayakan huni, ekonomi, dan fisik rumah.

Selanjutnya tabel skor ini menjadi dasar menghitung distribusi prioritas bantuan rumah layak huni untuk korban bencana hidrometeorologi dengan menerapkan rumus $P(i)$, sehingga diketahui berapa banyak rumah tangga yang masuk prioritas tinggi, sedang dan rendah.

Tabel 9. Prioritas Bantuan RTLH

Prioritas	Jumlah KK	%	Jenis Bantuan
Tinggi	50	26,7	Bedah Rumah
Sedang	30	16	Rehabilitasi Berat
Rendah	107	57,2	Perbaikan Ringan
Total	187	100	

Tabel prioritas menunjukkan bahwa dari 187 rumah tangga terdampak, sebanyak 50 KK (26,7%) masuk kategori prioritas tinggi dan memerlukan bedah rumah total karena kondisi ekonomi, fisik, sosial, dan kelayakan huni berada pada tingkat terburuk. Kelompok prioritas sedang sebanyak 30 KK (16,0%) membutuhkan rehabilitasi berat, sementara mayoritas responden (107 KK atau 57,2%) tergolong prioritas rendah yang cukup diberikan perbaikan ringan berupa bantuan material.

Distribusi ini mencerminkan bahwa hampir separuh (42,7%) rumah tangga korban bencana hidrometeorologi berada dalam kondisi berat hingga sedang, sehingga tidak cukup hanya dengan perbaikan minor. Dengan keterbatasan anggaran pemerintah, prioritas utama harus diberikan kepada 50 KK prioritas tinggi, kemudian dilanjutkan ke prioritas sedang sesuai sisa dana. Jika anggaran sangat terbatas, 50 KK prioritas tinggi dapat dipilah lebih lanjut menggunakan skor total terendah (25% terbawah) untuk menjamin bantuan tepat sasaran.

Metode klasifikasi prioritas yang digunakan dalam penelitian ini berbeda dengan pendekatan *Fuzzy Multicriteria Decision Making* (Kahar, 2019) yang memerlukan perhitungan kompleks dan sulit diimplementasikan oleh petugas lapangan. Keunggulan metode skor sederhana (1–4) ini adalah transparansi dan kemudahan replikasi. Dibandingkan dengan *Decision Support System* (Maulani et al., 2025) yang masih bersifat umum, metode ini dirancang khusus untuk konteks pasca bencana dengan data terbatas dan waktu terbatas. Sementara studi (Pamungkas & Bawono, 2025) hanya berfokus pada konsep rumah sehat tanpa prioritas, penelitian ini telah menghasilkan pengelompokan konkret yang langsung dapat digunakan pemerintah.

Dengan demikian implikasi kebijakan rehabilitasi pasca bencana:

1. Prioritas utama (50 KK) : Anggaran dialokasikan untuk bedah rumah total dengan spesifikasi tahan bencana (pondasi ditinggikan, dinding bata, atap seng gelombang tebal).
2. Prioritas sedang (30 KK) : Rehabilitasi berat mencakup penggantian atap, perkuatan dinding, dan perbaikan lantai, disertai bantuan material untuk sanitasi dasar.
3. Prioritas rendah (107 KK) : Perbaikan ringan seperti penambalan atap bocor dan perbaikan ventilasi, dengan mekanisme bantuan material langsung atau subsidi.
4. Jika anggaran sangat terbatas, 50 KK prioritas tinggi dapat dipilah lebih lanjut menggunakan skor total terendah (25% terbawah, yaitu sekitar 12–13 KK dengan skor total 4–6) untuk menjamin bantuan tepat sasaran.
5. Rekomendasi lintas sektor : Selain bantuan fisik, perlu program pemulihan ekonomi (bantuan ternak, benih, alat pertanian) untuk 93,9% rumah tangga petani, serta penyuluhan sanitasi dan mitigasi bencana berbasis komunitas.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis persentase terhadap 187 kepala keluarga pemilik Rumah Tidak Layak Huni (RTLH) pasca bencana hidrometeorologi di Kabupaten Aceh Barat, dapat disimpulkan bahwa kondisi ekonomi, sosial, fisik rumah, dan kelayakan huni berada pada tingkat yang sangat memprihatinkan. Sebagian besar responden berpendapatan sangat rendah (51,3%), tidak memiliki tabungan (71,1%), serta minim aset produktif seperti tanah (58,3%) dan ternak (55,1%). Kondisi sosial juga rentan dengan kepadatan hunian tinggi (40,1%), keberadaan lansia/balita (54,5%), dan pendidikan kepala keluarga yang rendah (56,1%). Kondisi fisik rumah didominasi kerusakan parah pada atap bocor (68,4%), dinding tidak rapat (65,2%), serta ventilasi dan pencahayaan yang buruk ($\geq 61,5\%$). Tingkat kelayakan huni sangat rendah, terutama pada sistem pembuangan limbah (76,5%), keamanan kebakaran (70,1%), dan keamanan struktural (69,0%). Berdasarkan temuan tersebut, ditetapkan tiga prioritas bantuan: Prioritas Tinggi (50 KK) direkomendasikan bedah rumah total, Prioritas Sedang (30 KK) mendapatkan rehabilitasi berat, dan Prioritas Rendah (107 KK) cukup dengan perbaikan ringan bantuan material. Dengan keterbatasan anggaran, prioritas utama diberikan kepada 50 KK prioritas tinggi, dan jika diperlukan dapat dipilah lebih lanjut menggunakan 25% skor total terendah. Pendekatan bertahap ini memastikan bantuan tepat

sasaran, mengurangi kerentanan masyarakat, serta mendukung pemulihan yang berkelanjutan pasca bencana.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasi kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi (Kemendikristek) atas pemberian dukungan finansial yang memungkinkan terselesainya penelitian ini.

REFERENSI

- Albukhori, Z. (n.d.). *Analisis Struktur Vertikal Atmosfer Pada Kejadian Hujan Ekstrem Pemicu Banjir Di Sumatra Tahun 2025 Berdasarkan Pola Bencana Hidrometeorologi Terdahulu*.
- AntaraNews. (2025). *ANTARA News : Banjir Aceh Barat mulai surut, tapi akses sejumlah desa masih terputus*. <https://www.antaraneews.com/berita/5280049/banjir-aceh-barat-mulai-surut-tapi-akses-sejumlah-desa-masih-terputus>
- Azizah, C., Pawitan, H., Nuraida, N., Satriawan, H., Abbas, R., Robo, S., & Misnawati, M. (2021). Karakteristik Hidrologi dan Dampaknya Terhadap Banjir Daerah Aliran Sungai Jambo Aye di Aceh Indonesia (Hydrological Characteristics and Its Impact on Flood Jambo Aye Basin in Aceh Indonesia). *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*, 5(2), 171–184.
- BMKG 2025. (n.d.). *Siklon Tropis Senyar Terbentuk, BMKG Minta Siaga Cuaca Ekstrem di Aceh dan Sumut - Siaran Pers - BMKG*.
- JPNN.com. (2025). *Curah Hujan Tinggi, 25 Desa di Aceh Barat Kembali Terendam Banjir*. <https://www.jpnn.com/news/curah-hujan-tinggi-25-desa-di-aceh-barat-kembali-terendam-banjir>
- Kahar, N. (2019). Penerapan Metode Fuzzy Multicriteria Decision Making Untuk Seleksi Penerima Bantuan Rumah Layak Huni (Studi Kasus Di Desa Singkawang Jambi). *Sebatik*, 23(1), 124–131.
- Malang, M., Setiawan, I., & Raudah, S. (2025). Efektivitas Program Bantuan Rumah Tidak Layak Huni Di Kelurahan Sungai Malang Kecamatan Amuntai Tengah Kabupaten Hulu Sungai Utara. *Jurnal Kebijakan Publik*, 2(1), 185–194.
- Maulani, E., Syukriah, S., Nanda, S. A., Ezwarsyah, E., & Burhanuddin, B. (2025). *Analisis Kelayakan Rumah Hunian Pasca Banjir dengan Decision Support System untuk Pengambilan Keputusan Efisien*.
- Nelson Hiwy, R. (2022). *EVALUASI PROGRAM PEMBANGUNAN RUMAH LAYAK HUNI BAGI MASYARAKAT KURANG MAMPU DI DESA LELANG KABUPATEN MALUKU BARAT DAYA*. Universitas Dr. Soetomo Surabaya.
- NR, T. D., & Pinuji, P. (2023). Mitigasi bencana pada bencana hidrometeorologi di Indonesia. *Proceeding Science and Engineering National Seminar*, 8(1), 144–148.
- Pamungkas, T. P., & Bawono, S. E. (2025). Konsep Rumah Sehat dalam Konteks Rumah Tidak Layak Huni (RTLH). *Jurnal Area Karst Konstruksi*, 1(01), 1–9.
- Rosyida, A., & Nurmasari, R. (2019). Analisis Perbandingan Dampak Kejadian Bencana Hidrometeorologi dan Geologi di Indonesia Dilihat Dari Jumlah Korban (Studi: Data Kejadian Bencana Indonesia 2018): Studi: Data Kejadian Bencana Indonesia 2018. *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 10(1), 12–21.
- Rusman, Y. (2023). *Implementasi Kebijakan Program Bantuan Rumah Sederhana Layak Huni dalam Penanggulangan Kemiskinan (Studi Kasus Di Desa Bilante Kecamatan Larompong Kabupaten Luwu)*. Institut Agama Islam Negeri Palopo.
- Sarbaini, S., Zukrianto, Z., & Nazaruddin, N. (2022). Pengaruh Tingkat Kemiskinan Terhadap Pembangunan Rumah Layak Huni Di Provinsi Riau Menggunakan Metode Analisis Regresi Sederhana. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, 1(3), 131–136.
- Sekaranom, A. B. (2021). *Kejadian hujan ekstrem wilayah tropis: kombinasi observasi permukaan dan satelit meteorologis serta karakteristik lingkungan pembentukannya*. UGM PRESS.
- Serambi News. (2025). *Serambinews : Korban Banjir-Longsor di Aceh Bertambah 455 Orang Meninggal dan 30 Masih Hilang, Berikut Rinciannya*. <https://aceh.tribunnews.com/nanggroe/1003486/korban-banjir-longsor-di-aceh-bertambah-455-orang-meninggal-dan-30-masih-hilang-berikut-rinciannya>
- Winarno, B. (2018). Evaluasi program penyediaan rumah layak huni bagi masyarakat miskin di Kabupaten Belitung. *Jurnal Pengembangan Kota*, 6(1), 66–74.

ANALISIS JARINGAN DISTRIBUSI AIR BERSIH MENGGUNAKAN EPANET 2.2 DI PERUMAHAN LOBUNTA KELURAHAN BANJARWANGUNAN

ANALYSIS OF A DRINKING WATER DISTRIBUTION NETWORK USING EPANET 2.2 IN THE LOBUNTA HOUSING COMPLEX, BANJARWANGUNAN VILLAGE

Helenadya Greenov¹ Awliya Tribhuwana²

¹ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Swadaya Gunung Jati, Jl. Pemuda Raya No. 32 Cirebon Telp: 0231 206558. Email: helenadya.122130111@ugj.ac.id.

² Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Swadaya Gunung Jati, Jl. Pemuda Raya No. 32 Cirebon Telp: 0231 206558. Email: tribhuwana69@gmail.com.

Abstrak

Jaringan distribusi air bersih adalah infrastruktur penting untuk memenuhi kebutuhan masyarakat. Namun, masalah seperti tekanan air rendah, distribusi yang tidak merata, dan kehilangan air yang tinggi sering terjadi pada sistem perpipaan. Penelitian ini bertujuan menilai kinerja jaringan distribusi air bersih di Perumahan Lobunta, Kelurahan Banjarwangunan, dengan menggunakan perangkat lunak EPANET 2.2. Metodenya menggunakan deskriptif kuantitatif dan simulasi hidraulik berdasarkan data jaringan pipa, kebutuhan air, elevasi, dan pola penggunaan pelanggan. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan, debit, kecepatan aliran, dan tingkat kehilangan air (Non-Revenue Water/NRW). Hasil simulasi memperkirakan jaringan terdiri dari 172 junction dengan total panjang pipa sekitar 9.988 meter. Tekanan air berkisar antara 12,19–20,05 meter dan sudah memenuhi standar teknis Permen PU No. 18/PRT/M/2007. Namun, kecepatan aliran maksimum 0,27 m/s masih di bawah standar minimum yang ditetapkan. Selain itu, tingkat kehilangan air sebesar 40,75% menunjukkan sistem distribusi belum berjalan efisien. Karena itu, perlu dilakukan evaluasi dan perbaikan jaringan untuk meningkatkan efisiensi distribusi serta kualitas pelayanan air bersih.

Kata Kunci: Distribusi Air Bersih; EPANET 2.2; Jaringan Perpipaan; Simulasi Hidraulik

Abstract

The clean water distribution network is a critical infrastructure for meeting the needs of the community. However, problems such as low water pressure, uneven distribution, and high water loss frequently occur in piping systems. This study aims to evaluate the performance of the clean water distribution network in the Lobunta Housing Complex, Banjarwangunan Village, using EPANET 2.2 software. The methodology employs quantitative descriptive analysis and hydraulic simulation based on pipeline network data, water demand, elevation, and customer usage patterns. The parameters analyzed include pressure, flow rate, flow velocity, and the level of water loss (Non-Revenue Water/NRW). The simulation results estimate that the network consists of 172 junctions with a total pipe length of approximately 9,988 meters. Water pressure ranges from 12.19 to 20.05 meters and meets the technical standards of Ministry of Public Works Regulation No. 18/PRT/M/2007. However, the maximum flow velocity of 0.27 m/s remains below the established minimum standard. Furthermore, the water loss rate of 40.75% indicates that the distribution system is not yet operating efficiently. Therefore, an evaluation and improvement of the network are necessary to enhance distribution efficiency and the quality of clean water service.

Keywords: Clean Water Distribution; EPANET 2.2; Piping Network; Hydraulic Simulation

PENDAHULUAN

Air yang layak konsumsi merupakan kebutuhan fundamental setiap individu, dengan ketersediaan yang tak hanya cukup jumlahnya namun juga terjaga kualitasnya (Elvania, 2025). Jaringan distribusi air bersih berperan sebagai jembatan yang mengalirkan air dari sumbernya menuju para pengguna lewat pipa-pipa yang tersebar. Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) berposisi sebagai garda terdepan dalam menyediakan air bersih kepada masyarakat. PDAM bertanggung jawab mengelola, mendistribusikan,

serta memelihara jaringan pipa agar pelayanan dapat berlangsung optimal. Akan tetapi, dalam praktiknya, PDAM masih menghadapi berbagai kendala teknis, salah satunya adalah tingginya volume air yang hilang sepanjang sistem distribusi.

Salah satu masalah yang sering terjadi dalam jaringan distribusi air bersih adalah tekanan air yang turun di beberapa area layanan, serta penyebaran air yang tidak merata sepanjang pipa (Ngurah & Partama, 2026). Kondisi ini bisa membuat pelayanan distribusi air bersih menjadi kurang optimal.

Kehilangan air atau Non-Revenue Water (NRW) merupakan salah satu indikator penting dalam mengevaluasi efisiensi sistem distribusi air bersih (Pratama et al., 2018). NRW terjadi akibat perbedaan antara jumlah air yang diproduksi dengan jumlah air yang tercatat sebagai konsumsi pelanggan, yang dapat disebabkan oleh kebocoran jaringan maupun kehilangan nonfisik. Oleh karena itu, evaluasi dan pengendalian NRW diperlukan untuk meningkatkan kinerja pelayanan air bersih.

Perkembangan teknologi memungkinkan analisis jaringan distribusi air bersih dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi hidraulik. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan adalah EPANET 2.2. EPANET mampu mensimulasikan kondisi aliran, tekanan, serta debit pada jaringan perpipaan distribusi air bersih. Selain itu, EPANET 2.2 mampu merancang model jaringan pipa sehingga memudahkan proses penggambaran tanpa perlu dilakukan secara langsung di lapangan (Rossman et al., 2020).

Hasil yang diperoleh berupa tekanan, kecepatan, dan debit aliran. Setiap daerah memiliki kebutuhan air yang berbeda, baik di wilayah pedesaan maupun perkotaan. Pola hidup masyarakat perkotaan juga berbeda dari masyarakat pedesaan, sehingga standar kebutuhan air bisa disesuaikan berdasarkan wilayahnya. Oleh karena itu, beberapa hal menjadi acuan dalam menentukan standar kebutuhan air.

Dalam artikel ini, Perumahan Lobunta di Kelurahan Banjarwangan, Kecamatan Mundu, Cirebon menjadi objek penelitian mengenai air bersih yang digunakan oleh pelanggan PDAM. Penanganan masalah air bersih dilakukan dengan mengevaluasi distribusi air dengan memanfaatkan program EPANET 2.2.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kondisi hidraulik jaringan distribusi air bersih di Kelurahan Banjarwangan menggunakan EPANET 2.2. Analisis dilakukan untuk mengetahui kondisi tekanan, debit aliran, dan kehilangan energi pada jaringan perpipaan sehingga dapat digunakan sebagai bahan evaluasi sistem distribusi air bersih.

Penelitian ini bertujuan:

1. Untuk menghitung besaran kebutuhan air bersih berdasarkan hasil proyeksi jumlah penduduk terpilih.
2. Melakukan simulasi jaringan distribusi air bersih pada Perumahan Lobunta Kelurahan Banjarwangan Cirebon.
3. Mengevaluasi kinerja jaringan distribusi air bersih menggunakan EPANET 2.2.

Bipin Sahu dan Ajai Singh (2020) dalam penelitian *Design and Optimal Analysis Water*

System Distribution Networking System using EPANET memperoleh hasil bahwa tekanan maksimum jaringan mencapai 30,04 meter dan debit aliran pada seluruh pipa berada dalam kondisi memadai. Berdasarkan standar Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007, tekanan tersebut masih berada dalam rentang standar pelayanan yaitu sekitar 10–80 meter, sehingga sistem distribusi dinyatakan telah memenuhi standar hidraulik (Sahu & Singh, 2020).

Alexander Sinske, Altus de Klerk, dan Adrian van Heerden (2022) melalui penelitian *Advanced Fire Flow Risk Analysis Using EPANET* menunjukkan bahwa metode Pressure Driven Analysis (PDA) mampu meningkatkan evaluasi tekanan dan aliran air pada kondisi kebakaran. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa sistem dapat meningkatkan keandalan distribusi air dan mempertahankan tekanan pelayanan. Jika dibandingkan dengan indikator IWA Tahun 2000 tentang keandalan sistem distribusi air, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi prinsip efisiensi dan keberlanjutan jaringan distribusi (Africa, 2022).

Jagrat Jaggi dan Hari Kaushik N (2019) dalam penelitian *Design and Analysis of a Smart Water Distribution Network System in Jaipur, Rajasthan* memperoleh hasil bahwa tekanan sisa pada seluruh node lebih dari 12 meter dan kecepatan aliran berada pada rentang 0,6–2,5 m/s. Berdasarkan standar Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007, tekanan minimum distribusi air adalah sekitar 10 meter dan kecepatan aliran yang dianjurkan berkisar 0,3–2,0 m/s. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa jaringan distribusi telah memenuhi standar teknis hidraulik (Jaggi, 2019).

Hailu Gisha, Abrham W/Mariam, dan Brook Abate (2016) dalam penelitian *Water Distribution Network Analysis of Bodditi Town by EPANET* menemukan bahwa beberapa node mengalami tekanan di bawah standar minimum dan terdapat kehilangan energi yang tinggi pada beberapa pipa. Jika dibandingkan dengan standar Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007 dan indikator IWA, kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem distribusi belum memenuhi standar karena masih terdapat tekanan rendah dan kehilangan energi yang tinggi (Gisha & Soddo, 2016).

Burhan Barida dan Serlina Nurnagini Septiani (2023) dalam penelitian *Perencanaan Jaringan Distribusi Air Bersih di Desa Mantren, Kabupaten Magetan, dengan Software EPANET 2.0* menunjukkan bahwa tekanan sisa minimum sebesar 5,72 meter, kecepatan aliran maksimum sebesar

0,78 m/s, dan kehilangan tekanan maksimum sebesar 0,8 meter. Berdasarkan standar Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007, tekanan minimum yang dianjurkan adalah sekitar 10 meter, sehingga tekanan minimum pada penelitian ini masih belum memenuhi standar, meskipun kecepatan aliran dan kehilangan energi masih berada dalam batas yang diperbolehkan (Barid & Nurnagini, 2023).

Wilhelmus Bunganaen, I Made Udiana, dan Maria Y. Moruk (2022) dalam penelitian *Analisis Jaringan Perpipaan Air Bersih Kecamatan Kota Atambua Kabupaten Belu* menyimpulkan bahwa hasil simulasi jaringan perpipaan air bersih telah berjalan dengan baik, meskipun masih ditemukan beberapa parameter hidraulik yang belum sesuai dengan standar perencanaan. Jika dibandingkan dengan standar Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007, kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem distribusi belum sepenuhnya memenuhi standar teknis karena masih terdapat tekanan dan parameter aliran yang tidak sesuai (Bunganaen et al., 2022).

Muhammad Abdu, Aswad Asrasal, dan Muhammad Sayfullah (2022) dalam penelitian *Analysis of The Puncak Tumada Drinking Water Network System Using EPANET Software* menunjukkan bahwa tekanan minimum pada node sebesar 9,5 meter dan kecepatan aliran minimum berkisar 0,16–0,26 m/s. Berdasarkan standar Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007, tekanan minimum yang disyaratkan adalah sekitar 10 meter dan kecepatan aliran minimum sekitar 0,3 m/s. Oleh karena itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem distribusi masih belum sepenuhnya memenuhi standar teknis hidraulik (Shell et al., 2022).

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang dikombinasikan dengan analisis hidrolik berbasis EPANET 2.2 dalam mengevaluasi tekanan dan debit aliran jaringan distribusi air bersih. Menurut Fernandes (2018) dalam (Zulfikar, 2024), penelitian deskriptif adalah bentuk penelitian yang digunakan untuk menjelaskan berbagai fenomena yang ada, baik yang bersifat alami maupun yang terjadi akibat aktivitas manusia.

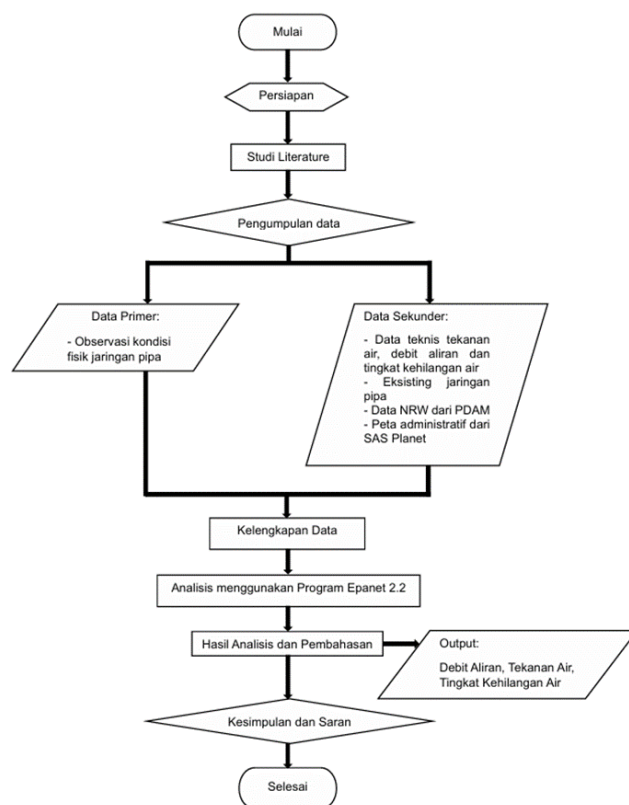
Penelitian ini berlokasi di Perumahan Lobunta Kelurahan Banjarwangunan. Pengumpulan data lapangan yang dibantu oleh PDAM Tirta Giri Nata Cirebon menggunakan perangkat Softrel LS42 yang berfungsi sebagai data logger. Pipa ini menggunakan pipa *Polyvinyl Chloride* (PVC). Total panjang pipa yaitu 9.988 m dan 172 *junction*.

Pengambilan data lapangan menggunakan logger dilakukan 24 jam, pada saat bulan Ramadhan.

Evaluasi jaringan perpipaan distribusi air bersih mengacu pada Permen PU. Parameter pengukuran yang digunakan diantaranya yaitu:

- 1) Tekanan;
- 2) Kecepatan Aliran;
- 3) Debit;
- 4) *Non-Revenue Water*.

Tahapan metode penelitian untuk dapat mensimulasikan jaringan distribusi air bersih, tahapannya terdiri dari persiapan, studi literatur, pengumpulan data, analisis menggunakan EPANET 2.2, dan kesimpulan.



Gambar 1 Diagram Alir Perencanaan

Pertama, dilakukan persiapan untuk menentukan lokasi penelitian. Selanjutnya, dilakukan studi pustaka untuk mengumpulkan dan mempelajari teori, konsep, serta hasil penelitian sebelumnya tentang simulasi jaringan pipa air bersih. Setelah itu, data dikumpulkan dengan merancang jalur pipa dan menentukan koordinat pelanggan menggunakan QGIS, melakukan survei lapangan, serta mengukur tekanan dan debit menggunakan alat logger. Data tekanan dan debit yang diperoleh kemudian diolah dengan Excel dan digunakan dalam EPANET 2.2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Proyeksi Jumlah Penduduk

Data jumlah penduduk yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data eksisting Perumahan Lobunta pada periode 2022-2026 yang diperoleh sebagai dasar perhitungan proyeksi penduduk. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode aritmatika, geometrik dan eksponensial untuk memperkirakan jumlah penduduk. Perhitungan proyeksi penduduk umumnya dilakukan dengan menggunakan beberapa metode tertentu sesuai kebutuhan analisis, yaitu metode aritmatika, dan geometrik yang masing-masing memiliki karakteristik perhitungan berdasarkan pola pertumbuhan penduduk.

Tabel 1. Data Eksisting Jumlah Penduduk Perumahan Lobunta Tahun 2022-2026

Tahun	Jumlah Penduduk	Pertumbuhan Penduduk	
	(Jiwa)	r	Pn
2022	838	0	838
2023	832	0.144%	834
2024	819	0.317%	822
2025	816	0.076%	817
2026	816	0	817
Average		0.134%	

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan data eksisting tersebut, diperoleh nilai laju pertumbuhan penduduk untuk periode tahun 2022-2026 sebesar 0,134%, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan proyeksi menggunakan 3 metode, yaitu metode aritmatik, metode geometrik, dan metode eksponensial. Adapun data yang digunakan dalam perhitungan proyeksi penduduk adalah sebagai berikut:

Angka pertumbuhan penduduk (r) : 0.134%

Tahun proyeksi (n) : 4 tahun

Jumlah penduduk pada tahun akhir (Pn) : 816

a. Metode Geometrik

$$P_n = P_0(1 + r)^n$$

$$P_n = P_{2026}(1 + 0.00134)^2$$

$$P_n = 816(1 + 0.00134)^2$$

$$P_n = 819 \text{ Jiwa}$$

b. Metode Aritmatika

$$P_n = P_0 + (r \cdot n)$$

$$P_n = P_{2026} + (0.00134 \cdot x^2)$$

$$P_n = 816 + (0.00134 \cdot x^2)$$

c. Metode Eksponensial

$$P_n = P_0 \times e^{0.00134 \times x^2}$$

$$P_n = P_{2026} \times (2,7182818)^{0.00134 \times x^2}$$

$$P_n = 816 \times (2,7182818)^{0.00134 \times x^2}$$

$$P_n = 819 \text{ Jiwa}$$

Tabel 2. Hasil perhitungan proyeksi pertumbuhan penduduk tahun 2022-2026

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa)	Metode Geometrik (Jiwa)	Metode Aritmatika (Jiwa)	Metode Eksponensial (Jiwa)
2022	838	840	838	840
2023	832	834	832	834
2024	819	821	819	821
2025	816	818	816	818
2026	816	818	816	818
Jumlah	4121	4132	4121	4132

Sumber: Hasil Perhitungan

Koefisien Korelasi

Uji korelasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil perhitungan proyeksi penduduk menggunakan metode aritmatik, metode geometrik, dan metode eksponensial terhadap data jumlah penduduk eksisting. Koefisien korelasi digunakan sebagai parameter pemilihan metode proyeksi yang paling sesuai dengan pola pertumbuhan penduduk di Perumahan Lobunta. Rumus Koefisien Korelasi:

$$r = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(n\sum X^2 - (\sum X)^2)(n\sum Y^2 - (\sum Y)^2)}}$$

a. Metode Geometrik

$$= \frac{5(3406051) - (4121)(4132)}{\sqrt{(5(3396941) - (4121)^2)(5(3415185) - (4132)^2)}} = 1,000$$

b. Metode Aritmatika

$$= \frac{5(3396952) - (4121)(4121)}{\sqrt{(5(3396941) - (4121)^2)(5(3396963) - (4121)^2)}} = 1,000$$

c. Metode Eksponensial

$$= \frac{5(3406051) - (4121)(4132)}{\sqrt{(5(3396941) - (4121)^2)(5(3415185) - (4132)^2)}} = 1,000$$

Berdasarkan hasil uji korelasi terhadap tiga metode proyeksi penduduk, diperoleh nilai koefisien korelasi pada metode aritmatika, geometrik, dan eksponensial memperoleh nilai

koefisien korelasi sebesar 1,000. Nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh metode memiliki hubungan yang sangat kuat terhadap data penduduk eksisting. Oleh karena nilai korelasi ketiga metode menunjukkan hasil yang sama, pemilihan metode proyeksi dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik pertumbuhan penduduk. Berdasarkan kondisi pertumbuhan penduduk Perumahan Lobunta yang relatif stabil, metode aritmatika dipilih karena memiliki asumsi pertumbuhan konstan yang paling sesuai dengan kondisi wilayah penelitian.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa kebutuhan air bersih juga cenderung konstan dan tidak mengalami peningkatan signifikan. Dengan demikian, sistem distribusi air tidak mengalami tekanan tambahan akibat pertumbuhan penduduk, melainkan lebih dipengaruhi oleh faktor lain seperti pola pemakaian air dan kondisi jaringan distribusi.

b. Kebutuhan Air pada Kondisi Eksisting

Kebutuhan air pada kondisi eksisting merupakan jumlah kebutuhan air bersih yang diperlukan oleh masyarakat berdasarkan kondisi pelayanan saat ini. Kebutuhan air domestik yaitu kebutuhan air yang dipengaruhi oleh jumlah penduduk dan tingkat konsumsi air per hari. Kebutuhan ini mencakup penggunaan air untuk aktivitas sehari-hari, seperti minum, memasak, mandi, dan mencuci. Sementara itu, kebutuhan air non domestik yaitu kebutuhan air yang digunakan untuk kegiatan di luar rumah tangga, seperti sektor komersial, industri, dan pelayanan umum. Kebutuhan non domestik juga mencakup penggunaan air pada fasilitas institusi, seperti sekolah, fasilitas kesehatan, tempat ibadah, serta fasilitas umum lainnya (Sari, Anggi Nidya, et al, 2023).

Kebutuhan air bersih di Perumahan Lobunta saat ini sebagai berikut:

a. Jumlah Pelanggan

$$= SR \times \text{Jumlah Jiwa dalam KK}$$

$$= 816 \times 5$$

$$= 4.080 \text{ Jiwa}$$

b. Kebutuhan perorang

$$= \frac{\text{Kebutuhan per orang liter perhari}}{\text{detik perhari}}$$

$$= \frac{120}{86.400}$$

$$= 0,001388 \text{ l/det}$$

c. Kebutuhan Air Bersih

$$= \text{Jumlah Pelanggan} \times \text{Kebutuhan perorang} \left(\frac{1}{\text{det}} \right)$$

$$= 4.080 \times 0,001388$$

$$= 5,67 \text{ l/det}$$

d. Kebutuhan Air Non Domestik

$$= 20\% \times \text{Kebutuhan air bersih}$$

$$= 20\% \times 5,67$$

$$= 1,13 \text{ l/det}$$

e. Kebutuhan Air Bersih Total

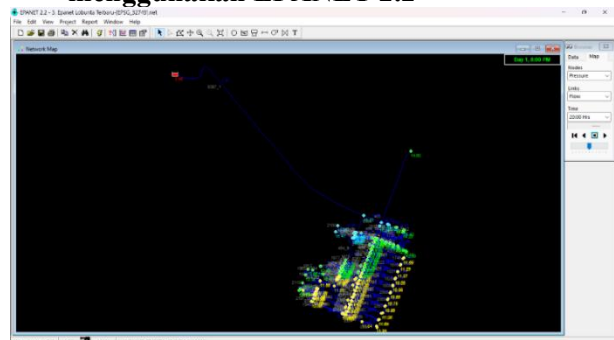
$$= Q_d + Q_{nd}$$

$$= 5,67 + 1,13$$

$$= 6,8 \text{ l/det}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh jumlah pelanggan sebesar 4.080 jiwa dengan total kebutuhan air bersih pada kondisi eksisting sebesar 7,08 l/det. Sementara itu, berdasarkan data pemakaian air pada bulan Februari 2026 yang diperoleh dari PDAM Tirta Giri Nata Kota Cirebon, kebutuhan air bersih pelanggan tercatat sebesar 6,8 l/det. Kondisi ini mengindikasikan adanya inefisiensi dalam sistem distribusi air bersih, seperti tingginya kehilangan air (Non-Revenue Water/NRW), adanya kebocoran pada jaringan perpipaan, serta sistem distribusi air yang belum berjalan secara optimal. Berdasarkan data DRD dari PDAM, tingkat NRW pada wilayah penelitian mencapai 40,75%, sehingga menunjukkan masih besarnya air yang hilang selama proses distribusi kepada pelanggan.

c. Analisis Jaringan Distribusi Air Bersih menggunakan EPANET 2.2



Gambar 1. Hasil Simulasi menggunakan EPANET 2.2

Simulasi jaringan perpipaan distribusi air bersih eksisting di Perumahan Lobunta Kelurahan

Banjarwangunan dilakukan menggunakan perangkat lunak EPANET 2.2 dengan periode simulasi selama 24 jam. Waktu simulasi dimulai pada pukul 11.00 dan berakhir pada pukul 10.00 pada hari berikutnya saat bulan Ramadhan. Simulasi tersebut menggunakan data pola pemakaian air selama 24 jam yang diperoleh dari PDAM Tirta Giri Nata di Perumahan Lobunta, Kelurahan Banjarwangunan, Kota Cirebon.

Berdasarkan ketentuan dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007, kecepatan aliran pada jaringan distribusi air bersih yang direkomendasikan berada pada rentang 0,3–2,0 m/s. Apabila kecepatan aliran berada di bawah 0,3 m/s, maka aliran air di dalam pipa tergolong terlalu rendah dan belum memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan. Hasil simulasi hidraulik menggunakan EPANET 2.2 menunjukkan bahwa nilai kecepatan aliran tertinggi pada jaringan hanya mencapai 0,27 m/s. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa kondisi aliran pada seluruh jaringan distribusi masih berada di bawah standar minimum pelayanan. Keadaan ini menunjukkan bahwa kinerja sistem distribusi air bersih belum berjalan secara optimal. Rendahnya nilai kecepatan aliran diduga dipengaruhi oleh penggunaan diameter pipa yang relatif besar dibandingkan dengan debit air yang dialirkan pada jaringan distribusi.

Tabel 3. Flow Faktor Kebutuhan Air dalam 24 jam

No.	Jam	Flow Factor	No.	Jam	Flow Factor
1	11:00	0.98	13	23:00	1.06
2	12:00	0.95	14	00:00	1.01
3	13:00	0.98	15	01:00	0.95
4	14:00	0.95	16	02:00	0.95
5	15:00	0.92	17	03:00	0.98
6	16:00	0.92	18	04:00	1.06
7	17:00	0.86	19	05:00	1.09
8	18:00	0.89	20	06:00	1.12
9	19:00	0.89	21	07:00	1.09
10	20:00	0.95	22	08:00	1.09
11	21:00	1.09	23	09:00	1.06
12	22:00	1.12	24	10:00	1.03

Sumber: Hasil Perhitungan

Tabel 4. Tekanan Terendah dan Tertinggi pada Jam Puncak pada EPANET 2.2

No.	Node ID	Pressure (m)
1	Junction 77	11.83
2	Junction 47	20.18

Sumber: Hasil Simulasi

Berdasarkan Tabel 4, tekanan terendah yang diperoleh sebesar 11,83 m, sedangkan tekanan tertinggi mencapai 20,18 m. Mengacu pada ketentuan teknis dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No. 18/PRT/M/2007 yang menetapkan standar tekanan sebesar 10–25 m (Menteri & Umum, 2007), maka kondisi tekanan pada Perumahan Lobunta dapat dinyatakan telah memenuhi standar yang ditetapkan.

Tabel 5. Kecepatan Aliran Maksimum

No.	Link ID	Velocity (m/s)
1	Pipa 1	0.26
2	Pipa 3	0.22
3	Pipa 19	0.25
4	Pipa 20	0.25
5	Pipa 140	0.27

Sumber: Hasil Perhitungan

d. Kebutuhan air di Perumahan Lobunta

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah SR} &= 816 \text{ SR} \\
 \text{Jumlah Pelanggan} &= 816 \times 5 \\
 &= 4.080 \text{ Jiwa} \\
 \text{Jam Puncak} &= 10,83 \text{ liter/detik} \\
 \text{Kebutuhan air} &= 4.080 \times 120 \\
 &= 489.600 \text{ liter/hari} \\
 \text{Kebutuhan Air} &= 489.600 \\
 \text{Menjadi Debit} &= \frac{489.600}{86.400} \\
 &= 5,67 \text{ liter/detik (rata-rata)}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, jumlah pelanggan PDAM sebesar 816 SR dikonversi menjadi jumlah penduduk terlayani sebesar 4.080 jiwa dengan asumsi 5 jiwa/SR. Kebutuhan air domestik dihitung menggunakan standar kebutuhan air sebesar 120 liter/jiwa/hari, sehingga diperoleh kebutuhan air sebesar 489.600 liter/hari atau setara dengan 5,67 liter/detik.

Meskipun rata-rata debit yang terukur pada kondisi lapangan adalah 9,67 liter per detik, jumlah ini secara umum masih memadai untuk memenuhi kebutuhan air bersih para pelanggan yang ditaksir mencapai 5,67 liter per detik. Akan tetapi, pada periode beban puncak, yaitu antara pukul 06.00 pagi dan 22.00 malam, permintaan air melonjak hingga 10,83 liter per detik, yang berimplikasi pada defisit debit sebesar 1,16 liter per detik. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas sistem distribusi saat ini belum sepenuhnya mampu memenuhi peningkatan kebutuhan air pada periode beban puncak, sehingga berpotensi menyebabkan penurunan tekanan dan ketidakmerataan distribusi air pada beberapa area pelayanan.

Kondisi tersebut menjadi semakin kompleks karena waktu pengamatan data dilakukan

bertepatan dengan periode bulan Ramadhan, di mana preferensi konsumsi air oleh populasi masyarakat menunjukkan indikasi perubahan signifikan dibandingkan dengan kondisi normal. Peningkatan permintaan air pada jam 06.00 pagi umumnya dapat diatribusikan pada aktivitas ritual pagi hari, mencakup kegiatan higienitas pribadi dan persiapan sebelum memulai aktivitas harian. Sebaliknya, lonjakan konsumsi air pada jam 22.00 malam berkorelasi dengan serangkaian aktivitas yang dilakukan pasca-iftar dan pelaksanaan ibadah malam.

Waktu sahur dan berbuka puasa tidak diidentifikasi sebagai periode puncak konsumsi air karena penggunaan sumber daya air pada kedua momen tersebut berlangsung secara terbatas dalam durasi waktu dan tidak dilakukan secara serentak oleh seluruh pengguna. Lebih lanjut, interval pencatatan data yang tidak lebar dimungkinkan dapat menyebabkan fluktuasi peningkatan konsumsi air pada periode tersebut tidak terefleksi secara substansial. Konsekuensinya, pola jam puncak yang berhasil diestimasi tetap mampu memberikan gambaran agregat mengenai pola umum pemanfaatan air rumah tangga oleh populasi.

e. Rekomendasi Perbaikan Jaringan

Berdasarkan analisis simulasi komputasional dengan aplikasi perangkat lunak EPANET 2.2, jaringan distribusi air bersih di kawasan Perumahan Lobunta secara kuantitatif telah mematuhi parameter tekanan yang ditetapkan dalam Permen PU No. 18/PRT/M/2007, dengan tingkat tekanan yang bervariasi antara 11,83 hingga 20,18 meter. Meski demikian, terdapat beberapa anomali yang teridentifikasi dalam infrastruktur jaringan distribusi, khususnya terkait dengan kecepatan aliran yang masih berada di bawah ambang batas minimum yang dipersyaratkan, serta fenomena defisiensi debit air selama periode permintaan puncak. Oleh karena itu, diperlukan beberapa upaya perbaikan jaringan agar sistem distribusi dapat bekerja lebih optimal.

Intervensi perbaikan awal yang dapat dipertimbangkan adalah melakukan kajian terhadap dimensi perpipaan di sejumlah segmen jaringan distribusi. Temuan dari simulasi mengindikasikan bahwa laju aliran maksimum hanya mencapai 0,27 m/s, bertentangan dengan kriteria laju aliran yang direkomendasikan, yaitu dalam rentang 0,3–2,0 m/s. Situasi ini mengindikasikan adanya ketidaksesuaian antara dimensi perpipaan yang terpasang dengan volume aliran air yang dialirkan, di mana diameter pipa terindikasi lebih besar dari kebutuhan aktual. Konsekuensinya, penyesuaian pada diameter pipa di segmen-segmen tertentu

menjadi esensial untuk meningkatkan laju aliran dan mengoptimalkan efektivitas distribusi air (Hafsari et al., 2021).

Selanjutnya, diperlukan optimalisasi alokasi debit aliran selama periode beban puncak penggunaan. Berdasarkan analisis yang mendalam, permintaan air pada jam puncak terpantau sebesar 10,83 L/detik, sementara kapasitas debit rata-rata yang tersedia hanya sebesar 9,67 L/detik. Ketidakseimbangan ini mengakibatkan defisit debit sebesar 1,16 L/detik. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, PDAM dapat melakukan pengaturan pola distribusi air atau penambahan suplai debit pada waktu-waktu tertentu agar pelayanan air tetap stabil saat kebutuhan meningkat.

Tindakan korektif tambahan yang krusial adalah mengurangi tingkat kehilangan air (Non-Revenue Water/NRW). Analisis data mengindikasikan bahwa persentase kehilangan air mencapai 40,75%, sebuah nilai yang masih tergolong signifikan dan belum mematuhi standar optimal dalam penyediaan air bersih. Penurunan NRW dapat diimplementasikan melalui inspeksi rutin untuk mendeteksi kebocoran pipa, perbaikan pada koneksi pipa yang mengalami kerusakan, serta pemantauan terhadap pengambilan air secara tidak sah. Dengan berkurangnya tingkat kehilangan air, efektivitas dalam distribusi air bersih diharapkan akan mengalami peningkatan.

Di samping perbaikan infrastruktur, pemeliharaan preventif jaringan perpipaan secara teratur memegang peranan penting dalam mempertahankan efisiensi operasional sistem distribusi. Aktivitas pemeliharaan ini mencakup pemeriksaan tekanan air, pembersihan interior pipa, serta peninjauan kondisi jaringan secara periodik dengan memanfaatkan simulasi menggunakan EPANET 2.2. Prosedur ini esensial untuk mengidentifikasi dini potensi masalah pada jaringan sehingga penanggulangannya dapat segera dilaksanakan.

Dengan adanya rekomendasi perbaikan tersebut, diharapkan sistem distribusi air bersih di Perumahan Lobunta Kelurahan Banjarwangan dapat bekerja lebih optimal, efisien, serta mampu memenuhi kebutuhan air masyarakat secara merata dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis jaringan distribusi air bersih di Perumahan Lobunta Kelurahan Banjarwangan menggunakan EPANET 2.2, dapat disimpulkan bahwa hasil proyeksi jumlah penduduk menunjukkan pola pertumbuhan yang relatif stabil dengan nilai laju pertumbuhan sebesar 0,134%. Berdasarkan hasil uji korelasi terhadap

metode aritmatika, geometrik, dan eksponensial, metode aritmatika dipilih sebagai metode proyeksi yang paling sesuai karena memiliki asumsi pertumbuhan konstan yang sesuai dengan kondisi wilayah penelitian. Hasil proyeksi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis kebutuhan air bersih, sehingga diperoleh kebutuhan air rata-rata sebesar 5,67 liter/detik.

Hasil simulasi jaringan distribusi air bersih menggunakan EPANET 2.2 menunjukkan bahwa kondisi hidraulik jaringan Perumahan Lobunta memiliki tekanan antara 12,19–20,05 meter. Nilai tekanan tersebut masih berada dalam rentang standar pelayanan berdasarkan Permen PU No. 18/PRT/M/2007, sehingga jaringan distribusi masih mampu memberikan pelayanan tekanan yang sesuai kepada pelanggan. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan pola kebutuhan air selama 24 jam sehingga dapat menggambarkan perubahan kondisi jaringan berdasarkan variasi penggunaan air.

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja jaringan, masih ditemukan beberapa parameter yang perlu diperhatikan. Kecepatan aliran maksimum pada jaringan hanya mencapai 0,27 m/s sehingga belum memenuhi standar minimum yang direkomendasikan. Selain itu, pada kondisi beban puncak kebutuhan air meningkat hingga 10,83 liter/detik, sedangkan debit rata-rata yang tersedia sebesar 9,67 liter/detik, sehingga terjadi kekurangan debit sebesar 1,16 liter/detik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jaringan distribusi air bersih di Perumahan Lobunta telah berjalan cukup baik pada kondisi rata-rata, tetapi masih memerlukan pengelolaan dan peningkatan kinerja agar mampu memenuhi kebutuhan air secara optimal pada periode pemakaian tinggi.

Kontribusi penelitian ini adalah memberikan gambaran mengenai kondisi kinerja jaringan distribusi air bersih di Perumahan Lobunta melalui pendekatan simulasi hidraulik menggunakan EPANET 2.2. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar evaluasi bagi pengelola sistem penyediaan air bersih dalam mengetahui kemampuan jaringan terhadap variasi kebutuhan air, terutama pada kondisi beban puncak.

REFERENSI

- Africa, S. (2022). "Advan ced fire fl ow risk an alysis is usi ng e panet". July, 18–22.
- Barid, B., & Nurnagini, S. (2023). "Perencanaan Jaringan Distribusi Air Bersih di Desa Mantren , Kabupaten Magetan , dengan Software Epanet 2 ". 0. 3(2), 71–76.

- Bunganaen, W., Udiana, I. M., & Moruk, M. Y. (2022). "Analisis Jaringan Perpipaan Air Bersih Kecamatan Kota Atambua Kabupaten Belu Analysis of Clean Water Pipeline Network , Atambua City District Belu Regency". 2(2), 55–65.
- Elvania, N. C. (2025). B"uku Ajar PENGOLAHAN AIR BERSIH" (E. Damayanti (ed.)). Widina Media Utama.
- Gisha, H., & Soddo, W. (2016). "Water Distribution Network Analysis of Bodditi Town by". 6(10), 10–17.
- Hafsari, V., Haribowo, R., & Ismoyo, M. J. (2021). "Evaluasi Sistem Distribusi Air Bersih Zona Rumah Pompa Pradah Kota Surabaya". 1(2), 501–513.
- Jaggi, J. (2019). "Design and Analysis of a Smart Water Distribution Network System in Jaipur , Rajasthan". 8(09), 446–457.
- Menteri, P., & Umum, P. (2007). "Penyelenggaraan pengembangan sistem penyediaan air minum".
- Ngurah, I. G., & Partama, E. (2026). "EVALUASI SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI AIR BERSIH PERUMDA AIR". 18(01).
- Pratama, D. T., Teknik, P., Universitas, S., Berekening, A. T., & Air, K. (2018). "ANALISIS NON REVENUE WATER (NRW) PADA JARINGAN PIPA AIR BERSIH PDAM KOTA BALIKPAPAN ANALYSIS OF NON REVENUE WATER (NRW) IN PDAM CLEAN WATER PIPE NETWORK BALIKPAPAN CITY". 1, 25–33.
- Rossmann, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2020). "EPANET 2.2 Users Manual". EKAMITRA Engineering. https://aquanuity.com/wp-content/uploads/2024/04/EPANET_USERS_MANUAL_2.2.0.pdf
- Sahu, B., & Singh, A. (2020). "Optimal Design and Analysis of Water Distribution Networking System using EPANET WATER ENGINEERING AND". 16–25.
- Sari , Anggi Nidya. Pratama, M. Ade Surya. Suryan, V. (2023). "Jurnal Talenta Sipil Peramalan Kebutuhan Air : Analisis Debit Kebutuhan". 6, 76–84. <https://doi.org/10.33087/talentsipil.v6i1.197>
- Shell, S., Engineering, C., Abdu, M., Asrasal, A., & Sayfullah, M. (2022). "Analysis of The Puncak Tumada Drinking Water Network System Using Epanet Software". 7(1).
- Zulfikar, R. et al. (2024). "METODE PENELITIAN KUANTITATIF (Teori, Metode dan Praktik)" (E. Damanyanti (ed.)). Widina Media Utama. <https://repository.penerbitwidina.com/media/publications/567988-metode-penelitiankuantitatif-teori-meto-a0b0560e.pdf>

Analisis Faktor dan Indikator yang Mempengaruhi Penurunan Human Error pada Proyek Konstruksi

Analysis of Factors and Indicators Influencing Human Error Reduction in Construction Projects

Cynthia Fadhila Diantoro Putri¹, Mohammad Arif Rohman²

¹Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya. Telp: (031)5994251.
Email : cynthiafadhila@gmail.com

Abstrak

Human error masih menjadi salah satu penyebab utama kecelakaan pada proyek konstruksi. Pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, dan lingkungan kerja merupakan faktor penting yang dapat membantu mengurangi human error. Namun, penelitian yang mengintegrasikan ketiga faktor tersebut dalam satu model masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi dan memvalidasi faktor serta indikator yang memengaruhi penurunan human error pada proyek konstruksi. Data diperoleh melalui survei kuesioner terhadap personel Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada perusahaan konstruksi di Indonesia dan dianalisis menggunakan Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). Hasil penelitian mengidentifikasi empat faktor utama, yaitu pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, lingkungan kerja, dan penurunan human error, yang diwakili oleh 17 indikator yang valid dan reliabel. Temuan menunjukkan bahwa pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, dan lingkungan kerja berpengaruh signifikan terhadap penurunan human error. Penelitian ini menghasilkan kerangka faktor dan indikator yang tervalidasi untuk mendukung pengembangan strategi keselamatan kerja dalam mengurangi human error pada proyek konstruksi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji model pada berbagai jenis proyek konstruksi selain proyek gedung, melibatkan responden yang lebih beragam, serta menambahkan faktor lain seperti budaya keselamatan, dan beban kerja guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi penurunan human error.

Kata Kunci: *human error; keselamatan konstruksi; keterampilan keselamatan; lingkungan kerja; pengetahuan keselamatan.*

Abstract

Human error remains one of the leading causes of accidents in construction projects. Safety knowledge, safety skills, and the work environment are important factors that can help reduce human error. However, studies that integrate these factors into a single validated framework remain limited. This study aims to identify and validate the factors and indicators that influence the reduction of human error in construction projects. Data were collected through a questionnaire survey of Occupational Health and Safety (OHS) personnel in construction companies in Indonesia and analyzed using Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). The results identified four main factors: safety knowledge, safety skills, work environment, and human error reduction, represented by 17 valid and reliable indicators. The findings indicate that safety knowledge, safety skills, and the work environment significantly contribute to reducing human error. This study provides a validated framework of factors and indicators to support the development of safety strategies aimed at reducing human error in construction projects. Future research is recommended to test the model across various types of construction projects beyond building construction, involve a more diverse range of respondents, and incorporate additional factors such as safety culture and workload to achieve a more comprehensive understanding of the factors influencing human error reduction.

Keywords: *construction safety; human error; safety knowledge; safety skills; work environment.*

PENDAHULUAN

Industri konstruksi dikenal sebagai salah satu sektor dengan tingkat risiko kecelakaan kerja yang

tinggi akibat kompleksitas aktivitas konstruksi, kondisi kerja yang dinamis, serta paparan berbagai bahaya di lingkungan kerja. Meskipun sistem manajemen keselamatan dan persyaratan regulasi

terus mengalami peningkatan, kecelakaan kerja masih menjadi permasalahan utama di berbagai negara. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa faktor manusia merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kecelakaan dan insiden keselamatan pada proyek konstruksi (Moshood et al., 2020; Akinlolu et al., 2021).

Human error sering dikaitkan dengan tindakan tidak aman, pengambilan keputusan yang kurang tepat, serta kegagalan dalam pelaksanaan pekerjaan. Pada proyek konstruksi, *human error* dapat menyebabkan kecelakaan, cedera pekerja, keterlambatan proyek, dan kerugian finansial. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi *human error* menjadi salah satu tujuan penting dalam manajemen keselamatan konstruksi (Rafieyan et al., 2024).

Pengetahuan keselamatan merupakan salah satu komponen dasar dalam penerapan keselamatan kerja. Pekerja yang memiliki pemahaman yang memadai mengenai peraturan keselamatan, catatan kecelakaan, dan tindakan pengendalian risiko akan lebih mampu mengenali bahaya serta menerapkan tindakan pencegahan secara efektif. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengetahuan keselamatan berkontribusi terhadap peningkatan perilaku keselamatan dan pencegahan kecelakaan kerja (Wu et al., 2020; Xu & Zou, 2021).

Selain pengetahuan, keterampilan keselamatan juga berperan penting dalam mendukung kinerja kerja yang aman. Keterampilan keselamatan meliputi kemampuan identifikasi bahaya, komunikasi, kepemimpinan, penerapan perilaku kerja aman, serta kemampuan tanggap darurat. Kompetensi tersebut memungkinkan pekerja untuk menerapkan pengetahuan keselamatan secara efektif dalam situasi kerja dan mengurangi perilaku tidak aman (Barling et al., 2020; Sidiq & Rohman, 2023).

Lingkungan kerja juga merupakan faktor yang memengaruhi kinerja keselamatan pekerja. Pengawasan yang efektif, beban kerja yang terkendali, kondisi kerja yang ergonomis, serta waktu istirahat yang memadai dapat membantu pekerja menjaga konsentrasi dan mengurangi kelelahan. Sebaliknya, kondisi kerja yang kurang baik dapat meningkatkan tingkat stres dan kemungkinan terjadinya *human error* (Liao et al., 2018; Zhou et al., 2023; Wang et al., 2024).

Penelitian terdahulu umumnya mengkaji pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, dan lingkungan kerja secara terpisah. Namun, penelitian yang menginvestigasi kontribusi ketiga faktor tersebut secara simultan terhadap penurunan *human error* pada proyek konstruksi masih terbatas. Selain itu, penelitian yang mengintegrasikan kompetensi pekerja dan kondisi

lingkungan kerja dalam satu kerangka konseptual juga masih relatif sedikit (Mohandes & Zhang, 2021; Rauzana et al., 2023). Perbedaan indikator yang digunakan pada berbagai penelitian turut menyebabkan ketidakkonsistenan dalam pengukuran penurunan *human error*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memvalidasi faktor serta indikator yang memengaruhi penurunan *human error* pada proyek konstruksi menggunakan pendekatan *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data primer yang diperoleh melalui survei kuesioner yang disebarakan kepada personel Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang bekerja pada perusahaan jasa konstruksi Badan Usaha Milik Negara (BUMN) dan Badan Usaha Milik Swasta (BUMS) di Indonesia yang bergerak di bidang pembangunan gedung dan telah menerapkan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK). Populasi penelitian adalah seluruh personel K3 yang terlibat dalam pengelolaan keselamatan konstruksi pada perusahaan tersebut. Responden dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* berdasarkan pengalaman serta keterlibatannya dalam pengelolaan keselamatan konstruksi. Sebanyak 173 responden yang memenuhi kriteria digunakan sebagai sampel penelitian. Variabel penelitian disusun berdasarkan sintesis dari berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan manajemen keselamatan konstruksi dan penurunan *human error*. Berdasarkan hasil kajian literatur, penelitian ini mengidentifikasi empat faktor utama dan tujuh belas indikator yang digunakan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi penurunan *human error* pada proyek konstruksi.

Tabel 1. Faktor dan Indikator Penelitian

Variabel	Indikator	Referensi
Pengetahuan Keselamatan	Pengetahuan Catatan Kecelakaan,	Xu & Zou (2021); Wu et al. (2020); Akinlolu et al. (2021)
	Pengetahuan Peraturan Keselamatan,	
	Pengetahuan Pengendalian Risiko	
	Identifikasi Bahaya,	
Keterampilan Keselamatan	Komunikasi,	Albert et al. (2020); Barling et al. (2020); Sidiq & Rohman (2023); Martin et al. (2021)
	Kepemimpinan,	
	Keterampilan Praktik Kerja Aman, Tanggap Darurat	
	Pengendalian Kondisi Lingkungan Kerja,	
Lingkungan Kerja	Kondisi Ergonomis, Beban Kerja,	Liao et al. (2018); Zhou et al. (2023);

Variabel	Indikator	Referensi
	Pengawasan, Waktu Istirahat	Wang et al. (2024)
Penurunan <i>Human Error</i>	Ketepatan Pelaksanaan Pekerjaan, Kepatuhan terhadap Prosedur, Ketepatan Pengambilan Keputusan, Toleransi terhadap Kelelahan	Rafieyan et al. (2024); Albert dan Hallowell (2023); Sidiq & Rohman (2023)

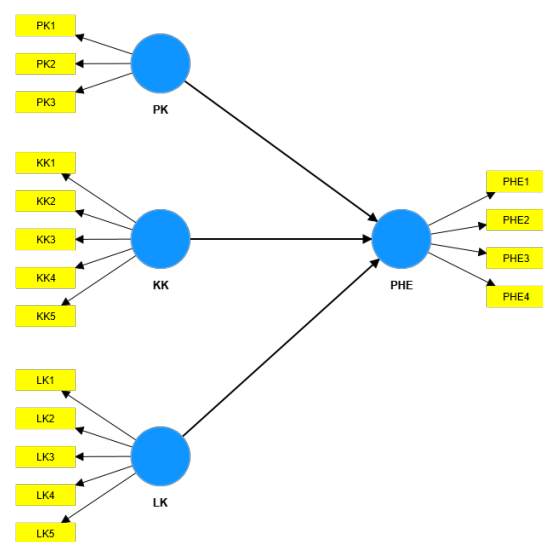
Berdasarkan hasil kajian literatur, penelitian ini menggunakan empat variabel utama, yaitu pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, lingkungan kerja, dan penurunan *human error*. Setiap variabel diwakili oleh beberapa indikator yang relevan dengan keselamatan kerja pada proyek konstruksi. Pengetahuan keselamatan terdiri atas indikator pengetahuan catatan kecelakaan, peraturan keselamatan, dan pengendalian risiko. Keterampilan keselamatan terdiri atas identifikasi bahaya, komunikasi, kepemimpinan, praktik kerja aman, dan tanggap darurat. Lingkungan kerja diukur melalui pengendalian kondisi lingkungan kerja, kondisi ergonomis, beban kerja, pengawasan, dan waktu istirahat. Sementara itu, penurunan *human error* diukur melalui ketepatan pelaksanaan pekerjaan, kepatuhan terhadap prosedur, ketepatan pengambilan keputusan, dan toleransi terhadap kelelahan. Seluruh variabel dan indikator tersebut disusun berdasarkan berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan keselamatan konstruksi dan digunakan untuk menganalisis faktor-faktor yang berpengaruh terhadap penurunan *human error* pada proyek konstruksi.

Analisis data dilakukan menggunakan metode *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM). Analisis dilakukan dalam dua tahap, yaitu evaluasi model pengukuran (*outer model*) untuk menguji validitas dan reliabilitas indikator, serta evaluasi model struktural (*inner model*) untuk menganalisis hubungan antar faktor yang memengaruhi penurunan *human error*. Hasil akhir penelitian ini berupa kerangka faktor dan indikator yang telah tervalidasi secara empiris dalam memengaruhi penurunan *human error* pada proyek konstruksi. Kerangka tersebut diharapkan dapat menjadi acuan dalam meningkatkan kinerja keselamatan konstruksi serta mengurangi risiko kecelakaan kerja di lingkungan proyek konstruksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu evaluasi kuesioner, evaluasi data (uji validitas dan reliabilitas), serta evaluasi model pengukuran.

Kuesioner disebarakan kepada personel Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang terlibat dalam proyek konstruksi di berbagai wilayah Indonesia. Sebanyak 173 responden berpartisipasi dalam survei dan memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa secara umum responden memberikan penilaian setuju hingga sangat setuju terhadap indikator-indikator yang digunakan dalam penelitian ini. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai rata-rata setiap indikator yang berada di atas nilai tengah skala pengukuran, sehingga mengindikasikan bahwa indikator yang digunakan dianggap relevan dalam menjelaskan faktor-faktor yang memengaruhi penurunan *human error* pada proyek konstruksi.



Gambar 2. Model Penelitian

Model penelitian terdiri atas tiga variabel independen, yaitu pengetahuan keselamatan (PK), keterampilan keselamatan (KK), dan lingkungan kerja (LK), serta satu variabel dependen yaitu penurunan *human error* (PHE). Masing-masing variabel diukur menggunakan indikator yang diperoleh dari kajian literatur dan dianalisis menggunakan pendekatan PLS-SEM untuk mengetahui pengaruhnya terhadap penurunan *human error* pada proyek konstruksi.

Evaluasi data dilakukan melalui pengujian validitas dan reliabilitas. Validitas konvergen dievaluasi menggunakan nilai outer loading, di mana indikator dengan nilai outer loading sebesar 0,70 atau lebih dinyatakan memenuhi kriteria validitas (Hair et al., 2019). Validitas diskriminan diuji menggunakan *cross loadings*, kriteria *Fornell-Larcker*, dan *Heterotrait Monotrait Ratio* (HTMT). Nilai HTMT yang lebih kecil dari 0,90 menunjukkan bahwa validitas diskriminan telah terpenuhi dan setiap konstruk memiliki perbedaan yang memadai satu sama lain (Henseler et al., 2015). Reliabilitas

konstruk dievaluasi menggunakan nilai *Cronbach's Alpha*, *Composite Reliability* (CR), dan *Average Variance Extracted* (AVE). Hasil pengujian validitas indikator pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Validitas Indikator Penelitian

Var	Kode	Indikator	Nilai Outer Loading	Ket
PK	PK1	Pengetahuan tentang catatan kecelakaan	0.897	Valid
	PK2	Pengetahuan tentang peraturan keselamatan	0.924	Valid
	PK3	Pengetahuan tentang pengendalian risiko	0.883	Valid
KK	KK1	Keterampilan komunikasi	0.830	Valid
	KK2	Keterampilan pengenalan bahaya	0.843	Valid
	KK3	Keterampilan kepemimpinan Praktik	0.775	Valid
	KK4	keselamatan berbasis perilaku	0.798	Valid
LK	LK1	Pengendalian Kondisi	0.708	Valid
	LK2	Lingkungan Kerja Kondisi kerja ergonomis	0.758	Valid
	LK3	Beban kerja terkelola	0.708	Valid
PHE	PHE1	Ketepatan Pelaksanaan Pekerjaan	0.870	Valid
	PHE2	Kepatuhan terhadap Prosedur	0.874	Valid
	PHE3	Ketepatan Pengambilan Keputusan Kerja	0.790	Valid

Hasil uji validitas konvergen menunjukkan bahwa seluruh indikator yang dipertahankan memiliki nilai *outer loading* di atas 0,70 sehingga memenuhi kriteria validitas dan mampu merepresentasikan konstruk yang diukur dengan baik. Sebaliknya, beberapa indikator, yaitu KK5 (keterampilan tanggap darurat), LK4 (pengawasan), LK5 (waktu istirahat), dan PHE4 (toleransi terhadap kelelahan), dieliminasi dari model karena memiliki nilai *outer loading* di bawah 0,70 sehingga tidak memenuhi kriteria validitas konvergen. Eliminasi indikator tersebut dilakukan untuk meningkatkan kualitas model pengukuran dan memastikan bahwa hanya indikator yang valid dan reliabel yang digunakan dalam analisis selanjutnya.

Pengujian reliabilitas dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi internal dari konstruk penelitian. Pada penelitian ini, reliabilitas diukur

menggunakan nilai *Cronbach's Alpha*, *Composite Reliability* (CR), dan *Average Variance Extracted* (AVE). Suatu konstruk dinyatakan reliabel apabila memiliki nilai *Cronbach's Alpha* lebih besar dari 0,60 dan nilai *Composite Reliability* lebih besar dari 0,70 (Hair et al., 2019). Selain itu, nilai AVE yang melebihi 0,50 menunjukkan bahwa konstruk mampu menjelaskan lebih dari 50% varians indikator-indikator yang membentuknya. Hasil pengujian reliabilitas dan validitas konstruk disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Realibilitas Faktor dan Indikator Penelitian

Variabel	Cronbach's Alpha	Composite Reliability	Average Variance Extracted (AVE)	Ket
PHE	0,784	0,826	0,739	Reliabel
PK	0,884	0,884	0,812	Reliabel
KK	0,849	0,855	0,67	Reliabel
LK	0,706	0,747	0,657	Reliabel

Berdasarkan hasil analisis data, variabel Pengetahuan Keselamatan direpresentasikan oleh tiga indikator. Indikator Pengetahuan Peraturan Keselamatan (PK2) memiliki nilai outer loading tertinggi sebesar 0,924, diikuti oleh Pengetahuan Catatan Kecelakaan (PK1) sebesar 0,897 dan Pengetahuan Pengendalian Risiko (PK3) sebesar 0,883. Nilai tersebut menunjukkan bahwa ketiga indikator memiliki kontribusi yang kuat dalam membentuk variabel Pengetahuan Keselamatan. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemahaman pekerja terhadap peraturan keselamatan, catatan kecelakaan, dan pengendalian risiko berperan penting dalam meningkatkan kesadaran keselamatan serta mendukung perilaku kerja yang aman. Pengetahuan keselamatan yang memadai memungkinkan pekerja mengenali potensi bahaya dan menerapkan tindakan pencegahan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya *human error*.

Variabel Keterampilan Keselamatan direpresentasikan oleh empat indikator valid. Indikator Keterampilan Identifikasi Bahaya (KK2) memiliki nilai *outer loading* tertinggi sebesar 0,843, diikuti oleh Keterampilan Komunikasi (KK1) sebesar 0,830 dan Keterampilan Praktik Kerja Aman (KK4) sebesar 0,798. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan mengidentifikasi bahaya, berkomunikasi secara efektif mengenai aspek keselamatan, serta menerapkan praktik kerja yang aman merupakan kompetensi penting bagi personel konstruksi. Keterampilan tersebut membantu pekerja mengenali kondisi tidak aman, mengoordinasikan aktivitas keselamatan, dan meminimalkan tindakan yang berpotensi menyebabkan kecelakaan.

Variabel Lingkungan Kerja direpresentasikan oleh tiga indikator valid. Indikator Kondisi Kerja Ergonomis (LK2) memiliki nilai outer loading tertinggi sebesar 0,758, sedangkan Pengendalian Kondisi Lingkungan Kerja (LK1) dan Beban Kerja yang Terkelola (LK3) masing-masing memiliki nilai sebesar 0,708. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi kerja yang ergonomis, pengendalian lingkungan kerja yang efektif, serta beban kerja yang terkendali merupakan elemen penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman dan produktif. Lingkungan kerja yang mendukung dapat membantu pekerja mempertahankan konsentrasi, mengurangi kelelahan fisik, dan melaksanakan pekerjaan dengan lebih akurat sehingga berkontribusi pada penurunan *human error*.

Variabel Penurunan *Human Error* direpresentasikan oleh tiga indikator valid. Indikator Kepatuhan terhadap Prosedur (PHE2) memiliki nilai outer loading tertinggi sebesar 0,874, diikuti oleh Ketepatan Pelaksanaan Pekerjaan (PHE1) sebesar 0,870 dan Ketepatan Pengambilan Keputusan Terkait Pekerjaan (PHE3) sebesar 0,790. Temuan ini menunjukkan bahwa kepatuhan terhadap prosedur yang telah ditetapkan, ketepatan dalam pelaksanaan pekerjaan, dan kemampuan mengambil keputusan yang tepat merupakan indikator utama dalam penurunan *human error* pada proyek konstruksi. Pekerja yang konsisten mematuhi prosedur dan mampu mengambil keputusan yang tepat cenderung lebih kecil kemungkinannya melakukan kesalahan yang dapat menurunkan kinerja keselamatan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan memvalidasi faktor serta indikator yang memengaruhi penurunan *human error* pada proyek konstruksi di Indonesia. Hasil evaluasi model pengukuran menunjukkan bahwa seluruh indikator yang dipertahankan telah memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas, sehingga layak digunakan untuk merepresentasikan variabel penelitian. Dari 17 indikator awal yang diidentifikasi melalui kajian literatur, sebanyak 13 indikator dinyatakan valid dan dipertahankan dalam model penelitian.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, dan lingkungan kerja merupakan faktor yang berperan dalam mendukung penurunan *human error* pada proyek konstruksi. Pada variabel pengetahuan keselamatan, indikator yang paling dominan adalah pengetahuan peraturan keselamatan. Pada variabel keterampilan keselamatan, indikator yang paling dominan adalah keterampilan identifikasi bahaya. Pada variabel lingkungan kerja,

indikator yang paling dominan adalah kondisi kerja ergonomis. Sementara itu, pada variabel penurunan *human error*, indikator yang paling dominan adalah kepatuhan terhadap prosedur.

Secara keseluruhan, penelitian ini menghasilkan kerangka faktor dan indikator yang tervalidasi terkait pengetahuan keselamatan, keterampilan keselamatan, lingkungan kerja, dan penurunan *human error*. Kerangka tersebut dapat digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi dan meningkatkan kinerja keselamatan kerja melalui penguatan pengetahuan keselamatan, pengembangan keterampilan pekerja, serta penciptaan lingkungan kerja yang mendukung guna mengurangi *human error* pada proyek konstruksi.

REFERENSI

- Akinlolu, M., Haupt, T. C., Edwards, D. J., & Mahamadu, A. M. (2021). *Improving construction safety through safety knowledge and competency development*. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 19(4), 1024–1041.
- Albert, D., Smith, J., & Brown, K. (2024). *The role of Safety Knowledge in preventing human error on construction sites*. *Safety Science*, 62(3), 145–156.
- Barling, J., Loughlin, C., & Kelloway, E. K. (2020). *Development and test of a model linking safety-specific transformational leadership and occupational safety*. *Journal of Applied Psychology*, 87(3), 488–496.
- Liao, P. C., Lei, G., Fang, D., & Liu, W. (2018). *The relationship between workplace conditions and safety performance in construction projects*. *Safety Science*, 105, 190–199.
- Martin, A., Karanikas, N., & Robertson, M. (2021). *Safety competency development and emergency response performance in high-risk industries*. *Safety Science*, 138, 105231.
- Mohandes, S. R., & Zhang, X. (2021). *Developing construction safety management frameworks using data-driven approaches*. *Automation in Construction*, 128, 103761.
- Moshood, T. D., Adeleke, A. Q., Nawanir, G., & Mahmud, F. (2020). *Ranking of human factors affecting contractors' risk attitudes in the Malaysian construction industry*. *Social Sciences & Humanities Open*, 2(1), 100064.
- Rafieyan, M., Banhashemi, S., & Abbasi, A. (2024). *Human factors and human error reduction in construction operations*. *Journal of Construction Safety*, 45(2), 88–102.

- Rauzana, A., Ibrahim, M., & Syahrizal. (2023). *Occupational safety management and human error prevention in construction projects*. *International Journal of Construction Management*, 23(8), 1452–1463.
- Sidiq, M. F., & Rohman, M. A. (2023). *Safety knowledge and safety skills for reducing human error in construction projects*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(6), 04023032.
- Wang, J., Liu, Y., & Chen, X. (2024). *Work environment and safety performance in construction projects*. *Journal of Occupational Health and Safety*, 32(4), 201–215.
- Wu, C., Fang, D., & Li, N. (2020). *Safety knowledge and risk control practices in construction projects*. *Safety Science*, 128, 104772.
- Xu, S., & Zou, P. X. W. (2021). *Learning from accident records to improve construction safety performance*. *Safety Science*, 141, 105335.
- Zhou, Y., et al. (2023). *Psychological stress and human error in construction work: A review*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2025. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032025>
- Zhou, Z., Li, H., & Fang, D. (2023). *Workload, stress, and safety behavior in construction projects*. *Journal of Safety Research*, 85, 140–151.