

Mohammad Ghimnastiar Ulsak, Lintang Rizkyta Ananda, G. Awaludin Sobarsah, dan Fena Retyo Titani

An Overview of The Open-Circuit Voltage Thermodynamics on Vanadium Redox Flow Battery and Zn-Air Redox Flow Battery

Muhammad Rafi Sugema, dan Robi Maulana

Dampak Pembangunan Jalan Tol Dalam Kota Bandung (BIUTR) terhadap Fenomena Induced Traffic

Rahmat Nur Saifudin, Mina Naidah Gani, dan Andry Haidar

Prototipe Sistem Pemantauan Tekanan Darah, Denyut Jantung, dan Saturasi Oksigen dalam Darah Berbasis IoT

Bayu Patria Y, Yopi Dwi A.P, dan Chairunnisa

Penentuan Layout Pemecah Gelombang di Pantai Nusa Dua Provinsi Bali

Elizabeth Desfelicia Ciciolini Sidabutar, Vanessa Keysia Imanuella Mampow, Zain Achmad Kahfi, Arturito Tri Setiawan, Hendrik Vicarlo Saragih Manihuruk, Arini Anesthesia Purba, Yongki Christandi Batubara, Fika Dwi Oktavia, Rizqy Romadhona Ginting, dan Naufal Rakha Ramdhani

Analisis Pengaruh Variasi Katalis CaO Dari Tulang Sapi Terhadap Konversi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel Melalui Transesterifikasi

Yessa Julyana, Hendriyana, Een Taryana, Handoko Iskandar, dan Xbal Meiprastyo

Techno-Economic Assessment of Dimethyl Ether (DME) Production through Methanol Dehydration Process

Raiyyan Rahmi Isda, Laode Azan Muzahab, Akmal Maulana, Desi Gumelarsari, Isma Nurul Rohmah, Syachril Saputra Roswandi, dan Prima Sukma Yuana

Evaluasi Kerapuhan Seismik Gedung Fakultas Teknik UNJANI Menggunakan Metode HAZUS

Riyandi, dan Tira Roesdiana

Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Agregat Halus Cimalaka (Sumedang) dan Agregat Halus Merapi (Klaten)

Shafa Dewintha, dan Waluyo Hatmoko

Analisis Manajemen Risiko pada Proyek Konstruksi (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang)

TIM REDAKSI

- Editor In Chief : • Dr. Martijanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57217586993)
- Advisory Editorial Board : • Dr. Iris Mahani, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia. Scopus ID : 57197848218)
- Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Sinta ID : 133135)
- Editors : • Andri Rahmat Kumalasian Nasution, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6718339)
- Andini Hizbiyati, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6973959)
- Dede Irawan Saputra, S.Pd., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57215833890)
- Giri Angga Setia, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57194215122)
- Hajjar Yuliana, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57194007789)
- Pawawoi, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 56545755100)
- Tiara Ariani Putri, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57202790101)
- Xbal Meiprastyo, S.T., M.Eng.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6722189)

Penerbit :
Fakultas Teknik
Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Bandung)
Jl. Terusan Gatot Subroto Tromol Pos 807
Bandung – Jawa Barat
Indonesia
40285
Telp. : 022-731-2741

Fakultas Teknik
Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Cimahi)
Jl. Terusan Jenderal Sudirman P.O. Box 148
Cimahi – Jawa Barat
Indonesia
40531
Telp. : 022-665-4572
022-664-3006

Jurnal Teknik merupakan **jurnal *peer-reviewed*** dalam **Bahasa Indonesia** di bidang keteknikan yang terbit **2 kali dalam setahun**. Terbit di bulan **Mei** dan **November** sejak tahun 2001. Jurnal Teknik versi online baru terbit pada tahun 2017 dengan fasilitas pengumpulan dan penerbitan online yang berbasis **Open Access Journal** dan mengikuti [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).

Harga Berlangganan	: Institusi	Rp. 170.000,-/tahun
	Individu	Rp. 160.000,-/tahun
Harga Tidak Berlangganan	: Rp. 100.000,-/nomor	

MITRA BESTARI

Anggota Tim Mitra Bestari Jurnal Teknik Tahun 2026

- Reviewers :
- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 6506054959]
 - Prof. Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57218863103]
[ORCHID ID: 0000-0003-1711-5413] [SINTA ID: 5984218]
 - Prof. Dr. Ir. H. R. Anwar Yamin, M.T., M.E. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57222001511 &
57208864466] [SINTA ID: 6882330]
 - Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM.
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 15128239500]
 - Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S.
(Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 43461203000]
 - Prof. Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg.
(Politeknik Negeri Bali, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189864100]
 - Prof. Dr. Suhartono, S.T., M.Si. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189075734]
 - Dr. Arief Nur Pratomo, S.T., M.T.
(Universitas Pertahanan, Indonesia) [SCOPUS ID: 57216756313]
 - Dr. Asep Najmurrokhman, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55919091000]
 - Dr. Budi Marpaung, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57211503173]
 - Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M.
(Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia) [SCOPUS ID: 23975188900]
 - Dr. Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 25638780900]
 - Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T.
(Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 56688583600]
 - Dr. Eng. Dwi Hantoko., B.Sc., M.Sc.
(King Fahd University of Petroleum and Minerals, Arab Saudi) [SCOPUS ID:
57203536113]
 - Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng.
(Institut Pertanian Bogor, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195301854]

- Dr. Eng. Ir. Nur Indrianti, M.T.
(UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia) [SCOPUS ID: 15071306300]
- Dr. Fitri Hadiah, S.T., M.T., IPM
(Universitas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57194602385)
- Dr. Ferry Rusgiyatro, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194649672]
[SINTA ID: 6647288]
- Dr. Haruman Wiranegara, S.T., M.T.
(Balai Besar Logam dan Mesin - Kementerian Perindustrian, Indonesia)
[SINTA ID: 6714161]
- Dr. Hendy Suryana, S.T., M.T., IPM.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200332569]
- Dr. Heri Rustamaji, S.T., M.Eng. *
(Universitas Lampung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57612717200] [SINTA ID:
6678798]
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T.
(Universitas Sriwijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57193694034]
- Dr. Ir. Arian Budi Safarina, M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189898100]
- Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.
(Badan Tenaga Nuklir Nasional, Indonesia) [SCOPUS ID: 6507211795]
- Dr. Ir. Endang Prasetyaningsih, M.T.
(Univesitas Islam Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189580587]
- Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195229456]
- Dr. Ir. Herman, M.T.
(Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia) [SINTA ID: 6030796]
- Dr. Ir. Nita Puspita Hidayat, M.T.
(Universitas Islam Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201677362]
- Dr. Ir. Oviyan Patra, M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6756651]
- Dr. Ir. Sutarno, M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57205031839]
- Dr. Ir. Timothy rey Laheba, S.T., M.T.
(Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia) [SINTA ID: 6725639]
- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T.
(Universitas Sebelas Maret, Indonesia) [SCOPUS ID: 37114996900]

- Dr. Khoiruddin, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 55584284500]
 - Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6098629]
 - Dr. Putu Teta Prihartini Aryanti, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56951380600]
[ORCHID ID: 0000-0003-0200-418X] [SINTA ID: 6001600]
 - Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56582391600]
 - Dr. Sabhan Kanata, ST., M.Eng.
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57420428900]
 - Dr. Syah Alam, S.Pd., M.T.
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191903622]
 - Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia) [SCOPUS ID: 15838524700]
 - Erwin Lim, S.T., M.S., Ph.D.
Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 36093026700]
 - Ir. Harry Ramza, MT., P.hD.
(Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189898100]
 - P. Y. M. Wibowo Nd, S.T., M.T., Ph.D.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55983351800]
 - Putu Doddy Sutrisna, S.T., M.T., Ph.D.
(Universitas Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 6504553709]
 - Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D.
(Politeknik Negeri Semarang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194209980]
 - Aji Gumilar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6082397]
 - Aji Putro Prakoso, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200571585]
[ORCHID ID: 0000-0002-7290-7352] [SINTA ID: 6747587]
 - Annisa Uswatun Khasanah, S.T., M.Sc.
(Universitas Islam Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195477115]
 - Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T.
(University of Electro-Communications (UEC), Jepang) [SCOPUS ID: 57188573899]
-

- Atik Charisma, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188567470]
[SINTA ID: 6082832]
- Edwar, S.T., M.T.
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215427881]
- Erma Desimaliana, S.T., M.T. *
(Institut Teknologi Nasional, Indonesia) [SINTA ID: 6177014]
- Handoko Rusiana Iskandar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194219446]
- Herman Budi Harja, S.T., M.T.
(Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201665196]
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPM.
(Universitas Muslim Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201065526]
- Ir. Ketut Tomy Suhari, M.T., IPP.
(Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57196485539]
- Ir. Nana Heryana, S.T., M.T., IPM.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 35174665300]
- Khamaludin, S.T., M.T.
(Universitas Islam Syekh Yusuf, Indonesia) [SCOPUS ID: 57223191789]
- M. Reza Hidayat, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188573208]
- Naftalin Winanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200994613]
- Nirmawana Simarmata, S.Pd., M.Sc.
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57301196400]
- Nivika Tiffany Somantri, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6764716]
- Prima Sukma Yuana, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 59245400500]
[SINTA ID: 6717152]
- Salita Ulitia Prini, S.T., M.T.
(Pusat Riset Telekomunikasi - BRIN, Indonesia) [SCOPUS ID: 57208581701]
- Sofyan Basuki, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6686946]
- Sussi, S.Si., M.T. *
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215071175]

- Tommi Hariyadi S.T., M.T.
(Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 53263841200]
- Wahyu Setyo Pambudi, S.T., M.T.
(ITATS Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57202921245]

DAFTAR ISI

<i>An Overview of The Open-Circuit Voltage Thermodynamics on Vanadium Redox Flow Battery and Zn-Air Redox Flow Battery</i>	01 – 15
Mohammad Ghimnastiar Ulsak, Lintang Rizkyta Ananda, G. Awaludin Sobarsah, dan Fena Retyo Titani	
<i>Dampak Pembangunan Jalan Tol Dalam Kota Bandung (BIUTR) terhadap Fenomena Induced Traffic</i>	16 – 22
Muhammad Rafi Sugema, dan Robi Maulana	
<i>Prototipe Sistem Pemantauan Tekanan Darah, Denyut Jantung, dan Saturasi Oksigen dalam Darah Berbasis IoT</i>	24 – 33
Rahmat Nur Saifudin, Mina Naidah Gani, dan Andry Haidar.	
<i>Penentuan Layout Pemecah Gelombang di Pantai Nusa Dua Provinsi Bali</i>	34 – 41
Bayu Patria Y, Yopi Dwi A.P, dan Chairunnisa	
<i>Analisis Pengaruh Variasi Katalis CaO Dari Tulang Sapi Terhadap Konversi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel Melalui Transesterifikasi</i>	42 – 49
Elizabeth Desfelicia Ciciolini Sidabutar, Vanessa Keysia Imanuella Mampow, Zain Achmad Kahfi, Arturo Tri Setiawan, Hendrik Vicarlo Saragih Manihuruk, Arini Anestesia Purba, Yongki Christandi Batubara, Fika Dwi Oktavia, Rizqy Romadhona Ginting, dan Naufal Rakha Ramdhani	
<i>Evaluasi Kerapuhan Seismik Gedung Fakultas Teknik UNJANI Menggunakan Metode HAZUS</i>	50 – 62
Raiyyan Rahmi Isda, Laode Azan Muzahab, Akmal Maulana, Desi Gumelarsari, Isma Nurul Rohmah, Syachril Saputra Roswandi, dan Prima Sukma Yuana	
<i>Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Agregat Halus Cimalaka (Sumedang) dan Agregat Halus Merapi (Klaten)</i>	63 – 70
Riyandi, dan Tira Roesdiana	
<i>Analisis Manajemen Risiko pada Proyek Konstruksi (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang)</i>	71 – 79
Shafa Dewintha, dan Waluyo Hatmoko	

DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 25 Nomor 1, bulan Mei 2026. Dalam edisi ini disajikan 8 (delapan) makalah berkaitan dengan bidang Ilmu Teknik, yang mencakup Teknik Kimia, Teknik Elektro, Teknik Mesin, Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, Teknik Industri, dan Teknik Geomatika yang meliputi: (1) *An Overview of The Open-Circuit Voltage Thermodynamics on Vanadium Redox Flow Battery and Zn-Air Redox Flow Battery*, (2) Dampak Pembangunan Jalan Tol Dalam Kota Bandung (BIUTR) terhadap *Fenomena Induced Traffic*, (3) Prototipe Sistem Pemantauan Tekanan Darah, Denyut Jantung, dan Saturasi Oksigen dalam Darah Berbasis IoT, (4) Penentuan *Layout* Pemecah Gelombang di Pantai Nusa Dua Provinsi Bali, (5) Analisis Pengaruh Variasi Katalis CaO Dari Tulang Sapi Terhadap Konversi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel Melalui Transesterifikasi, (6) Evaluasi Kerapuhan Seismik Gedung Fakultas Teknik UNJANI Menggunakan Metode HAZUS, (7) Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Agregat Halus Cimalaka (Sumedang) dan Agregat Halus Merapi (Klaten), dan (8) Analisis Manajemen Risiko pada Proyek Konstruksi (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang).

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 25 (1) ini. Tak lupa juga kami ucapkan terima kasih kepada Mitra Bestari yang telah membantu hingga Jurnal Teknik ini dapat diterbitkan. Redaksi senantiasa mengundang peneliti, perekayasa, dan para fungsional lain untuk memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya bidang ilmu teknik. Kritik dan saran atas ketidak-sempurnaan dalam Jurnal Teknik sangat kami harapkan demi kemajuan dan penyempurnaan dalam terbitan selanjutnya. Semoga pemuatan karya dalam terbitan kali ini dapat menjadi pemicu peneliti-peneliti untuk melahirkan karya-karya lain dengan ide-ide original dan bermanfaat untuk masyarakat.

Cimahi, Mei 2026

Dewan Redaksi

An Overview of The Open-Circuit Voltage Thermodynamics on Vanadium Redox Flow Battery and Zn-Air Redox Flow Battery

Mohammad Ghimnastiar Ulsak¹, Lintang Rizkyta Ananda¹, G. Awaludin Sobarsah¹, Fena Retyo Titani²

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Agriculture,
Universitas Setia Budhi Rangkasbitung, Lebak, Indonesia

²Department of Chemical Engineering, Vocational School, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia
mgulsak@usbr.ac.id, lintang.rizkyta@usbr.ac.id, g.awaludin@usbr.ac.id, fenafen16@polsri.ac.id

Abstrak

Persamaan Nernst untuk tegangan sirkuit terbuka, yang pertama kali dikembangkan oleh Walther Nernst lebih dari seabad yang lalu, sangat penting dalam studi sistem elektrokimia. Sayangnya, ketika diterapkan pada sistem yang kompleks (seperti yang menggunakan membran pertukaran ion atau melibatkan potensial campuran), persamaan ini dapat mengambil bentuk yang salah karena asumsi yang mendasari derivasi persamaan tersebut sering diabaikan dalam literatur. Terlepas dari cara proses elektrokimia diekspresikan, kesalahan-kesalahan ini dapat dicegah dengan menggunakan derivasi termodinamika yang akurat. Misalnya, pemodelan baterai aliran redoks vanadium dan baterai zinc-air memerlukan derivasi yang benar dari persamaan Nernst. Termodinamika non-kesetimbangan adalah titik awal yang ketat untuk derivasi persamaan Nernst.

Kata kunci: Baterai Aliran Redoks, Tegangan Sirkuit Terbuka, Termodinamika, Baterai Aliran Redoks Vanadium, Baterai Zn-Udara

Abstract

The open circuit voltage's Nernst equation, which was first developed Walther Nernst more than a hundred years earlier, is essential to the study of electrochemical systems. Regretfully, adapted to complex methods (such as interactions with mixed potentials or ion-exchange membranes), the equation takes on erroneous forms due to the assumptions that underlie its derivation being frequently ignored in the literature. Regardless of how the electrochemical processes are expressed, these errors may be prevented by using an accurate thermodynamic derivation. In particular, the Nernst equation must be correctly derived in order to describe zinc-air batteries and vanadium redox flow batteries. Non-equilibrium thermodynamics is where the rigorous route where the Nernst equation's formulation starts.

Keywords: Redox Flow Batteries, Open-Circuit Voltage, Thermodynamics, Vanadium Redox Flow Batteries, Zn-Air Battery

1. Introduction

When there could be no current flowing through an electrochemical cell, voltage between its terminals could be commonly referred to as the open-circuit voltage, or OCV. It is employed as a control tool on the electrochemical energy storage systems because it is immediately measurable (for example, as a state-of-charge estimator (Skylas-Kazacos & Kazacos, 2011) and (Vlasov et al., 2025) or to detect undesirable processes occurring in the system (J. Zhang, Tang, Song, Zhang, & Wang, 2006) and (Wang et al., 2025)). However, a formula known as the Nernst equation that links the observed value to the cell parameters is necessary in order to interpret it correctly. The whole thermodynamic equilibrium of the cell does not match the OCV (or at least its usually detectable value). Consider an electrochemical cell with its electrodes suddenly cut off. Open Circuit Voltage (OCV) is the first value at which the voltage between the electrodes stabilizes, as indicated by first plateau on voltage versus time graph (Pavelka, Wandschneider, & Mazur, 2015). However, if one waits, other effects (include species crossover or parasite interactions) may cause the voltage to fluctuate even more. A different number, which typically would not match the observed OCV, would define the entire equilibrium provided by the global minimum of Gibbs energy (Vágner, Kodým, & Bouzek, 2019). We only take into account the easing of the most important processes since we are concentrating on the practical description of on OCV, which is provided by the initial plateau on the voltage/time curve. Either equilibrium as well as non-equilibrium thermodynamics must be used in this kind of study.

This article provides a comprehensive review of how equation of Nernst is derived from the basic thermodynamics.

Info Makalah:

Dikirim : 10-03-25;
Revisi 1 : 12-05-25;
Diterima : 02-23-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 821-7469-1043
e-mail : mgulsak@usbr.ac.id

We also demonstrate how the OCV for complicated systems might be interpreted incorrectly when simplistic derivations are used. In the context of non-equilibrium thermodynamics, certain cases—such as corrosion processes—where many reactions can occur at a single electrode and result in mixed potentials are also covered. Lastly, we list recent advancements that may benefit greatly from this thermodynamic derivation. Naturally, this work's originality is not the Nernst equation, but rather the recollection of its underlying principles

in modern thermodynamic terms and the methodical implementation of such concepts to particular systems, including non-equilibrium occurrences, like zinc-air and all-vanadium. For example, it is demonstrated how the thermodynamic derivation from the Nernst equation yields superior results to the simpler one in vanadium as well as zinc-air redox flow batteries.

2. Method

2.1. Potential Electric

In general, the sum of the molar electrostatic potential energy can be used to express potential of species α 's electrochemistry in a solution. (Gnutt, Heyden, & Ebbinghaus, 2016) and the chemical potential μ_α .

$$\tilde{\mu} = \mu_\alpha + z_\alpha F\phi = \mu_\alpha^\circ + RT \ln \left(\gamma_\alpha \frac{b_\alpha}{b^\circ} \right) + z_\alpha F\phi \quad (1)$$

The Poisson equation in electrostatics holds for species α (on aqueous solution here), where $\tilde{\mu}_\alpha^\circ$ remains the standard chemical potential, b_α remains the molality (b° standard molality), γ_α is the activity coefficient, $(\gamma_\alpha \frac{b_\alpha}{b^\circ})$ remains its activity, z_α is charge number, also ϕ remains potential of electrostatic Maxwell.

The voltage which a potentiometer measures is determined by the disparity of electron electrochemical potential across terminals (measuring electrodes). Electrochemical potential of electrons is defined as

$$\tilde{\mu}_{e^-} = -F\phi \quad (2)$$

It is electric potential description Φ ; for further information, look at (Kjelstrup & Bedeaux, 2008), (Pavelka, Klika, Vágner, & Maršik, 2015), (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015) (Mor, 2025). Remember that Φ as well as ϕ are often different potentials. There may be a difference when two metals that have distinct Fermi energies come within contact. Although the Maxwell (also called the electrostatic) potentials of the two metals, ϕ , differ, compensating for the difference at Fermi energy, Φ is the same in both metals due to electrochemical potentials of their electrons are equal at equilibrium. Furthermore, the Poisson equation applies to electrostatic potential ϕ rather than Φ .

2.2. Electrochemical Processes

Electrochemical affinities vary, which drives electrochemical processes.

$$\tilde{A}_r = \sum_{\alpha} v_{r\alpha} \tilde{\mu}_\alpha \quad (3)$$

When the electrode surfaces are in close proximity to the electrochemical potentials $\tilde{\mu}_\alpha$; see, for example, (Dreyer, Guhlke, & Müller, 2016), (Guggenheim, 1985). Vanishing electrochemical affinity is a characteristic of an electrochemical reaction's equilibrium.

$$\sum_{\alpha} v_{r\alpha} \tilde{\mu}_\alpha = 0 \quad (4)$$

2.3. Mobility

Usually, gradient of the species' electrochemical potential is proportional to species α flow.

$$\mathbf{j}_\alpha = -\mathcal{D}_\alpha \nabla \tilde{\mu}_\alpha \quad (5)$$

For example, this link is developed from microscopic theory in (De Groot & Mazur, 2013), (Pavelka, Klika, & Grmela, 2018). $\mathcal{D}_\alpha$ is the diffusion coefficient, and for infinitely diluted liquids, $\mathcal{D}_\alpha = D_\alpha \cdot c_\alpha / RT$.

If the species being carried has the same electrochemical potential on both sides of the membrane when transport takes place, (ignoring potential coupling and crossover effects), there is no net flow.

$$\tilde{\mu}_\alpha^P = \tilde{\mu}_\alpha^N \quad (6)$$

where the positive and negative sides are denoted by P and N, respectively.

Now let's talk about battery electrolyte transfer. Equation (1) states that gradient of $\tilde{\mu}_\alpha$ may be divided through two parts: gradient of the Maxwell potential ϕ and chemical potential μ_α gradient, which is dependent upon molalities of species α within mixture. Zero-flux condition turns into a zero gradient of Maxwell electrostatic potential condition if complete mixing (homogeneous concentrations, i.e., $\nabla c = 0$) is assumed.

$$\nabla \phi = 0 \quad (7)$$

2.4. The Open-Circuit Voltage (OCV)

Although it lacks a straightforward, universal definition, the OCV is a crucial metric that describes batteries and electrochemical cells. Since there is no flux passing through the cell, a potentiometer usually monitors the voltage. This definition might not be apparent as the cell's condition is not mentioned. From a theoretical perspective, the most appealing definition is perhaps the notion because the cell of electrochemical was actually left uninterrupted long enough to reach thermodynamic equilibrium. This kind of balance would be defined by a decrease in the Gibbs free energy of all possible electrochemical reactions taking place inside cell (Vágner et al., 2019).

Yet the cell is usually not allowed to relax for full equilibrium when measuring OCV in practice. Two factors are at play: (i) it would require an excessive amount of time, and (ii) parasitic processes (such as corrosion or cross-over effects) would occur. Once a plateau emerges on voltage vs. time display, OCV is instead monitored as the voltage. In order for the observed plateau to match to the equilibrium of these processes, it is required to take into account quickest processes influencing practical OCV in theoretical calculation.

The difference between electrons' electric potentials at positive as well as negative electrodes, corresponding to their respective electrochemical potentials, will subsequently be known as the OCV.

$$E = \Phi^P - \Phi^N \quad (8)$$

Once activity coefficients are given, the OCV dependency on species' activities may constitute changed to a dependence on the species' molalities as well as concentrations. However, there is typically a paucity of data on activity coefficients, which results in the simplification of perfect mixing assumptions (activity coefficients equal to unity). Water requires a little more cautious use due to equation of Gibbs–Duhem, that connects derivative of its chemical potential to variants of its chemical potential with that of each of the other species. This is how the molalities of the other species represent water action (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015).

Into further express the OCV in a function of a state of charge (SOC), the molalities (also known as concentrations) of each species in a cell must first be established as functions of the SOC. In order to determine the relationship between charge flowing across membrane and changes in molalities of all pertinent species on both electrolytes, one must first select a specific reaction pathway. Now let's show how the formula representing the OCV on a vanadium flow cell battery is derived thermodynamically.

3. Result and Discussion

3.1. The Vanadium Redox Flow Battery (VRFB)

Onto (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015) as well as (Muñoz, Dewage, Yufit, & Brandon, 2017), the vanadium redox flow battery (VRFB) was examined. Let's quickly review the computation in a simplified format and see how it varies from the standard formula found in (Muñoz et al., 2017),

$$E_{\text{usual}}^* = E^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{c_{\text{VO}_2^+}^P c_{\text{V}^{2+}}^N (c_{\text{H}^+}^P)^2}{c_{\text{VO}^{2+}}^P c_{\text{V}^{3+}}^N} \quad (9)$$

We will be looking at the following two situations: An anion-exchange (anex) membrane-equipped VRFB and a cation-exchange (catex) membrane-equipped VRFB. In the two situations, the OCV calculation will be different.

Primary electrochemical processes occurring in VRFBs may be summed up in order



and in side of positive



on the negative side. Additionally, we must take into account ionic transport across the membrane, specifically H^+ in the catex case and HSO_4^- in the anex case. Now, let's talk about these two casess independently.

3.1.1. Membrane of Cation-Exchange (catex)

Formulas that represent electrochemical processes' equilibrium are

$$\tilde{\mu}_{\text{VO}_2^+}^P - F\Phi^P + 2\tilde{\mu}_{\text{H}^+}^P = \tilde{\mu}_{\text{VO}^{2+}}^P + \tilde{\mu}_{\text{H}_2\text{O}}^P \quad (11a)$$

and

$$\tilde{\mu}_{\text{V}^{2+}}^N = \tilde{\mu}_{\text{V}^{3+}}^N - F\Phi^N \quad (11b)$$

If the ionic transport across the membrane is in equilibrium, then

$$\tilde{\mu}_{H^+}^N = \tilde{\mu}_{H^+}^P \quad (12)$$

which is rewriteable as

$$\varphi^P - \varphi^N = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{H^+}^N}{a_{H^+}^P} \quad (13)$$

where the positive and negative electrolytes' Maxwell potentials are shown by $\varphi^{P,N}$, respectively. It is thus possible to express the OCV as

$$\begin{aligned} E &= \Phi^P - \Phi^N \\ E &= \frac{1}{F} (\tilde{\mu}_{VO_2^+}^P + 2\tilde{\mu}_{H^+}^P - \tilde{\mu}_{VO^{2+}}^P - \tilde{\mu}_{H_2O}^P) + \frac{1}{F} (\tilde{\mu}_{V^{2+}}^N - \tilde{\mu}_{V^{3+}}^N) \\ E &= \frac{1}{F} (\mu_{VO_2^+}^0 - \mu_{VO^{2+}}^0 - \mu_{H_2O}^0 + \mu_{V^{2+}}^0 - \mu_{V^{3+}}^0) + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{VO_2^+}^P (a_{H^+}^P)^2 a_{V^{2+}}^N}{a_{VO^{2+}}^P a_{H_2O}^P a_{V^{3+}}^N} + \varphi^P - \varphi^N \end{aligned} \quad (14)$$

Take note of the final line, where the Maxwell electrostatic potential difference is still present. The version of equations (11), where the left-side charge is not zero but is equal to the right-side charge, is the source of this. membrane equilibrium equation (13) must be applied in order to eliminate Maxwell potential difference, which results in

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{VO_2^+}^P a_{V^{2+}}^N a_{H^+}^P a_{H^+}^N}{a_{VO^{2+}}^P a_{H_2O}^P a_{V^{3+}}^N} \quad (15)$$

where standard cell potential is

$$E^0 = \frac{1}{F} (\mu_{VO_2^+}^0 - \mu_{VO^{2+}}^0 - \mu_{H_2O}^0 + \mu_{V^{2+}}^0 - \mu_{V^{3+}}^0) = 1.256 \text{ V} \quad (16)$$

3.1.2. Anion-Exchange (anex) Membrane

We will now talk about VRFB that has anex membranes that allow the movement of HSO_4^- ions. Equations for equilibrium (11) are identical to those in the anex situation. The ion transit differs as eq. (13) transforms to

$$\tilde{\mu}_{HSO_4^-}^N = \tilde{\mu}_{HSO_4^-}^P \quad (17)$$

which is rewriteable as

$$\varphi^P - \varphi^N = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{HSO_4^-}^P}{a_{HSO_4^-}^N} \quad (18)$$

After that, the OCV equation (14) shifts to

$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{VO_2^+}^P a_{V^{2+}}^N (a_{H^+}^P)^2 a_{HSO_4^-}^P}{a_{VO^{2+}}^P a_{H_2O}^P a_{HSO_4^-}^N} \quad (19)$$

Once more, one must express the activities, such as (Lenihan et al., 2018), on terms of molalities in order to properly compare it alongside experimental dependency of OCV in SOC. Comparison, which uses data from (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015), is displayed in Figure 1 on the assumption that the activity coefficients are equal. Specifically, take note of the fact that the OCV formulas in the anex and catex situations differ. The Nernst equation's simplified construction does not show this discrepancy. The OCV's thermodynamic formula differs from the standard one found in the literature (Sukkar & Skyllas-Kazacos, 2003), (Knehr & Kumbur, 2011), (Huynh et al., 2025), and (B. Zhang & Lei, 2025). Figure 1 is compared with the naïve equation (9) and the catex and anex equations ((15) and (19), correspondingly). It is evident that naïve and catex formulas, which are similar for standard Nernst equation for VRFB, are flawed. See (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015) for a similarity of catex membrane formula alongside experimental data.

Furthermore, the species that is carried via the membrane—more specifically, the membrane choice—determines the OCV formula (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015). The transport through the membrane equilibrium equation and the consequent Nernst equation diverge, despite the electrochemical equations being identical.

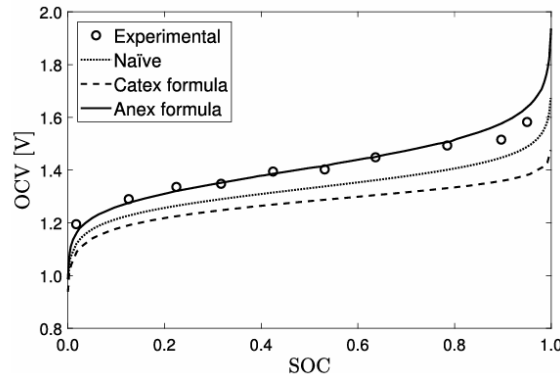


Figure 1. The testing data for an anex membrane (the data re-used via (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015))

3.2. The Zn-Air Redox Flow Battery

Literature on Zn-air battery (ZAB) has a variety of OCV equations (Schröder & Krewer, 2014), (Stamm, Varzi, Latz, & Horstmann, 2017), (Zelger, Süßenbacher, Laskos, & Gollas, 2019). Some writers develop half-cell potentials and/or apply them into Butler–Volmer equation, even if they do not specifically provide an OCV formula. Here, we address various shortcomings of equations reported onto literature and provide proper thermodynamic derivation of OCV formulation to the Zn-air battery alongside an anion-exchange membrane (Abbasi, Hosseini, Somwangthanaroj, Mohamad, & Kheawhom, 2019), (Dewi, Oyaizu, Nishide, & Tsuchida, 2003), (Fujiwara et al., 2011), (Tsehay, Alloin, & Iojoiu, 2019).

3.2.1. Electrochemical Processes

At a zinc-air battery, the electrochemical process occurring onto negative electrode is

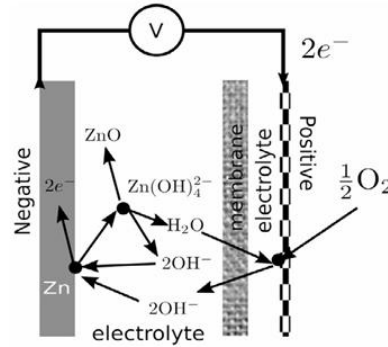


Figure 2. A simplified zinc-air battery design

this is followed by Zn oxide precipitation.



The electrochemical reaction in positive half-cell is as follows:



One side produces water as well as ions of hydroxide, while the other side consumes them. In a perfect anion-exchange membrane, the sole ion that passes through it is OH^- .

3.2.2. Situations for Equilibrium

Similar to the last case, we must ascertain the proper equilibrium condition at the membrane and electrodes. The reaction between the negative electrodes is at equilibrium when

$$0 = \tilde{\mu}_{\text{Zn}}^{\text{N}} + 4\tilde{\mu}_{\text{OH}^-}^{\text{N}} - \tilde{\mu}_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\text{N}} - 2\tilde{\mu}_{\text{e}^-}^{\text{N}} \quad (21)$$

which is rewriteable as

$$0 = \mu_{\text{Zn}}^{\circ} + 4\mu_{\text{OH}^-}^{\circ} + 4RT \ln a_{\text{OH}^-}^{\text{N}} - 4F\phi^{\text{N}} - \mu_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\circ} - RT \ln a_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\text{N}} + 2F\phi^{\text{N}} + 2F\phi^{\text{N}} \quad (22)$$

the positive electrode half-reaction's equilibrium, on the other hand, indicates

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{2}\mu_{\text{O}_2}^{\text{P}} + \mu_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{P}} + 2\tilde{\mu}_{\text{e}^-}^{\text{P}} - 2\tilde{\mu}_{\text{OH}^-}^{\text{P}} \\ &= \frac{1}{2}\mu_{\text{O}_2}^{\circ} + \frac{1}{2}RT \ln a_{\text{O}_2}^{\text{P}} + \mu_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} + RT \ln a_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{P}} - 2F\phi^{\text{P}} - 2\mu_{\text{OH}^-}^{\circ} - 2RT \ln a_{\text{OH}^-}^{\text{P}} + 2F\phi^{\text{P}} \end{aligned} \quad (23)$$

membrane mobility equilibrium can be represented using

$$\tilde{\mu}_{\text{OH}^-}^{\text{N}} = \tilde{\mu}_{\text{OH}^-}^{\text{P}} \quad (24)$$

3.2.3. Open-Circuit Voltage (OCV)

Battery's OCV remains then obtained via combining (22) and (23)

$$E = \phi^{\text{P}} - \phi^{\text{N}} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{2F} \left(\mu_{\text{Zn}}^{\circ} + 2\mu_{\text{OH}^-}^{\circ} - \mu_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\circ} + \frac{1}{2}\mu_{\text{O}_2}^{\circ} + \mu_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\sqrt{a_{\text{O}_2}^{\text{P}} a_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{P}} (a_{\text{OH}^-}^{\text{N}})^4}}{(a_{\text{OH}^-}^{\text{P}})^2 a_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\text{N}}} \right) + \phi^{\text{P}} - \phi^{\text{N}} \quad (26)$$

electrolyte potentials term can be replaced by equilibrium of OH^- transport across membrane (24) this way

$$\phi^{\text{P}} - \phi^{\text{N}} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{\text{OH}^-}^{\text{P}}}{a_{\text{OH}^-}^{\text{N}}} \right)^2 \quad (27)$$

final version of generic equation to OCV may be obtained by plugging this connection back into equation (25).

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\sqrt{a_{\text{O}_2}^{\text{P}} a_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{P}} (a_{\text{OH}^-}^{\text{N}})^2}}{a_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\text{N}}} \right) \quad (28)$$

where

$$E^{\circ} = \frac{1}{2F} \left(\mu_{\text{Zn}}^{\circ} + 2\mu_{\text{OH}^-}^{\circ} - \mu_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\circ} + \frac{1}{2}\mu_{\text{O}_2}^{\circ} + \mu_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} \right) = 1.60 \text{ V} \quad (29)$$

use typical chemical potential ideals that have been provided on the Appendix A.

3.2.4. Comparing standard OCV

In literature, the most widely used formulation to Zn-air battery OCV (e.g., [18]) has become

$$E_{\text{usual}} = E^{\text{P}} - E^{\text{N}} = E^{\circ} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{\sqrt{a_{\text{O}_2}^{\text{P}} a_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{P}} (c_{\text{OH}^-}^{\text{N}})^4}}{c_{\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}}^{\text{N}} (c_{\text{OH}^-}^{\text{P}})^2} \quad (30)$$

From transport equilibrium of the OH^- through membrane (29), formula (30) deviates from the standard formula (32). One name for these concepts is the Donnan (or membrane) potential. They make formula (30) more accurate than it would be otherwise. The Nernst equation's thermodynamic foundations must thus be revisited in the context of zinc-air batteries. Keep in mind, too, that practically any species that is tiny enough to fit through the pore scan may be transported across the positive and negative chambers if the battery's ion-exchange membrane is replaced with a porous separator. One must identify the electrochemical mechanism that equilibrates across the separator first in order to derive a relation for $\phi^{\text{P}} - \phi^{\text{N}}$. In the event that a different charged species equilibrates first, for example, eq. (26) must be substituted by the species' analogical equilibrium equation.

Many of the equations found in the literature (Schröder & Krewer, 2014), (Stamm et al., 2017), (Zelger et al., 2019) contain flaws that might have been avoided with the thermodynamic derivation shown here, despite the fact that the majority of modeling studies on the Zn-air systems examine cells alongside porous separators rather than membranes. For instance, activity term on formula shown in (Zelger et al., 2019) has the opposite sign. (Schröder & Krewer, 2014) and (Sun et al., 2025) uses the O₂ and H₂O concentrations rather than their activities. The relationship between activities and concentrations necessitates a separate method for determining the reference concentration over flawless liquids (or on the result of example, solvents) and dissolved gases. Henry's law provides the reference state under standard conditions, and the correct method for dissolved gas concentration was determined in (Stamm et al., 2017).

Furthermore, the majority of recent studies (Deiss, Holzer, & Haas, 2002), (Stamm et al., 2017), (Zelger et al., 2019) similarly depend on inaccurate values for the zinc electrode's standard potential. Based on the Gibbs energy of production of Zn(OH)₄²⁻ provided first time by (Gubeli & Ste-Marie, 1967) then (Kobets, Pshynko, Yatsyk, & Demutska, 2025), the value utilized, $E_{Zn}^{0,*} = -1.286$ V (vs. SHE), is the one that was published in (Bard, Parsons, & Jordan, 1985), (Dean & Lange, 1999), and (Jinnouchi, Karsai, & Kresse, 2024). However, a number of publications (Baes & Mesmer, 1976), (Powell et al., 2009), (Y. Zhang & Muhammed, 2001), and (Kim et al., 2025) have questioned the measurements made in (Gubeli & Ste-Marie, 1967) and (Kobets et al., 2025) because they were insufficient for measuring pH. $E_{Zn}^0 = -1.20$ V (vs. SHE) is obtained in this study using the value of $\Delta_f G^\circ$ Zn(OH)₄²⁻ suggested by (Y. Zhang & Muhammed, 2001), which is compatible with the ones given in (Baes & Mesmer, 1976) and (Reed, 2020) and on useful accord with experimental potentiometric measurements published by (C. Zhang, Wang, Zhang, Zhang, & Cao, 2001), (Isaacson, McLarnon, & Cairns, 1990), and (Sellathurai, Khademi, Zhang, Al-Hamdani, & Barz, 2025). OCV as well as kinetic constants for Zn reaction are assessed incorrectly when an erroneous standard potential is used. The standard potentials might be critically evaluated by finding the specific compounds (in this example, Zn(OH)₄²⁻) to which values of $\Delta_f G^\circ$ are not adequately stabilized using correct thermodynamic calculation of Nernst equation given below.

3.2.5. The impact of mixed potentials

The side reactions occurring on the electrodes are not taken into consideration in the reaction schemes (20a) and (20c). In actuality, the hydrogen evolution process (HER) can also occur at the zinc electrode's equilibrium potential.



The corrosion process changes the system's OCV while consuming active material (zinc). In this case, half-cell potential is commonly known as mixed potential. Since system is no longer on the equilibrium, this situation needs to be evaluated using non-equilibrium thermodynamics. Currents equality (no net current) characterizes corrosion pair equations (20a) as well as (31) in rapid equilibrium. For example, (Pavelka, Wandschneider, et al., 2015) to the thermodynamic origin of this formula (based in idea of potentially asymmetric dissipation potentials) or (Gnutt et al., 2016) for a kinetic origin, reaction rates are often described using equation of Butler–Volmer.

$$j = j_0 \left(e^{\frac{\alpha \tilde{A}}{RT}} - e^{-\frac{(1-\alpha)\tilde{A}}{RT}} \right) \quad (32)$$

Usually taken to be equal to 1/2, charge transfer coefficient α indicates whether state of transition is closer for reduced as well as oxidized species (Gnutt et al., 2016). The exchange current j_0 prefactor is positive on direction of oxidation and can be either constant as well as depending in reactant along with product concentrations (see (Newman & Thomas-Alyea, 2004) along with (Pavelka et al., 2018) for the Boltzmann equation).

Generally speaking, the mixed potential may be found using computational techniques that compute the potential at which the electrode's anodic and cathodic processes' combined currents—in this example, the evolution of hydrogen and the dissolution of zinc—are equal to zero. Analytical solutions of the mixed potential can be obtained, however, by simplifying equation of Butler–Volmer under specific circumstances. Equation of Tafel is the result of the Butler–Volmer equation (32) when high $|\tilde{A}|$ is present.

$$j = j_0 e^{\frac{(1-\alpha)\tilde{A}}{RT}} \quad (33)$$

whereas it becomes a linear relation for the low $|\tilde{A}|$ situation,

$$j = j_0 \frac{\tilde{A}}{RT} \quad (34)$$

from the overpotential to the current. Observe that in the low current limit, the charge transfer coefficient α vanishes.

According to (Perez, 2007), (X. G. Zhang, 1996), and (Ren et al., 2025) the most frequently documented circumstance in the corrosion literature is when both reactions are on Tafel regime (high $|\tilde{A}|$). But, given that corrosion inhibitors and zinc battery electrodes are claimed to have rapid kinetics and relatively significant hydrogen. However,

since Zn battery electrodes—which include corrosion inhibitors—are said towards have quick kinetics and comparatively large hydrogen overpotentials, this regime does not apply in their case (Cachet, Ströder, & Wiart, 1982), (Chen & Lasia, 1991), (Dundálek et al., 2017), and (Zhen, Hiratsuka, Chiku, Higuchi, & Inoue, 2025). Accordingly, the HER is typically on Tafel regime and Zn dissolution is on linear regime in Zn-based battery systems operating under conditions of OCV.

3.2.6. Addition of the Donnan potential

The Donnan potential, which exists across the membrane as a result of differential proton concentrations between the two electrolytes, is another significant aspect that is overlooked by the usual form of the Nernst equation employed in VRFB models (Figure 3a). The examination of two popular electrolyte manufacturing techniques provides a clear explanation for the variation in proton concentration. i) the electrolysis of vanadium pentoxide in suspended powder (Sukkar & Skyllas-Kazacos, 2003) and ii) the charging of vanadyl sulfate to create the negative vanadium electrolyte (–ve) (Hwang & Ohya, 1996) and (Knehr & Kumbur, 2011).

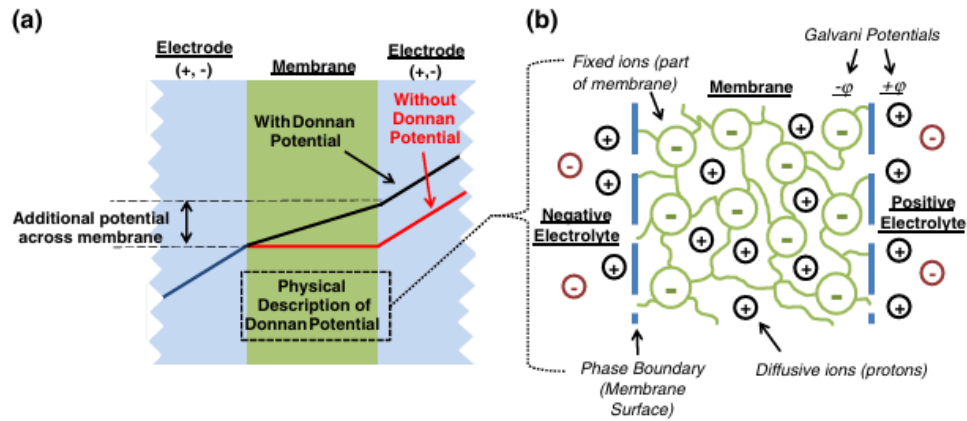


Figure 3. a) OCV with and without the membrane potential,
b) Physical depiction of the electrolytic double layers on both sides of the ion exchange membrane

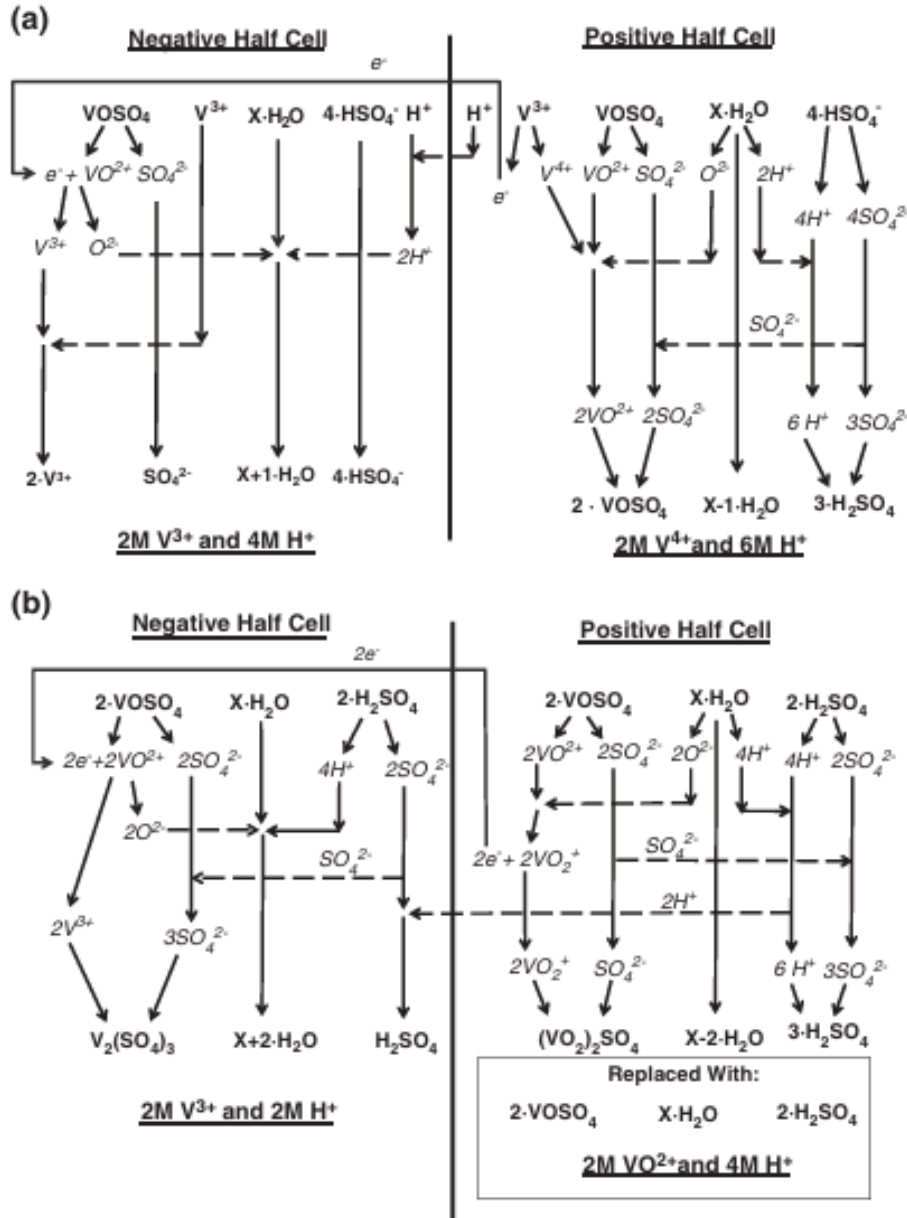


Figure 4. a) The second stage of the electrolysis of vanadium pentoxide in suspended powder;
b) The electrolytes containing vanadyl sulfate are prepared.

The first process, suspended powder electrolysis, reduces a solution of 1M $V_2O_5 + 5M H_2SO_4$ to a new solution of 1M $VOSO_4$ (V^{4+}) + 1M V^{3+} + 4M HSO_4^- + 1M H^+ + $x \cdot M H_2O$. The cell is then charged to create two distinct electrolytes, one containing only V^{3+} and the other solely V^{4+} , after an equal amount of the new V^{4+}/V^{3+} solution is added to both the positive and negative half-cells of a VRFB (Fig. 2a). The positive and negative half cells of a VRFB are filled with a solution of vanadyl sulfate (2M $VOSO_4$) dissolved in sulfuric acid (2M H_2SO_4) in the second electrolyte preparation procedure. Vanadium in the positive half-cell oxidizes to V^{5+} when the cell is charged, whereas vanadium in the negative half-cell decreases to V^{3+} (Figure 2b). The original vanadyl sulfate solution is then used to replace the solution in the positive half-cell, producing a VRFB at 0% state-of-charge (SOC) with a -ve that has two million fewer protons than +ve. The creation and dissociation of H_2O , which is directly linked to the presence of V^{4+} and V^{5+} as oxides, causes the imbalance of H^+ in both preparation procedures. The same theoretical approach that was used to derive the Nernst equation can be applied to determine the Donnan potential within the VRFB. A membrane potential, which can be described as follows, arises at each electrolyte/membrane phase boundary when a VRFB is in equilibrium (Hamann, 2007) and (Knehr & Kumbur, 2011).

$$E_m^k = \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{C_{H^+}^k}{C_{H^+}^m} \right) \quad (35)$$

Where m denotes the membrane and k is either "+" or "-" depending on the electrolyte. These membrane potentials are caused by the presence of positively and negatively charged layers at the electrolyte/membrane interfaces, which are created by the protons' locations in the membrane and electrolytes (Fig. 3b). The potentials at each electrolyte/membrane phase boundary will be different if the proton concentrations in the positive and negative electrolytes are different. There will be a net potential (Donnan potential) across the membrane if equation (35) is applied to both half-cells. The Donnan potential within the VFRB can be written as follows if equation (36) is applied to both half-cells.

$$E_m = E_m^+ - E_m^- \left(\frac{RT}{F} \ln \left(\frac{C_{H^+}^+}{C_{H^+}^-} \right) \right) \quad (36)$$

The complete form of the Nernst equation for a VRFB may be expressed as follows by adding the Donnan potential and the proton concentration at the positive electrode:

$$E = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{c_{VO_2^+} c_{V^{2+}} (c_{H^+}^+)^2 c_{H^+}^+}{c_{VO_2^+} c_{V^{3+}} c_{H^+}^-} \right) \quad (37)$$

To assess the correctness of the method, two sets of data from experiments were compared with the full version of the Nernst equation in equation (37) with the exception of the starting species concentrations, the electrolytes were made for the two sets of experimental data using the procedure shown in Figure 4b (Hwang & Ohya, 1997). The following variations in vanadium and proton concentrations occur during operation due to reactions at the electrodes:

$$c_{VO_2^+} = c_{V^{2+}} = c_V SOC \quad (38)$$

$$c_{VO_2^+} = c_{V^{3+}} = c_V (1 - SOC) \quad (39)$$

$$c_{H^+}^k = c_{H^+}^{0,k} + c_V SOC \quad (40)$$

Where $c_{H^+}^{0,k}$ denotes the starting proton concentrations in the +ve or -ve, and c_V is the total concentration of vanadium. Ionic bonds are stretched and weakened in the presence of an electric field, such as the Galvani potentials of a VRFB, which increases ion dissociation. As a result, all protons that were previously linked to SO_4^{2-} are considered to be totally dissociated and to exist as free protons when calculating $c_{H^+}^k$ (Knehr & Kumbur, 2011).

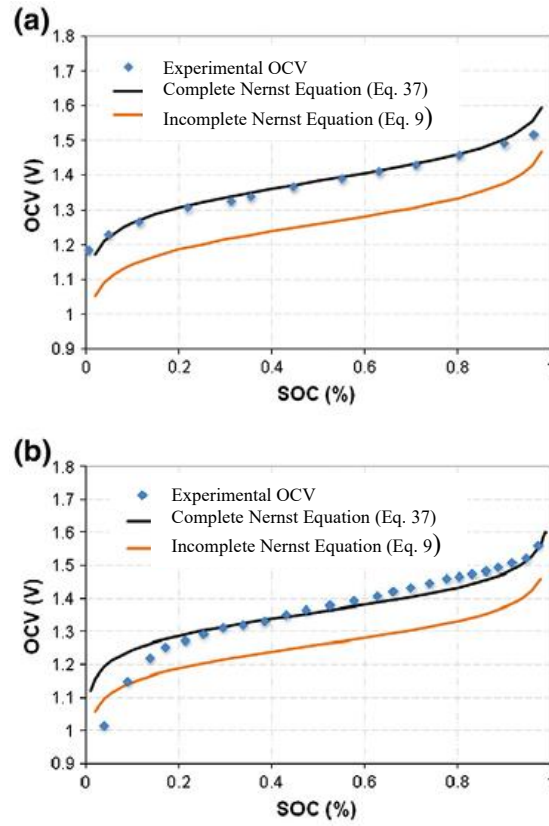


Figure 5. Experimental and anticipated OCV are compared using the suggested correlation equation (37) and the traditional Nernst equation, equation (9). The experimental conditions were as follows: a) $T = 303\text{ K}$ and initial $-ve$ and $+ve$ concentrations of $2M\ V^{3+} + 6M\ H^{+}$ and $2M\ VO^{2+} + 8M\ H^{+}$, respectively ($c_V = 2M$, $c_{H^{+}}^{0,+} = 8M$, $c_{H^{+}}^{0,-} = 6M$); b) $T = 298K$ and initial $-ve$ and $+ve$ concentrations of $1M\ V^{3+} + 5M\ H^{+}$ and $1M\ VO^{2+} + 6M\ H^{+}$, respectively ($c_V = 1M$, $c_{H^{+}}^{0,+} = 5M$, $c_{H^{+}}^{0,-} = 5$). (the data re-used via (Knehr & Kumbur, 2011))

The standard form of the Nernst equation in equation (9) used in current VRFB models yields $\pm 8.1\%$ average error within the same SOC range, while the complete form of the Nernst equation, equation (37) exhibits very good agreement with the experimental data ($\pm 1.2\%$ average error) within the normal operating conditions ranging from 5% to 95% SOC, as Fig. 5 makes evident. The assumption of unity activity coefficients can be blamed for any disagreement between experimental results at the extreme circumstances ($SOC < 5\%$ or 95%) and the entire form of the Nernst equation.

Conclusions

Literature makes considerable use of the simplified approach to the Nernst equation. However, when examining and simulating battery systems, such as in vanadium redox flow batteries, it may result in erroneous findings. A more reliable approach to the OCV that considers all required interfaces and potential non-equilibrium processes is thermodynamic formula of Nernst equation from basic up, starting with non-equilibrium thermodynamics.

The species passing through the membrane determines the OCV, especially on systems alongside ion-exchange membranes. Two variations of the Nernst equation are found in vanadium redox flow battery (VRFB), that allow over use of cation-exchange as well as anion-exchange membranes. The OCV may constitute influenced by non-equilibrium processes such as corrosion reason thermodynamic equilibrium is not the state in which it is measured. In conclusion, the Nernst equation should be determined taking non-equilibrium thermodynamics into account.

Acknowledgements

The authors would like to thank Universitas Setia Budhi Rangkasbitung for its financial support for this research. The authors would also like to thank colleagues who contributed to the useful discussions.

Appendix A. Gibbs formation energies

It is possible for assume that the standard Gibbs energies of formation, $\Delta_f G^\circ$, are equivalent to standard chemical potentials (Gnutt et al., 2016), (Reed, 2020). Both the $\Delta_f G^\circ$ of H^+ inside water and normal Gibbs energy of elements production are by definition zero. Chemical compounds used in this paper's standard Gibbs energy of synthesis are shown in Table 1 as follows (Reed, 2020) (unless otherwise noted). The temperature, pressure, and molality of the reference state are 298.15 K, 1 bar, and one mol kg^{-1} , respectively.

Table 1. formation standard Gibbs energies. Liquid (l) and aqueous solution (aq) are the two phases.

Compound	Phase	$\Delta_f G^\circ$ [kJ mol ⁻¹]
H^+	aq	0
H_2O	l	-237.129
V^{2+}	aq	-217.6
V^{3+}	aq	-242.3
VO^{2+}	aq	-446.4 [54]
VO_2^+	aq	-587.0 [54]

Notation

α	= species on aqueous solution
$\tilde{\mu}_\alpha^\circ$	= standard chemical potential
b_α	= molality
b°	= standard molality
γ_α	= activity coefficient
$(\gamma_\alpha \frac{b_\alpha}{b^\circ})$	= its activity
z_α	= charge number
ϕ	= potential of electrostatic Maxwell
D_α	= diffusion coefficient
$c_{H^+}^{0,k}$	= proton concentrations
c_V	= total concentration of vanadium
E	= net cell potential
Φ^P	= reduction potential of the positive electrode (cathode)
Φ^N	= reduction potential of the negative electrode (anode)
E_{usual}^*	= non-standard open-circuit cell voltage (reversible potential) under given concentration profiles
E°	= The standard cell potential of the VRFB, typically 1.25 V to 1.26 V at standard conditions (1 M, 298.15 K)
R	= universal ideal gas constant (8.314 J/mol · K)
T	= absolute operating temperature in Kelvins (K)
F	= Faraday's constant (96,485 C/mol)
$c_{VO_2^+}^P$	= concentration of vanadium(V) ions in the positive electrolyte
$c_{V^{2+}}^N$	= concentration of vanadium(II) ions in the negative electrolyte
$(c_{H^+}^P)^2$	= square of the proton (hydrogen ion) concentration in the positive electrolyte
$c_{VO^{2+}}^P$	= concentration of vanadium(IV) ions in the positive electrolyte
$c_{V^{3+}}^N$	= concentration of vanadium(III) ions in the negative electrolyte
j	= net current density (A/m ²)
j_0	= exchange current density
α	= anodic charge transfer coefficient
$\bar{A}$	= molar overpotential energy (J/mol)
$(c_{H^+}^+)^2$	= protons explicitly consumed by the reduction
$\frac{c_{H^+}^+}{c_{H^+}^{0,k}}$	= ratio accounts for the Donnan potential across the polymer membrane
$c_{H^+}^{0,k}$	= starting proton concentrations in the +ve or -ve
c_V	= total concentration of vanadium

References

Abbasi, A., Hosseini, S., Somwangthanaroj, A., Mohamad, A. A., & Kheawhom, S. (2019). Hydroxide Exchange Separator Membranes for Zinc – Air Battery, *I*, 1–17.

- Baes, C. F., & Mesmer, R. E. (1976). *The Hydrolysis of Cations*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=CgnwAAAAAAAJ>
- Bard, A. J., Parsons, R., & Jordan, J. (1985). *Standard Potentials in Aqueous Solution*. Taylor & Francis. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=fuJV1H18KtEC>
- Cachet, C., Ströder, U., & Wiart, R. (1982). The kinetics of zinc electrode in alkaline zincate electrolytes. *Electrochimica Acta*, 27(7), 903–908. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(82\)80214-4](https://doi.org/10.1016/0013-4686(82)80214-4)
- Chen, L., & Lasia, A. (1991). Study of the Kinetics of Hydrogen Evolution Reaction on Nickel-Zinc Alloy Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(11), 3321–3328. <https://doi.org/10.1149/1.2085409>
- De Groot, S. R., & Mazur, P. (2013). *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Dover Publications. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=mfFyG9jfaMYC>
- Dean, J. A., & Lange, N. A. (1999). *Lange's Handbook of Chemistry*. McGraw-Hill. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=56KPMQEACAAJ>
- Deiss, E., Holzer, F., & Haas, O. (2002). Modeling of an electrically rechargeable alkaline Zn-air battery. *Electrochimica Acta*, 47(25), 3995–4010. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00316-X](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00316-X)
- Dewi, E. L., Oyaizu, K., Nishide, H., & Tsuchida, E. (2003). Cationic polysulfonium membrane as separator in zinc-air cell. *Journal of Power Sources*, 115(1), 149–152. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00650-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00650-X)
- Dreyer, W., Guhlke, C., & Müller, R. (2016). A new perspective on the electron transfer: Recovering the Butler-Volmer equation in non-equilibrium thermodynamics. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(36), 24966–24983. <https://doi.org/10.1039/c6cp04142f>
- Dundálek, J., Šnajdr, I., Libánský, O., Vrána, J., Pocič, J., Mazúr, P., & Kosek, J. (2017). Zinc electrodeposition from flowing alkaline zincate solutions: Role of hydrogen evolution reaction. *Journal of Power Sources*, 372(October), 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.10.077>
- Fujiwara, N., Yao, M., Siroma, Z., Senoh, H., Ioroi, T., & Yasuda, K. (2011). Reversible air electrodes integrated with an anion-exchange membrane for secondary air batteries. *Journal of Power Sources*, 196(2), 808–813. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.07.074>
- Gnutt, D., Heyden, M., & Ebbinghaus, S. (2016). Physical Chemistry 2015. *Nachrichten Aus Der Chemie*, 64(3), 310–313. <https://doi.org/10.1002/nadc.20164047296>
- Gubeli, A. O., & Ste-Marie, J. (1967). Stabilité des complexes hydroxo et produits de solubilité des hydroxydes de métaux. I. Argent et zinc. *Canadian Journal of Chemistry*, 45(8), 827–832. <https://doi.org/10.1139/v67-137>
- Guggenheim, E. ~A. (1985). *Thermodynamics - An advanced treatment for chemists and physicists (7th edition)*. Hamann, C. H. (2007). *Electrochemistry*. WILEY-VCH (NY). Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=A8nIzgEACAAJ>
- Huynh, T. T. K., Yang, T., Nayanthara, P. S., Yang, Y., Ye, J., & Wang, H. (2025). *Construction of High-Performance Membranes for Vanadium Redox Flow Batteries: Challenges, Development, and Perspectives*. Nano-Micro Letters (Vol. 17). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01736-x>
- Hwang, G.-J., & Ohya, H. (1996). Preparation of cation exchange membrane as a separator for the all-vanadium redox flow battery. *Journal of Membrane Science*, 120(1), 55–67. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00135-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00135-4)
- Hwang, G.-J., & Ohya, H. (1997). Crosslinking of anion exchange membrane by accelerated electron radiation as a separator for the all-vanadium redox flow battery. *Journal of Membrane Science*, 132(1), 55–61. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(97\)00040-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(97)00040-9)
- Isaacson, M. J., McLarnon, F. R., & Cairns, E. J. (1990). Zinc Electrode Rest Potentials in Concentrated KOH - K₂Zn (OH)₄ Electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 137(8), 2361–2364. <https://doi.org/10.1149/1.2086944>
- Jinnouchi, R., Karsai, F., & Kresse, G. (2024). Absolute standard hydrogen electrode potential and redox potentials of atoms and molecules: Machine learning aided first principles calculations. *Chemical Science*, 16(5), 2335–2343. <https://doi.org/10.1039/d4sc03378g>
- Kim, H., Kim, M. M., Cho, J., Lee, S., Kim, D. H., Shin, S. J., ... Choi, C. H. (2025). Cation Effect on the Electrochemical Platinum Dissolution. *Journal of the American Chemical Society*, 147(5), 4667–4674. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c17833>
- Kjelstrup, S., & Bedeaux, D. (2008). Non-equilibrium Thermodynamics of Heterogeneous Systems. *Series on Advances in Statistical Mechanics*. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91721720>
- Knehr, K. W., & Kumbur, E. C. (2011). Open circuit voltage of vanadium redox flow batteries: Discrepancy between models and experiments. *Electrochemistry Communications*, 13(4), 342–345. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2011.01.020>
- Kobets, S. O., Pshynko, G. M., Yatsyk, B. P., & Demutska, L. M. (2025). Promising Adsorbents for the Purification of Aquatic Environments from Heavy Metals: A Review. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 47(5), 476–491. <https://doi.org/10.3103/S1063455X25050066>

- Lenihan, C., Oboroceanu, D., Quill, N., Ní Eidhin, D., Bourke, A., Lynch, R. P., & Buckley, D. N. (2018). Water Affinity of Vanadium Electrolytes. *ECS Transactions*, 85(13), 175–189. <https://doi.org/10.1149/08513.0175ecst>
- Mor, B. (2025). The Conceptual Flow of Physics: A Transdisciplinary Framework for Modern Science. *Transdisciplinary Journal of Engineering and Science*, 16, 209–233. <https://doi.org/10.22545/2025/00277>
- Muñoz, C. A. P., Dewage, H. H., Yufit, V., & Brandon, N. P. (2017). A Unit Cell Model of a Regenerative Hydrogen-Vanadium Fuel Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(14), F1717–F1732. <https://doi.org/10.1149/2.1431714jes>
- Newman, J., & Thomas-Alyea, K. E. (2004). *Electrochemical Systems*. Wiley. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=vArZu0HM-xYC>
- Pavelka, M., Klika, V., & Grmela, M. (2018). Multiscale Thermo-Dynamics. *Multiscale Thermo-Dynamics*, (December 2019). <https://doi.org/10.1515/9783110350951>
- Pavelka, M., Klika, V., Vágner, P., & Maršik, F. (2015). Generalization of exergy analysis. *Applied Energy*, 137(March 2020), 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.071>
- Pavelka, M., Wandschneider, F., & Mazur, P. (2015). Thermodynamic derivation of open circuit voltage in vanadium redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 293, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.05.049>
- Perez, N. (2007). *Electrochemistry and Corrosion Science*. Springer US. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=nynrBwAAQBAJ>
- Powell, K. J., Brown, P. L., Byrne, R. H., Gajda, T., Hefter, G., Leuz, A. K., ... Wanner, H. (2009). Chemical speciation of environmentally significant metals with inorganic ligands. Part 3: The Pb²⁺⁺ OH⁻, Cl⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, and PO₄³⁻ systems (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 81(12), 2425–2476. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-09-03-05>
- Reed, J. J. (2020). Digitizing “The NBS tables of chemical thermodynamic properties: Selected values for inorganic and c1 and c2 organic substances in SI Units”1. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/JRES.125.007>
- Ren, B., Zhang, X., Wei, H., Jiang, J., Chen, G., Li, H., & Liu, Z. (2025). Suppressing Zinc Metal Corrosion by an Effective and Durable Corrosion Inhibitor for Stable Aqueous Zinc Batteries. *Advanced Functional Materials*, 35(17), 2418594. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202418594>
- Schröder, D., & Krewer, U. (2014). Model based quantification of air-composition impact on secondary zinc air batteries. *Electrochimica Acta*, 117, 541–553. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.116>
- Sellathurai, A. J., Khademi, M., Zhang, B. X., Al-Hamdani, M., & Barz, D. P. J. (2025). Mitigation of Dendrite Formation on Zinc Electrodes in Mildly Acidic Electrolytes: The Influence of Self-Assembled Graphene Surface Coatings and Electrolyte Additives. *Langmuir*, 41(29), 19204–19217. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c01550>
- Skyllas-Kazacos, M., & Kazacos, M. (2011). State of charge monitoring methods for vanadium redox flow battery control. *Journal of Power Sources*, 196(20), 8822–8827. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.080>
- Stamm, J., Varzi, A., Latz, A., & Horstmann, B. (2017). Modeling nucleation and growth of zinc oxide during discharge of primary zinc-air batteries. *Journal of Power Sources*, 360, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.073>
- Sukkar, T., & Skyllas-Kazacos, M. (2003). Water transfer behaviour across cation exchange membranes in the vanadium redox battery. *Journal of Membrane Science*, 222(1), 235–247. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00309-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00309-0)
- Sun, M., Wan, K., Huang, Y., Yang, H., Zhou, X., Yan, C., ... Qian, T. (2025). Playing with Water Molecules: “Repulsing” or “Trapping” to Exclude Water-Induced Side Reactions on Zn Metal Anode. *Advanced Functional Materials*, 35(13), 2417890. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202417890>
- Tsehaye, M. T., Alloin, F., & Iojoiu, C. (2019). Prospects for anion-exchange membranes in alkali metal–air batteries. *Energies*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/en12244702>
- Vágner, P., Kodým, R., & Bouzek, K. (2019). Thermodynamic analysis of high temperature steam and carbon dioxide systems in solid oxide cells. *Sustainable Energy and Fuels*, 3(8), 2076–2086. <https://doi.org/10.1039/c9se00030e>
- Vlasov, V. I., Kuzin, A. Y., Florya, I. N., Buriak, N. S., Chernyshev, V. S., Golikov, A. D., ... Gorin, D. A. (2025). Hybrid nanophotonic-microfluidic sensor integrated with machine learning for operando state-of-charge monitoring in vanadium flow batteries. *Journal of Energy Storage*, 111(August 2024), 115349. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115349>
- Wang, C. R., Stansberry, J. M., Mukundan, R., Chang, H.-M. J., Kulkarni, D., Park, A. M., ... Zenyuk, I. V. (2025). Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis: Cell-Level Considerations for Gigawatt-Scale Deployment. *Chemical Reviews*, 125(3), 1257–1302. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00904>
- Zelger, C., Süßenbacher, M., Laskos, A., & Gollas, B. (2019). State of charge indicators for alkaline zinc-air redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 424, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.099>

- Zhang, B., & Lei, Y. (2025). Simulation of the electrolyte imbalance in vanadium redox flow batteries. *PLoS ONE*, 20(2 February). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318460>
- Zhang, C., Wang, J., Zhang, L., Zhang, J., & Cao, C. (2001). The Behavior of the Amalgamated Zinc Electrode in Supersaturated Alkaline Zincate Solutions. *Journal of The Electrochemical Society - J ELECTROCHEM SOC*, 148. <https://doi.org/10.1149/1.1374447>
- Zhang, J., Tang, Y., Song, C., Zhang, J., & Wang, H. (2006). PEM fuel cell open circuit voltage (OCV) in the temperature range of 23 °C to 120 °C. *Journal of Power Sources*, 163(1 SPEC. ISS.), 532–537. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.026>
- Zhang, X. G. (1996). *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. Springer US. Retrieved from <https://books.google.co.id/books?id=Qmf4VsriAtMC>
- Zhang, Y., & Muhammed, M. (2001). Critical evaluation of thermodynamics of complex formation of metal ions in aqueous solutions VI. Hydrolysis and hydroxo-complexes of Zn²⁺ at 298.15 K. *Hydrometallurgy*, 60, 215–236. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00148-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00148-7)
- Zhen, C., Hiratsuka, N., Chiku, M., Higuchi, E., & Inoue, H. (2025). Zinc Deposition Behavior in Concentrated Aqueous Potassium Hydroxide Solutions. *ACS Applied Energy Materials*, 8(13), 9268–9279. <https://doi.org/10.1021/acsaem.5c00852>

Dampak Pembangunan Jalan Tol Dalam Kota Bandung (BIUTR) terhadap Fenomena *Induced Traffic*

Rafi Sugema, dan Robi Maulana

Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

rafi.sugema@student.unjani.ac.id, robim3084@gmail.com

Abstrak

Pembangunan jalan tol dalam kota di Bandung dirancang sebagai solusi untuk mengatasi permasalahan kemacetan dan meningkatkan konektivitas antar wilayah. Meskipun demikian, pendekatan peningkatan kapasitas infrastruktur ini berisiko menimbulkan fenomena *induced traffic*, yaitu peningkatan volume lalu lintas akibat bertambahnya aksesibilitas dan kemudahan perjalanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dampak *induced traffic* dari proyek Jalan Tol Dalam Kota Bandung (BIUTR) dengan pendekatan studi kasus berbasis dokumen perencanaan, termasuk RTRW Kota Bandung dan *Description of Services* BIUTR. Hasil kajian menunjukkan bahwa peningkatan aksesibilitas melalui pembangunan tol berpotensi menciptakan perjalanan baru serta memperpanjang perjalanan eksisting, yang dalam jangka panjang dapat memunculkan kemacetan baru. Kajian ini merekomendasikan pentingnya integrasi perencanaan infrastruktur jalan dengan penguatan moda transportasi publik dalam rangka mendukung sistem mobilitas kota yang berkelanjutan.

Kata kunci: *induced traffic*, jalan tol dalam kota, perencanaan transportasi, Bandung, keberlanjutan

Abstract

The intra-urban toll road development in Bandung has been designed as a solution to address traffic congestion and enhance regional connectivity. However, this capacity-expansion approach carries the risk of triggering the phenomenon of induced traffic, where increased accessibility and travel ease lead to higher traffic volumes. This study aims to analyze the potential impact of induced traffic from the Bandung Intra Urban Toll Road (BIUTR) project using a case study method based on planning documents, including the Bandung Spatial Plan (RTRW) and the BIUTR Description of Services. The findings indicate that improved accessibility through toll construction may generate new trips and extend existing travel patterns, potentially resulting in renewed congestion in the long term. This study recommends the integration of road infrastructure planning with the reinforcement of public transport systems to support sustainable urban mobility.

Keywords: induced traffic, intra-urban toll road, transport planning, Bandung, sustainability

1. Pendahuluan

Pertumbuhan kota-kota besar di Indonesia, termasuk Kota Bandung, membawa tantangan serius dalam penyediaan infrastruktur transportasi yang inklusif dan berkelanjutan. Dengan populasi yang terus meningkat dan urbanisasi yang pesat, kemacetan menjadi isu utama, terutama pada jalur arteri utama seperti koridor timur-barat Kota Bandung. Menanggapi hal ini, Pemerintah Indonesia menetapkan proyek *Bandung Intra Urban Toll Road* (BIUTR) sebagai bagian dari Proyek Strategis Nasional (PSN) yang bertujuan untuk meningkatkan konektivitas dan kapasitas jalan di kawasan perkotaan. Proyek ini merupakan kerja sama pemerintah dan badan usaha (*Public Private Partnership* – PPP) yang sedang dipersiapkan dengan dukungan teknis dari Kemitraan Indonesia Australia untuk Infrastruktur (KIAT) melalui *Project Preparation Facility Team* (PPF Team), dengan fokus pada pembangunan infrastruktur jalan tol baru sepanjang lebih dari 20 km (KIAT & PPF Team, 2024).

Namun demikian, berbagai literatur internasional dan domestik menunjukkan bahwa pendekatan penambahan kapasitas jalan dapat menimbulkan efek samping berupa *induced traffic*, yaitu peningkatan volume perjalanan sebagai respons terhadap peningkatan aksesibilitas (Goodwin, 1996). Pandangan serupa disampaikan oleh Carlos Nemesio dari *Institute for Transportation and Development Policy* (ITDP) Indonesia, yang menilai bahwa jalan tol dalam kota cenderung memperbesar ketergantungan terhadap kendaraan pribadi serta berisiko menghambat perkembangan sistem transportasi publik. Ia juga menyoroti bahwa proyek semacam ini berpotensi mendorong kenaikan harga lahan dan secara tidak langsung menggeser masyarakat berpenghasilan rendah (Nemesio, 2024).

Dalam konteks lokal, rencana pembangunan BIUTR patut dikaji dalam kerangka *induced demand*. Berdasarkan

Info Makalah:

Dikirim : 04-29-25;

Revisi 1 : 09-02-25;

Revisi 2 : 09-16-25;

Diterima : 04-08-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 896-0619-5182

e-mail : rafi.sugema@student.unjani.ac.id

dokumen *Description of Services* (KIAT & PPF Team, 2024) dan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Bandung Pemkot (2022), belum ditemukan pernyataan eksplisit mengenai strategi mitigasi terhadap dampak *induced traffic*. Meskipun terdapat klausul terkait evaluasi dampak sosial, tata ruang, dan pengendalian emisi, absennya pendekatan berbasis manajemen permintaan perjalanan (*Travel Demand Management*) menunjukkan adanya celah dalam perencanaan yang dapat memicu dampak negatif jangka panjang.

Kondisi ini menegaskan pentingnya integrasi antara kebijakan transportasi dan tata ruang dalam mengantisipasi *induced traffic*, terutama pada proyek-proyek infrastruktur di kota berkembang. Kebijakan alternatif seperti pengembangan transportasi massal berbasis koridor (*Bus Rapid Transit/Buy the Service*), penerapan *congestion pricing*, serta pembangunan kawasan berorientasi transit (*Transit-Oriented Development* atau TOD) perlu dipertimbangkan sebagai bagian dari kerangka mitigasi terpadu yang mendukung efisiensi sistem transportasi dan keberlanjutan perkotaan.

Dengan mempertimbangkan adanya celah dalam dokumen perencanaan BIUTR dan masih terbatasnya kajian spesifik untuk Kota Bandung, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi dampak *induced traffic* dari pembangunan tol tersebut. Kajian ini mengevaluasi bagaimana proyek ini berpotensi memengaruhi perilaku perjalanan, penggunaan moda transportasi, dan struktur ruang kota ke depan melalui pendekatan kualitatif-deskriptif berbasis studi kasus dengan sumber utama dokumen RTRW Kota Bandung dan dokumen perencanaan proyek BIUTR.

2. Metode

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif dengan studi kasus proyek BIUTR. Data diperoleh dari dokumen perencanaan resmi, yaitu:

1. *Description of Services* BIUTR oleh PPF Team (2024)
2. RTRW Kota Bandung (Perda No. 5 Tahun 2022)
3. Studi terdahulu oleh JICA (2009).

2.2. Model dan Teknik Analisis

Model analisis berbasis *policy-impact framework* digunakan untuk mengidentifikasi relasi sebab-akibat antara peningkatan kapasitas jalan, perubahan perilaku perjalanan, dan dampaknya terhadap lalu lintas dan tata ruang. Analisis dilakukan melalui:

1. Kajian dokumen: membaca secara kritis isi dokumen perencanaan dan melihat relevansinya dengan teori *induced traffic*.
2. Klasifikasi risiko: mengidentifikasi risiko jangka menengah terkait pola perjalanan, *urban sprawl*, dan tekanan terhadap moda transportasi umum.

2.3. Induced Traffic

Fenomena *induced traffic* telah menjadi topik penting dalam studi perencanaan transportasi sejak awal 1990-an, terutama terkait dengan dampak jangka panjang pembangunan infrastruktur jalan terhadap volume lalu lintas. *Induced traffic* merujuk pada peningkatan volume perjalanan sebagai respons terhadap bertambahnya kapasitas jalan, yang (Goodwin, 1996) pada akhirnya dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan manfaat awal dari investasi infrastruktur tersebut. Goodwin (1996), dalam salah satu kajian seminalnya, menyatakan bahwa peningkatan kapasitas jalan tidak secara otomatis mengurangi kemacetan. Sebaliknya, perbaikan aksesibilitas cenderung menarik pengguna baru, memicu perubahan rute, waktu perjalanan, dan bahkan lokasi aktivitas, yang kemudian meningkatkan jumlah perjalanan secara keseluruhan.

Sejalan dengan pandangan tersebut, Litman (2001) memperkenalkan konsep *latent demand*, yaitu permintaan perjalanan yang sebelumnya tertahan akibat hambatan seperti kemacetan, biaya tinggi, atau waktu tempuh yang panjang. Ketika hambatan-hambatan ini dihilangkan melalui penambahan kapasitas jalan, permintaan yang terpendam ini mulai terealisasi, sehingga volume lalu lintas meningkat dalam jangka menengah hingga panjang. Fenomena ini telah dikonfirmasi oleh berbagai studi empiris di negara maju maupun berkembang, yang menunjukkan bahwa pembangunan infrastruktur jalan tanpa pengendalian permintaan berisiko menghasilkan *vicious cycle* dari kemacetan yang berulang.

Dalam konteks negara berkembang, permasalahan *induced traffic* menjadi lebih kompleks karena beririsan dengan isu-isu tata ruang, pertumbuhan urban yang tidak terkendali, serta keterbatasan integrasi antarmoda transportasi. Di Jakarta misalnya, proyek jalan tol dalam kota yang diharapkan dapat memperlancar mobilitas justru berkontribusi terhadap peningkatan penggunaan kendaraan pribadi. Studi oleh Nemesis (2024) mengungkap bahwa setelah tol dalam kota beroperasi, terjadi lonjakan signifikan dalam penggunaan kendaraan pribadi, sementara efisiensi mobilitas justru menurun akibat fragmentasi pola pergerakan dan melemahnya peran transportasi publik. Kondisi serupa tercatat di beberapa kota besar di Asia dan Afrika, seperti Bangkok, Manila, dan Lagos, di mana pembangunan jalan tol tanpa strategi transportasi berkelanjutan hanya memberikan manfaat jangka pendek dan cenderung memperburuk kesenjangan aksesibilitas serta pencemaran lingkungan.

Lebih lanjut, beberapa studi menunjukkan bahwa *induced traffic* tidak hanya berdampak pada kemacetan, tetapi juga mempercepat konversi lahan, meningkatkan ketimpangan sosial spasial, dan memicu *urban sprawl*. Cervero (2003) menekankan bahwa konektivitas jalan yang tinggi tanpa pembatasan pemanfaatan ruang cenderung menghasilkan pola permukiman yang menyebar, sulit dilayani oleh angkutan umum, dan memiliki ketergantungan tinggi terhadap kendaraan bermotor.

2.4. Kondisi Eksisting: Jaringan Transportasi dan Tata Ruang Koridor Terdampak

Sebelum menganalisis potensi dampak dari pembangunan BIUTR, penting untuk memahami kondisi dasar (*baseline*) dari sistem transportasi dan struktur ruang yang ada. Bagian ini menyajikan data kondisi eksisting yang menjadi konteks dan justifikasi bagi perencanaan proyek BIUTR, sekaligus menjadi fondasi untuk menganalisis potensi dampak negatifnya.

2.4.1. Kinerja Jaringan Jalan Arteri dan Tingkat Kemacetan

Koridor transportasi timur-barat Kota Bandung, yang menjadi cikal bakal trase BIUTR, telah lama mengalami tekanan beban lalu lintas yang signifikan, terutama pada jam puncak pagi dan sore hari. Ruas jalan arteri utama seperti Jalan Pasteur di sisi barat dan Jalan Soekarno-Hatta yang membentang di bagian selatan menjadi tulang punggung pergerakan kota, namun kinerjanya terus menurun.

Data dari Dinas Perhubungan Kota Bandung tahun 2023 menunjukkan bahwa rasio volume kendaraan terhadap kapasitas jalan (*V/C Ratio*) di beberapa segmen Jalan Soekarno-Hatta telah mencapai 0,92 pada jam puncak. Angka ini mengindikasikan kondisi arus lalu lintas yang sangat jenuh (mendekati kemacetan total), di mana sedikit saja gangguan dapat menyebabkan antrean panjang (Dishub, 2023). Kondisi serupa juga terjadi di koridor Pasteur, yang menjadi gerbang utama masuk dan keluar kota dari arah barat.

Menurunnya kinerja jaringan jalan ini berdampak langsung pada kecepatan dan waktu tempuh. Sebelum adanya tol, kecepatan rata-rata kendaraan di koridor timur-barat pada jam sibuk hanya berkisar 18 km/jam. Akibatnya, perjalanan komuter dari kawasan Cibiru di timur menuju pusat bisnis di sekitar Pasteur di barat dapat memakan waktu hingga 90-110 menit untuk menempuh jarak sekitar 19 km (KKRT ITB, 2022). Kondisi kemacetan kronis inilah yang menjadi justifikasi utama bagi pemerintah untuk merencanakan pembangunan infrastruktur berkapasitas tinggi seperti BIUTR guna meningkatkan konektivitas dan mengurangi beban jalan arteri.

2.4.2. Keterbatasan Layanan Angkutan Umum Massal

Di tengah tingginya volume kendaraan pribadi, kinerja sistem angkutan umum massal di koridor terdampak menunjukkan berbagai keterbatasan. Meskipun layanan berbasis koridor seperti *Bus Rapid Transit* (BRT) dan program *Buy the Service* (BTS) telah diperkenalkan, cakupannya belum mampu menjadi alternatif yang kompetitif bagi kendaraan pribadi.

Data operasional menunjukkan bahwa cakupan rute angkutan umum massal belum sepenuhnya menjangkau pusat-pusat permukiman dan kawasan perkantoran baru di sepanjang koridor BIUTR. Selain itu, *headway* (waktu tunggu antarbus) pada jam sibuk rata-rata masih di atas 25 menit, angka yang dianggap kurang menarik bagi komuter yang sensitif terhadap waktu (Dishub, 2023), ditambah dengan fasilitas pendukung seperti halte dan integrasi antarmoda yang masih parsial, menyebabkan rendahnya minat masyarakat untuk beralih moda.

Hal ini tercermin dalam data *modal split* Kota Bandung tahun 2022, di mana penggunaan kendaraan pribadi (motor dan mobil) masih mendominasi pergerakan harian dengan porsi mencapai 86%, sementara angkutan umum hanya berkontribusi sekitar 14% (BPS, 2023). Kondisi ini menciptakan apa yang disebut sebagai *latent demand* atau permintaan terpendam; sebagian besar penduduk tidak memiliki pilihan moda transportasi lain yang layak. Tanpa perbaikan fundamental pada angkutan umum, setiap penambahan kapasitas jalan seperti BIUTR berisiko tinggi hanya akan diserap oleh permintaan terpendam ini, bukan mendorong peralihan moda.

2.4.3. Karakteristik Tata Guna Lahan dan Kependudukan

Secara spasial, koridor yang direncanakan untuk dilalui trase BIUTR menunjukkan karakteristik yang rentan terhadap ekspansi perkotaan atau *urban sprawl*. Bagian barat dan tengah koridor (area Pasteur, Pasir Koja, Buah Batu) merupakan kawasan terbangun yang padat, sementara bagian timur (area Gedebage, Cibiru) merupakan kawasan pengembangan kota.

Berdasarkan data RTRW Kota Bandung 2022-2042, kawasan Gedebage sebelum adanya rencana detail BIUTR masih memiliki porsi lahan pertanian dan ruang terbuka yang cukup signifikan, yakni sekitar 38% dari total luasnya. Sementara itu, Cibiru didominasi oleh permukiman dengan kepadatan sedang dan kawasan pendidikan. Kepadatan penduduk di Kecamatan Gedebage pada tahun 2023 tercatat sebesar 6.850 jiwa/km², angka yang diproyeksikan akan meningkat tajam seiring dengan statusnya sebagai pusat pertumbuhan baru (BPS, 2023).

Karakteristik ini menandakan bahwa koridor timur merupakan area yang sangat potensial untuk mengalami konversi lahan secara masif. Pembangunan infrastruktur berskala besar seperti BIUTR dipastikan akan bertindak sebagai katalisator yang mempercepat perubahan tata guna lahan dari pertanian menjadi permukiman padat dan area komersial, yang pada gilirannya akan membangkitkan volume perjalanan baru dan memperpanjang jarak tempuh.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Deskripsi Proyek Jalan Tol Dalam Kota Bandung

Proyek Jalan Tol Dalam Kota Bandung atau BIUTR merupakan salah satu proyek strategis nasional yang dirancang untuk meningkatkan kapasitas transportasi dan konektivitas antarwilayah di Kota Bandung. Berdasarkan

dokumen *DoS* (KIAT & PPF Team, 2024), proyek ini akan menghubungkan koridor barat dan timur kota melalui jaringan jalan tol sepanjang ± 27 km seperti pada Tabel 1. Proyek ini juga diharapkan dapat mengurangi beban lalu lintas di jalan arteri eksisting seperti Jalan Soekarno-Hatta dan Jalan Pasteur.

Tabel 1. Rencana Trase dan Segmen Jalan Tol BIUTR

Segmen	Titik Awal	Titik Akhir	Panjang (km)
1	Pasteur	Buah Batu	9.8
2	Buah Batu	Cibiru	7.6
3	Pasir Koja	Soekarno-Hatta	9.2
Total	-	-	26.6

Sumber: (KIAT & PPF Team, 2024); (Pemkot, 2022)

3.2. Proyeksi Volume Lalu Lintas dan Efek *Induced Traffic*

Berdasarkan proyeksi pada Tabel 2, kecepatan rata-rata di koridor yang dilayani tol sebelum proyek beroperasi adalah 18 km/jam. Dokumen pendukung proyek (KIAT & PPF Team, 2024) memprediksi bahwa BIUTR akan meningkatkan kecepatan rata-rata tersebut menjadi 24 km/jam pada tahun pertama operasionalnya, atau sebuah kenaikan signifikan sebesar 33%. Namun, dalam jangka panjang, manfaat ini berpotensi terkikis oleh fenomena *induced traffic* seperti yang dijelaskan pada tabel 2 berpotensi terjadi akibat meningkatnya daya tarik kendaraan pribadi.

Tabel 2. Proyeksi Kecepatan dan Volume Lalu Lintas pada BIUTR

Tahun Operasi	Kec. Rata-rata (km/jam)	Volume (kend/hari)
2021 (sebelum tol)	18	15.949
Tahun 1	24	32.500
Tahun 5	19	58.955

Sumber: (KIAT & PPF Team, 2024) ; (Litman, 2001)

Penurunan kecepatan pada tahun kelima menunjukkan bahwa manfaat kapasitas tidak bersifat permanen. Dengan tingkat pertumbuhan volume lalu lintas yang diproyeksikan mencapai hampir 270% (dari 15.949 menjadi 58.955 kend/hari) hanya dalam 5 tahun operasi, data ini mendukung asumsi bahwa kemudahan akses mendorong peningkatan perjalanan secara signifikan. Fenomena ini dapat dijelaskan sebagai perjalanan yang sebelumnya tidak terjadi karena hambatan waktu atau biaya, namun menjadi mungkin setelah infrastruktur diperbaiki.

3.3. Dampak Terhadap Tata Guna Lahan dan Perilaku Perjalanan

Analisis RTRW Kota Bandung (Pemkot, 2022) menunjukkan adanya perubahan rencana penggunaan lahan di sekitar koridor tol, terutama di wilayah Gedebage, Cibiru, dan Buah Batu. Perubahan ini mencakup konversi lahan pertanian menjadi permukiman dan pusat kegiatan baru seperti dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perubahan Tata Guna Lahan di Sekitar Koridor Tol

Wilayah	Fungsi Eksisting	Fungsi Rencana Pasca-Tol
Gedebage	Pertaniann	Permukiman padat dan niaga
Buah Batu	Residensial & Komersial	Terminal terpadu dan residensial
Cibiru	Permukiman sedang	Kawasan Pendidikan dan komersial

Sumber: (Pemkot, 2022)

3.4. Dampak Terhadap Tata Guna Lahan dan Perilaku Perjalanan

Sebagai antitesis terhadap pembangunan berbasis kapasitas, sejumlah alternatif kebijakan transportasi yang berorientasi pada pengelolaan permintaan (*demand management*) dan penguatan moda transportasi berkelanjutan perlu dipertimbangkan secara lebih serius dan strategis oleh pemerintah kota maupun pihak swasta. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan mengurangi tekanan terhadap infrastruktur jalan, tetapi juga memperbaiki kualitas hidup masyarakat melalui sistem transportasi yang lebih efisien, adil, dan rendah emisi.

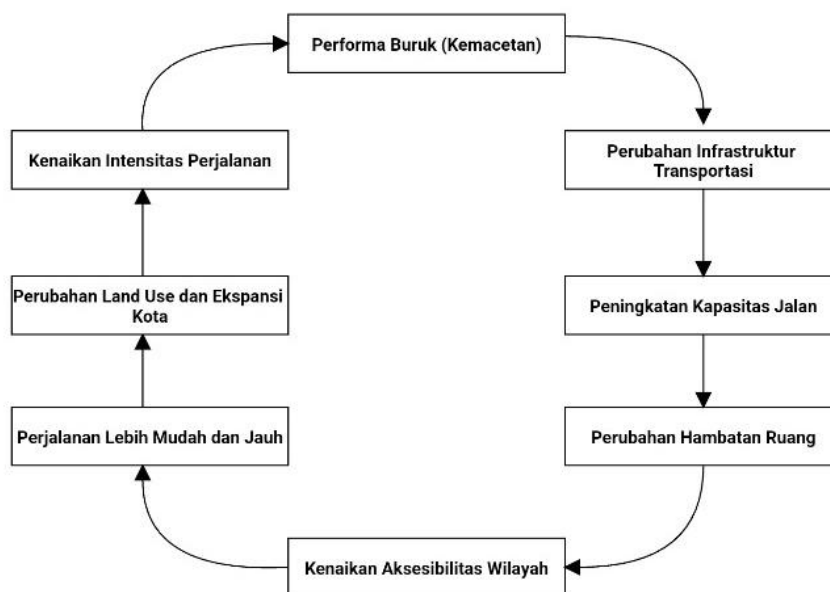
Pendekatan ini mencakup pengembangan angkutan umum massal berbasis koridor seperti BRT dan perluasan layanan BTS dari Kementerian Perhubungan. Kajian (Litman, 2001) dan pengalaman kota Bogotá serta Seoul menunjukkan bahwa penurunan ketergantungan terhadap kendaraan pribadi dapat dicapai melalui insentif moda umum, manajemen parkir, serta kebijakan zonasi berbasis TOD. Namun, implementasi kebijakan tersebut di Bandung masih bersifat parsial dan belum menyatu dalam kerangka perencanaan transportasi jangka panjang. Misalnya,

layanan BTS yang telah diperkenalkan belum menjangkau seluruh koridor strategis kota, dan fasilitas pendukung seperti halte, integrasi tarif, serta informasi penumpang *real-time* masih sangat terbatas.

Selain itu, belum terdapat regulasi yang mengatur secara ketat pemanfaatan ruang kota berdasarkan prinsip TOD, sehingga perkembangan kawasan cenderung tidak terkontrol dan memperpanjang perjalanan harian warga. Oleh karena itu, strategi-strategi alternatif ini harus diintegrasikan ke dalam rencana induk transportasi kota serta menjadi komponen utama dalam evaluasi proyek-proyek jalan tol, untuk memastikan sinergi antara infrastruktur dan perubahan perilaku mobilitas yang diinginkan.

3.5. Lingkaran Setan Kemacetan dan Perubahan Sistemik

Fenomena *induced traffic* tidak dapat dipahami secara sederhana sebagai hubungan linier antara peningkatan kapasitas jalan dan peningkatan volume lalu lintas. Sebaliknya, fenomena ini membentuk suatu siklus yang kompleks dan berulang seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1, yang sering disebut sebagai lingkaran setan transportasi (*vicious cycle of congestion*). Ketika performa jaringan jalan mengalami penurunan akibat kepadatan lalu lintas dan kemacetan yang terus meningkat, respons kebijakan yang lazim diambil adalah dengan membangun infrastruktur baru atau memperbesar kapasitas jalan yang ada, misalnya melalui pembangunan jalan tol, *flyover*, atau pelebaran jalan arteri. Langkah-langkah ini dimaksudkan untuk mengatasi hambatan pergerakan dan mempercepat mobilitas.



Gambar 1 Lingkaran Setan Perencanaan Transportasi Berbasis Kapasitas

Peningkatan kapasitas jalan melalui pembangunan BIUTR secara teoretis akan mengurangi hambatan ruang (*spatial friction*) dan meningkatkan aksesibilitas antarlokasi. Dalam kasus BIUTR, proyeksi ini sangat jelas: kecepatan rata-rata koridor diprediksi meningkat dari 18 km/jam menjadi 24 km/jam pada tahun pertama operasi, yang secara efektif menurunkan biaya waktu dan jarak perjalanan bagi pengguna. Namun, kemudahan akses ini memicu dua respons sistemik. Pertama, individu cenderung melakukan perjalanan lebih sering dan lebih jauh, meningkatkan dominasi kendaraan pribadi. Kedua, pola penggunaan lahan pun mengalami transformasi. Hal ini terefleksi pada rencana tata guna lahan di sekitar trase tol, di mana kawasan Gedebage yang sebelumnya didominasi lahan pertanian secara masif akan diubah menjadi kawasan permukiman padat dan niaga. Fenomena ini dikenal sebagai *urban sprawl*, yang memperbesar radius aktivitas dan mendorong terciptanya permintaan perjalanan baru (*latent demand*).

Data proyeksi BIUTR menjadi bukti kuantitatif dari hipotesis ini. Sebagai akibat dari kemudahan akses dan perubahan tata guna lahan, intensitas perjalanan dalam kota diprediksi meningkat secara drastis. Volume lalu lintas harian diproyeksikan melonjak dari 15.949 kend/hari (kondisi sebelum tol) menjadi 58.955 kend/hari pada tahun kelima, sebuah kenaikan sebesar hampir 270%. Pada titik ini, jaringan jalan yang telah diperluas kembali mengalami kejenuhan. Akibatnya, kemacetan diproyeksikan akan kembali terjadi; kecepatan rata-rata yang sempat naik menjadi 24 km/jam, turun kembali menjadi 19 km/jam pada tahun kelima, hampir setara dengan kondisi awal sebelum tol dibangun. Data ini secara gamblang menunjukkan bahwa solusi berbasis penyediaan kapasitas semata bukan hanya tidak efektif dalam jangka panjang, tetapi justru memperkuat siklus ketergantungan terhadap kendaraan pribadi dan memperburuk struktur kota.

Lingkaran setan yang dibuktikan oleh data proyeksi BIUTR ini memperkuat urgensi perlunya perubahan paradigma dalam perencanaan transportasi perkotaan. Pendekatan yang berfokus pada penyediaan kapasitas (*supply-oriented approach*) harus digantikan oleh pendekatan berbasis pengelolaan permintaan (*demand management*) yang

menekankan efisiensi penggunaan ruang dan integrasi antarmoda. Upaya ini mencakup pengembangan transportasi publik yang andal, pengaturan penggunaan kendaraan pribadi melalui tarif dan manajemen parkir, serta integrasi transportasi dengan perencanaan tata guna lahan berbasis transit (*Transit-Oriented Development*).

Tanpa adanya intervensi kebijakan yang terintegrasi dan transformatif, kota-kota seperti Bandung akan terus terjebak dalam spiral kemacetan yang berulang. Setiap upaya memperbesar kapasitas tanpa strategi pengendalian, seperti yang berpotensi terjadi pada proyek BIUTR, akan memperpanjang siklus ini dan menggerus kualitas hidup masyarakat urban, sekaligus menghambat upaya menuju sistem transportasi yang inklusif, efisien, dan berkelanjutan.

Kesimpulan

Kajian terhadap dokumen perencanaan proyek Jalan Tol Dalam Kota Bandung (BIUTR) dan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Bandung menyimpulkan bahwa rencana pembangunan infrastruktur tersebut memiliki potensi signifikan untuk menimbulkan fenomena induced traffic. Temuan ini didasarkan pada tiga bukti utama dari data proyeksi. Pertama, manfaat peningkatan kecepatan lalu lintas terbukti hanya bersifat sementara; kecepatan rata-rata yang awalnya naik dari 18 km/jam menjadi 24 km/jam pada tahun pertama, diprediksi turun kembali menjadi 19 km/jam pada tahun kelima operasi. Kedua, lonjakan volume kendaraan yang diproyeksikan mencapai hampir 270% dalam lima tahun mengonfirmasi adanya potensi permintaan perjalanan baru yang masif sebagai respons terhadap peningkatan aksesibilitas. Ketiga, efek ini diperparah oleh rencana perubahan tata guna lahan di koridor tol, khususnya di Gedebage, yang akan mendorong ekspansi perkotaan dan menambah intensitas perjalanan harian.

Hasil analisis data secara sistemik juga mengonfirmasi adanya siklus umpan balik di mana pembangunan infrastruktur sebagai respons terhadap kemacetan justru memicu dinamika yang mereproduksi kembali kondisi kemacetan awal. Seluruh manfaat awal dari peningkatan kapasitas jalan pada akhirnya terkikis oleh permintaan perjalanan baru yang dibangkitkannya sendiri. Akibatnya, kondisi kemacetan di koridor tersebut diproyeksikan akan kembali terjadi dalam jangka menengah, bahkan dengan volume lalu lintas yang jauh lebih tinggi dari sebelumnya.

Rekomendasi

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang perencanaan transportasi dan tata ruang, baik pada tataran lokal maupun nasional, dengan menyoroti tiga aspek utama. Pertama, studi ini mengisi kekosongan dalam literatur akademik mengenai evaluasi dampak *induced traffic* di kota-kota sekunder, khususnya Kota Bandung. Selama ini, sebagian besar penelitian tentang fenomena *induced demand* lebih terfokus pada kota metropolitan seperti Jakarta, sehingga temuan-temuan berbasis konteks lokal di kota menengah masih sangat terbatas. Dengan demikian, kajian ini memperluas cakupan geografis dan kontekstual dalam pemahaman mengenai hubungan antara pembangunan infrastruktur jalan dan dinamika permintaan perjalanan di wilayah urban yang sedang tumbuh.

Kedua, penelitian ini menawarkan pendekatan metodologis yang inovatif dengan mengintegrasikan dokumen perencanaan spasial jangka panjang, seperti RTRW, dengan dokumen perencanaan proyek teknis, seperti Dokumen Studi Biaya Manfaat (DoS BIUTR), sebagai landasan analisis dampak transportasi. Pendekatan ini belum banyak diterapkan dalam studi-studi transportasi berskala lokal, padahal integrasi antara kebijakan spasial dan teknis sangat krusial dalam merumuskan keputusan yang berkelanjutan dan kontekstual. Penggunaan dua jenis dokumen perencanaan ini secara bersamaan memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap potensi dampak infrastruktur terhadap tata guna lahan dan mobilitas masyarakat.

Ketiga, artikel ini mengembangkan kerangka evaluasi yang bersifat sistemik dan multidimensional dengan menggabungkan dimensi teknis, sosial, dan spasial secara holistik. Pendekatan integratif ini memungkinkan pengambilan keputusan kebijakan infrastruktur transportasi yang lebih adaptif dan berorientasi pada keberlanjutan, khususnya di kota-kota berkembang yang tengah menghadapi tekanan pertumbuhan penduduk dan urbanisasi. Kerangka kerja yang ditawarkan dapat direplikasi sebagai model evaluatif untuk menganalisis proyek-proyek transportasi serupa di berbagai wilayah lain yang memiliki karakteristik sebanding.

Temuan dari penelitian ini selaras dengan teori *induced traffic* yang dikemukakan oleh (Goodwin, 1996) dan (Litman, 2001), yang menyatakan bahwa peningkatan kapasitas infrastruktur jalan cenderung memicu pertumbuhan perjalanan yang pada akhirnya mengikis manfaat awal dari proyek tersebut, kecuali jika diiringi dengan strategi pengelolaan permintaan transportasi. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa konversi lahan secara masif di sepanjang trase tol berkontribusi terhadap peningkatan intensitas perjalanan, yang memperparah kondisi lalu lintas dan mengurangi efisiensi sistem transportasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan kebijakan yang lebih integratif, seperti pengembangan sistem transportasi publik berbasis bus cepat (BRT atau BTS), serta pengendalian penggunaan lahan melalui prinsip TOD, guna memastikan bahwa pembangunan infrastruktur transportasi benar-benar memberikan manfaat sosial, ekonomi, dan lingkungan secara berkelanjutan.

Daftar Notasi

<i>kend/hari</i>	= Volume lalu lintas dalam kurun waktu tertentu
<i>km/jam</i>	= Kecepatan rata-rata lalu lintas
<i>km</i>	= Jarak / Panjang perjalanan rata-rata.

Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik Kota Bandung. (2023a). *Kecamatan Gedebage dalam Angka 2023*.
- Badan Pusat Statistik Kota Bandung. (2023b). *Statistik Transportasi Kota Bandung 2023*.
- Cervero, R. (2003). Road Expansion, Urban Growth, and Induced Travel: A Path Analysis. *Journal of the American Planning Association*, 69(2), 145–163. <https://doi.org/10.1080/01944360308976303>
- Dinas Perhubungan Kota Bandung. (2023a). *Analisis Kinerja Lalu Lintas Ruas Jalan Arteri Kota Bandung*.
- Dinas Perhubungan Kota Bandung. (2023b). *Laporan Evaluasi Kinerja Operasional Trans Metro Bandung Tahun 2023*.
- Goodwin, P. B. (1996). Empirical evidence on induced traffic. *Transportation*, 23(1), 35–54. <https://doi.org/10.1007/BF00166218>
- Japan International Cooperation Agency. (2009). *PREPARATORY SURVEY FOR BANDUNG INTRA URBAN TOLL ROAD PROJECT FINAL REPORT*.
- Kelompok Keahlian Rekayasa Transportasi ITB. (2022). *Survei Waktu Tempuh dan Kecepatan Perjalanan di Koridor Perkotaan Bandung*.
- Kemitraan Indonesia Australia untuk Infrastruktur (KIAT), & PPF Team. (2024). *Procurement of Technical Partner for Bandung Intra Urban Toll Road Project ("BIUTR") Contact Information DESCRIPTION OF SERVICES*.
- Litman Victoria, T. (2001). Generated Traffic and Induced Travel Implications for Transport Planning Generated Traffic and Induced Travel: Implications for Transport Planning. In *ITE Journal* (Vol. 71, Issue 4). www.vtpi.org/Info/vtpi.org
- Nemesis, C. (2024). *Solusi Kemacetan Jakarta di Depan Mata, Tapi Siapa yang Berani Melangkah?* ITDP Indonesia. <https://itdp-indonesia.org/2024/11/solusi-kemacetan-jakarta-di-depan-mata-tapi-siapa-yang-berani-melangkah/>
- Pemerintah Kota Bandung. (2022). *Peraturan Daerah Kota Bandung Nomor 5 Tahun 2022 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Bandung Tahun 2022-2042*.

Prototipe Sistem Pemantauan Tekanan Darah, Denyut Jantung, dan Saturasi Oksigen dalam Darah Berbasis IoT

Rahmat Nur Saifudin, Mina Naidah Gani, dan Andry Haidar

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Kabupaten Bandung Barat, Indonesia

rahmat.nur.tkom21@polban.ac.id, mina.naidah@polban.ac.id, andry.haidar@polban.ac.id

Abstrak

Gaya hidup modern sering kali membawa manusia pada kebiasaan buruk pada konsumsi dan kegiatan yang buruk. Gaya hidup modern harus diimbangi dengan konsumsi dan kegiatan positif yang menunjang kesehatan. Untuk mengetahui mengenai kondisi kesehatan tentunya tidak lepas dari pemeriksaan rutin untuk mengetahui kondisi kesehatan seseorang. Tentunya pemeriksaan kesehatan akan memakan banyak waktu yang akan mengurangi produktivitas seseorang. Artikel ini mendeskripsikan alat pendeteksi tekanan darah, BPM, dan SpO₂ untuk memantau kondisi kesehatan seseorang melalui beberapa indikator seperti sistol, diastol, BPM, dan SpO₂. Alat dibuat menggunakan dua buah sensor yaitu sensor MPX 5050 DP untuk mendeteksi tekanan darah dan sensor MAX 30100 untuk mendeteksi BPM dan SpO₂. Indikator hasil pemeriksaan ditampilkan dalam *dashboard* platform IoT ThingSpeak dan aplikasi media sosial Telegram, serta hasil pemeriksaan dapat ditampilkan pada layar LCD. Alat yang dibuat setelah dilakukan pengujian memiliki nilai akurasi sebesar 91,85% untuk pengukuran tensi yaitu sistol dan diastol serta tingkat akurasi sebesar 95,84% untuk pengukuran BPM dan SpO₂.

Kata kunci: Kesehatan, MPX 5050 DP, MAX 30100

Abstract

Modern lifestyle often leads people to bad consumption habits and bad activities. A modern lifestyle must be balanced with positive consumption and activities that support health. To find out about health conditions, of course, cannot be separated from routine checks to determine a person's health condition. Of course, health checks will take a lot of time which will reduce a person's productivity. Therefore, in this case, the author created a blood pressure, BPM, and SpO₂ detection device to monitor the user's health condition, whether a person is healthy or not through several indicators such as systole, diastole, BPM, and SpO₂. In this device there are two sensors used, namely the MPX 5050 DP sensor to detect blood pressure and the MAX 30100 sensor to detect BPM and SpO₂. The device created can send inspection results messages to Thingspeak and Telegram, and inspection results can be displayed on the LCD screen. The device created after testing has an accuracy value of 91.85% for measuring blood pressure, namely systole and diastole, and an accuracy level of 95.84% for measuring BPM and SpO₂.

Keywords: Health, MPX 5050 DP, MAX 30100

1. Pendahuluan

Kesehatan merupakan suatu hal yang mahal yang mana kondisi kesehatan patut dijaga oleh setiap manusia (Jaenudin, Afrianto, & Firdaus, 2023). Dengan menjaga kesehatan manusia akan memiliki angka harapan hidup yang lebih baik dan lebih produktif dalam menjalani kehidupan sehari-hari (Kardi, Ibrahim, & Nopiyanto, 2020). Tetapi terkadang manusia banyak yang tidak sempat untuk melakukan *medical checkup* untuk memeriksa apakah dirinya dalam keadaan sehat atau tidak. Oleh sebab itu untuk memudahkan aktivitas *medical checkup* diperlukan alat untuk memeriksa beberapa indikator kesehatan seperti tensi yang didalamnya mengukur sistol dan diastol, kemudian terdapat BPM untuk mengetahui seberapa cepat jantung berdetak, dan yang terakhir yaitu SpO₂ yaitu untuk mengetahui kadar oksigen dalam hemoglobin. Alat yang dibuat memiliki referensi dari penelitian sebelumnya seperti yang dibuat oleh Amran, dkk. mereka membuat alat pendeteksi tekanan darah menggunakan mikrokontroler Node MCU dan menggunakan sensor MPX 5050 DP untuk mengukur tensi (Amran, Subito, & Alamsyah, 2020). Sementara itu, Harianto dkk. (2021) melakukan penelitian mengenai alat ukur pendeteksi tekanan jantung menggunakan mikrokontroler Node MCU ESP 8266 dan sensor MAX 30100 untuk mendeteksi nilai dari BPM dan SpO₂ (Harianto, Hidayat, & Hulu, 2021). Melihat hal ini penulis membuat alat yang dapat memiliki fitur gabungan untuk mendeteksi tensi, BPM, dan SpO₂. Dengan dibuatnya alat ini maka pengguna dapat melakukan *medical checkup* secara mandiri dimanapun dan kapanpun. Pada penelitian ini penulis menggunakan dua sampel untuk menguji alat yang telah dibuat yaitu pada remaja dan dewasa. Pengujian dilakukan dengan mengambil sampel sebanyak 20 kali untuk remaja dan dewasa.

Info Makalah:

Dikirim : 12-09-24;

Revisi 1 : 09-17-25;

Diterima : 04-08-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : rahmat.nur.tkom21@polban.ac.id

Dengan maraknya digitalisasi di era sekarang alat yang dibuat oleh penulis menggunakan sebuah teknologi IoT yang merupakan sebuah teknologi dimana benda atau alat dapat terhubung dengan internet (Valencia, Zamora, & Hernández, 2022; H, Kumala, & Irmayani, 2021). Arduino yang penulis pakai untuk pengaplikasian IoT untuk alat yang dibuat adalah wemos D1 *mini*. Wemos D1 *mini* merupakan board wifi

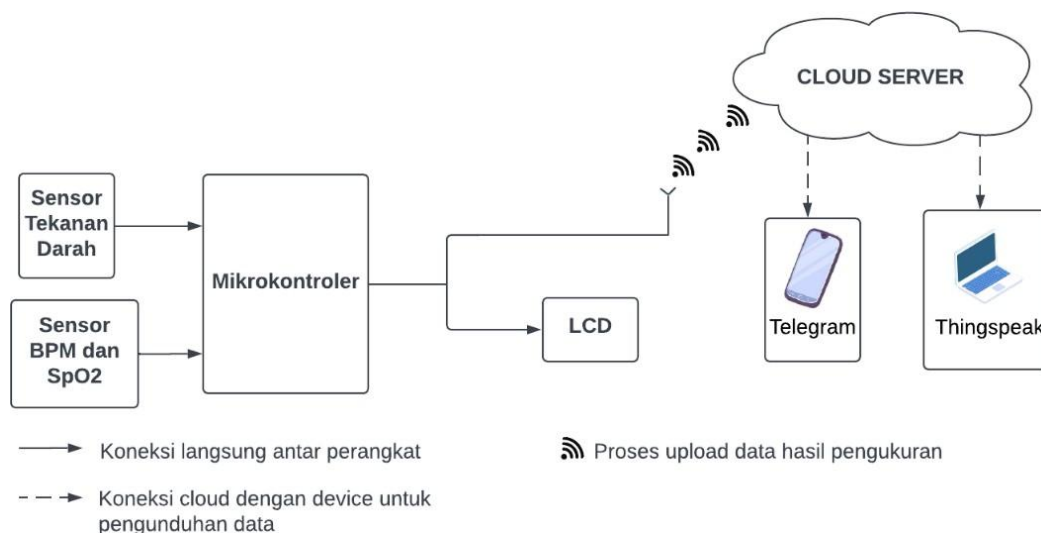
mini berbasis ESP266 yang dikenal ekonomis dan handal. ESP8266 ini yang bisa menghubungkan perangkat mikrokontroler seperti arduino dengan internet via wifi. Modul Wemos D1-Mini dapat menjalankan semua kode yang diterima secara mandiri, sehingga Wemos D1 *mini* dapat digunakan untuk proyek tanpa menggunakan Arduino sebagai mikrokontroler (H, Kumala, & Irmayani, 2021). Kemudian terdapat penggunaan sensor MAX 30100 untuk mendeteksi detak jantung, saturasi oksigen, dan suhu secara bersamaan dimana lampu LED merah dan inframerah yang dipancarkan oleh modul sensor MAX30100 menjadi komponen utama yang mewakili seluruh fungsi kerja MAX30100 (Karnadi, Riantono, Roihan, & Koestoer, 2024). Penggunaan sensor MPX 5050 DP untuk pengukuran tekanan darah dipilih karena memiliki rentang pengukuran dari 0 hingga 50 kPa dan sinyal keluaran dari 0,2 hingga 4,7 V dengan begitu sensor ini dapat mengukur tekanan diferensial yang dirancang untuk tekanan yang berbeda (Karnadi, Riantono, Roihan, & Koestoer, 2024). (K, D, & Nagaraj, 2024).

Alat yang dibuat penulis menggunakan teknologi IoT dimana alat terhubung pada *web* ThingSpeak dan aplikasi Telegram. Untuk *web* Thingspeak dapat menampilkan empat indikator kesehatan dan terdapat grafik informasi riwayat pemeriksaan. Thingspeak digunakan dalam penelitian ini untuk struktur yang aman dan dapat ditingkatkan untuk menerima, menyimpan, serta mengatur data. Kemudian thingspeak menyediakan alat visualisasi yang telah disiapkan dan algoritma analisis yang dapat diprogram untuk memantau tanda-tanda vital secara langsung (K, D, & Nagaraj, 2024). Alat juga terhubung pada aplikasi Telegram yang setelah dilakukan pemeriksaan maka mikrokontroler mengirimkan pesan mengenai kondisi kesehatan pengguna. Alat ini dapat mengirimkan informasi dari jarak jauh selama terhubung dengan akses internet, sehingga alat dapat mengirimkan hasil pemeriksaan dan dapat menampilkan informasi pada ThingSpeak maupun aplikasi Telegram. Melalui penggunaan aplikasi telegram Pengguna dapat menggunakan telepon pintar atau perangkat lain untuk menghidupkan atau mematikan perangkat elektronik tanpa perlu hadir secara fisik di lokasi perangkat ditempatkan (Alfarisi & Chandra, 2022). Pada telegram terdapat API yang diharapkan dapat memberikan solusi pengelolaan perangkat elektronik secara lebih efisien dan hemat energi (Wahyusari, Saputro, & Wibowo, 2023). Dengan dibuatnya alat yang terhubung dengan internet, kedepannya alat ini diharapkan mampu terintegrasi dengan fasilitas kesehatan yang terdaftar. Alat ini diharapkan dapat mempermudah dan mempercepat diagnosa oleh dokter atau tenaga kesehatan.

2. Metode

2.1. Perancangan Diagram Blok

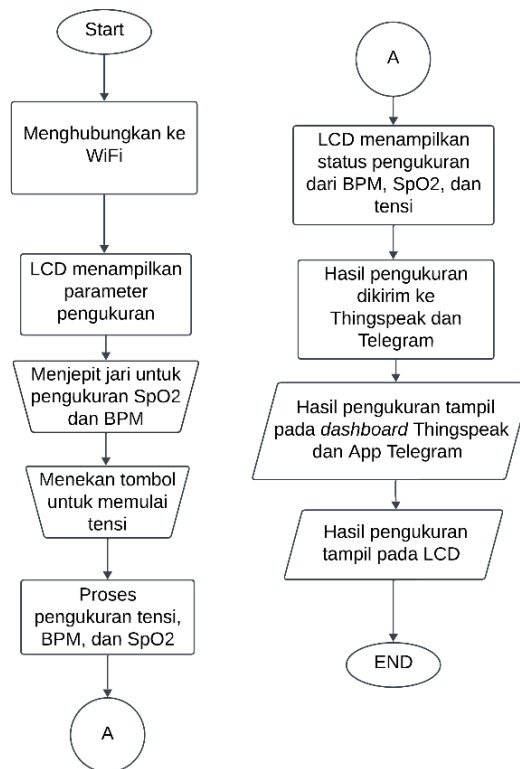
Diagram blok sistem diperlihatkan dalam Gambar 1 Parameter sistem dideteksi oleh dua buah sensor yaitu sensor untuk mendeteksi tekanan darah dan sensor untuk mendeteksi BPM dan SpO2. Sensor yang digunakan untuk mendeteksi tensi menggunakan sensor MPX 5050 DP dan sensor untuk mendeteksi BPM dan SpO2 adalah sensor MAX 30100. Kedua buah sensor terhubung ke mikrokontroler wemos D1 mini yang mana nantinya setelah dilakukan pemeriksaan tekanan darah, BPM, dan SpO2 maka mikrokontroler akan menampilkan hasil pemeriksaan pada *LCD*. Selain pada *LCD* hasil pemeriksaan akan dikirimkan ke *cloud server* yang nantinya akan muncul pada *dashboard thingspeak* melalui perangkat laptop dan telegram melalui perangkat *smartphone*.



Gambar 1. Diagram Blok bagian *Node* dan *Gateway*

Pada *dashboard thingspeak* akan menampilkan nilai pengukuran berupa sistol, diastol, BPM, dan SpO2. Sedangkan pada aplikasi telegram akan menampilkan pesan seperti kondisi tekanan darah (tensi), kecepatan detak jantung (bpm), dan seberapa banyak oksigen yang terkandung dalam hemoglobin (SpO2) berupa kondisi kesehatan setelah dilakukan pemeriksaan. Hasil pemeriksaan seperti sistol, diastol, BPM, dan SpO2 ditampilkan setelah pemeriksaan terhadap pengguna selesai.

2.2. Perancangan Diagram Alir

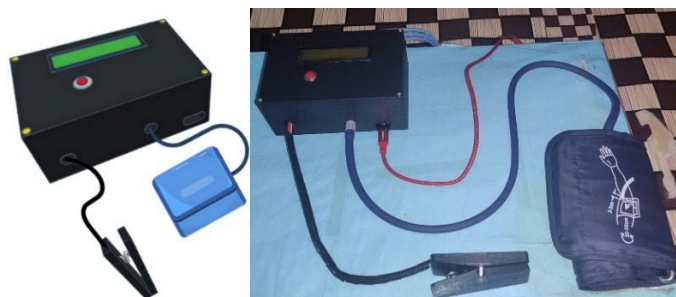


Gambar 2. Diagram Alir Sistem Kerja Alat

Gambar 2 merupakan diagram alir dari sistem kerja alat yang mana alat pertama-tama akan menghubungkan ke *wifi* yang telah diatur sebelumnya. Setelah berhasil terhubung dengan *wifi* maka LCD akan menampilkan indikator pemeriksaan seperti sistol, diastol, BPM, dan SpO2. Setelah itu pengguna dapat menjepit salah satu jari untuk pemeriksaan BPM dan SpO2. Setelah nilai BPM dan SpO2 telah stabil maka tekan tombol untuk memulai pemeriksaan tensi. Kemudian tunggu hingga pemeriksaan tensi selesai. Setelah pemeriksaan selesai maka LCD akan menampilkan status pemeriksaan tensi, BPM, dan SpO2. Setelah LCD menampilkan hasil pemeriksaan mikrokontroler akan mengirimkan hasil pengukuran ke cloud server thingspeak dan telegram. Setelah terkirim pada thingspeak dan telegram maka LCD akan menampilkan hasil pemeriksaan,

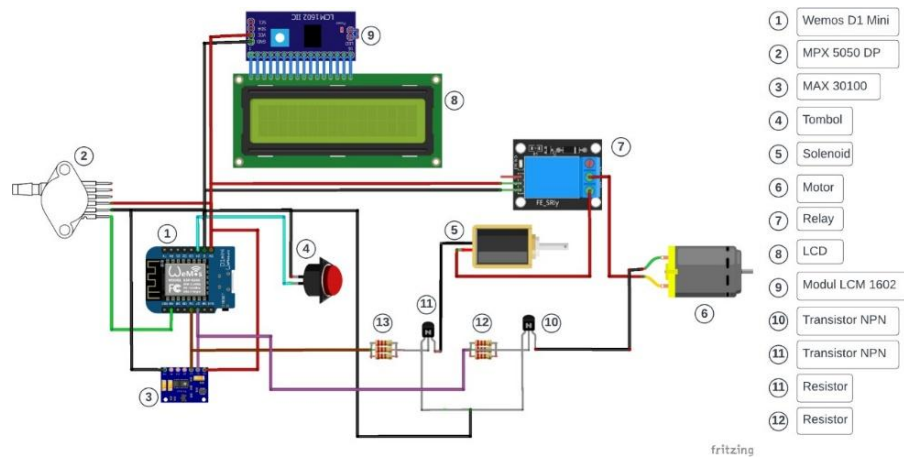
2.3. Realisasi Perangkat Keras

Pada realisasi perangkat keras sebelumnya penulis merancang terlebih dahulu diagram perkabelan pada aplikasi fritzing. Kemudian untuk kemasan penulis terlebih dahulu merancang *box* pada aplikasi 3D *thinkercad* sebelum melakukan 3D *printing*.



Gambar 3 Rancangan dan Realisasi BOX 3D

Gambar 3 menunjukkan perancangan dan realisasi dari BOX alat. Dapat dilihat pada bagian atas terdapat LCD yang akan menunjukkan indikator pemeriksaan seperti sistol, diastol, BPM, dan SpO2. Kemudian terdapat tombol merah untuk memulai proses pemeriksaan tensi. Selanjutnya terdapat jepitan untuk menjepit jari untuk pemeriksaan BPM dan SpO2. Kemudian terdapat manset yang dipasangkan di lengan. Kemudian terdapat lubang untuk menghubungkan alat dan sumber daya menggunakan kabel.



Gambar 4. Interkoneksi Antar Komponen Dalam Sistem

Gambar 4 dapat dilihat bahwa dalam alat yang dibuat menggunakan dua buah sensor yaitu sensor untuk mengukur tekanan darah yaitu MPX 5050 DP yang terdapat 3 pin yang digunakan dan sensor untuk mengukur saturasi oksigen dan denyut nadi yaitu MAX 30100 yang terdapat 4 pin yang digunakan. Pin GND, VCC, dan Analog pada sensor MPX 5050 DP dan pin VCC, GND, SDA, dan SCL dihubungkan ke mikrokontroler Wemos D1 Mini.

Penggunaan sensor MPX 5050 DP sebagai sensor untuk mengukur tekanan darah dan sensor MAX 30100 untuk mengukur saturasi oksigen (SpO2) dan denyut nadi (BPM). Pin VCC kedua sensor dihubungkan pada *port* 5V Wemos D1 Mini, kemudian untuk GND dari kedua sensor dihubungkan pada port G Wemos D1 Mini, selanjutnya untuk pin analog sensor MPX 5050 DP dihubungkan dengan port A0 Wemos D1 Mini dengan tegangan maksimum 3.3 V, dan pin SCL dan SDA sensor MAX 30100 terhubung ke port D7 dan D8 Wemos D1 Mini.

Dalam alat ini terdapat solenoid *valve* yang berfungsi untuk mengatur udara yang masuk, dan motor pompa udara yang berfungsi untuk memompa udara menuju manset. Solenoid *valve* dan pompa udara masing-masing dihubungkan dengan resistor dan transistor NPN. Selanjutnya terdapat *relay* yang mana terhubung dengan komponen solenoid *valve* dan motor yang berfungsi untuk mengatur arus listrik tinggi dengan arus listrik rendah arduino sehingga tegangan yang bersumber dari arduino dapat menggerakkan solenoid dan motor. Pada *solenoid valve* dihubungkan dengan pin D6 dan pompa udara dihubungkan dengan pin D7 pada Wemos D1 Mini. Kemudian untuk tombol salah satu kaki dihubungkan pada *port* G Wemos D1 mini untuk *grounding* dan satu kaki lainnya dihubungkan dengan *port* D4 Wemos D1 Mini.

2.4. Parameter dan Skenario Pengujian

Penelitian ini terdapat empat indikator yang menjadi parameter pengujian yaitu yang pertama BPM yaitu pemeriksaan untuk mengukur ritme detak jantung permenit, selanjutnya yang kedua yaitu SpO2 yang merupakan pemeriksaan untuk pengukuran saturasi oksigen yang terdapat dalam hemoglobin, kemudian yang ketiga adalah sistol untuk mengukur tekanan darah saat jantung berkontraksi atau memompa darah, selanjutnya yang keempat adalah diastol yang mengukur tekanan darah saat jantung berelaksasi. Untuk nilai normal dari setiap indikator dapat dilihat pada tabel 1, 2 dan 3 (Salomon, 2024). Dalam pengujian ini skenario yang dilakukan adalah pasien remaja dan dewasa diperiksa dalam kondisi duduk tegak seperti yang ditampilkan gambar X.

Tabel 1. Variabel Indikator Sistol dan Diastol Pada Remaja

Kategori	Normal	Tidak Normal
Tekanan Darah Sistolik	112 - 118 mmHg	< 112 mmHg > 118 mmHg
Tekanan Darah Diastolik	66 - 80 mmHg	< 66 mmHg > 80 mmHg

Tabel 2. Variabel Indikator Sistol dan Diastol Pada Dewasa

Kategori	Normal	Tidak Normal
Tekanan Darah Sistolik	90 - 120 mmHg	< 90 mmHg > 120 mmHg
Tekanan Darah Diastolik	60 - 80 mmHg	< 60 mmHg > 80 mmHg

Tabel 3. Variabel Indikator Detak Jantung dan Saturasi Oksigen

Kategori	Normal	Tidak Normal
Detak Jantung	60 – 100 denyut/menit	<60 denyut/menit >100 denyut menit
Saturasi Oksigen	95 - 100%	<95%

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian dilakukan pada sampel remaja dan dewasa, dimana manset untuk mengukur tekanan darah di letakkan pada lengan sebelah kiri dan jari dijepit untuk pengujian BPM dan SpO₂ seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Proses Pengujian Alat

3.1. Pengujian Pada Remaja

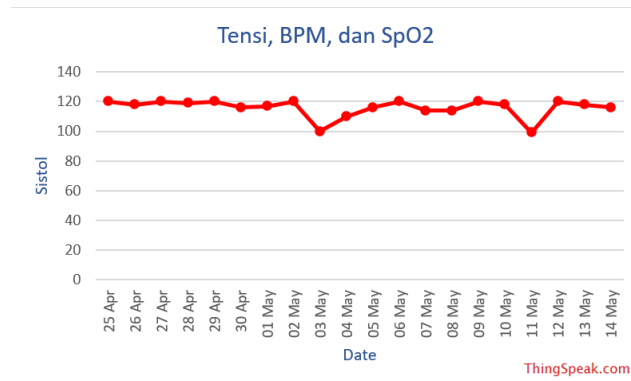
Dalam pengujian ini penulis menggunakan sampel untuk pemeriksaan pada remaja berusia 12 tahun. Pada pengujian ini mengukur nilai dari sistol, diastol, BPM, dan SpO₂.

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Pada Remaja

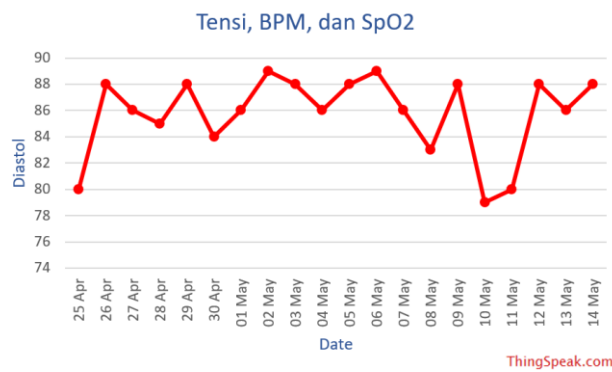
No	Tanggal	Sistol	Diastol	BPM	SpO ₂
1	04/25/2024	120	80	103,13	98
2	04/26/2024	118	88	99,37	97
3	04/27/2024	120	86	100	96
4	04/28/2024	119	85	95,35	95
5	04/29/2024	120	88	92,36	93
6	04/30/2024	116	84	95,37	96
7	05/01/2024	117	86	85,34	94
8	05/02/2024	120	89	90,45	95
9	05/03/2024	100	88	93,27	98
10	05/04/2024	110	86	92,34	99
11	05/05/2024	116	88	99,42	93
12	05/06/2024	120	89	80,31	98
13	05/07/2024	114	86	90,67	97
14	05/08/2024	114	83	97,56	96
15	05/09/2024	120	88	94,76	93
16	05/10/2024	118	79	87,6	97
17	05/11/2024	99	80	85,97	95
18	05/12/2024	120	88	85,99	98
19	05/13/2024	118	86	79,3	96
20	05/14/2024	116	88	85,29	93
Rata-Rata		115,75	85,75	91,6925	95,85

Tabel 4 diatas dapat dilihat untuk pemeriksaan dilakukan sebanyak 20 kali percobaan dengan nilai rata-rata untuk sistol adalah 115,75, diastol sebesar 85,75, BPM dengan rata-rata 91,6, dan untuk SpO₂ yaitu 95,85. Berdasarkan tabel pengujian pada remaja dapat dilihat untuk nilai sistol, diastol, BPM, dan SpO₂ masih digolongkan normal sesuai dengan tabel 4.

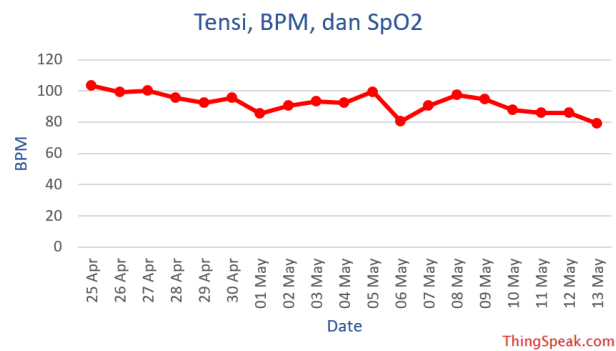
Gambar 5-9 menunjukkan grafik pengukuran untuk nilai sistol, diastol, BPM, dan SpO₂ untuk remaja dimana sampel diambil sebanyak 20 kali dalam jangka waktu 20 hari. Kemudian terdapat gambar 10 yang menunjukkan nilai rata-rata dari hasil pengukuran.



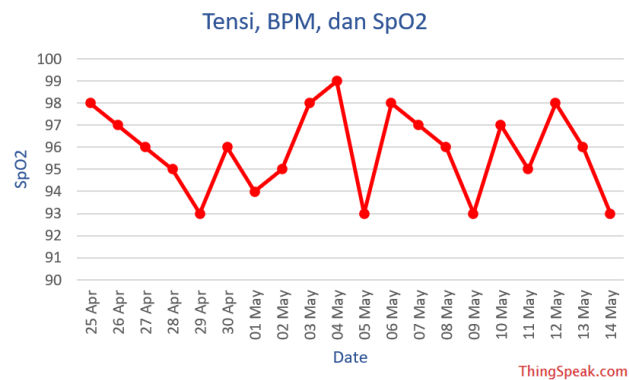
Gambar 6. Grafik Pengujian Sistol Pada Remaja



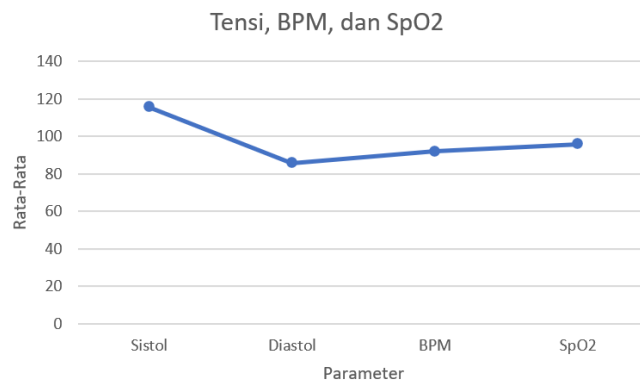
Gambar 7. Grafik Pengukuran diastol Pada Remaja



Gambar 8. Grafik Pengukuran BPM Pada Remaja



Gambar 9. Grafik Pengukuran SpO2 Pada Remaja



Gambar 10. Grafik Rata-Rata Pengukuran Pada Remaja

3.2. Pengujian Pada Dewasa

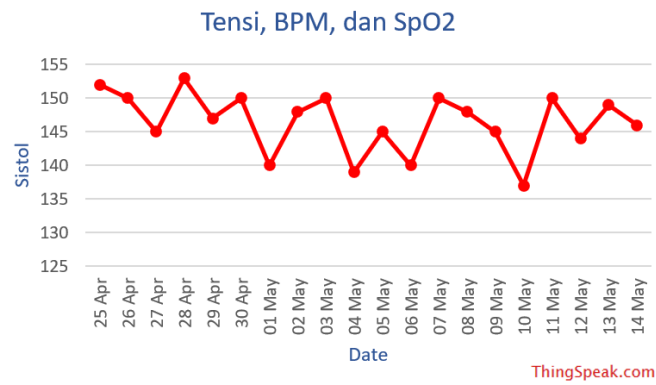
Dalam pengujian ini penulis menggunakan sampel untuk pemeriksaan pada dewasa berusia 47 tahun. Pada pengujian ini mengukur nilai dari sistol, diastol, BPM, dan SpO2.

Tabel 5. Hasil Pemeriksaan Pada Dewasa

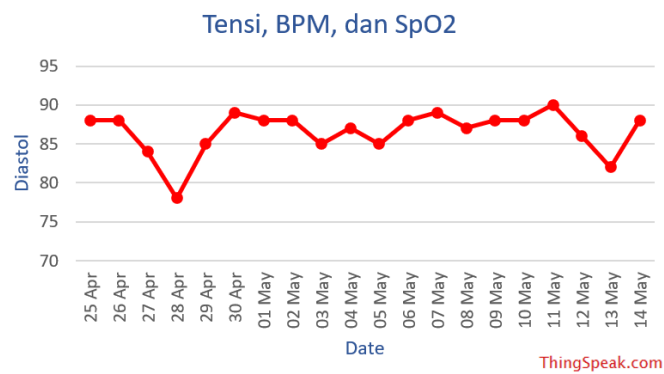
No	Tanggal	Sistol	Diastol	BPM	SpO2
1	04/25/2024	120	80	103,13	98
2	04/26/2024	118	88	99,37	97
3	04/27/2024	120	86	100	96
4	04/28/2024	119	85	95,35	95
5	04/29/2024	120	88	92,36	93
6	04/30/2024	116	84	95,37	96
7	05/01/2024	117	86	85,34	94
8	05/02/2024	120	89	90,45	95
9	05/03/2024	100	88	93,27	98
10	05/04/2024	110	86	92,34	99
11	05/05/2024	116	88	99,42	93
12	05/06/2024	120	89	80,31	98
13	05/07/2024	114	86	90,67	97
14	05/08/2024	114	83	97,56	96
15	05/09/2024	120	88	94,76	93
16	05/10/2024	118	79	87,6	97
17	05/11/2024	99	80	85,97	95
18	05/12/2024	120	88	85,99	98
19	05/13/2024	118	86	79,3	96
20	05/14/2024	116	88	85,29	93
Rata-Rata		115,75	85,75	91,6925	95,85

Tabel 5 diatas dapat dilihat untuk pemeriksaan dilakukan sebanyak 20 kali percobaan dengan nilai rata- rata untuk sistol adalah 146,4, diastol sebesar 86,55, BPM dengan rata-rata 83,5, dan untuk SpO2 yaitu 95,25. Berdasarkan tabel pengukuran pengujian pada dewasa tua nilai dari diastol, BPM, dan SpO2 tergolong normal. Sedangkan tekanan sistol terindikasi mengalami tekanan darah tinggi.

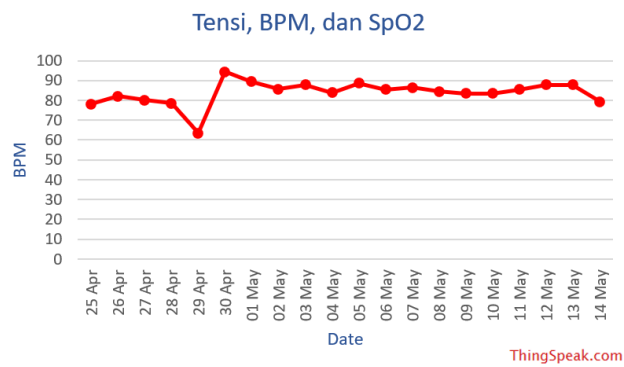
Gambar 11-14 menunjukkan grafik pengukuran untuk nilai sistol, diastol, BPM, dan SpO2 untuk dewasa dimana sampel diastol sebanyak 20 kali dalam jangka waktu 20 hari. Kemudian terdapat gambar 15 yang menunjukkan nilai rata-rata dari hasil pengukuran.



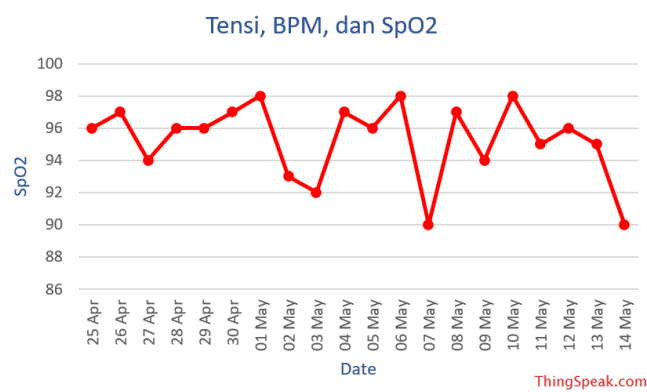
Gambar 11. Grafik Pengujian Sistol Pada Dewasa



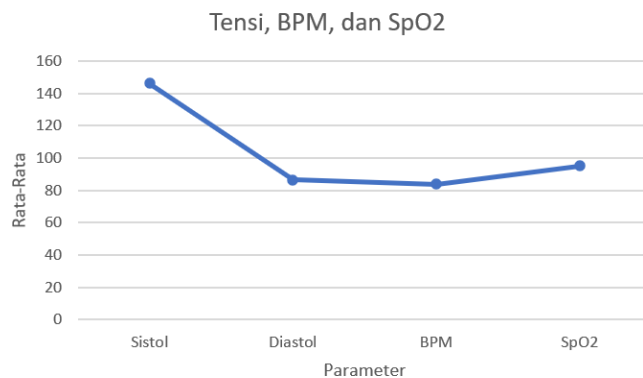
Gambar 12. Grafik Pengujian Diastol Pada Dewasa



Gambar 13. Grafik Pengujian BPM Pada Dewasa



Gambar 14. Grafik Pengujian SpO2 Pada Dewasa



Gambar 15. Grafik Rata-Rata Pengukuran Pada Dewasa

3.3. Pengujian Kinerja Sistem Sensor MPX 5050 DP

Pengujian untuk sensor MPX 5050 DP yang merupakan sensor untuk mengukur tekanan darah dibandingkan kinerjanya dengan tensimeter digital dengan merk omicron. Pengujian kinerja sensor MPX 5050 DP dengan tensimeter digital omicron dilakukan dengan membandingkan keduanya dengan melakukan pengujian pada pasien sebanyak tiga kali dan didapatkan akurasi sebesar 91,85% dengan tingkat error sebesar 8,15% .

Tabel 6. Kinerja Sistem Sensor MPX 5050 DP

No	Jenis Kelamin	Sistol		Selisih Sistol	Diastol		Selisih Diastol
		MPX 5050 DP	Tensimeter		MPX 5050 DP	Tensimeter	
1	L	122	109	13	89	79	10
2	L	121	132	11	89	97	8
3	P	152	160	8	88	84	4
Jumlah		395	401	32	266	260	22
Rata-Rata		131,67	133,67	10,67	88,67	86,67	7,3
		%Error = 7,9%			%Error = 8,4%		
		Akurasi (Sistol) = 92,1			Akurasi (Diastol) = 91,6%		
		Akurasi Sensor = 91,85%					

3.4. Pengujian Kinerja Sistem Sensor MAX 30100

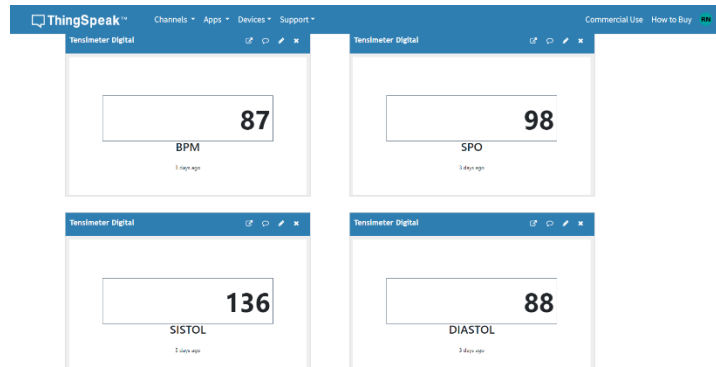
Pengujian untuk sensor MAX 30100 yang merupakan sensor untuk mengukur BPM dan SpO₂ dibandingkan kinerjanya dengan *pulse oximeter*. Pengujian kinerja sensor MAX 30100 dengan *pulse oximeter* dilakukan dengan membandingkan keduanya dengan melakukan pengujian pada pasien sebanyak tiga kali dan didapatkan akurasi sebesar 95,84% dengan tingkat error sebesar 4,16% .

Tabel 7. Kinerja Sistem Sensor MAX 30100

No	Jenis Kelamin	BPM		Selisih BPM	SpO2 (%)		Selisih SpO2
		MAX30100	Oximeter		MAX30100	Oximeter	
1	L	98	103	5	94	96	2
2	L	110	114	4	94	97	3
3	P	80	71	9	97	96	1
Jumlah		288	288	18	285	289	6
Rata-Rata		96	96	6	95	96,3	2
		%Error = 6,25%			%Error = 2,07%		
		Akurasi (Sistol) = 93,75%			Akurasi (Diastol) = 97,93%		
		Akurasi Sensor = 95,84%					

3.5. Hasil Pengujian Pada *Thingspeak*

Gambar 16 menampilkan alat yang dibuat dapat mengirimkan informasi dari 4 indikator yaitu sistol, diastol, BPM, dan SpO₂ dan dapat ditampilkan pada *dashboard thingspeak*.



Gambar 16. *Dashboard Thingspeak*

3.6. Hasil Pengujian Pada Telegram

Gambar 17 menampilkan alat yang dibuat dapat mengirimkan informasi dari 4 indikator yaitu sistol, diastol, BPM, dan SpO2 dan informasi dapat ditampilkan pada aplikasi telegram beserta dengan keterangan kesehatannya.



Gambar 17. Tampilan Pada Aplikasi Telegram

Kesimpulan

Alat yang telah dibuat sudah dapat terhubung dengan media informasi seperti telegram untuk mengirim hasil pengukuran beserta keterangan dari hasil pengukuran. Serta untuk hasil pengukuran seperti sistol, diastol, BPM, dan SpO2 dapat ditampilkan pada *dashboard thingspeak*. Akurasi alat yang dibuat didapat dengan membandingkan dengan alat yang dijual di pasaran. Dimana untuk akurasi pengukuran tensi yaitu sebesar 91,85%, serta untuk akurasi pengukuran nilai BPM dan SpO2 adalah 95,84%. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, tingkat keakuratan alat yang dibuat dengan alat yang dijual di pasaran memiliki nilai yang masih terdapat perbedaan. Hal ini disebabkan sensitifitas pada sensor digital sangatlah tinggi. Pada pengujian ini didapatkan hasil pengukuran yang diperoleh sejalan dengan hasil penelitian telah dilakukan sebelumnya, dibuktikan melalui perhitungan dan pembuktian data penelitian dalam mengukur tekanan darah menggunakan perangkat digital yang terintegrasi dengan internet tidak jauh berbeda dengan pengukuran perangkat secara manual.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih yang sebesar-besarnya kepada POLBAN yang telah memberikan bantuan materil dalam pembuatan tulisan ini, serta tidak lupa ucapan terimakasih pembimbing yang telah memberikan arahan dalam penulisan, dan kepada teman-teman seperjuangan yang telah memberikan masukan dan saran.

Daftar Notasi

BPM = *Beat Per Minute*

SpO2 = *Saturation of Peripheral Oxygen*

Daftar Pustaka

- Alfarisi, F. S., & Chandra, J. C. (2022). PROTOTIPE SISTEM KONTROL LAMPU DAN KIPAS BERBASIS INTERNET OF THINGS MENGGUNAKAN APLIKASI TELEGRAM. *SENAFTI* (pp. 1137-1146). Jakarta: SENAFIT.
- Amran, Subito, M., & Alamsyah. (2020). SISTEM MONITORING TEKANAN DARAH DAN SUHU TUBUH BERBASIS IoT (INTERNET of THING) MENGGUNAKAN ANDROID. *Foristek*, 45-52.
- H, H. A., Kumala, S., & Irmayani. (2021). Sistem Monitoring Dan Pengendalian Data Suhu Ruang Navigasi Jarak Jauh Menggunakan WEMOS D1 Mini. *Jurnal Nasional Komputasi dan Teknologi Informasi*, 38-49.
- Harianto, B., Hidayat, A., & Hulu, F. N. (2021). ANALISIS PENGGUNAAN SENSOR MAX30100 PADA SISTEM PENDETEKSI DETAK JANTUNG BERBASIS IoT BLYNK. *SemanTECH 2021*, 238-245.
- Jaenudin, J., Afrianto, Y., & Firdaus, Y. H. (2023). LAYANAN PEMERIKSAAN DAN PENGUMPULAN DATA KESEHATAN SISWA-SISWI KELAS VI BERBASIS SISTEM INFORMASI MENGGUNAKAN METODE FUZZY TSUKAMOTO. *SINKRON: JURNAL PENGABDIAN MASYARAKAT UIKA JAYA*, 93-105.
- K, N., D, S., & Nagaraj, B. K. (2024). Healthcare Monitoring and Analysis Using ThingSpeak IoT Platform: Capturing and Analyzing Sensor Data for Enhanced Patient Care Healthcare Monitoring and Analysis Using ThingSpeak. *Research Gate*.
- Kardi, I. S., Ibrahim, N., & Nopiyanto, Y. E. (2020). Penerapan aktivitas fungsional rekreasi pada masa new normal untuk menjaga kesehatan lanjut usia. *Jurnal Empati*, 62-70.
- Karnadi, J., Riantono, A., Roihan, I., & Koestoer, R. A. (2024). Skin and Body Temperature Parameter Calibration of MAX30100 Sensor Module Based on Arduino-Uno. *Evergreen*, 1419-1425.
- Salomon, S. H. (2024, Oktober 04). *Verywell Health*. Retrieved from Verywell Health: <https://www.verywellhealth.com/average-blood-pressure-by-age-5085328>
- Sokop, S. J., Mamahit, D. J., & Sompie, S. R. (2016). Trainer Periferal Antarmuka Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno. *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, 13-23.
- Sulista, A., & Fuady, S. (2021). Rancang Bangun Alat Monitoring Tekanan Darah Berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Engineering*, 14-26.
- Valencia, R., Zamora, J., & Hernández, H. (2022). Introduction to IoT Systems. *CIMPS*, 227-229.
- Wahyusari, R., Saputro, T. A., & Wibowo, L. (2023). RANCANG BANGUN PROTOTIPE KONTROL DAN DETEKSI KERUSAKAN LAMPU PENERANGAN JALAN BERBASIS INTERNET OF THINGS. *Jurnal Informatika & Rekayasa Elektronika*, 214-219.

Penentuan *Layout* Pemecah Gelombang di Pantai Nusa Dua Provinsi Bali

Bayu Patria Y, Yopi Dwi A.P, dan Chairunnisa

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

bayuyudapatria@yahoo.com, yopiputra10@gmail.com, chairunnisa@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Pantai Nusa Dua terletak di Kabupaten Badung, Provinsi Bali. Pantai Nusa Dua mengalami erosi dan kemunduran garis pantai akibat energi gelombang dan gerakan sedimen sejajar pantai. Saat ini, di Pantai Nusa Dua telah dilakukan beberapa upaya pengendalian erosi, yaitu dengan membangun pemecah gelombang lepas pantai, *groin*, *revetment*, serta *sand nourishment* (pengisian pasir). Bangunan pemecah gelombang dapat mengurangi tinggi gelombang di pantai. Pada penelitian ini dilakukan penentuan *layout* pemecah gelombang di Pantai Nusa Dua, Provinsi Bali, agar dapat mengurangi tinggi gelombang dan mengurangi kecepatan arus sejajar pantai, sehingga dapat mengendalikan erosi dan mencegah kemunduran garis pantai. Pemecah gelombang yang direncanakan *layout*-nya adalah pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) dengan elevasi puncak pada -1 m dari MSL. Pemecah gelombang direncanakan tidak akan menimbulkan sedimentasi sehingga *layout*-nya berada sekitar 360 m dari garis pantai dan memiliki panjang struktur 180 m. Direncanakan 3 (tiga) struktur pemecah gelombang dengan celah antar struktur 22,5 m. Hasil pemodelan gelombang menunjukkan bahwa dengan *layout* yang direncanakan, pemecah gelombang dapat mengurangi tinggi gelombang di pantai yang awalnya sekitar 2-3 m menjadi sekitar 1 m.

Kata kunci: erosi, tinggi gelombang, *layout* pemecah gelombang, Delft3D, pemodelan gelombang

Abstract

Nusa Dua Beach is located in Badung Regency, Bali Province. Nusa Dua beach is experiencing erosion and coastline decline due to wave energy and sediment movement along the coast. Currently, at Nusa Dua Beach, several erosion control efforts have been carried out by building offshore breakwaters, groins, revetments, and sand nourishment. Breakwater can reduce wave height. In this study, the layout of the breakwater was determined on Nusa Dua Beach, Bali Province, in order to reduce wave height and reduce the speed of longshore currents, so as to control erosion and prevent shoreline deterioration. The breakwater which its layout is designed is a low crested breakwater (LCB/PEGAR) with crest elevation at -1 m from MSL. The breakwater is designed not to cause sedimentation so that its layout is about 360 m from the shoreline and has a structure length of 180 m. Three units of breakwater is designed with a distance between structures of 22.5 m. The results of wave modeling show that with the designed layout, the breakwater can reduce the wave height on the beach, which was initially around 2-3 m to about 1 m.

Keywords: erosion, wave height, breakwater layout, Delft3D, wave modeling

1. Pendahuluan

Pantai Nusa Dua merupakan pantai yang terletak di sebelah selatan Pulau Bali. Salah satu potensi yang dimiliki Pantai Nusa Dua adalah keindahan pantainya sehingga menjadi salah satu lokasi wisata yang kerap dikunjungi wisatawan baik lokal maupun internasional. Namun, dibalik keindahan hamparan pasir putih di Pantai Nusa Dua, terjadi proses erosi yang dapat mengakibatkan kemunduran garis pantai. Kemunduran garis pantai dapat menyebabkan berkurangnya ruang antara laut dan infrastruktur, sehingga meningkatkan risiko kerusakan pada fasilitas pesisir seperti jalan, permukiman, dan bangunan pelindung pantai (Lansu et al., 2024). Selain itu, kemunduran garis pantai mengurangi area pantai wisata yang berfungsi sebagai ruang rekreasi dan daya tarik utama sektor pariwisata pesisir. Penyusutan lebar pantai akibat erosi menyebabkan berkurangnya ruang bagi aktivitas wisata seperti berjemur, bermain, maupun kegiatan ekonomi berbasis pantai.

Erosi dapat terjadi akibat energi gelombang yang menghantam pantai, maupun akibat arus sejajar pantai. Dibutuhkan bangunan pelindung pantai untuk mengendalikan erosi yang terjadi agar tidak terjadi kemunduran garis pantai.

Arah datang gelombang yang tidak tegak lurus terhadap garis pantai akan menimbulkan arus sejajar pantai yang akan menyebabkan terjadinya gerakan sedimen sejajar pantai (*litoral drift*). Gerakan sedimen sejajar pantai di Pantai Nusa Dua mengarah ke Utara, sedangkan sedimen dari Selatan tidak ada karena tertahan tombolo. Tidak seimbang antara sedimen masuk dan keluar akan menyebabkan kemunduran garis pantai, sehingga perlu dilakukan *artificial sand nourishment* (Dirjen Pengairan DPU, 1983).

Sejak tahun 2003 telah dilakukan beberapa upaya konservasi Pantai Nusa Dua yaitu dengan membangun pemecah gelombang lepas pantai, *groin*, *revetment*, serta *sand nourishment* (pengisian pasir). Putro dan Lee (2020) mengkaji erosi di Pantai Nusa Dua menggunakan data hasil monitoring profil pantai dari tahun 2003-2016, yang hasilnya menunjukkan

Info Makalah:

Dikirim : 09-07-24;

Revisi 1 : 04-27-26;

Diterima : 04-28-26.

Penulis Korespondensi:

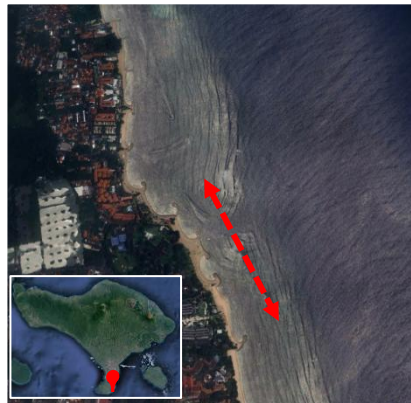
Telp : +62 813-9522-1424

e-mail : chairunnisa@lecture.unjani.ac.id

bahwa hampir semua area Pantai Nusa Dua mengalami erosi setelah upaya konservasi pantai.

Arus sejajar pantai dipengaruhi oleh sudut gelombang pecah terhadap garis pantai dan tinggi gelombang pecah (Ahdannabiel et al., 2017). Semakin tinggi gelombang dan semakin besar sudut antara gelombang pecah dan garis pantai, maka kecepatan arus sejajar pantai akan semakin besar (Komar, 1998). Bangunan pemecah gelombang dapat mengurangi energi dan tinggi gelombang. Bangunan pemecah gelombang dapat mengurangi kemunduran garis pantai (Efendi, 2016). Namun, bangunan pemecah gelombang jarang digunakan di tempat wisata karena dampak estetikanya sangat mengganggu, sehingga berkembanglah inovasi berupa pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) yang puncak strukturnya berada di bawah atau sedikit muncul di atas permukaan air laut rata-rata (MSL) (Sulaiman, 2021). PEGAR meredam sebagian energi gelombang sehingga gelombang pecah dan melimpas di atas puncak struktur sambil mengangkut sedimen dan mengendapkannya di pantai (Sulaiman, 2018).

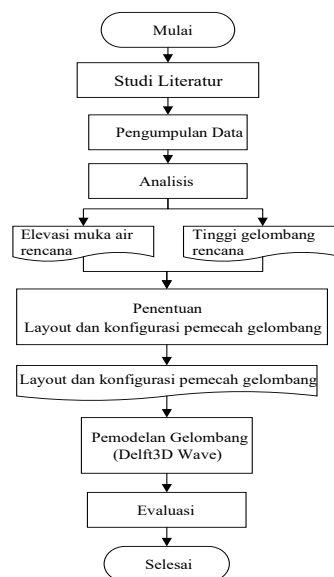
Pada penelitian ini akan dilakukan penentuan *layout* pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) di Pantai Nusa Dua, Provinsi Bali, agar dapat mengurangi tinggi gelombang dan mengurangi kecepatan arus sejajar pantai, sehingga dapat mengendalikan erosi dan mencegah kemunduran garis pantai.



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

2. Metode

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur mengenai kondisi Pantai Nusa Dua Bali dan kriteria desain *layout* bangunan pemecah gelombang. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data, dan analisis data. Data yang digunakan adalah peta bathimetri, arah dan kecepatan angin, serta elevasi muka air pasang surut. Analisis data dilakukan untuk menentukan tinggi muka air rencana, dan menentukan tinggi gelombang rencana di laut dalam (lepas pantai lokasi penelitian). Hasil analisis data digunakan sebagai dasar menentukan *layout* dan konfigurasi pemecah gelombang. Selanjutnya dilakukan pemodelan gelombang dengan *software* Delft3D (modul *wave*) untuk menentukan tinggi gelombang rencana di pantai (lokasi struktur) dan mengetahui pengaruh *layout* pemecah gelombang terhadap tinggi gelombang di pantai. Bagan alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

2.1. Pengumpulan Data

Data teknis yang dikumpulkan terdiri dari data elevasi muka air pasang surut, data angin, peta global, dan peta bathimetri. Data elevasi muka air pasang surut diperoleh dari hasil prediksi NAOtide. Data angin berupa kecepatan dan arah angin 3 jam selama 10 tahun (tahun 2012-2021) diperoleh dari NOAA. Peta global diperlukan untuk membuat *fetch* (daerah pembentukan gelombang). *Fetch* dan data angin selanjutnya akan menjadi input dalam analisis *hindcasting*. Peta bathimetri diperoleh dari BATNAS, digunakan sebagai input dalam pemodelan transformasi gelombang.

2.2. Analisis Data

Analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah analisis pasang surut, *hindcasting*, dan analisis tinggi gelombang rencana.

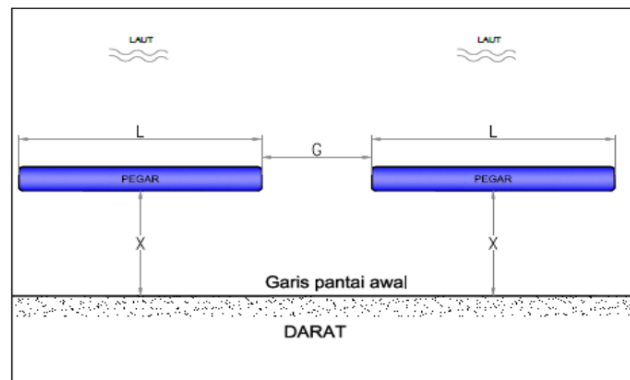
Analisis pasang surut dilakukan untuk mendapatkan elevasi muka air rencana. Analisis pasang surut dilakukan dengan 3 tahap, yaitu penguraian konstanta pasang surut, peramalan pasang surut selama 1 periode (18,6 tahun), dan penentuan elevasi muka air rencana.

Hindcasting adalah analisis peramalan gelombang yang dilakukan dengan menggunakan data angin selama 10 tahun dan panjang *fetch* efektif di lokasi penelitian. Data angin yang digunakan adalah kecepatan angin yang telah dikoreksi. Hasil *hindcasting* berupa nilai periode gelombang dan tinggi gelombang di laut dalam. Prosedur yang digunakan mengikuti prosedur peramalan gelombang SPM 1984.

Analisis tinggi gelombang rencana dilakukan untuk setiap arah gelombang, untuk memperoleh tinggi gelombang pada kala ulang tertentu. Data tinggi gelombang dalam analisis ini diperoleh dari hasil *hindcasting*. Analisis tinggi gelombang rencana akan dihitung menggunakan metode Gumbel. Tinggi gelombang rencana selanjutnya akan menjadi input dalam pemodelan transformasi gelombang untuk mendapatkan tinggi gelombang desain di lokasi rencana struktur pemecah gelombang (Chairunnisa, 2019).

2.3. Penentuan *Layout* Pemecah Gelombang

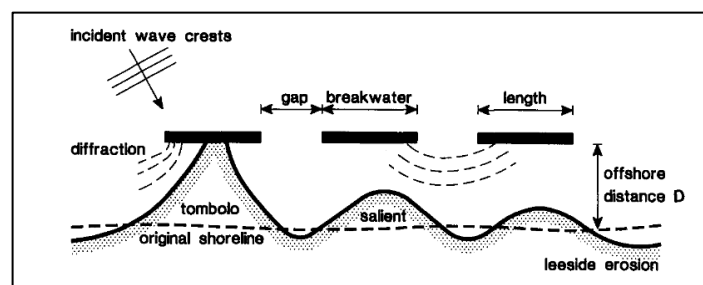
Dalam menentukan *layout* pemecah gelombang dilakukan perhitungan jarak struktur dari garis pantai (X), panjang struktur (L), dan lebar celah antar struktur pemecah gelombang (G). *Layout* pemecah gelombang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Layout* dan jarak pemecah gelombang

Sumber: Sulaiman, 2017

Penempatan struktur pemecah gelombang sangat mempengaruhi respon yang terjadi pada pantai. Respon pantai dapat berupa terbentuknya salient atau tombolo, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pemecah gelombang dan garis pantai yang terbentuk

Sumber: Leo van Rijn, 2018

Kriteria pembentukan salient atau tombolo ditentukan berdasarkan nilai rasio antara jarak struktur pemecah gelombang dari garis pantai (Y_B) dengan jarak lokasi gelombang pecah dari garis pantai (Y_{Br}).

$$\frac{Y_B}{Y_{Br}} > 1 \rightarrow \text{tidak terbentuk salient} \quad (1)$$

$$\frac{Y_B}{Y_{Br}} < 1 \rightarrow \text{terbentuk salient} \quad (2)$$

$$\frac{Y_B}{Y_{Br}} < 0.55 \rightarrow \text{terbentuk tombolo sempurna} \quad (3)$$

$$\frac{Y_B}{Y_{Br}} < 0.39 \rightarrow \text{terbentuk dobel tombolo} \quad (4)$$

Menurut Ahrens dan Cox (1990), panjang breakwater (L_B) ditentukan dengan menggunakan bilangan Iribaren (I) dengan terlebih dahulu menentukan Y_B .

$$I = e^{(1,72 - 0,41 \frac{L_B}{Y_B})} \quad (5)$$

Adapun hubungan nilai I dengan pola sedimentasinya adalah sebagai berikut:

$$I = 1 \text{ maka } \frac{L_B}{Y_B} \geq 3.205 \rightarrow \text{terbentuk tombolo sempurna} \quad (6)$$

$$I = 2 \text{ maka } 1.965 \leq \frac{L_B}{Y_B} \leq 3.205 \rightarrow \text{terbentuk tombolo periodik} \quad (7)$$

$$I = 3 \text{ maka } 1.14 \leq \frac{L_B}{Y_B} \leq 1.965 \rightarrow \text{terbentuk salient sempurna} \quad (8)$$

$$I = 4 \text{ maka } 0.525 \leq \frac{L_B}{Y_B} \leq 1.14 \rightarrow \text{terbentuk subdued salient} \quad (9)$$

$$I = 5 \text{ maka } \frac{L_B}{Y_B} \leq 0.525 \rightarrow \text{tidak ada sedimentasi} \quad (10)$$

Jarak antar struktur pemecah gelombang ditentukan dengan metode Suh dan Dalrymple (1987):

$$\frac{L_g Y_b}{Y_{br}^2} < 0.5 \quad (11)$$

2.4. Permodelan Transformasi Gelombang

Pemodelan transformasi gelombang dilakukan dengan menggunakan *software* Delft3D modul *wave*. Adapun input pemodelan adalah tinggi dan periode gelombang kala ulang 100 tahun. Pemodelan gelombang dilakukan untuk kondisi eksisting dan pada rencana *layout* pemecah gelombang.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis pasang surut berupa elevasi muka air penting disajikan pada Tabel 1. Jenis pasang surut di Pantai Nusa Dua adalah *mixed type* (semi diurnal dominan). Berdasarkan nilai HWS dan LWS pada Tabel 1 dapat diketahui nilai tunggang pasang di Pantai Nusa Dua adalah 303,65 cm.

Tabel 1. Elevasi Muka Air Penting di Pantai Nusa Dua

Muka Air Rencana	Elevasi (cm)
HWS (<i>Highest Water Spring</i>)	152,18
MHWS (<i>Mean High Water Spring</i>)	122
MHWL (<i>Mean High Water Level</i>)	72,38
MSL (<i>Mean Sea Level</i>)	0
MLWL (<i>Mean Low Water Level</i>)	-71,78
MLWS (<i>Mean Low Water Spring</i>)	-122,95
LWS (<i>Lowest Water Spring</i>)	-155,47

Hasil *hindcasting* berupa total persentase kejadian gelombang di Pantai Nusa Dua yang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Kejadian Gelombang Selama 10 Tahun

Arah	Tinggi Gelombang (m)							Jumlah	Prosentase
	<0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-1	1-1,5	1,5-2	>2		
Utara	96	0	0	0	0	0	0	96	0,3
Timur Laut	193	385	389	265	255	35	8	1530	5,1
Timur	0	589	460	472	2839	2566	1797	8723	29,3
Tenggara	0	166	405	429	2397	2253	1164	6814	22,9
Selatan	0	618	259	113	236	35	12	1273	4,3
Barat Daya	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Barat	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Barat Laut	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jumlah								18436	61,9
Calm								11340	38,1
Total								29776	100

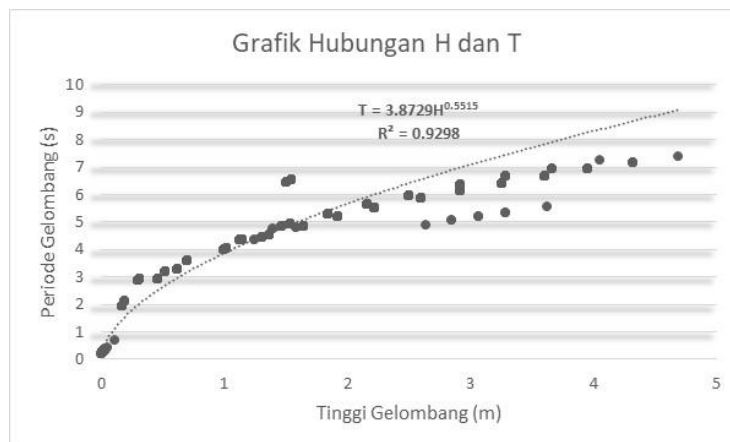
Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa kejadian gelombang di Pantai Nusa Dua adalah sebesar 61,9 % dengan gelombang dominan berasal dari arah Timur yaitu sebesar 29,3 % dan Tenggara 22,9%, sedangkan kejadian tidak ada gelombang (*calm*) sebesar 38,1%.

Tinggi gelombang rencana berupa tinggi gelombang kala ulang 100 tahun (H_{100}) disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Tinggi Gelombang Rencana H_{100}

Arah Gelombang	H_{100} (m)
NE	5
N	5
SE	6

Untuk menentukan periode gelombang rencana digunakan grafik hubungan antara H dan T yang dihasilkan dari proses *hindcasting*. Grafik hubungan antara H dan T dapat dilihat pada Gambar 5.



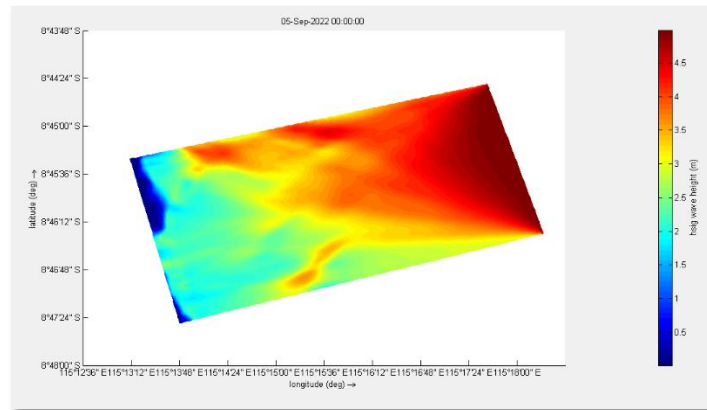
Gambar 5. Grafik Hubungan Antara H dan T

Dari Gambar 5 didapatkan persamaan $T = 3,8729 H^{0.5515}$ dengan nilai $R^2 = 0,9298$, yang selanjutnya akan digunakan untuk menghitung periode gelombang rencana. Tinggi dan periode gelombang rencana kala ulang 100 tahun dapat dilihat pada Tabel 4. Dari hasil analisis gelombang yang terdapat pada Tabel 4, gelombang maksimum berasal dari arah Tenggara dengan tinggi gelombang sebesar 6 m dan periode gelombang sebesar 11 detik yang selanjutnya akan dijadikan input dalam pemodelan gelombang.

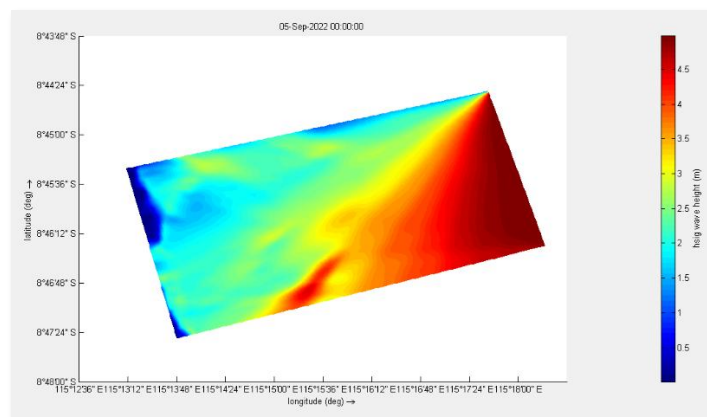
Tabel 4. Tinggi dan Periode Gelombang Rencana

Arah	H_{100} (m)	T (s)
Utara	5	10
Timur Laut	5	10
Tenggara	6	11

Pemodelan gelombang dilakukan untuk kondisi eksisting dan pada rencana *layout* pemecah gelombang. Gelombang yang memasuki perairan dangkal akan mengalami transformasi berupa berkurangnya kecepatan rambat gelombang, berkurangnya panjang gelombang, dan naiknya tinggi gelombang (Kurniadi & Windupranata, 2017). Hasil pemodelan transformasi gelombang untuk kondisi eksisting disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Tinggi Gelombang Hasil Transformasi Gelombang dari Arah Timur



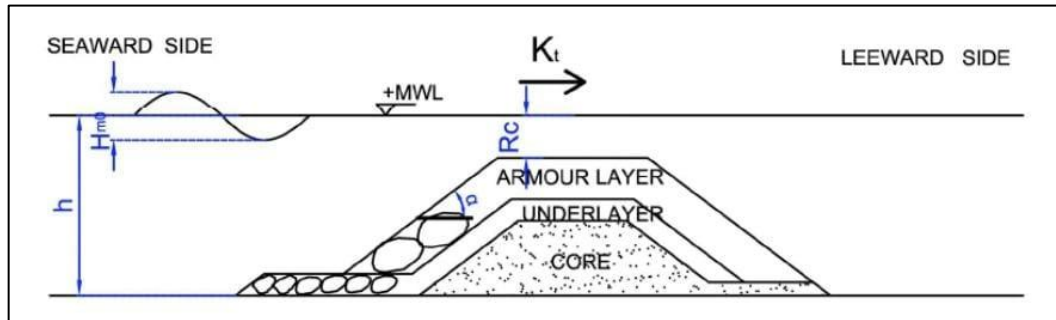
Gambar 7. Tinggi Gelombang Hasil Transformasi Gelombang dari Arah Timur Laut

Hasil pemodelan gelombang eksisting menunjukkan adanya penurunan tinggi gelombang dalam perambatan dari laut dalam ke pantai akibat proses transformasi gelombang (shoaling dan refraksi). Tinggi gelombang di pantai antara 2 sd 3 m.

Penentuan *layout* pemecah gelombang meliputi penentuan jarak struktur dari garis pantai, panjang struktur, serta jarak antar struktur. Pemecah gelombang direncanakan agar tidak menyebabkan sedimentasi sehingga *layout* pemecah gelombang berada 360 m dari garis pantai. Pemecah gelombang direncanakan sebanyak 3 unit dengan panjang setiap unit 180 m dan jarak antar struktur 22,5 m. Pemecah gelombang yang diusulkan adalah pemecah gelombang sisi miring yang terbuat dari *rubble mounds*, dan berupa pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) dengan puncak struktur berada pada elevasi -1 m dari MSL Gambar 8 merupakan sketsa *layout* pemecah gelombang di Pantai Nusa Dua Bali. Tipikal penampang melintang pemecah gelombang ditunjukkan pada Gambar 9.

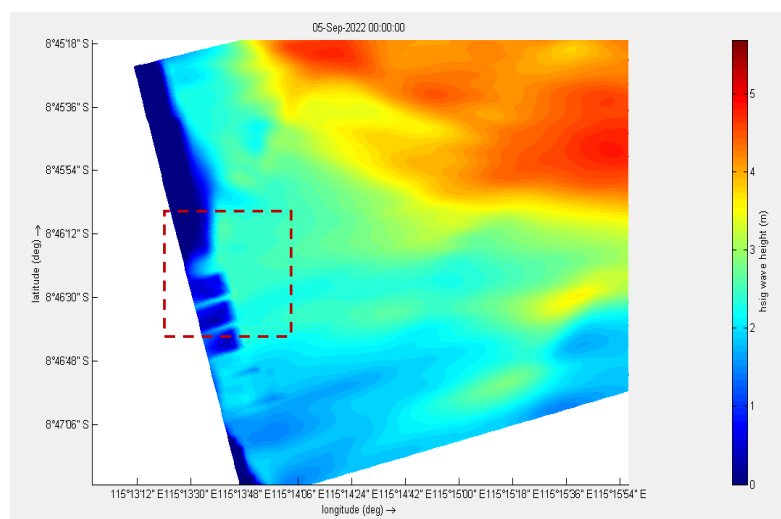


Gambar 8. Sketsa *Layout* Pemecah Gelombang

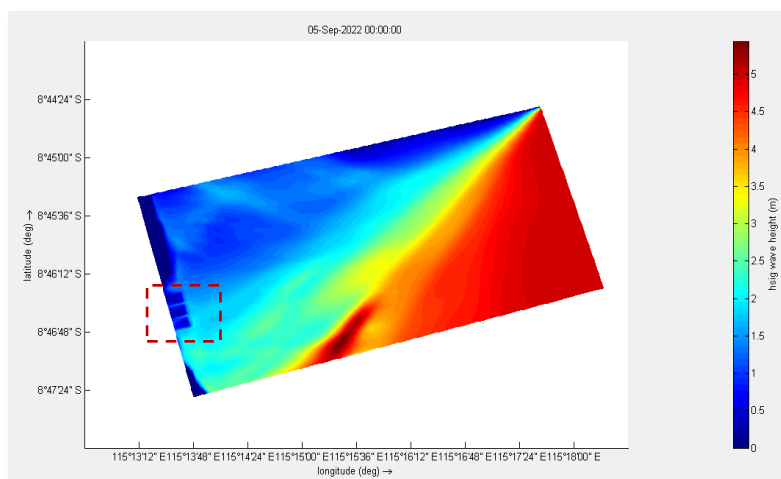


Gambar 9. Tipikal Penampang Melintang Pemecah Gelombang *Rubble Mounds* dengan Ambang Rendah
Sumber: Koftis et al, 2015

Hasil pemodelan transformasi gelombang pada rencana *layout* pemecah gelombang disajikan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Tinggi Gelombang Hasil Pemodelan Transformasi Gelombang Setelah Ada Pemecah Gelombang dari Arah Timur



Gambar 11. Tinggi Gelombang Hasil Pemodelan Transformasi Gelombang Setelah Ada Pemecah Gelombang dari Arah Timur Laut

Metode untuk menilai efektifitas struktur pemecah gelombang adalah dengan membandingkan tinggi gelombang sebelum dan setelah adanya struktur pemecah gelombang (Sugianto et al., 2019). Hasil pemodelan gelombang setelah ada pemecah gelombang ambang rendah menunjukkan bahwa dengan layout yang telah ditentukan, pemecah gelombang dapat mengurangi tinggi gelombang di pantai, yang awalnya sekitar 2-3 m menjadi sekitar 1 m.

Kesimpulan

Pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) dengan elevasi struktur pada -1 m dari MSL direncanakan sebanyak 3 unit dan berada 360 m dari garis pantai dengan panjang struktur 180 m serta jarak antar struktur 22,5 m. Berdasarkan hasil pemodelan transformasi gelombang, pemecah gelombang ambang rendah yang direncanakan dapat mengurangi tinggi gelombang di pantai yang awalnya sekitar 2-3 m menjadi sekitar 1 m. Diharapkan dengan berkurangnya tinggi gelombang maka kecepatan arus sejajar pantai akan berkurang sehingga tidak menyebabkan erosi di Pantai Nusa Dua Bali.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dari berbagai pihak yang terlibat dalam proses studi ini, baik berupa bantuan dalam pengumpulan dan analisis data, maupun atas diskusinya yang bermanfaat.

Daftar Notasi

H_{100}	= tinggi gelombang kala ulang 100 tahun
T	= periode gelombang
Y_{Br}	= jarak lokasi pecahnya gelombang dari garis pantai
Y_B, X	= jarak lokasi struktur pemecah gelombang dari garis pantai
L_B, L	= panjang struktur pemecah gelombang
L_g, G	= jarak antar struktur pemecah gelombang

Daftar Pustaka

- Ahdannabel, H., Widada, S., & Hariadi. (2017). Distribusi Sedimen Dasar Akibat Arus Sejajar Pantai di Sekitar Groin di Perairan Pantai Widuri Pemalang, J. Oseanograf., 6(4):650-658.
- Anthony Harlly Sasono Putro, Jung Lyul Lee. (2020). Analysis of Longshore Drift Patterns on the Littoral System of Nusa Dua Beach in Bali, Indonesia. Journal of Marine Science and Engineering, 8, 749.
- Chairunnisa, C., Atiah, S. N., & Wahyuni, R. (2019). *Penentuan tinggi gelombang desain untuk perencanaan rubble-mound breakwater Pelabuhan Belawan*. Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik, 18(1), 8–16. <https://doi.org/10.26874/jt.vol18no1.97>
- Dirjen Pengairan DPU, 1983 Laporan Hasil Peninjauan dan Saran Penanggulangan Wisata pantai Kawasan Nusa Dua Bali, Republik Indonesia
- Efendi, S. S. (2016). Pengaruh modifikasi bentuk groin terhadap perubahan garis pantai Sanur Bali. Jurnal Teknik Hidraulik, 7(1), 87–98.
- J. P. Ahren, J. Cox. (1990). Design and Performance of Reef Breakwaters. Journal of Coastal Research, 51(7), 61-75.
- Koftis et al. 2015. An Integrated Methodological Approach for The Upgrading of Coastal Structures due to Climate Change Effects, IAHR, Netherland
- Komar, P.D. (1998). Beach Processes and Sedimentation. Second Edition, Printice Hall, New Jersey, USA.
- Kurniadi, Y. N., & Windupranata, W. (2017). Transformasi gelombang pada batimetri ekstrim dengan model numerik SWASH: Studi kasus Teluk Pelabuhan Ratu, Sukabumi. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, 3(1), 26–35.
- K. Suh, R. Dalrymple. (1987). Offshore Breakwaters in Laboratory and Field. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 113(2), 105-121.
- Lansu, E.M., Reijers, V.C., Höfer, S. et al. A global analysis of how human infrastructure squeezes sandy coasts. *Nat Commun* 15, 432 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44659-0>
- Putra, A., S. Husrin, T.A. Tanto and R. Pratama. (2015). Coastal Vulnerability for Climate Change in Northeastern Bali Province. Marine Engineering, Bandung Institute of Technology. Available online at www.sciencedirect.com.
- Sugianto, D. N., Purwanto, Handoyo, G., Oktaviani, A., Kunarso, Zainuri, M., & Indarjo, A. (2019). *Determination of submerged breakwater location for coastal protection in Panjang Island waters Jepara*. Advances in Science, Technology and Engineering Systems, 4(5), 346–351. <https://doi.org/10.25046/aj040545>
- Sulaiman, Dede M. *Teknologi PEGAR Untuk Penanggulangan Erosi Dan Abrasi Pantai*. Deepublish, 2021.
- Sulaiman, D. M., Yungga, B., & Wiryawan, B. A. (2018). *Applying low-crested breakwaters in restoring eroding muddy coasts of Demak, Central Java*. Proceedings of the 21st IAHR-APD Congress, Yogyakarta.
- Sulaiman, Dede M., 2017, Pagar Bercelah–Bangunan Pelindung dan Penumbuh Pantai, Deepublish, Yogyakarta Cetakan 1, Mei ISBN 978-602-453-090-7
- Van Rijn, L. C. (2018). *Detached breakwaters*. www.leovanrijn-sediment.com

Analisis Pengaruh Variasi Katalis CaO Dari Tulang Sapi Terhadap Konversi Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel Melalui Transesterifikasi

Elizabeth Desfelia Ciciolini Sidabutar¹, Rizqy Romadhona Ginting¹, Fika Dwi Oktavia¹,
Yongki Christandi Batubara², Arini Anestesia Purba³, Hendrik Vicarlo Saragih Manihuruk⁴,
Arturito Tri Setiawan¹, Zain Achmad Kahfi¹, Vanessa Keysia Imanuella Mampow¹, dan
Naufal Rakha Ramdhani¹

¹Teknik Kimia, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

²Teknik Mesin, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

³Teknik Industri, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

⁴Teknik Logistik, Fakultas Rekayasa dan Teknik Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

elizabeth.sidabutar@lecturer.itk.ac.id, rizqy.ginting@lecturer.itk.ac.id, fika.oktavia@lecturer.itk.ac.id,

yongki.batubara@lecturer.itk.ac.id, arini.anestesia@lecturer.itk.ac.id, hendrik.manihuruk@lecturer.itk.ac.id,

05221075@student.itk.ac.id, 05221022@student.itk.ac.id, 05221062@student.itk.ac.id, 05221070@student.itk.ac.id

Abstrak

Produksi biodiesel dari minyak jelantah masih menghadapi kendala akibat tingginya kandungan asam lemak bebas (*free fatty acid*, FFA) yang dapat memicu reaksi saponifikasi dan menurunkan efektivitas katalis. Penggunaan katalis heterogen CaO berbasis limbah tulang sapi menjadi alternatif potensial karena memiliki toleransi lebih baik terhadap FFA. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh rasio molar metanol:minyak 5:1 dan 12:1, suhu kalsinasi katalis CaO 800°C dan 1000°C, waktu kalsinasi 3, 5, dan 7 jam, serta konsentrasi katalis 4 wt% dan 6 wt% terhadap yield biodiesel dari minyak jelantah. Katalis CaO disintesis dari tulang sapi melalui proses kalsinasi dan digunakan pada reaksi transesterifikasi selama 1 jam. Yield biodiesel digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi pengaruh parameter kalsinasi dan kondisi transesterifikasi. Hasil menunjukkan bahwa rasio molar 12:1 menghasilkan konversi lebih tinggi dibandingkan 5:1. Kondisi optimum diperoleh pada suhu kalsinasi 1000°C selama 5 jam dengan konsentrasi katalis 4–6 wt%, menghasilkan yield maksimum sebesar 73%. Peningkatan yield dari 46% menjadi 73% menunjukkan bahwa suhu kalsinasi yang lebih tinggi meningkatkan pembentukan CaO aktif dan situs basa O²⁻ yang berperan dalam pembentukan ion metoksida selama reaksi transesterifikasi. Katalis CaO berbasis tulang sapi efektif untuk produksi biodiesel tanpa esterifikasi awal.

Kata kunci : biodiesel, minyak jelantah, katalis CaO, kalsinasi, transesterifikasi.

Abstract

Biodiesel production from waste cooking oil is challenged by its high free fatty acid (FFA) content, which can promote saponification and reduce catalyst performance. Heterogeneous CaO catalyst derived from bovine bone waste offers a promising alternative due to its higher tolerance toward FFA. This study investigated the effects of methanol-to-oil molar ratios (5:1 and 12:1), catalyst calcination temperatures (800°C and 1000°C), calcination times (3, 5, and 7 h), and catalyst concentrations (4 and 6 wt%) on biodiesel yield from waste cooking oil. CaO catalyst was synthesized from bovine bones through calcination and applied in a 1 h transesterification reaction. Biodiesel yield was used to evaluate the influence of calcination and reaction conditions. The results showed that the 12:1 molar ratio provided higher conversion than the 5:1 ratio. The optimum condition was obtained at a calcination temperature of 1000°C for 5 h with a catalyst concentration of 4–6 wt%, yielding a maximum biodiesel yield of 73%. The increase in yield from 46% to 73% indicates enhanced formation of active CaO and O²⁻ basic sites, which facilitate methoxide ion generation during transesterification. These findings demonstrate the potential of bovine bone-derived CaO catalyst for biodiesel production without esterification.

Keywords: biodiesel, waste cooking oil, CaO catalyst, calcination, transesterification.

1. Pendahuluan

Energi berkelanjutan merupakan prasyarat penting bagi pembangunan, sehingga transisi dari bahan bakar fosil menuju sumber energi yang lebih bersih menjadi semakin mendesak (Azni dkk., 2023). Proyeksi menunjukkan bahwa pada tahun 2030 produksi minyak global hanya mencapai sekitar 100 juta barel per hari, sementara kebutuhan

Info Makalah:

Dikirim : 02-15-26;

Revisi 1 : 05-07-26;

Diterima : 05-16-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-81254784059

e-mail : elizabeth.sidabutar@lecturer.itk.ac.id

diperkirakan melebihi kapasitas tersebut hingga menimbulkan defisit ±10 juta barel per hari (Al-Yasiri, 2021). Kondisi ini menegaskan perlunya sumber energi alternatif yang tidak hanya lebih bersih, tetapi juga mampu memperkuat ketahanan energi global, terutama ketika permintaan energi diproyeksikan meningkat 53% dan permintaan minyak sebesar 6% pada tahun yang sama (Wan Osman dkk., 2024). Tekanan terhadap lingkungan juga terus meningkat, terutama di negara-negara besar seperti Tiongkok, India, dan Amerika Serikat yang

mengalami penurunan sumber daya alam serta lonjakan emisi gas rumah kaca (Wang & Azam, 2024). Di Indonesia, ketergantungan serupa terlihat dari emisi nasional yang mencapai 2.127,22 juta ton CO₂e pada tahun 2022 dan meningkat 10% dibandingkan tahun sebelumnya, sehingga memperkuat urgensi pengembangan energi alternatif yang lebih berkelanjutan (Hanifah & Purbadharmaja, 2025).

Dalam konteks tersebut, biodiesel menjadi salah satu opsi energi terbarukan yang paling relevan karena dapat menggantikan sebagian peran solar tanpa memerlukan modifikasi signifikan pada mesin diesel, serta menawarkan keunggulan teknis seperti sifatnya yang biodegradable, tidak beracun, dan memiliki titik nyala tinggi (Udayakumar dkk., 2024). Biodiesel berbasis minyak jelantah bahkan dilaporkan mampu menurunkan emisi CO hingga 96% dan meningkatkan efisiensi pembakaran sebesar 12,7% dibandingkan solar (Nugroho dkk., 2024). Potensi ketersediaan bahan bakunya juga sangat besar, mengingat sekitar 30% konsumsi minyak goreng per kapita berpotensi menjadi limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai *feedstock* biodiesel (Singh dkk., 2021). Di Indonesia, konsumsi minyak goreng mencapai 16,2 juta kiloliter per tahun, menghasilkan ±3 juta kiloliter minyak jelantah atau sekitar 18,5% dari total konsumsi (Ministry of Energy and Mineral Resources [ESDM], 2021). Namun, tingkat pemanfaatannya masih rendah, yaitu sekitar 570.000 kiloliter atau ±19% dari total potensi, sehingga menunjukkan perlunya optimalisasi sistem pengumpulan dan pemrosesan minyak jelantah untuk mendukung ketahanan energi serta mengurangi beban limbah domestik (El-Araby dkk., 2024).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa performa katalis CaO pada produksi biodiesel masih sangat dipengaruhi oleh kondisi preparasi katalis dan parameter reaksi transesterifikasi. Nadya, dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan katalis campuran CaO–NaOH dengan rasio katalis 3:1 dan waktu reaksi 80 menit menghasilkan *yield* biodiesel sebesar 85,16%. *Yield* yang relatif tinggi tersebut dipengaruhi oleh penggunaan NaOH sebagai katalis basa homogen yang dikombinasikan dengan CaO, sehingga aktivitas katalitik tidak hanya berasal dari CaO murni. Sementara itu, Ayoola dkk. (2018) menggunakan katalis CaO berbasis tulang kalkun yang dikalsinasi pada 800°C selama 3 jam dan menghasilkan *yield* biodiesel sekitar 68–69% pada beberapa kondisi reaksi.

Penelitian ini berupaya mengoptimalkan proses transesterifikasi minyak jelantah melalui evaluasi sejumlah parameter operasi secara lebih komprehensif. Variasi yang dianalisis meliputi suhu kalsinasi katalis pada 800 dan 1000°C, massa katalis 4 wt% dan 6 wt%, serta durasi kalsinasi 3, 5, dan 7 jam untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Parameter-parameter tersebut dipilih karena berperan penting dalam pembentukan fase CaO aktif dan jumlah situs basa katalis yang mempengaruhi aktivitas transesterifikasi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kondisi preparasi katalis yang kurang optimal dapat menurunkan aktivitas katalitik dan menghasilkan konversi biodiesel yang rendah. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh parameter kalsinasi katalis CaO berbasis tulang sapi terhadap peningkatan *yield* biodiesel dari minyak jelantah serta efektivitas proses transesterifikasi.

2. Metode

2.1. Preparasi Bahan Baku dan Katalis CaO dari Tulang Sapi

Tulang sapi diperoleh dari limbah yang berlokasi di kawasan Kampung Timur, Balikpapan Utara. Sedangkan minyak jelantah diperoleh dari industri kerupuk di kawasan Prapatan, Balikpapan Selatan. Tulang sapi segar terlebih dahulu dibersihkan dari jaringan organik melalui pencucian dengan air mengalir kemudian dijemur, setelah itu tulang tersebut dipotong hingga menjadi potongan-potongan tulang yang kemudian direbus menggunakan *pressure cooker* selama ±3 jam untuk menghilangkan residu lemak dan jaringan lunak. Tulang yang telah bersih dikeringkan pada oven dengan suhu 110 °C selama 2-5 jam hingga kering, kemudian dihancurkan menggunakan *hammer* dan mortar hingga berukuran kecil. Serbuk tulang kemudian dihaluskan dengan *ball mill* dan diayak menggunakan *sieve shaker* berukuran 100 mesh. Tahap kalsinasi dilakukan dengan memanaskan serbuk tulang di dalam *furnace* pada suhu 800 °C dan 1000 °C dengan variasi waktu tahan 3, 5, dan 7 jam. Serbuk CaO hasil kalsinasi disimpan dalam wadah kedap udara untuk mencegah rekarbonasi.



Gambar 1. Preparasi Katalis CaO dari Tulang Sapi

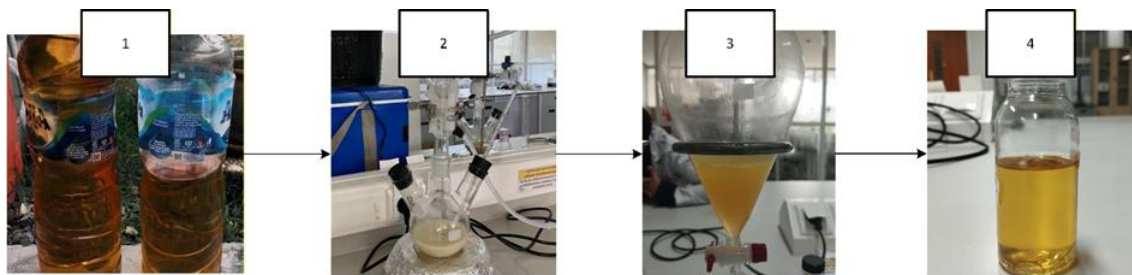
2.2. Persiapan Bahan Baku Minyak Jelantah

Minyak jelantah disaring menggunakan kertas saring untuk menghilangkan kotoran fisik dan residu padat. Minyak yang telah disaring kemudian diuji kandungan asam lemak bebas (FFA) melalui titrasi menggunakan larutan NaOH 0,1 N untuk memastikan kelayakan minyak sebagai bahan baku transesterifikasi (Buchori dkk., 2021). Adapun FFA dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\%FFA = \frac{V_{NaOH} \times N_{NaOH} \times Mr_{Minyak\ Jelantah}}{m_{sampel}} \quad (1)$$

2.3. Proses Transesterifikasi Biodiesel

Reaksi transesterifikasi dilakukan dengan mencampurkan minyak jelantah dan metanol sesuai variasi rasio molar (5:1 dan 12:1) serta penambahan katalis CaO sebesar 4 wt% dan 6 wt%. Campuran direaksikan dalam *batch reactor glassware* yang dilengkapi *hot plate stirrer* dengan kecepatan pengadukan 600 rpm pada suhu tetap 65 °C selama 1 jam. Setelah reaksi selesai, campuran dipindahkan ke corong pemisah dan dibiarkan mengendap selama 12 jam hingga terbentuk dua fase: fase atas methanol biodiesel dan fase bawah berupa biodiesel serta sisa gliserol.



Gambar 2. Proses Transesterifikasi Pembuatan Biodiesel

Selanjutnya, biodiesel dipisahkan dan disaring menggunakan kertas saring untuk menghilangkan partikel katalis yang tersisa. Selanjutnya dilakukan pencucian menggunakan air hangat secara perlahan hingga lapisan air bilasan menjadi jernih. Biodiesel kemudian dipanaskan pada suhu 1000 °C selama 30-60 menit untuk menghilangkan sisa air. Produk akhir disimpan dalam botol tertutup sebelum dilakukan karakterisasi.

2.4. Analisis Karakteristik Biodiesel

Karakteristik biodiesel yang dihasilkan dianalisis melalui kandungan asam lemak bebas (FFA) dan perhitungan *yield*. *Yield* biodiesel dihitung berdasarkan massa biodiesel yang diperoleh setelah pemurnian dibandingkan massa minyak awal (Haryanto,dkk , 2015). Rumus perhitungan adalah:

$$\%Yield = \frac{m_{biodiesel}}{m_{minyak}} \quad (2)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis FFA (*Free Fatty Acid*) Konten pada Minyak Jelantah

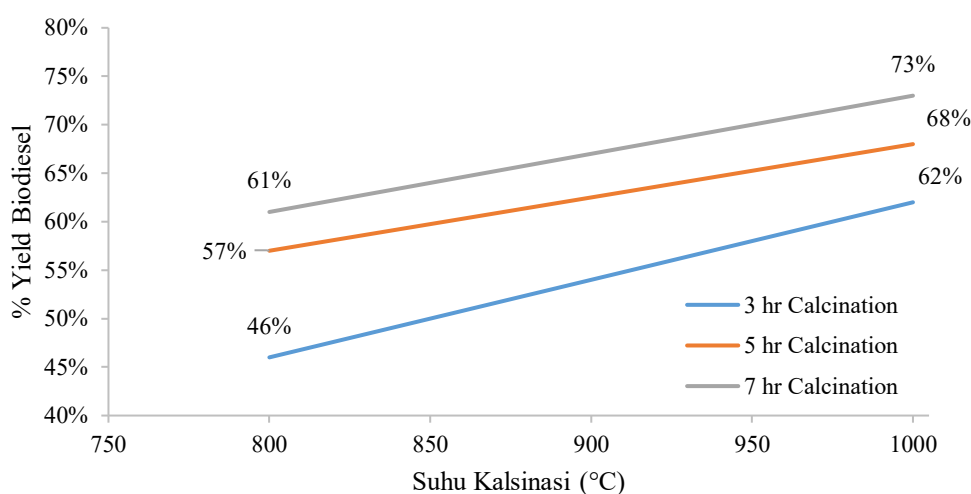
Analisis kadar asam lemak bebas pada minyak jelantah dilakukan untuk mengetahui tingkat degradasi minyak akibat proses pemanasan berulang selama penggorengan. Berdasarkan hasil titrasi pada penelitian ini, menggunakan larutan NaOH 0,1 N, diperoleh volume rata-rata titran sebesar 1,033 mL dengan nilai FFA sebesar 1,82%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa minyak jelantah yang digunakan telah mengalami peningkatan kandungan asam lemak bebas dibandingkan dengan minyak segar. Mohammad dkk. (2015) menyatakan bahwa minyak goreng segar umumnya memiliki nilai FFA di bawah 0,5%, sedangkan penggunaan berulang pada proses penggorengan dapat meningkatkan nilai FFA akibat reaksi hidrolisis dan oksidasi termal.

Peningkatan kadar FFA pada minyak goreng bekas juga ditunjukkan oleh Paase dkk. (2019), di mana proses penggorengan berulang meningkatkan kadar FFA hingga 2–5% akibat degradasi trigliserida selama pemanasan. Meskipun demikian, nilai FFA sebesar 1,82% pada penelitian ini masih tergolong moderat dan masih memungkinkan minyak digunakan langsung pada proses transesterifikasi menggunakan katalis basa heterogen. Azizah, dkk. (2024) menjelaskan bahwa reaksi saponifikasi pada proses transesterifikasi umumnya menjadi signifikan pada minyak dengan kadar FFA di atas 3%, karena asam lemak bebas dapat bereaksi dengan katalis basa membentuk sabun yang menghambat pemisahan biodiesel dan gliserol.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Eze dan Harvey (2018), yang menunjukkan bahwa minyak dengan kandungan FFA sebesar 1–3% masih dapat digunakan sebagai bahan baku biodiesel tanpa proses esterifikasi awal. Pada penelitian ini, minyak jelantah dengan FFA sebesar 1,82% masih dapat ditransesterifikasi menggunakan katalis CaO berbasis tulang sapi dan menghasilkan biodiesel dengan *yield* yang cukup baik. Hal tersebut menunjukkan bahwa kandungan FFA pada minyak belum cukup tinggi untuk menyebabkan reaksi saponifikasi yang dominan selama proses transesterifikasi.

3.2 Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel

Penelitian ini melakukan 2 variabel percobaan pada suhu kalsinasi, yaitu 800°C dan 1000°C, dari hasil percobaan ini dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 3. Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel
(Berat Katalis = 4wt%, Waktu Transesterifikasi = 1hr, Rasio Molar = 12:1; T = 65°C)

Dari hasil yang diperoleh variasi suhu kalsinasi memberikan dampak yang signifikan terhadap aktivitas katalis CaO yang dihasilkan dari tulang sapi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, Berdasarkan data percobaan, peningkatan suhu kalsinasi dari 800°C menjadi 1000°C secara konsisten meningkatkan *yield* biodiesel untuk seluruh waktu kalsinasi (3, 5, dan 7 jam). Pada suhu 800°C, *yield* biodiesel masing-masing tercatat sebesar 46%, 57%, dan 61%, sedangkan pada suhu 1000°C meningkat menjadi 62%, 68%, dan 73%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi yang lebih tinggi menghasilkan katalis dengan situs basa yang lebih banyak dan lebih aktif.

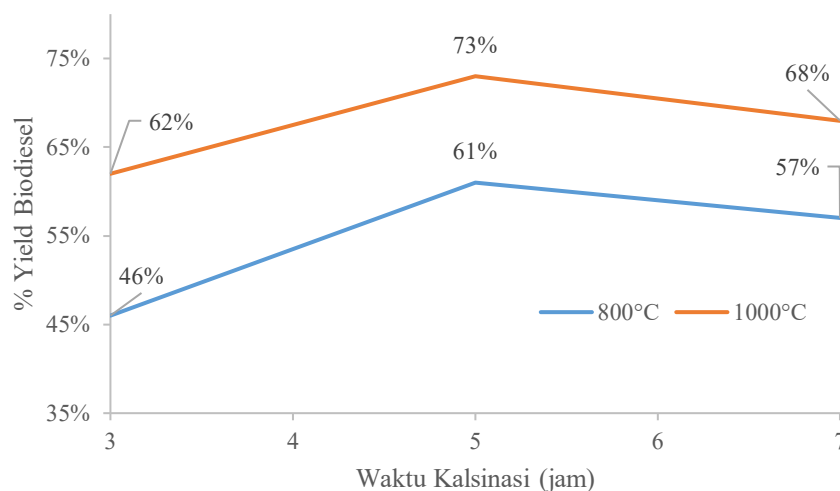
Konversi CaCO₃ yang tidak sempurna pada 800°C menyebabkan terbentuknya CaO dalam jumlah terbatas sehingga aktivitas katalis relatif lebih rendah. Hal ini sejalan dengan temuan Corro dkk. (2016), yang menyatakan bahwa struktur CaO yang terbentuk pada suhu <900°C masih didominasi CaCO₃ sehingga basa kuat O²⁻ belum terbentuk secara optimal (Corro dkk., 2016). Pada suhu 1000°C, proses dekarbonasi berlangsung lebih sempurna sehingga CaO yang dihasilkan lebih murni, memiliki kristalinitas lebih tinggi, serta memberikan jumlah situs basa

yang lebih besar. Aktivitas katalitik CaO yang tinggi inilah yang meningkatkan pembentukan ion metoksida (CH_3O^-), yang berperan sebagai nukleofil utama dalam reaksi transesterifikasi biodiesel.

Hasil variabel pada penelitian ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi merupakan faktor paling menentukan dalam meningkatkan aktivitas katalis CaO dari tulang sapi. Suhu 1000°C menghasilkan CaO dengan konversi mineral yang lebih sempurna, porositas lebih tinggi, serta distribusi situs basa yang lebih aktif, sehingga mampu menghasilkan *yield* biodiesel tertinggi pada seluruh variasi waktu kalsinasi. Kondisi ini menegaskan bahwa optimasi suhu kalsinasi memiliki peran penting dalam menentukan performa katalis CaO berbasis tulang sapi dalam proses transesterifikasi biodiesel.

3.3. Pengaruh Waktu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel

Hasil kalsinasi katalis CaO menghasilkan *yield* yang bervariasi pada percobaan yang telah dilakukan, hal ini dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 4 Pengaruh Waktu Kalsinasi Terhadap *Yield* Biodiesel
(Berat Katalis = 4wt%; Waktu Transesterifikasi = 1 hr; Rasio Molar = 12:1; T = 65°C)

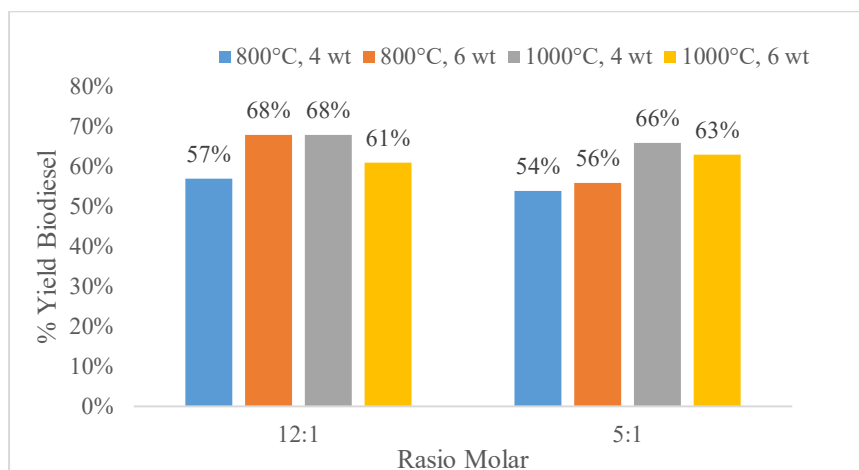
Variasi waktu kalsinasi menunjukkan pengaruh yang cukup jelas terhadap aktivitas katalis CaO yang dihasilkan dari tulang sapi. Berdasarkan Gambar 4, peningkatan waktu kalsinasi dari 3 jam menjadi 5 jam memberikan peningkatan signifikan pada *yield* biodiesel untuk kedua suhu kalsinasi. Pada suhu 800°C , *yield* meningkat dari 46% menjadi 61%, sedangkan pada suhu 1000°C *yield* meningkat dari 62% menjadi 73%. Hal ini menunjukkan bahwa durasi 5 jam merupakan waktu optimum untuk memungkinkan proses transformasi mineral berlangsung lebih sempurna, termasuk dekarbonasi CaCO_3 yang belum selesai pada durasi 3 jam.

Penambahan waktu kalsinasi memberikan lebih banyak waktu bagi CaCO_3 untuk terdekomposisi menjadi CaO aktif, konsisten dengan mekanisme reaksi dekarbonisasi. Kalsium karbonat dalam tulang hewan memerlukan waktu tertentu untuk mencapai dekarbonasi yang stabil pada suhu yang mendekati energi aktivasi untuk proses dekomposisi. Dengan waktu kalsinasi yang lebih panjang, akan terbentuk lebih banyak fraksi CaO, yang berarti meningkatnya jumlah situs basa O^{2-} dapat mempercepat pembentukan ion metoksida selama reaksi transesterifikasi (Bai dkk., 2019).

Namun, peningkatan waktu kalsinasi dari 5 jam menjadi 7 jam tidak lagi meningkatkan *yield* secara signifikan. Pada suhu 800°C , *yield* justru turun sedikit dari 61% menjadi 57%, sedangkan pada suhu 1000°C mengalami penurunan dari 73% menjadi 68%. Fenomena ini menunjukkan bahwa kalsinasi berlebih dapat menyebabkan terjadinya sintering, yakni penyatuan partikel CaO menjadi struktur lebih besar yang mengurangi luas permukaan dan jumlah situs basa aktif. Mekanisme sintering ini umum terjadi pada katalis berbasis CaO pada suhu tinggi, sebagaimana dilaporkan juga oleh (Wong dkk., 2015), yang menyebutkan bahwa paparan suhu tinggi dalam durasi lama dapat menurunkan aktivitas katalis akibat penurunan area aktif CaO (Mohadesi dkk., 2021; Wang dkk., 2015).

Selain itu, waktu kalsinasi yang terlalu lama dapat memperkuat transisi fase Ca-P dari hidroksiapatit menjadi β -TCP (β -trikalsium fosfat). Fase β -TCP stabil secara termal, tetapi bersifat lebih inert dan tidak memberikan kontribusi terhadap basicity katalis. Hal ini menjelaskan mengapa penambahan waktu dari 5 jam ke 7 jam tidak meningkatkan *yield* tetapi cenderung menurun karena fraksi CaO aktif tidak lagi bertambah, sementara potensi sintering meningkat (Hussain dkk., 2021). Secara keseluruhan, pola grafik menunjukkan bahwa waktu kalsinasi 5 jam merupakan kondisi optimum untuk menghasilkan katalis CaO yang aktif baik pada suhu 800°C maupun 1000°C . Pada durasi ini, CaCO_3 telah terdekomposisi secara signifikan, fase organik telah hilang, dan CaO terbentuk dalam jumlah maksimal sebelum terjadi sintering. Waktu kalsinasi yang lebih lama tidak meningkatkan aktivitas katalis, bahkan dapat menurunkannya, sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan *yield* biodiesel pada kedua suhu kalsinasi.

3.4. Pengaruh Rasio Molar Minyak dengan Metanol pada *Yield* Biodiesel



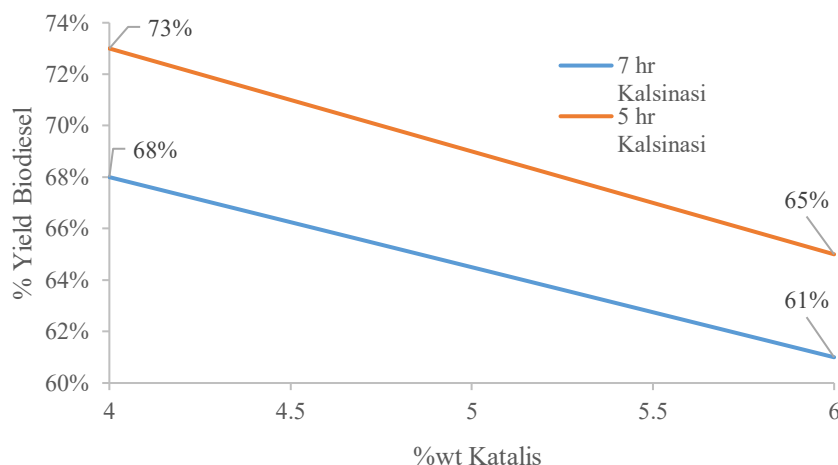
Gambar 5. Pengaruh Rasio Molar Terhadap *Yield* Biodiesel
(Waktu Transesterifikasi = 1 hr; T = 65°C; Lama Kalsinasi = 7 hr)

Variasi rasio molar minyak–metanol memberikan pengaruh yang jelas terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar 4.4, rasio molar 12:1 menghasilkan *yield* yang lebih tinggi dibandingkan rasio 5:1 pada seluruh kondisi suhu dan massa katalis. Pada suhu 800°C dengan 4 wt% katalis, *yield* meningkat dari 54% (5:1) menjadi 57% (12:1). Pada 6 wt%, kenaikan terlihat lebih signifikan, yaitu dari 56% menjadi 68%. Hal serupa terjadi pada katalis yang dikalsinasi pada 1000°C, di mana *yield* meningkat dari 66% menjadi 68% (4 wt%) dan dari 61% menjadi 63% (6 wt%). Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah metanol relatif terhadap minyak memberikan efek positif terhadap konversi trigliserida menjadi metil ester.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Buchori dkk. (2021), yang menunjukkan bahwa rasio 12:1 menghasilkan konversi biodiesel yang lebih tinggi pada sistem katalis CaO berbasis tulang hewan karena terbentuk lebih banyak spesies metoksi (CH_3O^-) di permukaan CaO. Spesies inilah yang menyerang gugus karbonil trigliserida sehingga meningkatkan laju pembentukan metil ester (Buchori dkk., 2021). Namun, peningkatan rasio metanol tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan *yield*. Pada rasio berlebih (di atas 12:1), literatur menunjukkan bahwa gliserol cenderung larut dalam metanol sehingga menghambat pemisahan fase, meningkatkan viskositas campuran reaksi, serta menyebabkan deaktivasi katalis CaO akibat pelarutan sebagian Ca^{2+} dalam kondisi metanol berlebih (Aziz dkk., 2020). Efek-efek ini berpotensi menurunkan *yield*. Meskipun penelitian ini hanya membandingkan rasio 12:1 dan 5:1, pola tersebut sudah tampak: rasio 5:1 memberikan *yield* lebih rendah karena jumlah metanol yang tidak cukup untuk menggeser kesetimbangan reaksi ke arah produk.

3.5. Pengaruh Berat Katalis terhadap *Yield* Biodiesel

Pada hasil transesterifikasi biodiesel yang diperoleh berat katalis memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *yield* yang dihasilkan dengan variasi percobaan 4%wt dan 6%wt, hal ini dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 6. Pengaruh Rasio Molar terhadap *Yield* Biodiesel
(Suhu Kalsinasi = 1000°C; Waktu Transesterifikasi = 1 hr; Rasio Molar = 12:1; T = 65°C)

Variasi berat katalis CaO memberikan pengaruh terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar .6 peningkatan massa katalis dari 4 wt% menjadi 6 wt% justru menurunkan *yield* biodiesel pada kedua durasi kalsinasi (5 jam dan 7 jam). Pada kondisi 5 jam kalsinasi, *yield* menurun dari 68% menjadi 61%, sedangkan pada 7 jam kalsinasi turun dari 73% menjadi 65%. Fenomena ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis berlebih tidak selalu meningkatkan performa transesterifikasi, bahkan dapat menghambat proses.

Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis tidak selalu meningkatkan *yield* biodiesel (Buchori dkk., 2021). Penggunaan katalis CaO berbasis tulang hewan pada konsentrasi yang terlalu tinggi dapat meningkatkan viskositas campuran reaksi dan menghambat kontak efektif antara metanol dan trigliserida, sehingga konversi biodiesel cenderung menurun. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Ayoola dkk. (2018), di mana peningkatan jumlah katalis CaO berbasis tulang menyebabkan terjadinya aglomerasi partikel katalis yang mengurangi luas permukaan aktif dan menurunkan efektivitas transesterifikasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan katalis dalam jumlah berlebih dapat menghambat difusi reaktan menuju situs basa aktif CaO sehingga *yield* biodiesel tidak meningkat secara signifikan.

Secara mekanistik, jumlah katalis yang terlalu tinggi menyebabkan peningkatan viskositas campuran reaksi dan menghambat efektivitas pencampuran antara minyak dan metanol. Hal ini dapat mengurangi frekuensi tumbukan efektif antara trigliserida, metanol, dan situs aktif CaO sehingga menurunkan konversi metil ester. Penggunaan katalis CaO berlebih dapat menyebabkan difusi reaktan menjadi tidak optimal akibat terbentuknya suspensi yang terlalu padat (Buchori dkk., 2021).

Selain itu, berat katalis yang lebih tinggi meningkatkan kemungkinan pembentukan sabun (saponifikasi) pada permukaan katalis, terutama ketika katalis memiliki kekuatan basa tinggi seperti CaO. Reaksi samping ini mengonsumsi sebagian metanol dan asam lemak bebas sehingga menurunkan jumlah trigliserida yang berhasil dikonversi menjadi biodiesel. Hasil *review* dari Hussain dkk. (2021) juga menunjukkan bahwa katalis berbasis CaO dari biomineral menunjukkan penurunan aktivitas pada konsentrasi berlebih karena meningkatnya kompetisi reaksi samping di permukaan katalis (Hussain dkk., 2021). Faktor lain yang turut berkontribusi adalah potensi terjadinya aglomerasi partikel katalis pada massa yang lebih besar. Aglomerasi ini dapat mengurangi luas permukaan aktif CaO yang tersedia, sehingga mengurangi jumlah situs basa O^{2-} yang dapat berinteraksi dengan metanol (Buchori dkk., 2021; Corro dkk., 2016).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi rasio molar metanol : minyak, suhu dan waktu kalsinasi, serta massa katalis berpengaruh terhadap *yield* biodiesel yang dihasilkan dari minyak jelantah. Kondisi terbaik diperoleh pada rasio molar 12:1 dengan katalis CaO berbasis tulang sapi yang dikalsinasi pada suhu 1000°C selama 5 jam, menghasilkan *yield* biodiesel maksimum sebesar 73%. Peningkatan *yield* biodiesel menunjukkan bahwa suhu dan waktu kalsinasi yang lebih tinggi mampu meningkatkan proses dekarbonasi $CaCO_3$ menjadi CaO aktif serta memperbesar jumlah situs basa O^{2-} pada permukaan katalis. Situs basa tersebut berperan dalam pembentukan ion metoksida (CH_3O^-) yang menjadi spesies aktif dalam reaksi transesterifikasi. Namun, peningkatan massa katalis secara berlebih cenderung menurunkan *yield* akibat meningkatnya viskositas campuran dan potensi aglomerasi partikel katalis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa katalis CaO berbasis tulang sapi berpotensi digunakan sebagai katalis heterogen dalam produksi biodiesel dari minyak jelantah tanpa proses esterifikasi awal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan dari Institut Teknologi Kalimantan melalui skema penelitian pada tahun anggaran 2026.

Daftar Notasi

ρ = densitas [g/ml]

φ = viskositas [cst]

Daftar Pustaka

- Al-Yasiri, A. (2021). Global energy demand for different energy sources: Current status and future prospects. *Akkad Journal of Contemporary Economic Studies*, 1(4), 186-196.
- Ayoola, A. A., Fayomi, O. S. I., & Usoro, I. F. (2018). Data on PKO biodiesel production using CaO catalyst from turkey bones. *Data in Brief*, 19, 789–797. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.05.103>
- Aziz, H. A., Abas, N. A., Ping, B. T. Y., & Idris, Z. (2020). Transesterification of Palm-based Methyl Palmitate into Esteramine Catalyzed by Calcium Oxide Catalyst. *Journal of Surfactants and Detergents*, 23(2), 251–262. <https://doi.org/10.1002/jsde.12373>
- Azizah, Z., Wardhana, W., & Fitri, M. A. (2024). PEMANFAATAN IKAN PATIN MENJADI BAHAN BAKU BIODIESEL. *Jurnal Chemurgy*, 8(1), 68. <https://doi.org/10.30872/cm.g.v8i1.11495>

- Azni, M. A., Ahmad, N., Mohammed, W. M. W., & Rahman, R. A. (2023). Review of the effects of fossil fuels and the need for hydrogen fuel cell policy in Malaysia. *Sustainability*, 15, 4033. <https://doi.org/10.3390/su15054033>
- Bai, H., Liu, X., Bao, F., & Zhao, Z. (2019). Synthesis of micronized CaO assisted by NH₄HCO₃ with Ca(OH)₂ and its application in heterogeneously catalyzing transesterification reaction for producing biodiesel. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 66(12), 1604–1609. <https://doi.org/10.1002/jccs.201900023>
- Buchori, L., Anggoro, D. D., & Ma'Ruf, A. (2021). Biodiesel synthesis from the used cooking oil using CaO catalyst derived from waste animal bones. *Chemistry and Chemical Technology*, 15(4), 583-590. <https://doi.org/10.23939/CHCHT15.04.583>
- Corro, G., Sánchez, N., Pal, U., & Bañuelos, F. (2016). Biodiesel production from waste frying oil using waste animal bone and solar heat. *Waste Management*, 47, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.001>
- El-Araby, R., dkk. (2024). Biofuel production: Exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 17, 129, 1-32.
- Eze, V. C., & Harvey, A. P. (2018). Continuous reactive coupling of glycerol and acetone – A strategy for triglyceride transesterification and in-situ valorisation of glycerol by-product. *Chemical Engineering Journal*, 347, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.078>
- Hanifah, P. R., & Purbadharmaja, I. B. P. (2025). Analisis pengaruh konsumsi listrik dan konsumsi bahan bakar fosil terhadap eksternalitas negatif emisi gas rumah kaca di Indonesia. *Jurnal Visi Manajemen*, 11(2), 298-314.
- Haryanto, A., Silviana, U., Triyono, S., & Prabawa, S. (2015). Produksi biodiesel dari transesterifikasi minyak jelantah dengan bantuan gelombang mikro: Pengaruh intensitas daya dan waktu reaksi terhadap rendemen dan karakteristik biodiesel. *Agritech*, 35(2), 234–240. <https://doi.org/10.22146/agritech.13792>
- Hussain, F., Alshahrani, S., Abbas, M. M., Khan, H. M., Jamil, A., Yaqoob, H., Soudagar, M. E. M., Imran, M., Ahmad, M., & Munir, M. (2021). Review waste animal bones as catalysts for biodiesel production; a mini review. In *Catalysts* (Vol. 11, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal11050630>
- Ministry of Energy and Mineral Resources. (2021). Statistik minyak goreng nasional 2021. ESDM Press.
- Mohadesi, M., Gouran, A., & Dehghan Dehnavi, A. (2021). Biodiesel production using low cost material as high effective catalyst in a microreactor. *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119671>
- Mohamad, M., Ngadi, N., & Lani, N. S. (2015). Production of Biodiesel from Cooking Oil Using CaO Catalyst. *Advanced Materials Research*, 1113, 518– 522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1113.518>
- Nadya, S., Mas'udah, & Santosa, S. (2023). Pengaruh rasio katalis CaO-NaOH dan waktu reaksi transesterifikasi terhadap kualitas biodiesel dari minyak sawit. *Distilat*, 9(3), 330-337.
- Nugroho, A. P., Rahmatullah, B., Abduh, M., & Amelia, R. (2024). Optimization of biodiesel from waste cooking oil using modified catalysts and its emission characteristics. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 5(2), 45-55.
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., & Jhalani, A. (2021). A comprehensive review on biodiesel production from waste cooking oil. *Fuel*, 307, 121-129.
- Udayakumar, M., Aravind, V. S., Prakash, M., & Suresh, S. (2024). Biodiesel production, fuel properties, engine performance and emission characteristics: A comprehensive review. *Renewable Energy Reviews*, 92(1), 1-25.
- Wan Osman, N. H., Rahman, N. A., & Hassan, M. H. (2024). Advances in biodiesel production and purification: Current technologies and future directions. *Energy Conversion and Management*, 305, 117-134.
- Wang, Q., & Azam, M. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption and environmental impact: Evidence from major economies. *Geoscience Frontiers*, 15(1), 1-15.
- Wong, Y. C., Tan, Y. P., Taufiq-Yap, Y. H., Ramli, I., & Tee, H. S. (2015). Biodiesel production via transesterification of palm oil by using CaO–CeO₂ mixed oxide catalysts. *Fuel*, 162, 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.012>

Evaluasi Kerapuhan Seismik Gedung Fakultas Teknik UNJANI Menggunakan Metode HAZUS

Raiyyan Rahmi Isda, Laode Azan Muzahab, Akmal Maulana, Desi Gumelarsari,

Isma Nurul Rohmah, Syachril Saputra Roswandi, dan Prima Sukma Yuana

Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Kota Cimahi, Indonesia

raiyyan.rahmiisda@lecture.unjani.ac.id, laodeazanmuzahab@lecture.unjani.ac.id, akmmaulana940@gmail.com,

desigumelar586@gmail.com, ismanurulrohmah03@gmail.com, syahril50saputra@gmail.com,

prima.sukma@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Evaluasi kerapuhan seismik pada bangunan pendidikan menjadi penting karena Indonesia memiliki tingkat kegempaan yang tinggi. Evaluasi juga diperlukan untuk mendukung mitigasi risiko dan keberlanjutan fungsi bangunan pascagempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kerapuhan seismik Gedung Fakultas Teknik UNJANI sebagai bangunan pendidikan melalui integrasi analisis statik nonlinier *pushover* dan Metode HAZUS. Dengan bantuan perangkat lunak berbasis elemen hingga, bangunan dimodelkan tiga dimensi hingga memperoleh *output* berupa kurva kapasitas, *performance point*, dan perpindahan spektral. Kemudian dengan Metode HAZUS diperoleh tingkat kerusakan bangunan (*damage states*): *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete*. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung termasuk tipe struktur rangka beton bertulang tingkat menengah (C1M) dengan level seismisitas tinggi. Kinerja struktur berada pada level *Immediate Occupancy* baik pada arah X maupun Y, yang menunjukkan bahwa struktur masih memiliki kapasitas yang baik setelah menerima beban gempa rencana. Probabilitas kerusakan untuk arah X adalah 0,0% *complete*, 10,0% *extensive*, 99,6% *moderate*, dan 100,0% *slight*, sedangkan untuk arah Y adalah 0,0% *complete*, 16,0% *extensive*, 99,9% *moderate*, dan 100,0% *slight*. Dengan demikian, kerusakan dominan berada pada kategori ringan (*slight*) hingga sedang (*moderate*). Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan analisis dinamik untuk memperkuat validasi hasil.

Kata kunci: kerapuhan seismik, Metode HAZUS, probabilitas kerusakan, analisis *pushover*, kurva kerapuhan.

Abstract

Seismic fragility assessment of educational buildings is important in Indonesia due to its high seismicity. This assessment is required to support risk mitigation and ensure the continuity of building function after earthquakes. This study aims to evaluate the seismic fragility of the Faculty of Engineering Building at UNJANI as an educational facility by integrating nonlinear static pushover analysis and the HAZUS Method. Using finite element-based software, the building was modeled three-dimensionally to obtain the capacity curve, performance point, and spectral displacement. The HAZUS method was applied to estimate the probability of damage states: slight, moderate, extensive, and complete. The results indicate that the building is classified as a mid-rise reinforced concrete moment-frame structure (C1M) with high seismicity level. Structural performance is at Immediate Occupancy in both the X and Y directions, indicating adequate capacity under the design seismic loads. Damage probabilities in the X direction are 0.0% complete, 10.0% extensive, 99.6% moderate, and 100.0% slight, while those in the Y direction are 0.0% complete, 16.0% extensive, 99.9% moderate, and 100.0% slight. Thus, the dominant damage is slight to moderate. Further research is recommended to consider dynamic analysis to strengthen the validation of the results.

Keywords: seismic fragility, HAZUS Method, damage probability, pushover analysis, fragility curve.

1. Pendahuluan

Secara geologis, Indonesia terletak di kawasan Cincin Api Pasifik atau *Ring of Fire*, dipengaruhi interaksi empat lempeng tektonik utama yang membentuk zona penunjaman, sesar aktif, serta gunung api sehingga menyebabkan Indonesia sangat rawan terhadap gempa bumi. Data pemantauan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menunjukkan bahwa setiap tahun Indonesia mengalami rata-rata 6.298 kejadian gempa tektonik bermagnitudo lebih dari 3,0 (Kementerian Pekerjaan Umum, 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa bangunan gedung di berbagai wilayah Indonesia memiliki risiko mengalami kerusakan akibat gempa, sehingga evaluasi ketahanan struktur menjadi penting.

Info Makalah:

Dikirim : 05-04-26;

Revisi 1 : 05-15-26;

Diterima : 05-18-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : raiyyan.rahmiisda@lecture.unjani.ac.id

Bangunan pendidikan memerlukan perhatian khusus karena digunakan secara terus-menerus dan mewadahi banyak aktivitas akademik. Universitas Jenderal Achmad Yani (UNJANI) di Kota Cimahi, Jawa Barat, melalui proyek *New UNJANI*, melaksanakan revitalisasi seluruh gedungnya untuk meningkatkan kualitas sarana prasarana pendidikan serta mendukung transformasi menuju *Smart Campus*. Oleh karena itu, penilaian kinerja seismik bangunan pendidikan tidak cukup hanya sebagai verifikasi kekuatan desain

saja, tetapi juga perlu diarahkan pada evaluasi kerapuhan serta potensi kerusakan bangunan sebagai bagian dari mitigasi bencana (Muntafi dkk., 2018).

Sejalan dengan hal di atas, pendekatan *performance-based earthquake engineering* semakin banyak digunakan dalam menilai ketahanan bangunan terhadap gempa melalui kajian perilaku inelastik struktur. Salah satu metodenya adalah analisis statik nonlinier (*pushover*), yaitu dengan cara memberikan beban lateral statik secara bertahap hingga struktur menunjukkan respons nonlinier dan menghasilkan kurva kapasitas untuk mengidentifikasi perilaku global (Kuria & Kegyes-Brassai, 2024).

Namun, hasil analisis *pushover* sebaiknya dikembangkan lagi menjadi estimasi probabilitas kerusakan bangunan pada berbagai tingkat intensitas gempa dengan Metode HAZUS (Hasyim, 2025). Metode ini mengelompokkan kerusakan bangunan ke dalam ambang kerusakan (*damage states*) berupa kerusakan ringan (*slight*), sedang (*moderate*), berat (*extensive*), dan sangat berat (*complete*) (*Federal Emergency Management Agency*, 2024). Hasilnya berupa kurva kerapuhan yang dapat memberikan gambaran seberapa besar kerapuhan bangunan terhadap gempa, sehingga hal ini menjadi lebih informatif dalam memberikan penilaian risiko struktur bangunan.

Studi-studi terdahulu menunjukkan bahwa integrasi analisis statik nonlinier (*pushover*) dan kurva kerapuhan (*fragility analysis*) telah diterapkan pada berbagai macam bangunan. Bangunan pendidikan di Yogyakarta, Muntafi dkk. (2018) menggunakan *pushover*, ATC-40, HAZUS, dan FEMA-1999 untuk memperoleh *performance level*, *damage probability matrix*, dan estimasi kerugian ekonomi. Rifki & Teguh (2019) juga mengevaluasi kerapuhan seismik bangunan pendidikan Gedung Kuliah Twin Building UMY menggunakan analisis statik linier, analisis *pushover*, dan analisis kerapuhan seismik berbasis HAZUS.

Nurhidayatullah & Kurniati (2021) mengintegrasikan *probabilistic seismic hazard analysis*, *pushover analysis*, dan kurva kerapuhan (*fragility curve*) untuk memperkirakan potensi kerusakan bangunan beton bertulang bertingkat sedang. Disebutkan bahwa kurva kapasitas hasil dari *pushover analysis* digunakan untuk menentukan *median spectral displacement* sebagai dasar pembuatan *fragility curve*, sedangkan *plotting* antara *performance point* dengan *fragility curve* digunakan untuk memperoleh potensi kerusakan bangunan. Di tahun yang sama, Frans dkk. (2021) juga mengintegrasikan antara *pushover* dengan Metode HAZUS untuk menganalisis Gedung ABC yang berada di Kelurahan Jongaya, Kecamatan Tamalate, Sulawesi Selatan. Pada bangunan esensial, Sáenz & Santana (2023) mengembangkan *analytical fragility curves* untuk menilai kerapuhan gedung administratif dan menunjukkan bahwa *damage probability matrix* mampu memperkirakan level kerusakan pada berbagai tingkat *demand* gempa.

Di tahun berikutnya, Paudel dkk. (2024) memperluas cakupan kajian ke arah komparatif dengan membandingkan bangunan *regular* dan *vertically irregular*, hasilnya menunjukkan bahwa bangunan *vertically irregular* memiliki peningkatan kerapuhan dibandingkan bangunan reguler, terutama pada probabilitas *complete failure*. Analisis kerapuhan seismik pada gedung tak beraturan juga dilakukan oleh Hasyim (2025) yang menggabungkan analisis *pushover* dan Metode HAZUS. Hasil penelitiannya menunjukkan kurva kerapuhan dapat memberikan informasi probabilitas kerusakan pada masing-masing *damage states* dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi struktur serta mitigasi risiko gempa.

Sementara itu, Narwastu dkk. (2024) mengembangkan metode *static adaptive pushover* pada Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan. Hasilnya menunjukkan pembaruan distribusi beban lateral berdasarkan kekakuan serta karakteristik modal struktur dapat memberikan keluaran analisis statis yang lebih mendekati perilaku struktur pada analisis dinamis inelastis, sekaligus mampu menggambarkan respons struktur secara lebih detail. Pada tipe struktur lain, Sumedi & Mulyandari (2025) menerapkan analisis *pushover* pada struktur rangka baja dan mengonversi kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas dengan formula dari ATC-40, kemudian dikembangkan menjadi kurva kerapuhan. Secara umum, studi-studi terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan analisis *pushover*–HAZUS efektif digunakan untuk mengevaluasi kinerja seismik dan probabilitas kerusakan bangunan akibat gempa.

Namun, dari berbagai studi tersebut masih terdapat ruang kajian yang dapat dikembangkan lebih lanjut, khususnya terkait integrasi analisis *pushover* dan Metode HAZUS pada bangunan pendidikan beton bertulang bertingkat menengah yang relatif baru dibangun. Beberapa studi komparatif mengenai bangunan reguler dan tidak beraturan juga masih lebih banyak dikembangkan pada konteks bangunan residensial atau *non-engineered buildings*, sehingga bangunan pendidikan modern masih memerlukan basis evidensi tersendiri.

Selain itu, beberapa studi terdahulu cenderung berfokus pada hasil akhir berupa level kinerja struktur atau probabilitas kerusakan, sementara hubungan antara kurva kapasitas hasil *pushover*, *performance point*, *spectral displacement*, kurva kerapuhan, dan probabilitas kerusakan pada setiap *damage state* belum dijelaskan secara runtut. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi kerapuhan seismik gedung melalui integrasi analisis *pushover* dan Metode HAZUS secara sistematis.

Berdasarkan latar belakang dan *research gap* yang telah diuraikan, permasalahan dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana integrasi analisis *pushover* dan Metode HAZUS dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat kerapuhan seismik serta probabilitas kerusakan pada setiap *damage state* bangunan pendidikan beton bertulang bertingkat menengah yang relatif baru dibangun. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas gedung melalui analisis *nonlinear static pushover*, menentukan *performance point* pada domain spektral, serta menyusun kurva kerapuhan bangunan menggunakan Metode HAZUS. Dengan demikian, penelitian ini mengintegrasikan

evaluasi kapasitas inelastik struktur dengan estimasi probabilistik kerusakan untuk menghasilkan penilaian kerapuhan seismik bangunan pendidikan beton bertulang yang lebih sistematis.

Objek yang dijadikan penelitian adalah Gedung Fakultas Teknik yang dibangun sekitar tahun 2024 sebagai bagian dari proyek revitalisasi *New Universitas Jenderal Achmad Yani (UNJANI)*, berlokasi di Kota Cimahi, Jawa Barat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pemilihan objek ini didasarkan pada karakteristik bangunan yang representatif sebagai gedung pendidikan bertingkat menengah dengan sistem beton bertulang, sehingga relevan untuk dikaji dalam konteks evaluasi kerapuhan seismik berbasis *pushover* dan HAZUS.



(a) Tampak Perspektif Depan-Samping
Sumber: Dokumentasi Fakultas Teknik, 2025



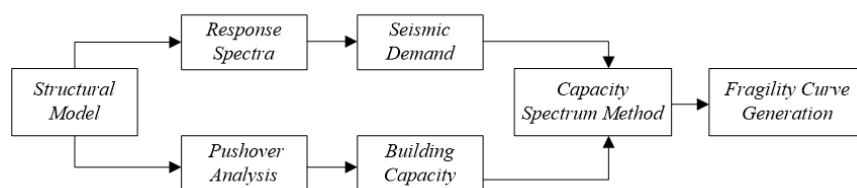
(b) Tampak Depan-Samping
Sumber: Dokumentasi Penulis, Mei 2026

Gambar 1. Gedung Fakultas Teknik *New UNJANI*

2. Metode

2.1 Desain Penelitian

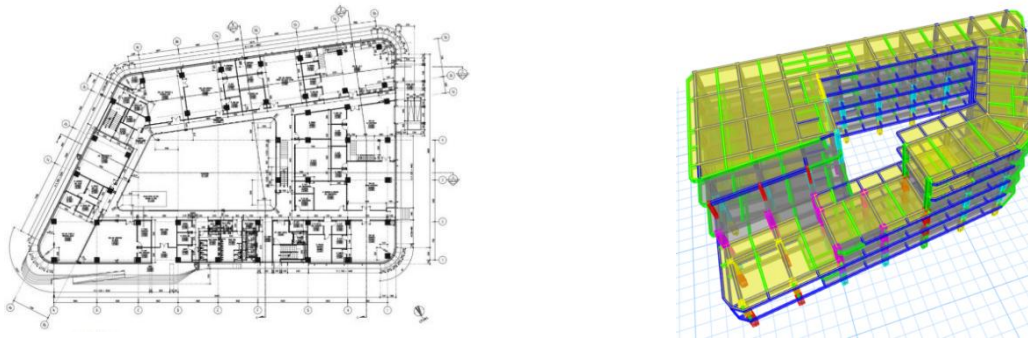
Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik untuk mengevaluasi kerapuhan seismik bangunan beton bertulang melalui analisis statik nonlinier (*pushover analysis*) dan Metode HAZUS. Analisis *pushover* digunakan untuk memperoleh kurva kapasitas struktur, mengidentifikasi titik kinerja (*performance point*), serta mengevaluasi respons inelastik bangunan akibat pembebanan lateral bertahap. Selanjutnya, parameter respons pada *performance point*, berupa percepatan spektral dan perpindahan spektral, diolah menggunakan Metode HAZUS untuk menghasilkan kurva kerapuhan seismik. Kurva tersebut merepresentasikan probabilitas bangunan mencapai berbagai tingkat kerusakan, yaitu ringan (*slight*), sedang (*moderate*), berat (*extensive*), dan sangat berat (*complete*). Dengan demikian, metode ini tidak hanya menggambarkan kapasitas global struktur, tetapi juga memberikan estimasi probabilistik terhadap potensi kerusakan bangunan akibat gempa. Secara garis besar, alur desain penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Sedangkan langkah-langkah spesifik penetapan tingkat kerusakan struktur bangunan dibahas pada subbab 2.5.



Gambar 2. Alur Desain Penelitian
Sumber: Maningding & Baldo (2024)

2.2 Data Umum dan Pemodelan

Gedung Fakultas Teknik UNJANI yang dimodelkan secara tiga dimensi menggunakan perangkat lunak (Gambar 3b) merupakan gedung pendidikan yang masuk kategori gedung beraturan dan terdiri atas lima lantai struktur beton bertulang. Denah gedung seperti yang terlihat dalam Gambar 3a diperoleh dari *shop drawing* PT. Wijaya Karya yang telah berstatus *approved* pada tanggal 8 Agustus 2024 (PT. Wijaya Karya, 2024). Tinggi lantai pertama 4,5 m, sedangkan tinggi lantai dua sampai lantai lima masing-masing 4,1 m. Atap gedung berupa dak beton. Elemen struktur berupa pelat lantai, balok, dan kolom, hingga fondasi *bored pile* menggunakan mutu beton 30 MPa. Sedangkan untuk mutu tulangan bajanya adalah 420 MPa untuk tulangan utama dan 280 MPa untuk tulangan sengkang.



(a) Denah Eksisting
Sumber: Diadaptasi dari *shop drawing* PT.
Wijaya Karya (*approved* 2024)

(b) Pemodelan Gedung

Gambar 3. Gedung Fakultas Teknik UNJANI

2.3 Acuan Standar Peraturan

Adapun peraturan yang digunakan sebagai acuan adalah sebagai berikut:

1. SNI 2052:2017 – Baja Tulangan untuk Beton (Badan Standardisasi Nasional, 2017).
2. SNI 1726:2019 – Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (Badan Standardisasi Nasional, 2019a).
3. SNI 1727:2020 – Tata Cara Perencanaan Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (Badan Standardisasi Nasional, 2020).
4. SNI 2847:2019 – Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung (Badan Standardisasi Nasional, 2019b).
5. ASCE 41-17 – *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (American Society of Civil Engineers & Structural Engineering Institute, 2017).
6. ATC 40 – *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (California Seismic Safety Commission, 1996).
7. FEMA 440 – *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (Federal Emergency Management Agency, 2005).
8. SNI 9273:2025 – Evaluasi dan Rehabilitasi Seismik Bangunan (Badan Standardisasi Nasional, 2025).
9. HAZUS 5.1 – *HAZUS Earthquake Model User Guidance* (Federal Emergency Management Agency, 2022).
10. HAZUS 6.1 – *HAZUS Earthquake Model Technical Manual* (Federal Emergency Management Agency, 2024).

2.4 Analisis Statik Nonlinier (*Pushover*)

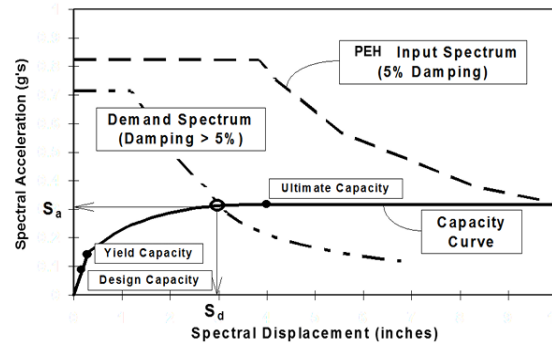
Analisis statik nonlinier (*pushover*) dilakukan untuk menilai kapasitas seismik bangunan dengan menerapkan beban lateral secara bertahap sampai struktur menunjukkan kondisi inelastik yang cukup besar. Gaya dorong lateral diterapkan untuk mensimulasikan efek gempa. Seiring bertambahnya beban lateral, struktur mengalami pelelehan bertahap pada elemen-elemen tertentu yang ditandai dengan terbentuknya sendi plastis. Kuria & Kegyes-Brassai (2024) menyebutkan bahwa analisis statik nonlinier (*pushover*) dapat menjadi alternatif yang lebih sederhana untuk memprediksi kekuatan lateral dan deformasi inelastik.

Hasil utama dari analisis *pushover* ini berupa kurva kapasitas yang merepresentasikan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*, V) dan perpindahan (*displacement*, D) (Hasyim, 2025). Kurva ini menggambarkan kapasitas global struktur terhadap beban gempa, digunakan untuk mengidentifikasi titik perpindahan leleh (*yield displacement*, d_y) dan perpindahan ultimit (*ultimate displacement*, d_u) di mana titik ini menjadi nilai acuan untuk menghitung *median spectral displacement* dalam Metode HAZUS nanti. Menurut Kumar & Ghosh (2025), nilai d_y dan d_u dapat diperoleh dari proses bilinearisasi kurva *pushover* berdasarkan ATC-40 dengan metode luas sama (*equal area method*).

Kurva tersebut kemudian ditransformasikan ke dalam bentuk spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) dengan format ADRS, yaitu *Acceleration-Displacement Response Spectrum*, di mana kurva hubungan *base shear* (V) – *displacement* (D) diubah menjadi kurva hubungan antara percepatan spektral (*spectral acceleration*, S_a) dengan perpindahan spektral (*spectral displacement*, S_d). Selanjutnya *capacity spectrum* disatukan dengan kurva *demand spectrum* atau *response spectrum* sehingga perpotongan dari kedua kurva tersebut diperoleh titik kinerja (*performance point*) (Ayuddin & Bindhu, 2023; Poudel dkk., 2025; Maningding & Baldo, 2024). Pada titik ini diperoleh nilai S_a

dan S_d seperti terlihat pada Gambar 4. Transformasi kurva ini diperlukan karena evaluasi kerusakan dalam Metode HAZUS dilakukan berdasarkan parameter spektral, bukan langsung pada hubungan $V-D$.

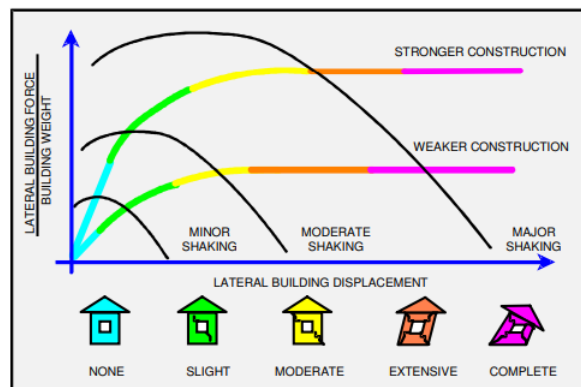
Nilai S_d pada *performance point* digunakan sebagai parameter respons bangunan dalam evaluasi kerapuhan seismik. Oleh karena itu, nilai S_d hasil analisis *pushover* dapat digunakan sebagai dasar pembentukan kurva kerapuhan karena kurva kapasitas dan *performance point* memberikan informasi respons struktur terhadap *demand* gempa, sedangkan Metode HAZUS digunakan untuk menghitung probabilitas kerusakan pada masing-masing *damage state* (Zuher dkk., 2023).



Gambar 4. Kurva Kapasitas Bangunan dan *Demand Spectrum*
Sumber: HAZUS 6.1 Gambar 5-2

2.5 Kurva Kerapuhan Seismik dengan Metode HAZUS

Kurva kerapuhan seismik disusun menggunakan pendekatan HAZUS. Metode ini digunakan untuk memperkirakan probabilitas bangunan mencapai atau melampaui tingkat kerusakan tertentu akibat pengaruh gempa. Dalam metode ini, tingkat kerusakan diklasifikasikan ke dalam lima kategori kerusakan (*damage states*), yaitu *none*, ringan (*slight*), sedang (*moderate*), berat (*extensive*), dan sangat berat (*complete*) (Gambar 5). *Damage states* tersebut digunakan untuk menggambarkan sifat dan tingkat kerusakan fisik komponen bangunan dari kondisi ringan sampai dengan kondisi sangat berat atau mendekati keruntuhan sehingga dapat menjadi dasar dalam estimasi konsekuensi keselamatan jiwa, kerugian ekonomi, serta dampak sosial.



Gambar 5. Hubungan Antara Kondisi Kerusakan Bangunan dengan Kurva Kapasitasnya
Sumber: Duan & Pappin (2008)

Berikut langkah-langkah penetapan tingkat kerusakan struktur bangunan:

- Menentukan tipe bangunan yang ditinjau (Tabel 1).
- Menetapkan ambang kerusakan (*damage states*) untuk kategori *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete* berdasarkan material bangunan (Tabel 2).
- Menentukan level desain seismik (*seismic design level*) berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} (Tabel 3).
- Menentukan parameter kurva kerapuhan struktural berdasarkan level desain seismik (Tabel 4).
- Mengambil nilai titik perpindahan leleh (*yield displacement*, d_y) dan perpindahan ultimit (*ultimate displacement*, d_u) dari kurva hasil analisis *pushover*.
- Menentukan nilai *median spectral displacement* untuk masing-masing *damage states* dengan rumus dari Tabel 5.
- Membuat kurva kerapuhan (*fragility curve*) seismik bangunan. Terlebih dahulu menghitung nilai rata-rata dan standar deviasi dari *median spectral displacement* untuk tiap *damage state*.
- Menghitung probabilitas kerusakan bangunan untuk setiap *damage state*.

Sebelum masuk ke tahap penentuan kerusakan bangunan, HAZUS memberikan pedoman pengklasifikasian struktur bangunan yang ditinjau berdasarkan material bangunan yang digunakan, seperti kayu, baja, beton konvensional, beton pracetak, dinding bata bertulang, dan lainnya (*Federal Emergency Management Agency, 2022*). Untuk klasifikasi struktur bangunan dari material beton dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan untuk *damage states*, HAZUS tidak memberikan definisi eksplisit untuk setiap *damage state* tersebut, tetapi menyediakan deskripsi kerusakan berdasarkan tipe dan material bangunan (Tabel 2).

Tabel 1. Klasifikasi Struktur Bangunan Berdasarkan Material Beton

Tipe	Keterangan	Tinggi			
		Rentang		Tipikal	
		Penamaan	Tingkat	Tingkat	Satuan Feet
C1L	Concrete Moment Frame	Tingkat rendah	1 sd 3	2	20
C1M		Tingkat menengah	4 sd 7	5	50
C1H		Tingkat tinggi	≥ 8	12	120
C2L	Concrete Shear Walls	Tingkat rendah	1 sd 3	2	20
C2M		Tingkat menengah	4 sd 7	5	50
C2H		Tingkat tinggi	≥ 8	12	120
C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Tingkat rendah	1 sd 3	2	20
C3M		Tingkat menengah	4 sd 7	5	50
C3H		Tingkat tinggi	≥ 8	12	120

Sumber: HAZUS 5.1 Tabel 5-7 dan Tabel 5-2

Tabel 2. Tingkat Kerusakan untuk Bangunan Rangka Penahan Momen dari Beton Bertulang (C1)

Tingkat Kerusakan	Deskripsi
<i>Slight</i>	Kerusakan ringan. Terjadi retak rambut lentur atau geser pada beberapa balok dan kolom, terutama di dekat sambungan (<i>joint</i>) atau di dalam sambungan. Kerusakan masih awal dan belum menunjukkan degradasi besar pada elemen utama.
<i>Moderate</i>	Kerusakan sedang. Sebagian besar balok dan kolom menunjukkan retakan rambut/halus. Pada rangka yang daktail, beberapa elemen struktur telah mencapai kapasitas leleh yang ditandai oleh retak lentur yang lebih besar dan beberapa pengelupasan (<i>spalling</i>) beton. Sedangkan pada rangka non-daktail dapat muncul retak geser yang lebih besar dan <i>spalling</i> yang lebih besar.
<i>Extensive</i>	Kerusakan berat. Beberapa elemen rangka telah mencapai kapasitas maksimumnya. Pada rangka daktail, ditunjukkan dengan retakan lentur yang besar, beton terkelupas (<i>spalled concrete</i>), dan tulangan utama yang mulai menekuk. Pada rangka non-daktail, kerusakan dapat berupa kegagalan geser, kegagalan lekatan pada <i>splice</i> tulangan, sengkang yang putus, atau tulangan utama kolom yang tekuk, yang dapat mengarah pada runtuh parsial.
<i>Complete</i>	Kerusakan sangat berat. Struktur telah runtuh atau dalam bahaya keruntuhan yang akan segera terjadi karena kegagalan getas elemen rangka non-daktail atau hilangnya stabilitas rangka. Diperkirakan sekitar 13% (bangunan rendah), 10% (bangunan menengah) atau 5% (bangunan tinggi) dari total luas bangunan C1.

Sumber: HAZUS 6.1 Sub Bab 5.3.3.1 Halaman 5-16 (FEMA, 2024)

Berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang telah diperoleh, level seismisitas gedung dapat ditentukan sesuai dengan (Tabel 3). Untuk parameter-parameter awal yang akan digunakan dalam analisis pada kurva kerapuhan seismik terdapat dalam Tabel 4.

Tabel 3. Definisi Level Seismisitas

Level Seismisitas	S_{DS}	S_{D1}
Sangat Rendah	$< 0,167 \text{ g}$	$< 0,067 \text{ g}$
Rendah	$\geq 0,167 \text{ g}$	$\geq 0,067 \text{ g}$
	$< 0,33 \text{ g}$	$< 0,133 \text{ g}$
Sedang	$\geq 0,33 \text{ g}$	$\geq 0,133 \text{ g}$
	$< 0,50 \text{ g}$	$< 0,20 \text{ g}$
Tinggi	$\geq 0,50 \text{ g}$	$\geq 0,20 \text{ g}$

Sumber: SNI 9273-2025 Tabel 2-4

Tabel 4. Parameter Kurva Kerapuhan Struktural - Tingkat Desain Seismik Tinggi

Building Properties			Spectral Displacement (inches)							
Type	Height (inches)		Slight		Moderate		Extensive		Complete	
	Roof	Modal	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta	Median	Beta
C1M	600	450	1,5	0,68	3	0,67	9	0,68	24	0,81

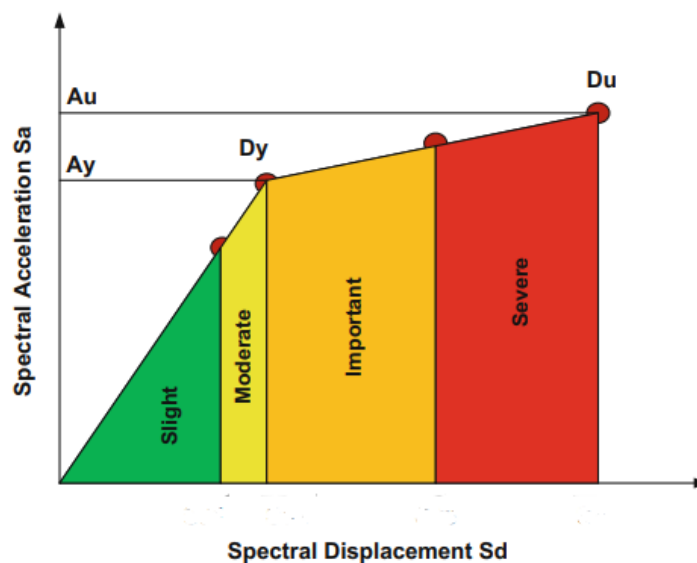
Sumber: HAZUS 6.1 Tabel 5.19

Median spectral displacement untuk tiap *damage state* ditetapkan dengan mengacu pada formulasi yang umum digunakan pada studi-studi berbasis HAZUS (Tabel 5), di mana d_y adalah perpindahan di titik leleh (*displacement yield*) dan d_u adalah perpindahan di titik ultimit (*displacement ultimate*), seperti pada Gambar 6. Sebagaimana dijelaskan Baylon dkk. (2022), dalam pendekatan *fragility* yang berbasis *pushover*, nilai d_y dan d_u hasil dari kurva *pushover* dapat digunakan untuk menetapkan ambang kerusakan (*damage states*), kemudian *performance point* dievaluasi terhadap *damage states* tersebut untuk memperoleh kondisi kerusakan bangunan. Menurut Kohns dkk. (2022), dalam membuat kurva kerapuhan, penentuan *damage states* menjadi langkah penting karena nilai ambang tersebut menjadi dasar untuk menghitung probabilitas terlampaunya suatu tingkat kerusakan terhadap parameter intensitas gempa.

Tabel 5. Nilai Median Spectral Displacement Pada Setiap Damage State

Median Spectral Displacement (S_d , inchi)			
Slight	Moderate	Extensive	Complete
$0,7 d_y$	d_y	$d_y + 0,25 (d_u - d_y)$	d_u

Sumber: Sáenz & Santana (2023); Remki & Kehila (2018)



Gambar 6. Nilai Median Spectral Displacement

Sumber: Remki & Kehila (2018)

Setelah median spectral displacement diperoleh, langkah berikutnya adalah membuat kurva kerapuhan (*fragility curve*). *Fragility curve* dinyatakan sebagai fungsi distribusi lognormal kumulatif yang menghubungkan antara spectral displacement dengan probabilitas bangunan yang mencapai atau melampaui *damage state* tertentu. Rumus yang digunakan adalah seperti Persamaan 1 (*Federal Emergency Management Agency*, 2024, Persamaan 5-2).

$$P[d_s/S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \quad (1)$$

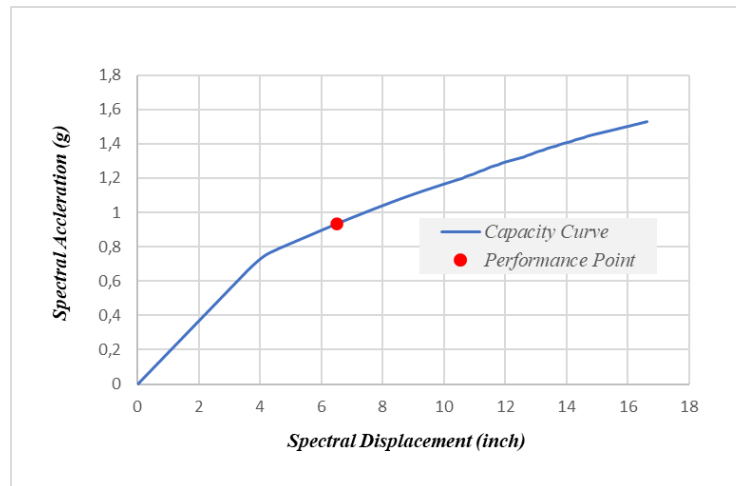
Nilai β_{ds} diperoleh dari Tabel 4. Nilai S_d diambil dari hasil analisis *pushover*, yaitu kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara percepatan spektral (*spectral acceleration*, S_a) dan perpindahan spektral (*spectral displacement*, S_d), lalu dibandingkan dengan nilai median spectral displacement untuk masing-masing *damage states* $S_{d,ds}$. Kurva kerapuhan yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menilai kecenderungan dominan tingkat kerusakan bangunan, sekaligus menjadi dasar dalam menginterpretasikan tingkat kerapuhan seismik struktur yang diteliti.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Analisis *Pushover*

Tahap awal analisis adalah mengetahui klasifikasi situs tanah gedung dengan cara menggunakan data hasil uji lapangan berupa nilai *Standard Penetration Test* (NSPT). Terdapat tiga titik data NSPT yang dianalisis, ketiganya menghasilkan klasifikasi situs tanah SD. Gedung terletak pada lintang -6,886719983915006 dan bujur 107,52817153930664. Berdasarkan Aplikasi Respon Spektra Indonesia (Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN) & PPMB-ITB, n.d.) diperoleh nilai percepatan spektral periode pendek 0,2 detik (S_s) sebesar 1,2659 g dan percepatan spektral pada periode 1 detik (S_1) sebesar 0,5372 g. Kemudian dari SNI 1726-2019, diperoleh nilai faktor amplifikasi untuk periode pendek 0,2 detik (F_a) sebesar 1,0 dan untuk periode 1 detik (F_v) sebesar 1,7372. Sehingga diperoleh nilai $S_{DS} = 0,844$ g dan $S_{D1} = 0,622$ g.

Selanjutnya dari kurva spektrum kapasitas dan kurva *demand spectrum* hasil analisis *pushover* seperti pada Gambar 4, terdapat hubungan antara *Spectral Acceleration* (S_a) dengan *Spectral Displacement* (S_d) serta dapat diperoleh nilai *performance point*-nya, baik untuk arah X (Gambar 7) maupun arah Y seperti pada Tabel 6. Selain itu dapat diperoleh juga nilai *yield displacement* (d_y) dan *ultimate displacement* (d_u) seperti yang tertera pada Tabel 7. Level kinerja hasil analisis *pushover* adalah *Immediate Occupancy* (IO), yang menunjukkan bahwa bangunan hanya mengalami kerusakan ringan dan masih aman untuk digunakan.



Gambar 7. Kurva Kapasitas dan *Performance Point* Arah X

Tabel 6. Nilai *Performance Point* dari Hasil Analisis *Pushover*

Arah <i>Pushover</i>	Base Shear V (kN)	Displacement D (inchi)	Spectral Acceleration S_a (g)	Spectral Displacement S_d (inchi)
X	69.435,45	9,02	0,9336	6,4941
Y	68.051,66	8,99	0,9328	6,6265

Tabel 7. Nilai *Yield Displacement* (d_y) dan *Ultimate Displacement* (d_u) dari Hasil Analisis *Pushover*

Arah	Displacement (inchi)	
	d_y	d_u
X	4,0673	16,6310
Y	3,7610	16,2564

3.2 Membuat Kurva Kerapuhan (*Fragility Curve*)

Berdasarkan Tabel 1, bangunan Gedung Fakultas Teknik UNJANI mempunyai 5 lantai sehingga dikategorikan tipe C1M. Level seismisitas gedung dapat ditentukan dari nilai S_{DS} dan S_{D1} , maka dari Tabel 3 diperoleh kategori level seismisitas gedung termasuk tinggi. Oleh karena itu parameter kurva kerapuhan struktural yang dipakai adalah Level Desain Seismik Tinggi seperti pada Tabel 4. Maka, berdasarkan Tabel 5 dan Tabel 7 diperoleh Tabel 8.

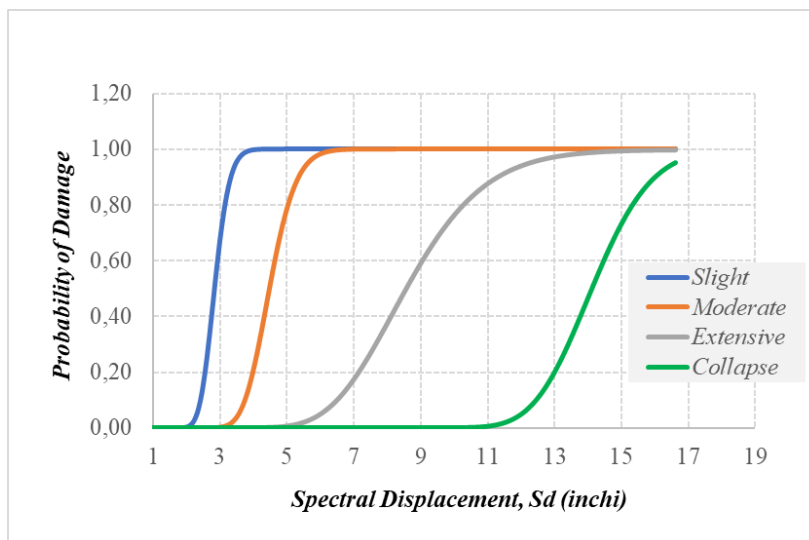
Tabel 8. Nilai *Median Spectral Displacement* untuk Masing-masing *Damage States*

Arah	Median Spectral Displacement ($\bar{S}_{d,ds}$, inchi)			
	<i>Slight</i>	<i>Moderate</i>	<i>Extensive</i>	<i>Complete</i>
X	2,8471	4,0673	7,2082	16,6310
Y	2,6327	3,7610	6,8848	16,2564

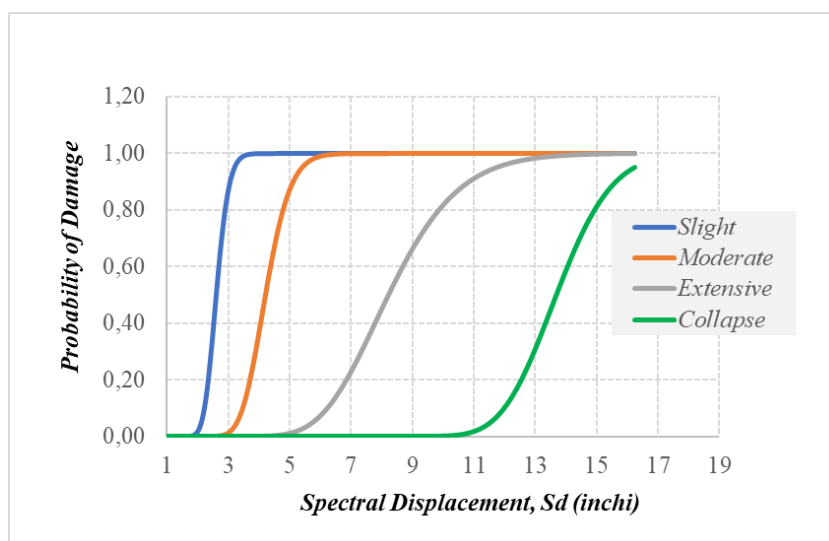
Kemudian berdasarkan Persamaan 1, nilai β_{ds} diperoleh dari Tabel 4, nilai S_d diambil dari nilai *performance point* (Tabel 6), lalu nilai $\bar{S}_{d,ds}$ diambil dari Tabel 8. Untuk menghasilkan fungsi distribusi kumulatif normal standar (Φ) pada masing-masing *damage state*, maka terlebih dahulu dihitung nilai rata-rata dan standar deviasi untuk setiap *damage state* (Tabel 9). Nilai rata-rata dari rentang fungsi Φ untuk setiap *damage state* berpatokan pada nilai $\bar{S}_{d,ds}$. Prosedur ini dilakukan juga terhadap arah gempa Y. Hasil akhir berupa kurva probabilitas kerapuhan seismik bangunan yang diperoleh dari fungsi distribusi kumulatif normal standar Φ (Gambar 8 dan Gambar 9).

Tabel 9. Nilai Rata-rata dan Standar Deviasi dari *Median Spectral Displacement* untuk Setiap *Damage State*

Arah	Parameter	Damage States				Sumber
		<i>Slight</i>	<i>Moderate</i>	<i>Extensive</i>	<i>Complete</i>	
	β_{ds}	0,68	0,67	0,68	0,81	Tabel 4
X	$\bar{S}_{d,ds}$ (inchi)	2,8471	4,0673	7,2082	16,6310	Tabel 8
	Rata-rata	-0,0037	0,1454	0,2551	-0,2013	
	Standar Deviasi	0,1830	0,2075	0,3161	0,1208	
Y	$\bar{S}_{d,ds}$ (inchi)	2,6327	3,7610	6,8848	16,2564	Tabel 8
	Rata-rata	-0,0190	0,1668	0,2609	-0,2116	
	Standar Deviasi	0,1842	0,2262	0,3189	0,1276	



Gambar 8. Kurva Kerapuhan (*Fragility Curve*) Gedung Arah X



Gambar 9. Kurva Kerapuhan (*Fragility Curve*) Gedung Arah Y

3.3 Probabilitas Kerusakan

Sebelum menghitung probabilitas kerusakan, diperlukan data-data seperti **Tabel 10**. Untuk nilai $\bar{S}_{d,ds}$ diambil dari nilai S_d kurva kapasitas hasil analisis *pushover* (hubungan $S_a - S_d$) yang nilainya mendekati nilai $\bar{S}_{d,ds}$ pada **Tabel 8**.

Kemudian data β_{ds} , S_d , dan $\bar{S}_{d,ds}$ pada **Tabel 10** dimasukkan ke **Persamaan 1**, diperoleh nilai fungsi distribusi kumulatif normal standar (Φ) seperti yang tertera dalam **Tabel 10**. Nilai fungsi (Φ) yang diperoleh diinterpolasikan sehingga diperoleh nilai probabilitas kerusakan seperti **Tabel 11** dan **Gambar 10**.

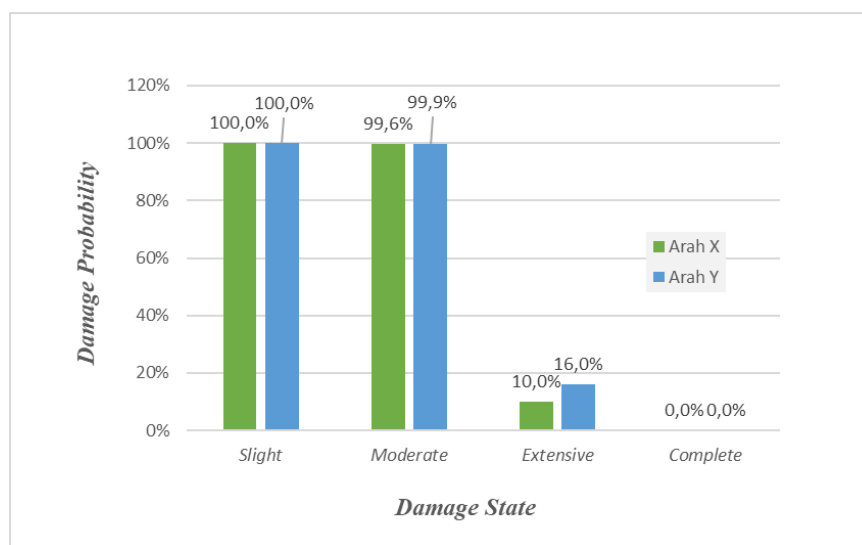
Tabel 10. Parameter Perhitungan Probabilitas Kerusakan

Arah	Parameter	Damage States				Sumber
		Slight	Moderate	Extensive	Complete	
	β_{ds}	0,68	0,67	0,68	0,81	Tabel 9
X	S_d (inchi)	6,49	6,49	6,49	6,49	Tabel 6
	$\bar{S}_{d,ds}$ (inchi)	2,8614	4,0673	7,1950	16,6310	
	Fungsi (Φ)	1,2053	0,6984	-0,1507	-1,1610	Persamaan 1
Y	S_d (inchi)	6,63	6,63	6,63	6,63	Tabel 6
	$\bar{S}_{d,ds}$ (inchi)	2,6187	3,7610	6,8862	16,2564	
	Fungsi (Φ)	1,3653	0,8454	-0,0565	-1,1079	Persamaan 1

Tabel 11. Probabilitas Kerusakan Gedung

Arah	Probabilitas	Damage States			
	P	Slight	Moderate	Extensive	Complete
X	Hasil interpolasi	1,00	0,9961	0,0996	0,00
	(%)	100%	99,6%	10,0%	0,0%
Y	Hasil interpolasi	1,00	0,9986	0,1598	0,00
	(%)	100%	99,9%	16,0%	0,0%

Jika dilihat dari Tabel 8 maupun Tabel 9, nilai *median spectral displacement* ($\bar{S}_{d,ds}$) arah Y untuk semua *damage states* relatif lebih kecil dibandingkan nilai arah X. Ini menunjukkan bahwa arah Y sedikit lebih rentan dibandingkan arah X, sebagaimana terkonfirmasi probabilitas kerusakan bangunan pada Gambar 10.



Gambar 10. Probabilitas Kerusakan Bangunan Arah X dan Y

Hasil analisis menunjukkan bahwa arah X memiliki probabilitas kerusakan ringan (*slight*) sebesar 100%, kerusakan sedang (*moderate*) sebesar 99,6%, kerusakan berat (*extensive*) sebesar 10,0%, dan kerusakan sangat berat (*complete*) sebesar 0,0%. Sementara itu, arah Y memiliki probabilitas *slight* sebesar 100%, *moderate* sebesar 99,9%, *extensive* sebesar 16,0%, dan *complete* sebesar 0,0%. Perbandingan kedua arah menunjukkan bahwa arah Y lebih kritis karena memiliki probabilitas *extensive* yang lebih tinggi dibandingkan arah X. Kondisi ini sejalan dengan nilai S_d pada *performance point* arah Y sebesar 6,63 inchi yang sedikit lebih besar dibandingkan arah X sebesar 6,49 inchi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.

Dengan demikian, pada kondisi gempa yang dianalisis, bangunan memiliki probabilitas yang sangat tinggi untuk mencapai tingkat kerusakan ringan dan sedang seperti tertera pada Tabel 2. Selain itu, probabilitas kerusakan sangat berat (*complete*) sebesar 0,0% pada kedua arah menunjukkan bahwa tidak terindikasi adanya potensi keruntuhan. Kondisi ini sejalan dengan hasil analisis pushover yang menunjukkan bahwa kinerja struktur pada arah X maupun arah Y berada pada level *Immediate Occupancy* (IO), di mana struktur masih dapat mempertahankan fungsi struktural utamanya setelah gempa, karena kerusakan yang terjadi umumnya bersifat ringan dan tidak menyebabkan kehilangan stabilitas global bangunan.

Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi kerapuhan seismik Gedung Fakultas Teknik yang dibangun sekitar tahun 2024 sebagai bagian dari proyek revitalisasi *New UNJANI* melalui integrasi analisis statik nonlinier *pushover* dan Metode HAZUS dengan tahapan: analisis statik nonlinier *pushover* untuk memperoleh kurva kapasitas, penentuan *performance point* pada domain spektral, serta penyusunan kurva kerapuhan menggunakan Metode HAZUS. Gedung terklasifikasi sebagai tipe C1M dengan level seismisitas tinggi ($S_{DS} = 0,844$ g dan $S_{D1} = 0,622$ g), dan pemodelan tiga dimensi dilakukan pada gedung pendidikan lima lantai berbahan beton bertulang dengan mutu beton 30 MPa dan mutu tulangan 420 MPa.

Hasil analisis *pushover* menunjukkan bahwa kinerja struktur pada kedua arah berada pada level *Immediate Occupancy*, dengan nilai *spectral displacement* pada *performance point* sebesar 6,49 inchi (arah X) dan 6,63 inchi (arah Y). Kurva kerapuhan yang dihasilkan melalui Metode HAZUS menunjukkan bahwa probabilitas kerusakan dominan berada pada kategori *slight* (100%) dan *moderate* (99,6 – 99,9%), sedangkan probabilitas *extensive* relatif rendah (10,0% arah X; 16,0% arah Y), dan probabilitas *complete* bernilai 0,0% pada kedua arah. Hal ini mengonfirmasi bahwa tidak terdapat indikasi potensi keruntuhan global pada kondisi gempa rencana. Namun arah Y sedikit lebih rentan dibandingkan arah X, sebagaimana tercermin dari nilai S_a *performance point* dan probabilitas *extensive* yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian mengindikasikan bahwa Gedung Fakultas Teknik memiliki kinerja seismik yang baik, tidak menunjukkan potensi keruntuhan global pada kondisi gempa rencana, sehingga bangunan masih layak difungsikan pascagempa dengan pemantauan berkala terhadap elemen struktur yang berpotensi mengalami kerusakan ringan hingga sedang. Pendekatan integrasi *pushover*–HAZUS dapat memberikan estimasi probabilistik yang terstruktur dan informatif sebagai dasar evaluasi kerapuhan seismik bangunan pendidikan beton bertulang bertingkat menengah.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan analisis dinamik nonlinier untuk memperkuat validasi hasil. Hasyim (2025) menyebutkan beberapa studi kerapuhan seismik menggunakan analisis riwayat waktu nonlinier yang dikombinasikan dengan pembentukan kurva *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) sebagai dasar pengukuran probabilitas kerusakan bangunan. Selain itu dapat juga mempertimbangkan pengaruh degradasi material, umur bangunan, atau korosi tulangan terhadap kurva kerapuhan (Diamantopoulos dkk., 2024), atau mempertimbangkan pengaruh interaksi tanah-struktur, karena studi berbasis HAZUS menunjukkan bahwa pemodelan *Soil-Structure Interaction* (SSI) dapat memengaruhi nilai *spectral displacement* pada *performance point* dan probabilitas kerusakan pada setiap tingkat kerusakan struktur (Janous dkk., 2024).

Daftar Notasi

D	= Perpindahan (<i>displacement</i>)
d_u	= Perpindahan ultimit (<i>ultimate displacement</i>)
d_y	= Perpindahan leleh (<i>yield displacement</i>)
F_a	= Faktor amplifikasi getaran gempa untuk periode pendek 0,2 detik
F_v	= Faktor amplifikasi getaran gempa untuk periode 1 detik
$P[d_s/S_a]$	= Probabilitas bangunan mencapai atau melampaui <i>damage state</i> tertentu
S_a	= Percepatan spektral (<i>spectral acceleration</i>)
S_d	= Perpindahan spektral (<i>spectral displacement</i>)
$\bar{S}_{d,ds}$	= Nilai median perpindahan spektral untuk ambang batas (<i>damage state</i>) yang ditinjau, di mana bangunan mencapai ambang batas tertentu dari tingkat kerusakan d_s
S_{DS}	= Parameter percepatan respons spektral desain pada periode pendek 0,2 detik
S_{D1}	= Parameter percepatan respons spektral desain pada periode pendek 1 detik
S_s	= Nilai percepatan spektral pada periode pendek 0,2 detik
S_1	= Nilai percepatan spektral pada periode 1 detik
V	= Gaya geser dasar (<i>base shear</i>)
Φ	= Fungsi distribusi kumulatif normal standar
β_{ds}	= Deviasi standar dari logaritma natural perpindahan spektral untuk tingkat kerusakan d_s

Daftar Pustaka

- American Society of Civil Engineers, & Structural Engineering Institute. (2017). *ASCE/SEI 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. <https://doi.org/10.1061/9780784416112.in>
- Ayuddin, & Bindhu, K. R. (2023). Application of Capacity Spectrum Method (CSM) for Non-Symmetrical Reinforced Concrete High-Rise Buildings As A Tool for Seismic Design. *Sinergi (Indonesia)*, 27(3), 405–414. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2023.3.011>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 2052-2017 Baja Tulangan Beton*. www.bsn.go.id

- Badan Standardisasi Nasional. (2019a). *SNI 1726-2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung & Non Gedung*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019b). *SNI 2847-2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727-2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2025). *SNI 9273-2025 Evaluasi dan Rehabilitasi Seismik Bangunan*.
- Baylon, M. B., Sevilla, M. P. E., Cutora, M. D., Villa, R. S. M., Reynes, P. P. M., & Montemayor, J. V. M. (2022). Development of Fragility Curves for Seismic Vulnerability Assessment: The Case of Philippine General Hospital Spine Building. *International Research Journal of Science, Technology, Education, and Management*, 2(4), 1–11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7559408>
- California Seismic Safety Commission. (1996). ATC 40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. In *IEE Colloquium (Digest)* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1049/ic:19990660>
- Diamantopoulos, S., Achmet, Z., Stefanidou, S., Markogiannaki, O., & Fragiadakis, M. (2024). Seismic Fragility Curves of RC Buildings Subjected to Aging. *GeoHazards*, 5(1), 192–208. <https://doi.org/10.3390/geohazards5010010>
- Duan, X., & Pappin, J. W. (2008). *A Procedure For Establishing Fragility Functions For Seismic Loss Estimate of Existing Buildings Based on Nonlinear Pushover Analysis*.
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*.
- Federal Emergency Management Agency. (2022). Hazus Earthquake Model User Guidance (HAZUS 5.1). In *Federal Emergency Management Agency* (Nomor April).
- Federal Emergency Management Agency. (2024). *HAZUS Earthquake Model Technical Manual (HAZUS 6.1)* (Nomor July).
- Frans, R., Kalangi, H. T., & Goretti, H. A. (2021). Analisis Kerapuhan Seismik Struktur Beton Bertulang. *JUTEKS : Jurnal Teknik Sipil*, 6(1), 17. <https://doi.org/10.32511/juteks.v6i1.719>
- Hasyim, W. (2025). Analisis Kerapuhan Seismik Struktur Gedung Tak Beraturan Dengan Analisis Pushover. *Jurnal "MITSU" Media Informasi Teknik Sipil UNIJA*, 13(1), 119–130. <https://doi.org/10.24929/ft.v13i1.3741>
- Janous, S. El, Abid, M. A., Afras, A., & Ghoulbzouri, A. El. (2024). Soil-Structure Interaction Influence on the Seismic Performance of Buildings. *Civil Engineering and Architecture*, 12(2), 798–813. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120210>
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2024). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2024*.
- Kohns, J., Stempniewski, L., & Stark, A. (2022). Fragility Functions for Reinforced Concrete Structures Based on Multiscale Approach for Earthquake Damage Criteria. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/buildings12081253>
- Kumar, A., & Ghosh, G. (2025). Assessment of Soil Amplification Effects on The Seismic Vulnerability of Irregular Reinforced Concrete Buildings of Varying Heights. In *Scientific Reports* (Vol. 15, Nomor 1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14145-2>
- Kuria, K. K., & Kegyes-Brassai, O. K. (2024). Pushover Analysis in Seismic Engineering: A Detailed Chronology and Review of Techniques for Structural Assessment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/app14010151>
- Maningding, R. A. D., & Baldo, J. N. S. (2024). Fragility Analysis of Pangasinan State University Urdaneta City Campus Buildings. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 20, 789–809. <https://doi.org/10.37394/232015.2024.20.75>
- Muntafi, Y., Faraodi, R., & Asroni, A. (2018). *Damage and Loss Probability Assessment of Reinforced Concrete Building Due To Yogyakarta Earthquake Scenario Using Pushover and HAZUS Analysis (Case Study : Student Center Building, Faculty of Social Science , UNY)*. 02014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/mateconf/201822902014>
- Narwastu, A., Sangadji, S., Devi, R. H., & Safarizki, H. A. (2024). Analisis Kerapuhan Struktur Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan dengan Static Adaptive Pushover. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(1), 89–96. <https://doi.org/10.22225/pd.13.1.7655.89-96>
- Nurhidayatullah, E. F., & Kurniati, D. (2021). Potensi Kerusakan Bangunan Bertingkat Sedang Dengan Skenario Gempa Lebih Besar Sama Dengan 5 SR Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Di Yogyakarta. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 125–139. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i1.409>
- Paudel, S., Maulana, T. I., & Prayuda, H. (2024). *Seismic Vulnerability Assessment of Regular and Vertically Irregular Residential Buildings in Nepal*. 10(May), 199–208. <https://doi.org/10.22146/jcef.10316>
- Poudel, J., Khatiwada, P., & Adhikari, S. (2025). Seismic Performance Evaluation of Low-Rise Reinforced Concrete Framed Buildings with Ready-to-Use Guidelines (RUD-NBC 205:2024) in Nepal. *CivilEng*, 6(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/civileng6030050>
- PT. Wijaya Karya. (2024). *Shop Drawing Gedung Fakultas Teknik New UNJANI*.

- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), & PPMB-ITB. (n.d.). *Aplikasi Respon Spektra*. Puslitbang Perumahan dan Permukiman. Diambil <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>
- Remki, M., & Kehila, F. (2018). Analytically Derived Fragility Curves and Damage Assessment of Masonry Buildings. *Sustainable Civil Infrastructures*, 42–54. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61914-9_4
- Rifki, M., & Teguh, M. (2019). Evaluasi Kerapuhan Seismik pada Struktur Gedung Kuliah Twin Building UMY Menurut SNI 1726-2012. *Prosiding Kolokium Program Studi Teknik Sipil (KPSTS) FTSP UII 2019*, 52–104. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/13988?show=full>
- Sáenz, U., & Santana, R. (2023). *Seismic Vulnerability in Essential Buildings Through Analytical Fragility Curves*. 38, 319–333. <https://doi.org/10.7764/RIC.00072.21>
- Sumedi, P. P., & Mulyandari, R. (2025). Kurva Kerapuhan Seismik Pada Struktur Rangka Baja Berbasis Pushover. *Jurnal Rekayasa Teknologi Nusa Putra*, 11(2), 93–102. <https://doi.org/10.52005/rekayasa.v11i2.654>
- Zuher, M. H., Nasution, A. P., Sidiq, Z. N., Masrilayanti, M., & Tanjung, J. (2023). Fragility Assesment of Mid-Rise RC Building using HAZUS Method in High Seismic Zone. *Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain*, 1(2), 79–89. <https://doi.org/10.25077/jbk.d.1.2.79-89.2023>

Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Agregat Halus Cimalaka (Sumedang) dan Agregat Halus Merapi (Klaten)

Riyandi, dan Tira Roesdiana

Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Swadaya Gunung Jati, Cirebon, Indonesia

rdi930347@gmail.com, tira.roesdiana@gmail.com

Abstrak

Beton menjadi pilihan utama dalam proyek konstruksi karena ketersediaan material penyusunnya dan kapasitas tekan yang tinggi. Meski demikian, tingkat mutu beton tidak terlepas dari pengaruh sifat fisis agregat halus yang digunakan. Penelitian ini bertujuan membandingkan pengaruh pasir Cimalaka (Sumedang) dan pasir Merapi (Klaten) terhadap kekuatan tekan beton normal dengan target mutu 25 MPa. Prosedur penelitian dilakukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), dimulai dari pengujian karakteristik agregat halus yang meliputi analisis gradasi, berat jenis, kadar lumpur, dan kadar organik, kemudian dilanjutkan dengan perencanaan campuran beton, uji *slump*, serta pengujian kuat tekan. Pengujian menggunakan spesimen silinder berukuran 15×30 cm sebanyak 24 sampel, dengan masing-masing variasi agregat halus terdiri atas 12 spesimen. Pengamatan kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil olah data mengindikasikan bahwa pasir Merapi menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan pasir Cimalaka pada seluruh umur pengujian. Pada umur 28 hari, beton dengan pasir Merapi mencapai 28,97 MPa, sedangkan beton dengan pasir Cimalaka mencapai 25,57 MPa. Meskipun menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah, pasir Cimalaka tetap layak digunakan sebagai agregat halus karena masih memenuhi target mutu beton normal sebesar 25 MPa.

Kata kunci: beton normal, kuat tekan, pasir Cimalaka, pasir Merapi, material lokal

Abstract

Concrete has become the primary choice in construction projects due to the availability of its constituent materials and its high compressive strength capacity. Nevertheless, concrete quality is strongly influenced by the physical properties of the fine aggregate used. This study aims to compare the effect of Cimalaka sand (Sumedang) and Merapi sand (Klaten) on the compressive strength of normal concrete with a target strength of 25 MPa. The research procedure was conducted based on the Indonesian National Standards (SNI), including tests on fine aggregate characteristics, concrete mix design, slump testing, and compressive strength testing. The study used 24 cylindrical specimens measuring 15×30 cm, with each fine aggregate variation consisting of 12 specimens. Compressive strength observations were carried out at the ages of 7, 14, 21, and 28 days. The results indicated that Merapi sand produced higher compressive strength than Cimalaka sand at all testing ages. At 28 days, concrete using Merapi sand achieved 28.97 MPa, while concrete using Cimalaka sand achieved 25.57 MPa. Although lower in strength, Cimalaka sand remains suitable as fine aggregate because it still meets the target strength requirement of 25 MPa.

Keywords: Cimalaka sand, compressive strength, normal concrete, local materials, Merapi sand

1. Pendahuluan

Sebagai material yang krusial bagi konstruksi masa kini, beton menawarkan fleksibilitas tinggi karena mudah dibentuk dan bersifat adaptif (Pertiwi dkk., 2011; Wawan & Kusdian, 2021). Material ini terbentuk dari perpaduan antara pasta semen dengan agregat kasar maupun halus, air, dan bahan aditif sering kali ditambahkan untuk menyesuaikan karakteristiknya dengan standar teknis yang diinginkan (Pertiwi dkk., 2011). Agregat halus berperan penting dalam mengisi rongga antar agregat kasar sehingga menentukan kepadatan, kekuatan, dan durabilitas beton (Mardoli Guna dkk., 2025; Zulkarnain & Kamil, 2021). Perbedaan karakteristik agregat halus dalam campuran beton mempengaruhi nilai kuat tekan, sehingga pemilihan agregat yang tepat, metode perawatan, dan umur beton yang optimal menjadi faktor penting untuk memperoleh mutu beton yang baik dengan indikator yang dapat ditinjau yaitu gradasi, kebersihan, berat jenis, serta kandungan lumpur (Hermawan, 2018; Ismail dkk., 2017; Paryati dkk., 2024; Zulkarnain & Kamil, 2021).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perbedaan sumber dan karakteristik agregat halus dapat menghasilkan variasi kuat tekan beton, meskipun menggunakan rancangan campuran yang sama (Paryati dkk., 2024; Triana & Subandi, 2023). Polii dkk. (2015) mengungkapkan bahwa kombinasi jenis agregat tertentu dapat meningkatkan kuat tekan beton. Sementara itu, Mardoli Guna dkk. (2025) menemukan bahwa tidak semua agregat lokal dapat mencapai kuat tekan rencana, meskipun berasal dari lokasi yang berbeda.

Info Makalah:

Dikirim : 04-11-26;

Revisi 1 : 05-15-26;

Diterima : 06-02-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : rdi930347@gmail.com

Agregat halus yang bersumber dari material vulkanik, seperti Pasir Merapi, umumnya memiliki mutu yang lebih baik karena mengandung tinggi silika (SiO_2) serta bentuk butirannya yang cenderung bersudut mampu memperkuat daya lekat dengan pasta semen (Choiriyah & Pertiwi, 2016; Nurrosyid dkk.,

2024; Susanti, 2014). Menurut Buwono (2012), pasir hasil erupsi Merapi memiliki karakteristik fisik yang tergolong baik, tetapi tingkat permeabilitas beton pun dipengaruhi oleh kualitas pasta semen, nilai rasio air semen, serta tingkat hidrasi yang terjadi, tidak hanya ditentukan oleh jenis agregat.

Keterkaitan antara sumber agregat dan kekuatan mekanis ini diperkuat oleh studi Pertiwi dkk. (2011), yang membuktikan keunggulan pasir Merapi pada nilai FAS 0,3 dengan kuat tekan 605,184 kg/cm², melampaui hasil pasir Lumajang yang bernilai 566,764 kg/cm² saat memasuki usia 28 hari. Selain itu, fleksibilitas pasir Merapi dalam memproduksi beton mutu tinggi secara konsisten mampu mencapai kekuatan di atas 40 MPa, namun sifat pasir Merapi tidak selalu seragam karena dipengaruhi oleh lokasi sumbernya, terutama terlihat pada gradasi butiran (Lasino & Cahyadi, 2016).

Temuan dari penelitian lain yaitu penggunaan pasir dari Desa Payo menghasilkan kuat tekan karakteristik tertinggi sebesar 266,49 kg/cm² pada umur 28 hari, jika dibandingkan dengan pasir dari Desa Kebur 258,08 kg/cm² dan Desa Gunung Agung 253,15 kg/cm² (Riwayati dkk., 2021). Penelitian serupa oleh Nurokhman dkk. (2023) membuktikan bahwa beton dengan agregat halus dari Pantai Depok memiliki kuat tekan tertinggi senilai 26,99 MPa dibandingkan dengan pasir besi, pasir Merapi, dan pasir Progo. Di sisi lain, Prayuda & Pujianto (2018) meneliti beton dengan pasir Kali Progo, mampu menghasilkan kuat tekan maksimum hingga 78,50 MPa, walaupun agregat Merapi dan Gamalama menunjukkan keunggulan dari segi kemudahan pengerjaan (*workability*).

Agregat halus lain, seperti pasir Cimalaka sebagai salah satu agregat lokal di Jawa Barat menunjukkan keunggulan yang dapat bersaing, meskipun masih memiliki sejumlah keterbatasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pasir ini mampu mencapai kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan pasir tertentu, seperti Bunihayu, namun tidak seunggul pasir Cilopang pada umur 28 hari (Saparingga & Yogaswara, 2023; Triana & Subandi, 2023). Salah satu permasalahan utama yang dihadapi adalah tingginya kandungan lumpur yang dapat mencapai sekitar 9,4%, berpotensi melemahkan ikatan dalam beton apabila tidak dilakukan pengolahan terlebih dahulu (Triana & Subandi, 2023). Di samping itu, gradasi agregat yang tidak memenuhi standar serta adanya kandungan zat organik juga dapat menghambat proses hidrasi semen dan berdampak pada penurunan kuat tekan beton (Paryati dkk., 2024; Riwayati dkk., 2021). Maka, pengendalian karakteristik agregat serta pengaturan rasio air semen menjadi faktor penting dalam menjaga kestabilan mutu beton (Choiriyah & Pertiwi, 2016; Triana & Subandi, 2023).

Berdasarkan hasil kajian literatur, masih terdapat celah penelitian berupa belum banyaknya studi yang secara langsung membandingkan agregat halus vulkanik berkualitas tinggi, seperti pasir Merapi, dengan agregat lokal seperti pasir Cimalaka dalam kondisi desain campuran yang setara. Studi terdahulu umumnya membahas perbandingan agregat berdasarkan perbedaan wilayah, namun belum melakukan analisis mendalam mengenai hubungan antara sifat fisik agregat dan kuat tekan beton secara menyeluruh. Dengan pertimbangan tersebut, penelitian ini perlu dilaksanakan guna menghasilkan temuan yang valid dan reliabel dalam pemahaman terkait pengaruh perbedaan sifat material terhadap kinerja mekanis beton. Urgensi penelitian ini terletak pada upaya mengoptimalkan pemanfaatan material lokal secara efisien tanpa mengabaikan mutu. Lebih lanjut, pemanfaatan pasir lokal seperti pasir Cimalaka memiliki nilai strategis karena berpotensi meningkatkan efisiensi biaya konstruksi melalui pengurangan jarak distribusi material, sekaligus mempermudah ketersediaan agregat untuk wilayah Jawa Barat yang terus mengalami perkembangan pembangunan. Sehingga penggunaan material lokal dapat mendukung pengembangan konstruksi yang ekonomis dan berkelanjutan karena memanfaatkan sumber daya daerah tanpa ketergantungan tinggi terhadap material dari luar wilayah.

2. Metode

Pendekatan eksperimen kuantitatif diterapkan dalam penelitian ini, yang mana dilakukan melalui pengujian di laboratorium untuk mengkomparasi kuat tekan beton dengan agregat halus dari dua sumber, yaitu Cimalaka (Sumedang) dan Merapi (Klaten). Pendekatan ini dipilih agar diperoleh data empiris yang akurat mengenai hubungan antara sifat fisik agregat dan kinerja beton. Penelitian dirancang dalam bentuk studi komparatif, dengan menempatkan variasi jenis agregat halus sebagai variabel independen dan kuat tekan beton sebagai variabel dependen. Sementara itu, variabel kontrol berupa jenis semen, agregat kasar, dan rasio campuran dikendalikan agar tetap sama, mengacu pada mutu rencana f'_c 25 MPa.

Pengujian karakteristik material dilakukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), meliputi analisis karakteristik agregat menurut SNI 1970:1990, pengujian kandungan air berdasarkan SNI 03-1971-1990, kadar lumpur berdasarkan SNI 03-4142-1996, dan kandungan zat organik berdasarkan SNI 03-2816-1992. Pengujian *workability* beton segar dilakukan menggunakan uji *slump* mengacu pada SNI 1972:2008. Spesimen disiapkan dalam konfigurasi silinder untuk keperluan pengujian kuat tekan berukuran 15 × 30 cm sebanyak 24 sampel, dengan masing-masing variasi agregat halus terdiri atas 12 spesimen. Pada setiap umur pengujian, yaitu 7, 14, 21, dan 28 hari. Proses *curing* dilakukan dengan metode perendaman sebelum dilaksanakan pengujian kuat tekan beton berdasarkan SNI 1974:2011. Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif menggunakan nilai rata-rata dan deviasi standar, serta disajikan dalam bentuk tabel dan grafik guna mempermudah interpretasi hasil penelitian.

Variasi spesimen dan komposisi *mix design* sebagaimana disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 1. Jumlah Spesimen

No.	Umur	Jumlah Spesimen	
		Pasir Cimalaka	Pasir Merapi
1	7 hari	3	3
2	14 hari	3	3
3	21 hari	3	3
4	28 hari	3	3
Total		12	12
		24	

Tabel 2. Perencanaan *Mix Design*

Perencanaan <i>Mix Design</i> Beton (SNI 03-2834-2000)				
No.	Uraian	Tabel/Gambar/ Perhitungan	Nilai	
			Merapi	Cimalaka
1	Kuat tekan yang disyaratkan	Ditetapkan	25 MPa	25 MPa
2	Deviasi Standar	-	6,6	6,6
3	Nilai tambah (margin)	-	10,8	10,8
4	Kekuatan rata-rata yang ditargetkan	1+2+3	35,8 MPa	35,8 MPa
5	Jenis semen	Ditetapkan	Tipe 1	Tipe 1
6	Jenis agregat:			
	Halus	Ditetapkan	Alami	Alami
	Kasar	Ditetapkan	Batu Pecah	Batu Pecah
7	Faktor air semen bebas	Tabel , Grafik	0,52	0,52
8	FAS max	Ditetapkan	0,6	0,6
9	<i>Slump</i>	Ditetapkan	60-180 mm	60-180 mm
10	Ukuran agregat maksimum	Ditetapkan	40 mm	40 mm
11	Kadar air bebas	Tabel	185 kg/m ³	185 kg/m ³
12	Kadar semen	Ditetapkan	358,78 kg/m ³	358,78 kg/m ³
13	Kadar semen maksimum	Ditetapkan	358,78 kg/m ³	358,78 kg/m ³
14	Kadar semen minimum	Ditetapkan	-	-
15	Faktor air semen yang disesuaikan	-	358,78 kg/m ³	358,78 kg/m ³
16	Susunan besar butir agregat halus	Gambar	Daerah gradasi zona 2	Daerah gradasi zona 1
17	Susunan agregat kasar atau gabungan	Gambar	Gradasi maksimum 40 mm	Gradasi maksimum 40 mm
18	Persen agregat halus	Gambar	36%	44%
19	Berat jenis agregat (kering permukaan)	-	2,6	2,6
20	Berat isi beton	Gambar	2372 kg/m ³	2372 kg/m ³
21	Kadar agregat gabungan	20-(15+11)	2198,22 kg	1828,22 kg
22	Kadar agregat halus	18 x 21	791,36 kg	804,41 kg
23	Kadar agregat kasar		1406,86 kg	1023,80 kg
24	Proporsi campuran	Tiap m ³		
	Air		185 liter	185 liter
	Semen		385,78 kg	385,78 kg
	Agregat halus		791,36 kg	804,41 kg
	Agregat kasar		1406,86 kg	1023,80 kg
	Proporsi campuran teoritis			
	Air		0,516	0,516
	Semen		1	1
	Agregat halus		2,206	2,269
	Agregat kasar		3,921	3,431
	Campuran untuk trial 1 silinder + 10% (0.00583 m³)			
	Air	Tiap m ³	1,078	1,078
	Semen		2,091	2,091
	Agregat halus		4,613	5,638
	Agregat kasar		8,2	7,175

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini memaparkan hasil pengujian sekaligus pembahasan terhadap temuan yang diperoleh selama pelaksanaan penelitian. Analisis diarahkan pada tiga aspek utama, yaitu karakteristik material, tingkat *workability* campuran, serta kuat tekan beton yang menggunakan pasir Cimalaka dan Merapi. Data yang disajikan tidak hanya diuraikan secara deskriptif, tetapi juga dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi relevansi antara sifat fisik agregat dengan mutu beton yang dihasilkan.

Agar diperoleh hasil analisis yang akurat, pembahasan diselaraskan dengan standar SNI yang berlaku serta didukung oleh teori dan penelitian terdahulu yang relevan. Melalui pendekatan ini, berbagai fenomena yang muncul selama proses pengujian dapat dijelaskan secara lebih sistematis dan komprehensif. Dengan demikian, bagian ini bertujuan memberikan gambaran yang jelas mengenai pengaruh perbedaan sumber agregat halus terhadap sifat mekanis dan kuat tekan beton.

3.1. Karakteristik Material

Kualitas akhir dan kinerja beton sangat bergantung pada sifat dasar material penyusunnya sebagai faktor utama. Karakter fisik dari agregat memberikan pengaruh signifikan terhadap tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*), kekuatan mekanis, hingga ketahanan jangka panjang beton. Evaluasi ini meliputi pengujian secara menyeluruh terhadap berat jenis, kandungan air, kandungan lumpur, keberadaan zat organik, dan gradasi agregat.

a. Berat Jenis

Tabel 3. Perbandingan Berat Jenis Pasir Cimalaka dan Pasir Merapi

Indikator	Pasir Cimalaka	Pasir Merapi
Berat Jenis (<i>Bulk</i>)	2,39	2,43
Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh (SSD)	2,60	2,60
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>)	3,05	2,95
Penyerapan (<i>Absorption</i>)	9,17 %	7,30 %

Berdasarkan prosedur SNI 1970:1990 (Badan Standarisasi Nasional, 1990a), pasir Cimalaka tercatat memiliki berat jenis curah 2,39, nilai *Saturated Surface Dry* (SSD) 2,60, dan berat jenis semu 3,05. Di sisi lain, pasir Merapi menunjukkan angka berat jenis curah yang sedikit lebih tinggi yakni 2,43, nilai SSD yang identik (2,60) dan berat jenis semu sebesar 2,95. Perbedaan mencolok terlihat pada parameter penyerapan air, di mana pasir Cimalaka mencapai 9,17%, jauh melampaui pasir Merapi sebesar 7,30%. Tingginya nilai absorpsi pada material asal Cimalaka ini merepresentasikan tingkat porositas butiran yang lebih besar. Secara teknis, kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan pasir Cimalaka berisiko meningkatkan permintaan air dalam konsistensi campuran beton guna mencapai tingkat kelecakan yang diinginkan.

b. Kandungan air

Tabel 4. Perbandingan Kandungan air Pasir Cimalaka dan Pasir Merapi

Indikator	Pasir Cimalaka	Pasir Merapi
Berat Talam W1	132 gr	126 gr
Berat Talam+Spesimen W2	2234 gr	2235 gr
Berat Spesimen W3	2102 gr	2109 gr
Berat Kering Talam+BendaUji W4	2087 gr	2023 gr
Berat Spesimen Kering W5	1955 gr	1897 gr
Hasil	7,52 %	11,18 %

Penentuan kandungan air dalam agregat dilakukan dengan merujuk pada tata cara SNI 03-1971-1990 (Badan Standarisasi Nasional, 1990) menunjukkan bahwa pasir Merapi memiliki kandungan air sebesar 11,18% yang lebih tinggi dibandingkan pasir Cimalaka sebesar 7,52%, sedangkan agregat kasar Batujajar memiliki kandungan air sebesar 1,01%, sehingga perbedaan kandungan air pada kedua jenis pasir tersebut menjadi faktor penting dalam koreksi kebutuhan air pada tahap perencanaan proporsi campuran beton guna menjaga akurasi komposisi campuran yang telah dirancang.

c. Kadar Lumpur

Tabel 5. Perbandingan Kadar Lumpur Pasir Cimalaka dan Pasir Merapi

Indikator	Pasir Cimalaka	Pasir Merapi
Berat Kering Spesimen+Wadah W1	492 gr	477 gr
Berat Wadah W2	25 gr	25 gr
Berat Kering Spesimen Awal W3	467 gr	452 gr
Berat Kering Spesimen Sesudah Pencucian+Wadah W4	458 gr	456 gr
Berat Kering Spesimen Sesudah Pencucian W5	433 gr	431 gr
Persen Bahan Lolos Saringan No. 200 W6	7,28 %	4,65 %

Penentuan kadar lumpur dalam agregat dilakukan dengan merujuk pada tata cara SNI 03-4142-1996 (Badan Standarisasi Nasional, 1996) menunjukkan bahwa pasir Cimalaka memiliki kandungan lumpur sebesar 7,28% yang melampaui batas maksimum 5%, sedangkan pasir Merapi memiliki kandungan lumpur sebesar 4,65% yang masih memenuhi persyaratan, sehingga kondisi tersebut mengindikasikan bahwa diperlukan proses pencucian terlebih dahulu pada pasir Cimalaka sebelum digunakan dalam campuran beton.

c. Kandungan Zat Organik

Tabel 6. Perbandingan Kandungan Zat Organik Pasir Cimalaka dan Pasir Merapi

Indikator Warna	Penurunan Kekuatan	
	Pasir Cimalaka	Pasir Merapi
Jernih	0%	0%
Kuning Cerah	0%-10%	0%-10%
Kuning Gelap	10%-20%	10%-20%
Kuning Kemerahan	20%-30%	20%-30%
Cokelat Kemerahan	30%-50%	30%-50%
Cokelat Gelap	50%-70%	50%-70%

Pengujian kandungan bahan organik yang mengacu pada tata cara SNI 03-2816-1992 (Badan Standarisasi Nasional, 1992), menunjukkan bahwa warna larutan hasil uji berada dalam rentang yang diperbolehkan dibandingkan dengan standar, sehingga mengindikasikan bahwa kandungan bahan organik pada pasir Cimalaka dan Merapi relatif rendah dan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap proses hidrasi semen maupun terhadap kekuatan beton yang dihasilkan.

3.2. Uji Slump

Tingkat kelecakan atau *workability* pada beton segar diukur menggunakan metode *slump test* menurut SNI 1972:2008 (Badan Standarisasi Nasional, 2008), untuk memantau kemudahan material saat diaduk, didistribusikan, hingga dituangkan ke dalam cetakan. Besaran nilai *slump* ini ditentukan oleh interaksi berbagai variabel teknis, mulai dari rasio air, distribusi ukuran butiran (gradasi), hingga bentuk agregat dan komposisi campuran. Validasi melalui pengujian ini menjadi sangat vital guna menjamin bahwa konsistensi adukan beton telah memenuhi kriteria operasional yang dibutuhkan dalam implementasi konstruksi di lapangan.

Dalam penelitian ini, uji *slump* dilakukan untuk membandingkan tingkat *workability* beton yang menggunakan agregat halus Cimalaka dan Merapi. Hasil pengujian ini digunakan untuk menganalisis pengaruh perbedaan karakteristik agregat halus terhadap kemudahan pengerjaan beton, serta sebagai indikator awal yang dapat berkorelasi dengan kualitas beton yang dihasilkan.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Uji *Slump* Beton dengan Pasir Cimalaka dan Pasir Merapi

No	Tanggal Cor	Tinggi Slump (cm)	
		Pasir Merapi	Pasir Cimalaka
1	21/01/2026	12	10
2	22/01/2026	12	11
3	23/01/2026	11	11
4	26/01/2026	12	10
Rata-Rata		11,75 (12±2)	10,5 (12±2)

Tingkat kelecakan beton segar dievaluasi melalui uji *slump* menggunakan kerucut Abrams. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua variasi campuran menghasilkan nilai *slump* yang masih berada dalam batas yang dipersyaratkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa beton memiliki tingkat kemudahan pengerjaan yang optimal.

3.3. Kuat Tekan Beton

Kinerja atau kekuatan tekan beton menjadi parameter krusial dalam menilai mutu dan kinerja beton, terutama dalam kemampuannya menahan beban tekan pada struktur. Beberapa faktor pengaruh nilai kuat tekan antara lain seperti komposisi campuran, rasio air-semen, proses *curing*, serta karakteristik material penyusun, khususnya agregat halus. Oleh sebab itu, pengujian kuat tekan merupakan tahap krusial untuk memastikan apakah campuran beton yang direncanakan telah memenuhi target kinerja.

Penelitian ini melibatkan pengujian terhadap spesimen berbentuk silinder dengan variasi umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengkomparasi kinerja beton yang menggunakan agregat halus dari Cimalaka dan Merapi. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk melihat perkembangan kuat tekan dari waktu ke waktu, sekaligus mengkaji pengaruh perbedaan karakteristik agregat halus terhadap hasil kekuatan beton.

Tabel 8. Evaluasi Kuat Tekan Beton Berbahan Agregat Halus Pasir Merapi

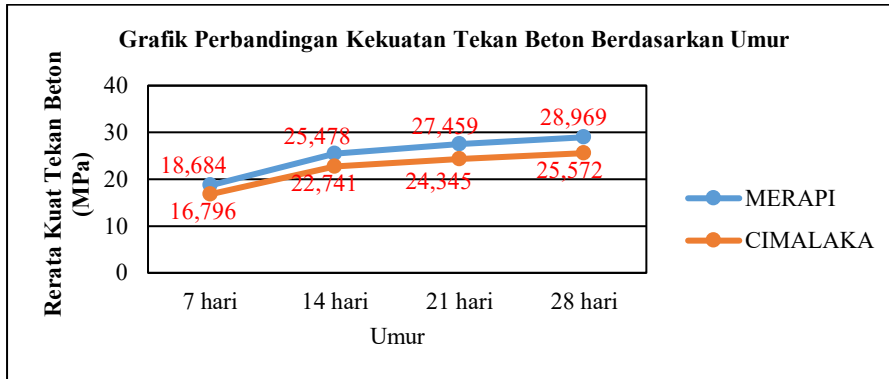
MERAPI										
No	Tanggal		Umur (Hari)	Berat (gr)	Ukuran Spesimen		Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum		Kuat Tekan Beton Pada Umur Uji (MPa)
	Cor	Uji			Diameter (mm)	Tinggi (mm)		(kN)	(N)	
1	26/01/2026	02/02/2026	7	12364	150	300	17662,5	340	340000	19,250
2	26/01/2026	02/02/2026	7	12297	150	300	17662,5	350	350000	19,816
3	26/01/2026	02/02/2026	7	12145	150	300	17662,5	300	300000	16,985
Rata-Rata										18,684
4	23/01/2026	06/02/2026	14	12378	150	300	17662,5	465	465000	26,327
5	23/01/2026	06/02/2026	14	12285	150	300	17662,5	450	450000	25,478
6	23/01/2026	06/02/2026	14	12324	150	300	17662,5	435	435000	24,628
Rata-Rata										25,478
7	21/01/2026	11/02/2026	21	12246	150	300	17662,5	500	500000	28,309
8	22/01/2026	12/02/2026	21	12355	150	300	17662,5	470	470000	26,610
9	22/01/2026	12/02/2026	21	12112	150	300	17662,5	485	485000	27,459
Rata-Rata										27,459
10	21/01/2026	18/02/2026	28	12215	150	300	17662,5	510	510000	28,875
11	21/01/2026	18/02/2026	28	12198	150	300	17662,5	520	520000	29,441
12	21/01/2026	18/02/2026	28	12120	150	300	17662,5	505	505000	28,592
Rata-Rata										28,969

Tabel 9. Evaluasi Kuat Tekan Beton Berbahan Agregat Halus Pasir Cimalaka

CIMALAKA										
No	Tanggal		Umur (Hari)	Berat (gr)	Ukuran Spesimen		Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum		Kuat Tekan Beton Pada Umur Uji (MPa)
	Cor	Uji			Diameter (mm)	Tinggi (mm)		(kN)	(N)	
1	23/01/2026	30/01/2026	7	12228	150	300	17662,5	300	300000	16,985
2	23/01/2026	30/01/2026	7	12347	150	300	17662,5	300	300000	16,985
3	23/01/2026	30/01/2026	7	12334	150	300	17662,5	290	290000	16,419
Rata-Rata										16,796
4	23/01/2026	06/02/2026	14	12327	150	300	17662,5	410	410000	23,213
5	22/01/2026	05/02/2026	14	12395	150	300	17662,5	400	400000	22,647
6	22/01/2026	05/02/2026	14	12230	150	300	17662,5	395	395000	22,364
Rata-Rata										22,741
7	22/01/2026	12/02/2026	21	12242	150	300	17662,5	455	455000	25,761
8	22/01/2026	12/02/2026	21	12251	150	300	17662,5	430	430000	24,345
9	22/01/2026	12/02/2026	21	12438	150	300	17662,5	405	405000	22,930
Rata-Rata										24,345
10	21/01/2026	18/02/2026	28	12371	150	300	17662,5	430	430000	24,345
11	21/01/2026	18/02/2026	28	12275	150	300	17662,5	455	455000	25,761
12	21/01/2026	18/02/2026	28	12269	150	300	17662,5	470	470000	26,610
Rata-Rata										25,572

Tabel 10. Analisis Komparatif Performa Beton Menggunakan Pasir Merapi dan Pasir Cimalaka

Uji Tekan Beton (MPa)			
Pasir Merapi		Pasir Cimalaka	
Umur	Rata-Rata	Umur	Rata-Rata
7	18,684	7	16,796
14	25,478	14	22,741
21	27,459	21	24,345
28	28,969	28	25,572



Grafik 1. Komparasi Kekuatan Tekan Beton dengan Pasir Cimalaka dan Pasir Merapi Berdasarkan Umur

Berdasarkan prosedur SNI 1974:2011 (Badan Standarisasi Nasional, 2011), pengujian kuat tekan pada rentang usia 7, 14, 21, dan 28 hari menunjukkan performa yang bervariasi antara kedua jenis pasir. Terlihat bahwa pasir Merapi menghasilkan nilai rata-rata kekuatan tekan beton lebih unggul dari pasir Cimalaka. Pada beton dengan komposisi berbahan pasir Merapi tercatat kekuatan sebesar 18,684 MPa, 25,478 MPa, 27,459 MPa, hingga mencapai puncaknya di angka 28,969 MPa pada hari ke-28. Sementara pada beton dengan komposisi berbahan pasir Cimalaka diperoleh kuat tekan 16,796 MPa, 22,741 MPa, 24,345 MPa, serta 25,572 MPa pada umur pengujian yang sama. Meski terdapat selisih yang cukup signifikan, beton dengan pasir Cimalaka hingga umur 28 hari mampu mencapai kuat tekan rencana sebesar 25 MPa.

Kesimpulan

Pengujian karakteristik agregat halus memperlihatkan perbedaan yang cukup signifikan antara pasir Cimalaka dan Merapi. Pasir Cimalaka memiliki berat jenis curah 2,39, berat jenis SSD 2,60, berat jenis semu 3,05, serta penyerapan air 9,17%, sedangkan pasir Merapi memiliki berat jenis curah 2,43, berat jenis SSD 2,60, berat jenis semu 2,95, dan penyerapan air 7,30%. Dari sisi kandungan air, pasir Merapi (11,18%) lebih tinggi dibandingkan pasir Cimalaka (7,52%). Selain itu, kandungan lumpur pada pasir Cimalaka sebesar 7,28% melampaui batas maksimum yang diizinkan, sementara pasir Merapi masih memenuhi persyaratan dengan nilai 4,65%. Adapun hasil uji bahan organik menunjukkan bahwa kedua jenis pasir berada dalam kisaran yang diperbolehkan untuk digunakan dalam campuran beton.

Nilai kekuatan tekan beton yang telah diuji mengindikasikan bahwa penggunaan pasir Merapi menghasilkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan pasir Cimalaka pada tiap umur pengujian, dengan nilai berturut-turut mencapai 18,68 MPa, 25,48 MPa, 27,46 MPa, dan 28,97 MPa pada umur 7 hingga 28 hari, sedangkan pasir Cimalaka menghasilkan 16,80 MPa, 22,74 MPa, 24,35 MPa, dan 25,57 MPa. Selisih pada umur 28 hari mencapai 3,40 MPa, yang menunjukkan pengaruh positif karakteristik butiran dan komposisi material pasir Merapi terhadap ikatan agregat dan pasta semen. Secara praktis, pasir Merapi lebih direkomendasikan untuk pekerjaan konstruksi yang memerlukan kuat tekan lebih tinggi dan mutu beton yang lebih stabil. Namun demikian, pasir Cimalaka tetap layak digunakan sebagai agregat halus pada beton normal karena masih mampu memenuhi mutu rencana sebesar 25 MPa. Penggunaan pasir Cimalaka akan lebih optimal apabila dilakukan pengendalian kadar lumpur dan pengolahan material terlebih dahulu sehingga mutu beton yang dihasilkan dapat lebih terjaga.

Daftar Pustaka

- Badan Standarisasi Nasional. (1990a). SNI 03-1970-1990 Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standarisasi Nasional. (1990b). SNI 03-1971-1990 Metode Pengujian Kadar air Agregat. Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standarisasi Nasional. (1992). SNI 03-2816-1992 Metode Pengujian Kotoran Organik dalam Pasir. untuk Campuran Mortar atau Beton. Departemen Pekerjaan Umum.

- Badan Standarisasi Nasional. (1996). SNI 4142:1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregate Yang Lolos Saringan Nomor 200 (0,0075 mm). Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standarisasi Nasional. (2008). SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton. Departemen Pekerjaan Umum.
- Buwono, H. K. (2012). Analisis Pengaruh Penggunaan Agregat Halus Dari Material Letusan. *Jurnal Konstruksia*, 4(1), 17–24.
- Choiriyah, S., & Pertiwi, D. (2016). Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Pasir Gunung Merapi Ditinjau dari Manajemen Kualitas. Dalam *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan IV*.
- Hermawan, O. H. (2018). Pengaruh Perawatan Terdapat Kuat Tekan Beton. *Jurnal Engineering*, 16(1), 1–7.
- Ismail, A. G., Mustofa, A., Dwicahyani, A., Ridho, M. M., & Sambowo, K. A. (2017). Pengaruh Beton Daur Ulang dan Bahan Tambah Fly Ash terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Struktural Ramah Lingkungan. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 1(1), 59–63.
- Lasino, & Cahyadi, D. (2016). Pemanfaatan pasir dan abu Merapi untuk pembuatan bata beton (conblock). Artikel Seminar Nasional, 1(1), 155–163. https://digilib.mercubuana.ac.id/manager/t!/@file_artikel_abstrak/Isi_Artikel_374863537525.pdf
- Mardoli Guna, Sahrul Harahap, & Afniria Pakpahan. (2025). Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton Menggunakan Pasir Sungaikelurahan Napa Di Kecamatan Angkola Selatan Dengan Pasir Mabang Di Kecamatan Muara Batang Toru. *STATIKA*, 8(1), 40–48. <https://doi.org/10.64168/statika.v8i1.1589>
- Nurokhman, Kristiyanto, H., Harmanto, H., Subagyo, S., & Hermanto, H. (2023). KOMPARASI AGREGAT PROGO DAN MERAPI DAN PENGARUNYA TERHADAP MUTU BETON FS 45. *Civil Engineering and Technology Journal (CivETech)*, 5(2), 31–45. <https://jurnal.ucy.ac.id/index.php/CivETech/issue/archive>
- Nurrosyid, M. I., Susanto, H. Y., Hartopo, & Apriyanto, T. (2024). ANALISIS PERBANDINGAN KUAT TEKAN BETON NORMAL DENGAN BETON CAMPURAN BAN BEKAS. *Jurnal Teknik Indonesia*, 5(1), 48–59.
- Paryati, N., Nuryati, S., Yulius, E., & Agussalim, A. M. (2024). Analisis Hasil Kuat Tekan Beton Normal Terhadap Mix Design Kuat Tekan Beton Rencana. *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, 6(2), 415–429.
- Pertiwi, D., Wibowo, B., Kasiati, E., & Sabban, A. G. (2011). Perbandingan Penggunaan Pasir Lumajang dengan Pasir Gunung Merapi terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal APLIKASI: Media Informasi & Komunikasi Aplikasi Teknik Sipil Terkini*, 9(2), 13–22.
- Polii, R. A., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2015). Kuat Tekan Beton dengan Variasi Agregat yang Berasal dari Beberapa Tempat di Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 3(3), 206–211.
- Prayuda, H., & Pujianto, A. (2018). Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Menggunakan Komparasi Agregat Gamalama, Agregat Merapi dan Agregat Kali Progo. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil Universitas Sebelas Maret*, 1–10.
- Riwayati, S. RR., Rachman, D. N., & Rasandes, R. S. (2021). Pengujian dan Analisa Pilihan Jenis Pasir Terbaik dari Desa Payo, Desa kebur, dan Desa Gunung Agung Kabupaten Lahat Melalui Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu K-250. *Jurnal Ilmiah Tekno Global*, 10(2), 47–53.
- Saparingga, A., & Yogaswara, D. (2023). Analisis Perbandingan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton SCC dengan Campuran Pasir Cilopang dan Pasir Cimalaka. *Jurnal Konstruksi Institut Teknologi Garut*, 21(1), 37–46. <https://jurnal.itg.ac.id/>
- Susanti, E. (2014). STUDI PERBANDINGAN NILAI KUAT LENTUR DAN DAKTILITAS BETON YANG MENGGUNAKAN PASIR MERAPI DAN PASIR LUMAJANG. Dalam *Jurnal Teknik Sipil KERN* (Vol. 4, Nomor 1). <http://pasiranmerapi.wordpress.com/>
- Triana, D., & Subandi, A. (2023). MESA (Teknik Mesin, Teknik Elektro, Teknik Aipil, Teknik Arsitektur) Analisis Perbandingan Pasir Cimalaka-Sumedang dengan Pasir Bunihayu-Subang Terhadap Kuat Tekan Mutu Beton K250. *MESA (Teknik Mesin, Teknik Elektro, Teknik Aipil, Teknik Arsitektur)* 34, 7(1), 34–41.
- Wawan, A., & Kusdian, D. (2021). Analisis Perbandingan Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Pasir Abu Gunung Merapi Propinsi Yogyakarta dengan Variasi Penekanan Harian. *Sistem Infrastruktur Teknik Sipil (Simteks)*, 3(1), 20–33.
- Zulkarnain, F., & Kamil, B. (2021, Oktober 28). Perbandingan Kuat Tekan Beton Menggunakan Pasir Sungai sebagai Agregat Halus Dengan Variasi Bahan Tambah Sica Fume Pada Perendaman Air Laut. *Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ*. <http://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit>

Analisis Manajemen Risiko pada Proyek Konstruksi (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang)

Shafa Nabila Dewintha dan Waluyo Hatmoko

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jendral Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

shafanabila48@gmail.com, waluyo.hatmoko@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Proyek konstruksi memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi dan rentan terhadap macam-macam risiko yang bisa memengaruhi kinerja sebuah proyek. Penelitian dibuat dengan tujuan untuk menganalisis manajemen risiko pada proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Kabupaten Subang melalui identifikasi risiko, penilaian tingkat risiko, serta perumusan mitigasi risiko. Metode penelitian yang dipakai yaitu metode deskriptif kuantitatif menggunakan data primer yang diperoleh dari kuesioner dan wawancara terhadap responden yang terlibat langsung dalam proyek, serta data sekunder yang berasal dari dokumen proyek dan studi literatur. Identifikasi risiko dilakukan menggunakan *skala Guttman*, sedangkan penilaian risiko memakai metode *Severity Index* (SI) untuk menghasilkan nilai probabilitas dan dampak risiko. Tingkat risiko selanjutnya diklasifikasikan menggunakan Matriks Probabilitas dan Dampak guna menentukan risiko yang dominan. Hasil penelitian menunjukkan terdapat lima risiko dominan berkategori tinggi, yaitu hujan ekstrem, kurangnya rambu-rambu K3, kurangnya pengawasan K3, perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan. Risiko-risiko tersebut memerlukan mitigasi prioritas untuk meminimalkan dampaknya terhadap pelaksanaan proyek.

Kata kunci: manajemen risiko, rumah sakit, proyek gedung, *severity index*, matriks probabilitas dan dampak

Abstract

Construction projects are characterized by high levels of uncertainty and are vulnerable to various risks that may affect project performance. This study aims to analyze risk management in the construction project of Hamori Hospital Building, Subang Regency, by identifying potential risks, assessing risk levels, and determining appropriate mitigation measures. The research employed a quantitative descriptive approach using primary data collected through questionnaires and interviews with respondents directly involved in the project, as well as secondary data obtained from project documents and literature studies. Risk identification was conducted using a Guttman scale, while risk assessment was carried out using the Severity Index (SI) method to determine the probability and impact of risks. The risk level was further categorized using a Probability–Impact Matrix to identify dominant risks. The results of the study showed that there were five dominant risks in the high category, namely extreme rain, lack of K3 signs, lack of K3 supervision, changes in the schedule of work implementation, and lack of control over the schedule of work implementation. These risks require priority mitigation to minimize their impact on project implementation.

Keywords: risk management, hospital, construction project, severity index, probability–impact matrix

1. Pendahuluan

Proyek konstruksi memiliki tingkat kompleksitas dan ketidakpastian yang tinggi sehingga rentan terhadap berbagai risiko yang dapat memengaruhi kinerja proyek dari aspek biaya, mutu, dan waktu (Iqbal dkk., 2015; Jayasudha & Vidivelli, 2016). Risiko pada proyek konstruksi dapat bersumber dari faktor internal maupun eksternal, seperti manajemen proyek, logistik, sumber daya manusia, kondisi lingkungan, serta faktor *force majeure* yang sulit diprediksi (Gulindo, 2021; Purba & Rhini Wulan Dary, 2021).

Pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori di Kabupaten Subang merupakan proyek konstruksi gedung pelayanan kesehatan yang memerlukan pengelolaan risiko secara sistematis. Proyek gedung rumah sakit memiliki karakteristik risiko yang lebih kompleks dibandingkan bangunan umum lainnya karena berkaitan langsung dengan standar keselamatan, kualitas bangunan, dan keberlanjutan pelayanan kesehatan (Rahman and Hanie 2022; Wally, Jamlaay, and Marantika 2022).

Berbeda dengan bangunan komersial pada umumnya, proyek pembangunan rumah sakit memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi karena hasil konstruksi akan digunakan sebagai fasilitas pelayanan kesehatan yang harus memenuhi persyaratan keselamatan, keandalan bangunan, dan kenyamanan pengguna. Keterlambatan

Info Makalah:

Dikirim : 03-21-26;
Revisi 1 : 06-07-26;
Diterima : 07-03-26.

Penulis Korespondensi:

Telp : -
e-mail : shafanabila48@gmail.com

penyelesaian proyek dapat menghambat kesiapan pelayanan kesehatan kepada masyarakat, sedangkan kegagalan mutu konstruksi berpotensi menimbulkan risiko terhadap keselamatan pasien, tenaga kesehatan, maupun pengguna bangunan lainnya. Oleh karena itu, pengelolaan risiko yang efektif menjadi aspek penting untuk menjamin keberhasilan pembangunan fasilitas kesehatan sesuai target biaya, mutu, dan waktu.

Penelitian mengenai manajemen risiko pada proyek konstruksi telah banyak dilakukan pada proyek gedung, jalan, perumahan, maupun infrastruktur lainnya

dengan berbagai metode analisis, seperti *Severity Index*, *House of Risk*, maupun *Probability Impact Matrix*. Namun, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada identifikasi risiko secara umum dan belum banyak mengkaji proyek pembangunan rumah sakit sebagai objek penelitian. Selain itu, karakteristik risiko pada proyek rumah sakit dapat berbeda dengan proyek konstruksi lainnya karena adanya tuntutan terhadap standar fasilitas kesehatan, keselamatan kerja, serta pengendalian mutu yang lebih ketat. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi risiko, menganalisis tingkat risiko dominan menggunakan metode *Severity Index* dan *Matriks Probabilitas-Dampak*, serta merumuskan mitigasi risiko pada proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang.

Manajemen risiko merupakan suatu proses terstruktur yang meliputi identifikasi, analisis, evaluasi, serta pengendalian risiko untuk meminimalkan dampak negatif dan meningkatkan keberhasilan (Kahandanie & Mahfud, 2020; Project Management Institute, 2008; Suriyadi & Azmi, 2022). Penerapan manajemen risiko yang tepat pada proyek konstruksi terbukti mampu mengurangi potensi keterlambatan, pembengkakan biaya, serta kegagalan pencapaian mutu proyek (Maulana & Santosa, 2020; Oktaviani dkk., 2021).

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan manajemen risiko proyek konstruksi. Data primer diperoleh melalui penyebaran kuesioner dan wawancara kepada 11 responden yang terlibat langsung dalam proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Kabupaten Subang, sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumen proyek dan studi literatur. Teknik pengambilan sampel menggunakan purposive sampling dengan kriteria responden merupakan personel yang terlibat langsung dalam pelaksanaan proyek dan memahami kondisi lapangan, seperti *Site Manager*, *Project Manager*, *Owner*, *staf engineer*, petugas K3, logistik, mandor, dan pengawas lapangan.

Analisis dilakukan melalui tiga tahapan. Tahap pertama adalah identifikasi risiko menggunakan *Skala Guttman* dengan pilihan jawaban setuju dan tidak setuju untuk menentukan relevansi variabel risiko. Variabel yang memenuhi tingkat persetujuan responden selanjutnya dianalisis pada tahap berikutnya. Tahap kedua adalah penilaian risiko menggunakan metode *Severity Index* (SI) untuk menentukan nilai probabilitas dan dampak masing-masing risiko. Metode SI digunakan untuk mengubah persepsi responden menjadi nilai kuantitatif sehingga tingkat keparahan risiko dapat diukur secara sistematis. Dengan menggunakan rumus:

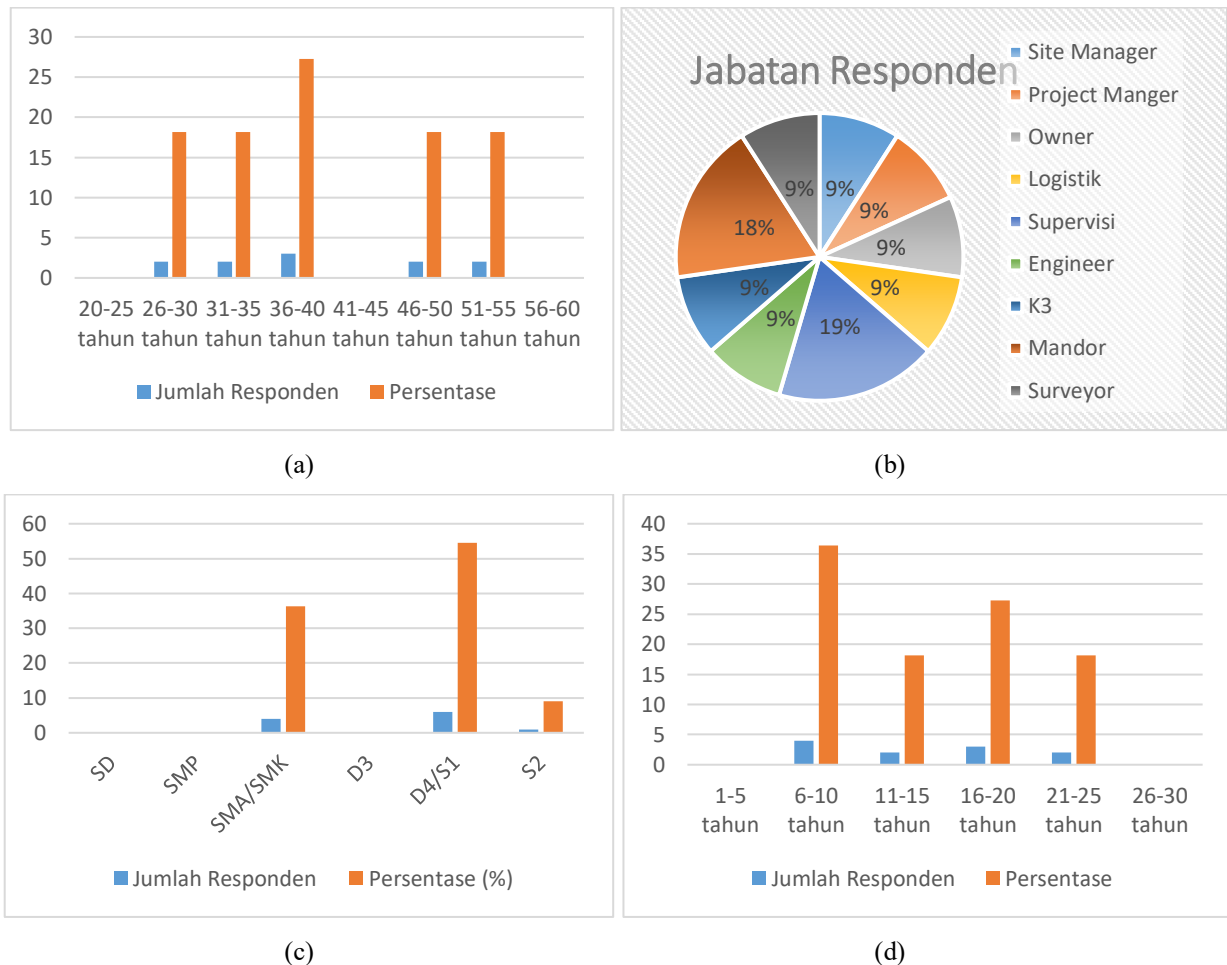
$$SI = \frac{\sum ai. xi}{4 \sum xi} \quad (1)$$

Tahap ketiga adalah pemetaan risiko menggunakan *Matriks Probabilitas-Dampak (Probability Impact Matrix)*. Tingkat risiko diperoleh dari hasil kombinasi nilai probabilitas dan dampak, kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori risiko rendah, sedang, dan tinggi untuk menentukan risiko dominan yang memerlukan penanganan prioritas serta penyusunan strategi mitigasi yang sesuai. Instrumen penelitian berupa kuesioner yang disusun berdasarkan variabel risiko dari penelitian-penelitian terdahulu yang telah banyak digunakan dalam kajian manajemen risiko konstruksi. Sebelum dilakukan penilaian risiko, variabel tersebut dikonfirmasi relevansinya terhadap kondisi proyek melalui identifikasi risiko menggunakan *Skala Guttman*, sehingga variabel yang dianalisis sesuai dengan karakteristik proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Kabupaten Subang.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Responden

Karakteristik responden disajikan untuk memberikan gambaran mengenai profil sumber data yang digunakan dalam penelitian ini. Pemilihan responden didasarkan pada posisi, pengalaman, dan tingkat keterlibatan dalam pengambilan keputusan maupun pelaksanaan pekerjaan di lapangan, sehingga informasi yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi risiko aktual pada proyek yang diteliti.



Gambar 1. Karakteristik Responden, (a) Usia Responden, (b) Jabatan Responden, (c) Pendidikan Responden, (d) Pengalaman Kerja Responden

Berdasarkan Gambar 1, responden penelitian terdiri atas personel yang memiliki keterlibatan langsung dalam pelaksanaan proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang. Dari aspek usia (Gambar 1a), mayoritas responden berada pada rentang usia produktif, sehingga dinilai memiliki pengalaman dan kapasitas yang memadai dalam mengidentifikasi risiko proyek. Dari aspek jabatan (Gambar 1b), responden berasal dari berbagai posisi strategis yang mencakup fungsi manajerial, teknis, operasional, logistik, dan K3, sehingga penilaian risiko diperoleh dari berbagai sudut pandang yang relevan terhadap pelaksanaan proyek.

Berdasarkan tingkat pendidikan (Gambar 1c), sebagian besar responden memiliki latar belakang pendidikan SMA/SMK hingga perguruan tinggi, dengan dominasi lulusan D4/S1. Kondisi ini menunjukkan bahwa responden memiliki kompetensi yang memadai untuk memahami aspek teknis dan manajerial dalam proyek konstruksi. Sementara itu, dari aspek pengalaman kerja (Gambar 1d), sebagian besar responden memiliki pengalaman kerja yang bervariasi, mulai dari 1 hingga lebih dari 20 tahun. Variasi pengalaman tersebut memberikan kontribusi terhadap kualitas penilaian risiko karena mencerminkan kombinasi antara pemahaman operasional lapangan dan pengalaman dalam pengelolaan proyek konstruksi. Dengan karakteristik tersebut, responden dinilai mampu memberikan penilaian yang representatif terhadap risiko-risiko yang berpotensi terjadi pada proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang (Iqbal dkk., 2015; Maharani dkk., 2022).

3.2 Analisa Data

3.2.1 Identifikasi Risiko Proyek Konstruksi

Identifikasi risiko dilakukan dengan tujuan mengetahui risiko-risiko yang berpotensi terjadi selama pelaksanaan proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang. Identifikasi ini didasarkan pada studi literatur serta hasil kuesioner yang disebarkan kepada responden menggunakan skala Guttman, yaitu pilihan setuju dan tidak setuju.

Tabel 1. Identifikasi Risiko

Var	Kategori Risiko	Variabel Risiko	Total	
			S	TS
X1	<i>Force Majeure</i>	Hujan Ekstrim	7	5
X2		Cuaca Panas	4	7
X3		Gempa Bumi	8	4
X4	Logistik	Pengadaan bahan dan peralatan tidak sesuai jadwal	9	3
X5		Kerusakan material pada saat pengiriman	9	4
X6		Kerusakan peralatan terjadi selama pelaksanaan	9	2
X7		Pemesanan material terlambat	8	4
X8		Keterlambatan pengiriman material dari pemasok	8	3
X9		Volume material yang dikirim tidak sesuai	7	5
X10		Ketersediaan material yang kurang	8	5
X11		Kekurangan peralatan yang diperlukan	8	4
X12		Penyimpanan material di Logistik yang tidak tercatat dengan baik	8	3
X13		Perawatan peralatan selama proyek	10	2
X14	Sumber Daya Manusia	Jumlah tenaga kerja berubah	7	4
X15		Kekurangan ketersediaan pekerja	7	4
X16		Kekurangan pekerja dan staff yang berkualifikasi	7	4
X17	Risiko Teknis	Adanya penerapan jam kerja lebih yang menyebabkan kelelahan	7	5
X18		Produktivitas kerja yang rendah	4	7
X19		Perubahan desain	8	3
X20		Kemacetan di sekitar lokasi proyek	3	9
X21		Akses ke lokasi yang sulit	5	6
X22		Metode konstruksi yang tidak sesuai	7	4
X23		Kerusakan yang terjadi di sekitar area saat pemasangan	6	5
X24		Gangguan keamanan di lokasi proyek	6	5
X25		Kualitas material yang tidak sesuai dengan spesifikasi	8	3
X26		Tidak dilakukannya pemeliharaan beton dengan baik, seperti <i>curing</i> yang tidak optimal	8	4
X27	Lingkungan	Pengecekan peralatan sebelum digunakan	11	0
X28		Adanya gangguan suara, getaran, dan debu yang berdampak ke masyarakat sekitar	6	7
X29		Lebihnya ketersediaan material menjadi limbah proyek (<i>waste</i>) dan tidak efisien	6	6
X30	Keamanan dan Keselamatan Kerja (K3)	Kecelakaan Kerja	8	4
X31		Kurang maksimal dalam APD	8	3
X32		Kurangnya penyampaian informasi K3 melalui <i>toolbox meeting</i>	9	3
X33		Kurangnya rambu Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di lokasi	9	3
X34		Kurangnya pengawasan yang ketat pada K3	8	3
X35	Manajemen dan Operasional pekerjaan	Kebersihan lokasi proyek dari sampah	10	2
X36		Kesalahan dalam memperkirakan biaya dan waktu pelaksanaan	7	5
X37		Perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan	7	4
X38		Kurangnya komunikasi dan koordinasi di lapangan	7	5
X39		Kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan	7	5
X40		Administrasi yang tidak tercatat dengan rapi	8	5
X41		Keterlambatan dalam perizinan sebelum pelaksanaan	6	6
X42	Keuangan atau Finansial	Koordinasi yang buruk antara pemangku kepentingan	7	5
X43		Adanya keterlambatan pembayaran pekerja	6	6
X44		Perubahan/kenaikan harga material atau kondisi pasar yang tidak stabil	8	4
X45		Besarnya pengeluaran tambahan (<i>overheads</i>)	6	6
X46		Kurangnya modal	7	5

Hasil identifikasi risiko menunjukkan bahwa dari 46 variabel risiko yang diajukan, sebagian besar memperoleh tingkat persetujuan yang tinggi dari responden. Hal ini menunjukkan bahwa risiko-risiko tersebut dinilai relevan dan berpotensi memengaruhi pelaksanaan proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang. Risiko yang memperoleh tingkat persetujuan tinggi banyak ditemukan pada kategori logistik, K3, manajemen operasional pekerjaan, dan keuangan. Temuan ini mengindikasikan bahwa keberhasilan proyek tidak hanya dipengaruhi oleh aspek teknis konstruksi, tetapi juga oleh efektivitas pengelolaan sumber daya, pengendalian pekerjaan, serta penerapan sistem keselamatan kerja. Pada kategori logistik, beberapa risiko seperti pengadaan material yang tidak sesuai jadwal,

keterlambatan pengiriman material dari pemasok, serta kurangnya ketersediaan material memperoleh tingkat persetujuan yang tinggi dari responden. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kelancaran rantai pasok material menjadi faktor penting dalam menjaga ketercapaian target waktu pelaksanaan proyek. Temuan ini sejalan dengan penelitian Oktaviani et al. (2021) yang menyatakan bahwa keterlambatan pengadaan material merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kinerja proyek konstruksi.

Selain itu, risiko pada kategori K3 dan manajemen operasional pekerjaan juga memperoleh tingkat persetujuan yang tinggi, terutama terkait kurangnya rambu-rambu K3, kurangnya pengawasan K3, perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta kurangnya pengendalian terhadap jadwal pekerjaan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa aspek keselamatan kerja dan pengendalian jadwal merupakan faktor yang perlu mendapat perhatian khusus dalam pelaksanaan proyek rumah sakit. Hasil ini sejalan dengan penelitian Honesti and Ramadhan (2021) yang menunjukkan bahwa lemahnya pengawasan dan pengendalian proyek dapat meningkatkan potensi keterlambatan dan menurunkan kinerja proyek secara keseluruhan. Di samping faktor internal proyek, risiko eksternal seperti hujan ekstrem juga memperoleh tingkat persetujuan yang tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan berpotensi memengaruhi produktivitas pekerjaan dan keberlangsungan aktivitas konstruksi di lapangan. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian Gulindo (2021) dan Rumimper dkk. (2015) yang menyatakan bahwa kondisi cuaca merupakan salah satu faktor eksternal yang dapat menghambat pelaksanaan proyek konstruksi apabila tidak diantisipasi melalui perencanaan yang memadai (Gulindo, 2021; Rumimper dkk., 2015).

3.2.2 Penilaian Risiko Menggunakan Severity Index (SI)

Risiko-risiko yang dinyatakan relevan selanjutnya dianalisis dengan metode Severity Index (SI) untuk membuat nilai probabilitas dan dampak risiko. Penilaian dilakukan berdasarkan persepsi responden terhadap tingkat kemungkinan terjadi suatu risiko dan seberapa besar dampak yang bisa ditimbulkan terhadap proyek. Hasil penilaian risiko menggunakan Severity Index menunjukkan adanya variasi tingkat probabilitas dan dampak pada setiap risiko yang teridentifikasi. Risiko dengan nilai probabilitas dan dampak yang relatif tinggi didominasi oleh aspek lingkungan, K3, dan manajemen proyek. Kondisi ini menunjukkan bahwa risiko-risiko tersebut memiliki peluang kejadian yang lebih besar serta berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap pelaksanaan proyek.

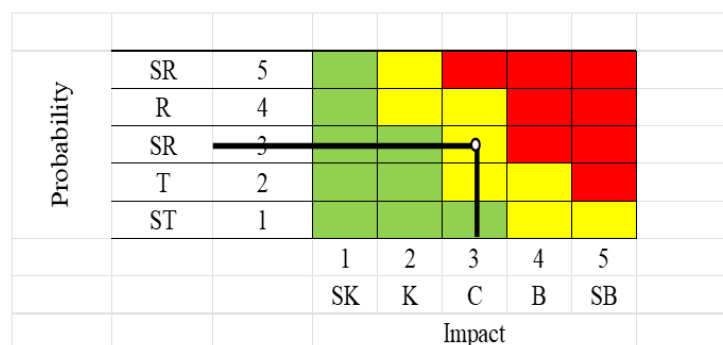
Berdasarkan hasil analisis, risiko hujan ekstrem, kurangnya rambu-rambu K3, kurangnya pengawasan K3, perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan, dan kurangnya pengendalian jadwal pekerjaan memperoleh nilai risiko yang relatif lebih tinggi dibandingkan risiko lainnya. Temuan ini mengindikasikan bahwa keberhasilan proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Subang sangat dipengaruhi oleh efektivitas pengendalian jadwal, penerapan sistem K3, serta kemampuan proyek dalam mengantisipasi faktor lingkungan (Ahmad Rizky Zaidan dkk., 2024; Samudra dkk., 2023). Hasil penilaian ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Penilaian Risiko

Var	Kategori Risiko	Variabel Risiko	Probabilitas			Dampak		
			Total	SI%	Kategori	Total	SI%	Kategori
X1	Force Majeure	Hujan Ekstrim	11	68,18	S	11	72,73	S
X2		Gempa Bumi	11	22,73	J	11	65,91	S
X3	Logistik	Pengadaan bahan dan peralatan tidak sesuai jadwal	11	56,82	C	11	50	C
X4		Kerusakan peralatan terjadi selama pelaksanaan	11	65,91	S	11	56,82	C
X5		Pemesanan material terlambat	11	50	C	11	43,18	C
X6		Keterlambatan pengiriman material dari pemasok	11	54,55	C	11	43,18	C
X7		Kekurangan peralatan yang diperlukan	11	47,73	C	11	40,91	C
X8		Penyimpanan material di Logistik yang tidak tercatat dengan baik	11	50	C	11	38,64	C
X9		Perawatan peralatan selama proyek	11	59,09	C	11	47,73	C
X10	SDM	Kekurangan ketersediaan pekerja	11	54,55	C	11	50	C
X11		Kekurangan keahlian pekerja dan kekurangan staff yang berkualifikasi	11	56,82	C	11	52,27	C
X12	Risiko Teknis	Perubahan desain	11	56,82	C	11	54,55	C
X13		Metode konstruksi yang tidak sesuai	11	50	C	11	59,09	C
X14		Kerusakan yang terjadi di sekitar area saat pemasangan	11	45,45	C	11	36,36	C
X15		Gangguan keamanan di lokasi proyek	11	54,55	C	11	43,18	C
X16		Kualitas material yang tidak sesuai dengan spesifikasi	11	43,18	C	11	43,18	C
X17		Tidak dilakukannya pemeliharaan beton dengan baik, seperti <i>curing</i> yang tidak optimal	11	47,73	C	11	43,18	C
X18		Pengecekan peralatan sebelum digunakan	11	59,09	C	11	45,45	C
X19	Keamanan dan Keselamatan Kerja (K3)	Kecelakaan Kerja	11	43,18	C	11	56,82	C
X20		Kurang maksimal dalam APD	11	54,55	C	11	50	C
X21		Kurangnya penyampaian informasi K3 melalui <i>toolbox meeting</i>	11	50	C	11	45,45	C
X22		Kurangnya rambu-rambu K3 di lokasi proyek	11	75	S	11	79,55	S
X23		Kurangnya pengawasan yang ketat pada K3	11	65,91	S	11	72,73	S
X24		Kebersihan lokasi proyek dari sampah	11	56,82	C	11	52,27	C
X25		Perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan	11	63,64	S	11	63,64	S
X26	Manajemen Operasional Pekerjaan	Kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan	11	63,64	S	11	72,73	S
X27		Koordinasi yang buruk antara pemangku kepentingan	11	50	C	11	59,09	C
X28	Keuangan dan Finansial	Perubahan/kenaikan harga material atau kondisi pasar yang tidak stabil	11	50	C	11	52,27	C

3.2.3 Kategori Tingkat Risiko pada Matriks Probabilitas dan Dampak

Nilai probabilitas dan dampak yang diperoleh dari analisis *Severity Index* selanjutnya dikombinasikan dengan Matriks Probabilitas dan Dampak bertujuan menentukan kategori tingkat risiko. Berdasarkan hasil analisis, risiko dapat dikelompokkan ke dalam kategori risiko rendah, sedang, dan tinggi. Untuk memperjelas posisi masing-masing risiko, hasil analisis dipetakan pada Matriks Probabilitas dan Dampak. Pemetaan ini memberikan gambaran visual mengenai tingkat risiko berdasarkan kombinasi nilai probabilitas dan dampaknya terhadap proyek.



Gambar 2. Pengeplotan Nilai Risiko

Berdasarkan hasil pemetaan pada Matriks Probabilitas-Dampak (Gambar 2), risiko-risiko yang teridentifikasi tersebar pada kategori rendah, sedang, dan tinggi. Sebagian besar risiko berada pada kategori sedang, yang menunjukkan bahwa risiko tersebut tetap memerlukan pengendalian namun belum menjadi prioritas utama dalam pelaksanaan proyek. Sementara itu, terdapat lima risiko yang berada pada kategori tinggi, yaitu hujan ekstrem, kurangnya rambu-rambu Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), kurangnya pengawasan terhadap penerapan K3, perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan.

Posisi kelima risiko tersebut pada area risiko tinggi menunjukkan bahwa risiko memiliki kombinasi probabilitas kejadian dan dampak yang relatif besar terhadap kinerja proyek. Risiko yang berkaitan dengan jadwal pekerjaan berpotensi menyebabkan keterlambatan penyelesaian proyek, sedangkan risiko K3 dapat meningkatkan potensi kecelakaan kerja dan mengganggu produktivitas pelaksanaan konstruksi. Di sisi lain, risiko hujan ekstrem menunjukkan bahwa faktor lingkungan juga memiliki pengaruh signifikan terhadap keberlangsungan pekerjaan di lapangan (A. Kassem dkk., 2019; Septiaji dkk., 2025). Oleh karena itu, risiko-risiko tersebut perlu menjadi prioritas utama dalam penyusunan strategi mitigasi dan pengendalian proyek.

3.3 Mitigasi Risiko Proyek

Berdasarkan hasil analisis tingkat risiko dan pemetaan pada matriks probabilitas dan dampak, diperoleh sejumlah risiko dominan yang memerlukan tindakan mitigasi. Mitigasi risiko disusun untuk mengurangi kemungkinan terjadinya risiko serta meminimalkan dampak yang dapat ditimbulkan terhadap pelaksanaan proyek.

Tabel 3. Mitigasi Risiko

Variabel	Kategori Risiko	Variabel Risiko	Mitigasi
X1	<i>Force Majeure</i>	Hujan Ekstrem	Menghentikan sementara pekerjaan saat intensitas hujan tinggi Menyusun jadwal cadangan (<i>buffer time</i>). Mengalihkan pekerjaan ke area <i>indoor</i> . Menambah jam kerja setelah cuaca membaik. <i>Monitoring</i> cuaca harian.
X22	Keamanan dan Keselamatan Kerja (K3)	Kurangnya rambu-rambu K3 di lokasi proyek	Memasang rambu K3 sesuai standar di seluruh area. Menempatkan rambu pada titik rawan bahaya (galian, alat berat, listrik, ketinggian). Menggunakan rambu yang jelas, tahan cuaca, dan mudah terlihat.
X23		Kurangnya pengawasan yang ketat pada K3	Memberi marka jalur kerja dan jalur evakuasi Menempatkan petugas K3 khusus di lokasi proyek. Menyediakan <i>checklist</i> inspeksi harian K3. Mencatat temuan dan tindak lanjut pengawasan. Menerapkan <i>reward and punishment</i> K3
X25	Manajemen Operasional Pekerjaan	Perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan	Menyusun jadwal dengan <i>buffer time</i> . Menyediakan rencana alternatif (<i>contingency plan</i>). Mengalihkan pekerjaan ke aktivitas yang tidak terdampak.
X26		Kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan	Menambah jam kerja atau <i>shift</i> bila diperlukan. Membuat <i>baseline schedule</i> sebagai acuan utama Melakukan <i>monitoring</i> progres harian dan mingguan. Menggunakan Kurva-S sebagai alat kontrol waktu Rapat evaluasi rutin. Penetapan PIC tiap pekerjaan.

Berdasarkan hasil pemetaan risiko pada Tabel 3, sebagian besar risiko berada pada kategori sedang, sedangkan beberapa risiko lainnya termasuk kategori rendah dan tinggi. Distribusi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar risiko masih memerlukan pengendalian selama pelaksanaan proyek, meskipun tidak seluruhnya memberikan dampak yang signifikan terhadap kinerja proyek.

Risiko yang termasuk kategori tinggi terdiri atas hujan ekstrem, kurangnya rambu-rambu K3, kurangnya pengawasan terhadap penerapan K3, perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan. Risiko-risiko tersebut memiliki kombinasi probabilitas dan dampak yang tinggi sehingga berpotensi memengaruhi pencapaian target waktu, keselamatan kerja, dan kelancaran pelaksanaan proyek. Temuan ini menunjukkan bahwa aspek pengendalian jadwal, penerapan K3, dan faktor lingkungan merupakan area yang memerlukan perhatian utama dalam pengelolaan risiko proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Kabupaten Subang. Hasil ini sejalan dengan penelitian Afiq (2021) dan Oktaviani dkk. (2021) yang menyatakan bahwa aspek pengendalian proyek dan pengawasan lapangan berpengaruh terhadap kinerja pelaksanaan proyek konstruksi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil identifikasi dan analisis risiko pada proyek pembangunan Gedung Rumah Sakit Hamori Kabupaten Subang, diperoleh 42 variabel risiko yang relevan terhadap pelaksanaan proyek. Hasil analisis menggunakan Severity Index dan Matriks Probabilitas-Dampak menunjukkan bahwa terdapat lima risiko dominan yang termasuk kategori tinggi, yaitu hujan ekstrem, kurangnya rambu-rambu Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di lokasi proyek, kurangnya pengawasan terhadap penerapan K3, perubahan jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta kurangnya pengendalian terhadap jadwal pelaksanaan pekerjaan.

Berdasarkan risiko dominan tersebut, strategi mitigasi yang menjadi prioritas meliputi peningkatan penerapan dan pengawasan K3 di lapangan, penyediaan rambu-rambu K3 yang memadai, penguatan pengendalian dan monitoring jadwal pekerjaan secara berkala, serta penyusunan perencanaan pelaksanaan yang lebih adaptif terhadap kondisi cuaca. Penerapan strategi mitigasi tersebut diharapkan dapat mengurangi dampak risiko terhadap kinerja biaya, mutu, dan waktu pada proyek konstruksi rumah sakit.

Daftar Notasi

a_i = konstanta penilaian
 x_i = frekuensi responden
 i = 0, 1, 2, 3, 4 dan seterusnya

Daftar Pustaka

- A. Kassem, M., Khoiry, M. A., & Hamzah, N. (2019). Using probability impact matrix (PIM) in analyzing risk factors affecting the success of oil and gas construction projects in Yemen. *International Journal of Energy Sector Management*, 14(3), 527–546. <https://doi.org/10.1108/IJESM-03-2019-0011>
- Afiq, M. (2021). MANAJEMEN RISIKO PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG ASRAMA MAHASISWA UIN WALISONGO TAHUN 2021. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 3(1). <https://doi.org/10.37058/aks.v3i1.3561>
- Ahmad Rizky Zaidan, Koosdaryani Soeryodarundio, & Setiono Setiono. (2024). Analisis Manajemen Risiko Proyek dengan Metode Severity Index (SI) pada Proyek Pembangunan Gedung X Kota Surakarta. *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 2(3), 211–221. <https://doi.org/10.61132/globe.v2i3.501>
- Gulindo, H. A. (2021). Analisis Manajemen Risiko Yang Mempengaruhi Kontraktor pada Pelaksanaan Proyek Jalan dan Gedung di Kabupaten Malinau-Kalimantan Utara. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 2(5), 805–815. <https://doi.org/10.36418/jist.v2i5.145>
- Honesti, L., & Ramadhan, J. (2021). IDENTIFIKASI MANAJEMEN RISIKO KINERJA BIAYA PADA PROYEK KONTRUKSI GEDUNG DI PROVINSI SUMATRA BARAT (Dilihat dari sudut pandang kontraktor). *Rang Teknik Journal*, 4(1), 68–75. <https://doi.org/10.31869/rtj.v4i1.2030>
- Iqbal, S., Choudhry, R. M., Holschemacher, K., Ali, A., & Tamošaitienė, J. (2015). RISK MANAGEMENT IN CONSTRUCTION PROJECTS. *Technological and Economic Development of Economy*, 21(1), 65–78. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.994582>
- Jayasudha, K., & Vidivelli, B. (2016). *ANALYSIS OF MAJOR RISKS IN CONSTRUCTION PROJECTS*. 11(11).
- Kahandanie, F., & Mahfud, M. (2020). Manajemen Risiko Konsultan Perencana Kontruksi Di Kota Balikpapan. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 3(2), 71. <https://doi.org/10.31602/jk.v3i2.4068>
- Maharani, S. A., Sari, S., As'adi, M., & Saputro, A. P. (2022). Analisis Risiko Pada Proyek Konstruksi Perumahan Dengan Metode House of Risk (HOR) (Studi Kasus: Proyek Konstruksi Perumahan PT ABC). *Journal of Integrated System*, 5(1), 16–26. <https://doi.org/10.28932/jis.v5i1.3996>
- Maulana, A. W., & Santosa, B. (2020). Risk Management Analysis of Building Construction Project in the Jakarta City. *Jurnal Fondasi*, 9(1). <https://doi.org/10.36055/jft.v9i1.7199>
- M.Hendra Aulia Rahman & Hanie Teki Tjendani. (2022). Identifikasi Risiko Pelaksanaan Pembangunan Proyek Gedung Highrise Building Di Hotel Grand Dafam Signature Yogyakarta. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 11(2), 177–185. <https://doi.org/10.22225/pd.11.2.5336.177-185>

- Oktaviani, O., Susetyo, B., & Kusumo Bintoro, B. P. (2021). Risk Management Model using Cause and Effect Analysis in Industrial Building Project. *International Journal of Research and Review*, 8(8), 227–235. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20210832>
- Project Management Institute. (2008). *A Guide to the Project Management of Body Knowledge (PMBOK Guide)*. Project Management Institute.
- Purba, I. Y. & Rhini Wulan Dary. (2021). Analisis Risiko Terhadap Biaya, Mutu Dan Waktu Pada Proyek Pembangunan Rumah Susun Kota Tanjung Balai Provinsi Sumatera Utara 1 TA. 2020. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Agregat*, 1(2), 72–84. <https://doi.org/10.51510/agregat.v1i2.519>
- Rumimper, R. R., Sompie, B. F., & Sumajouw, M. D. J. (2015). *ANALISIS RESIKO PADA PROYEK KONSTRUKSI PERUMAHAN DI KABUPATEN MINAHASA UTARA*.
- Samudra, A. R., Hatmoko, J. U. D., & Wibowo, M. A. (2023). Analisa Faktor Risiko Prioritas pada Proyek Konstruksi Jembatan. *Syntax Literate ; Jurnal Ilmiah Indonesia*, 8(7), 5040–5049. <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v8i7.12944>
- Septiaji, A. I., Jayady, A., & Suryani, F. (2025). Managing Cost and Schedule Risks in High-Rise Building Projects: A Case Study from Jakarta, Indonesia. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 10(8), 01–09. <https://doi.org/10.35629/8193-10080109>
- Suriyadi, S., & Azmi, F. (2022). PENGEMBANGAN MANAJEMEN RESIKO PADA INSTANSI PENDIDIKAN. *Warta Dharmawangsa*, 16(3), 543–553. <https://doi.org/10.46576/wdw.v16i3.2246>
- Wally, S. N., Jamlaay, O., & Marantika, M. (2022). ANALISIS MANAJEMEN RISIKO PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG LABORATORIUM TERPADU DAN PERPUSTAKAAN MAN 1 MALUKU TENGAH. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), 61–69. <https://doi.org/10.21009/jmenara.v17i2.27124>