

Dedy Chandra Haludin dan Inten Tejaasih

Analisis Pengukuran Beban Kerja Mental Mahasiswa pada Kuliah Daring dan Hybrid di Fakultas Saintek Universitas Muhammadiyah Bandung dengan Metode Nasa-TLX

Farid Irawan, Agus Sulaeman, dan Xbal Meiprasetyo

Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (*Sheet Pile*) Dermaga yang Tidak Sesuai *Detail Engineering Design* (DED)

Miftahul Iman dan Ferry Rusgiarto

Analisa Manajemen Risiko proyek di daerah 3T (Terluar-Terdepan-Tertinggal). Studi Kasus Pembangunan Jalan di Pulau Siberut, Kep. Mentawai, Sumatera Barat

Rospita Uli, Wibawa Hendra Saputera, Dwiwahju Sasongko, dan Hary Devianto

Pengembangan Katalis Berbasis Tungsten Oksida (WO_3) untuk Degradasi Limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan Teknologi Fotokatalitik

Sutiono Watiko Putro dan Dani Rusirawan

Review Optimalisasi Pengelolaan Pengotoran dan Korosi pada Sistem Perpindahan Panas terhadap *Reheater* pada PLTU

Adi Ganda Putra, Afrianto Sihalo, Mohamad Vicky, Sony Sukmara, dan Pawawoi

Optimisasi Sifat Mekanik Paduan Mg AZ91: Pengaruh Proses *Thixoforming* dan Homogenisasi terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, dan Mikrostruktur

Adi Ganda Putra, Afrianto Sihalo, Mohamad Vicky, Sony Sukmara, dan Pawawoi

Pengaruh Mobilitas Masyarakat terhadap Tingkat Penambahan Jumlah Kasus COVID-19 di Surabaya

Widya Prapti Pratiwi, Bustami Ibrahim, dan Mohammad Haryst Daryaly

Perancangan *Semi Automatic Material Handling and Feeding Machine* pada Industri Pembuatan Baut

Ni Made Sintya Rani, Kadek Adi Suryawan, I Gusti Ayu Wulan Krisna Dewi, dan Anak Agung Ayu Asta Oktaviani Putri

Implementasi Konsep *Green Building* Melalui *Value Engineering* pada Pekerjaan Arsitektur

Handoko Rusiana Iskandar, Ahmad Daelami, Awang Rahmawan Prakoso, Cepi Arifin, dan Miftah Farid

A Review: Reliability Assessment of Isolated Phase Busduct Through FMEA and RCFA Methodologies

TIM REDAKSI

- Editor In Chief : • Dr. Martijanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57217586993)
- Advisory Editorial Board : • Dr. Fitri Hadiyah, S.T., M.T., IPM
(Universitas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57194602385)
- 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)
- 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)
- Hajiar 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)
- Ragil Handito, S.T., M.Eng.
(Korea National University of Transportation, Korea.)
- Tiara Ariani Putri, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- 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 2025

- Reviewers :
- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 6506054959]
 - 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]
 - 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. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M.
(Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia) [SCOPUS ID: 23975188900]
 - Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57218863103]
[ORCHID ID: 0000-0003-1711-5413] [SINTA ID: 5984218]
 - 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. 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. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T.
(Universitas Sriwijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57193694034]
- Dr. Ir. Agus Sulaeman, MT
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191260048]
[SINTA ID: 6711550]
- Dr. Ir. Ariani 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. Zaenal-Muttaqien, S.T., S.E., S.Pd., M.T., IPU., ASEAN Eng., ACPE.,
APECEng.
(Universitas Jenderal Acbmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 58674304500]
[SINTA ID: 6662264]
- 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. Suhartono, S.T., M.Si.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189075734]
 - 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]
 - Edwar, S.T., M.T.
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215427881]
-

- Gianti Puspawardhani, ST., MT. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6086741]
- Fatin Saffanah Didin, S.T., M.T. *
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SINTA ID: 6693837]
- 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]
- 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]
- Syah Alam, S.Pd., M.T.
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191903622]
- 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]

*Reviewer yang terlibat pada Vol 24, No 1, Tahun 2025

DAFTAR ISI

Analisis Pengukuran Beban Kerja Mental Mahasiswa pada Kuliah Daring dan Hybrid di Fakultas Saintek Universitas Muhammadiyah Bandung dengan Metode Nasa-TLX Dedy Chandra Haludin, dan Inten Tejaasih	01 – 09
Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (<i>Sheet Pile</i>) Dermaga yang Tidak Sesuai <i>Detail Engineering Design</i> (DED) Farid Irawan, Agus Sulaeman, dan Xbal Meiprasetyo	10 – 23
Analisa Manajemen Risiko Proyek di daerah 3T (Terluar–Terdepan–Tertinggal). Studi Kasus Pembangunan Jalan di Pulau Siberut, Kep. Mentawai, Sumatera Barat Miftahul Iman, dan Ferry Rusgiyanto	24 – 33
Pengembangan Katalis Berbasis Tungsten Oksida (WO₃) untuk Degradasi Limbah <i>Palm Oil Mill Effluent</i> (POME) dengan Teknologi Fotokatalitik Rospita Uli, Wibawa Hendra Saputera, Dwiwahju Sasongko, dan Hary Devianto	34 – 42
Review Optimalisasi Pengelolaan Pengotoran dan Korosi pada Sistem Perpindahan Panas terhadap <i>Reheater</i> pada PLTU Sutiono Watiko Putro, dan Dani Rusirawan	43 – 50
Optimisasi Sifat Mekanik Paduan Mg AZ91: Pengaruh Proses <i>Thixoforming</i> dan Homogenisasi terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, dan Mikrostruktur Adi Ganda Putra, Afrianto Sihaloho, Mohamad Vicky, Sony Sukmara, dan Pawawoi	51 – 57
Pengaruh Mobilitas Masyarakat terhadap Tingkat Penambahan Jumlah Kasus COVID-19 di Surabaya Gholiqul Amrodh Alawy, Achmad Wicaksono, Syaripin, Adelia Nur Isna Kartikasari, dan Niswah Selmi Kaffa	58 – 65
Perancangan <i>Semi Automatic Material Handling and Feeding Machine</i> pada Industri Pembuatan Baut Widya Prapti Pratiwi, Bustami Ibrahim, dan Mohammad Haryst Daryaly	66 – 74
Implementasi Konsep <i>Green Building</i> Melalui <i>Value Engineering</i> pada Pekerjaan Arsitektur Ni Made Sintya Rani, Kadek Adi Suryawan, I Gusti Ayu Wulan Krisna Dewi, dan Anak Agung Ayu Asta Oktaviani Putri	75 – 83
<i>A Review: Reliability Assessment of Isolated Phase Busduct Through FMEA and RCFA Methodologies</i> Handoko Rusiana Iskandar, Ahmad Daelami, Awang Rahmawan Prakoso, Cepi Arifin, dan Miftah Farid	84 – 93

DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas berkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 24 Nomor 1, bulan Mei 2025. Dalam edisi ini disajikan 10 (sepuluh) 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) Analisis Pengukuran Beban Kerja Mental Mahasiswa pada Kuliah Daring dan *Hybrid* di Fakultas Saintek Universitas Muhammadiyah Bandung dengan Metode Nasa-TLX, (2) Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (*Sheet Pile*) Dermaga yang Tidak Sesuai *Detail Engineering Design* (DED), (3) Analisa Manajemen Risiko Proyek di daerah 3T (Terluar–Terdepan–Tertinggal). Studi Kasus Pembangunan Jalan di Pulau Siberut, Kep. Mentawai, Sumatera Barat, (4) Pengembangan Katalis Berbasis Tungsten Oksida (WO_3) untuk Degradasi Limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan Teknologi Fotokatalitik, (5) *Review* Optimalisasi Pengelolaan Pengotoran dan Korosi pada Sistem Perpindahan Panas terhadap *Reheater* pada PLTU, (6) Optimisasi Sifat Mekanik Paduan Mg AZ91: Pengaruh Proses *Thixoforming* dan Homogenisasi terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, dan Mikrostruktur, (7) Pengaruh Mobilitas Masyarakat terhadap Tingkat Penambahan Jumlah Kasus COVID-19 di Surabaya, (8) Perancangan *Semi Automatic Material Handling and Feeding Machine* pada Industri Pembuatan Baut, (9) Implementasi Konsep *Green Building* Melalui *Value Engineering* pada Pekerjaan Arsitektur, dan (10) *A Review: Reliability Assessment of Isolated Phase Busduct Through FMEA and RCFA Methodologies*

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 24 (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 2025

Dewan Redaksi

Analisis Pengukuran Beban Kerja Mental Mahasiswa pada Kuliah Daring dan *Hybrid* di Fakultas Saintek Universitas Muhammadiyah Bandung dengan Metode Nasa-TLX

Dedy Chandra Haludin, dan Inten Tejaasih

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Muhammadiyah Bandung, Bandung, Indonesia

dedychandra@umbandung.ac.id, intentejaasih@umbandung.ac.id

Abstrak

Pandemi Covid 19 berlangsung sejak tahun 2020-2022 mendorong seluruh institusi untuk melakukan perubahan metode pembelajaran dengan menerapkan perkuliahan daring dan *hybrid*. Tujuan penelitian ini untuk mengukur beban mental mahasiswa saat mengikuti perkuliahan *online* dan *hybrid* dengan metode Nasa-TLX, menguji ada tidaknya perbedaan tingkat beban kerja mental pada dua metode pembelajaran tersebut serta menguji hubungan antara program studi dan jenis kelamin terhadap beban mental mahasiswa. Kuesioner Nasa-TLX diisi oleh 83 mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi angkatan 2020 Universitas Muhammadiyah Bandung. Penelitian ini menemukan nilai beban mental kuliah daring sebesar 80,95 dengan kategori berat, sedangkan nilai beban mental kuliah *hybrid* sebesar 83,87 dengan kategori berat. Keduanya memiliki indikasi beban mental tertinggi yang sama, yakni Effort Level (TU). Dari hasil uji t, nilai beban mental kuliah daring berbeda jauh dengan kuliah *hybrid*. Sementara itu, uji korelasi spearman, variabel jenis kelamin memiliki hubungan yang kuat dengan upaya mental, sedangkan variabel program studi tidak memiliki hubungan yang kuat.

Kata kunci: Beban Kerja Mental, Kuliah Daring, Kuliah Hybrid, Nasa-TLX, Metode Pembelajaran.

Abstract

The Covid 19 pandemic that has been going on since 2020-2022 has encouraged all institutions to change their learning methods by implementing online and hybrid lectures. The purpose of this study was to measure the mental burden of students when taking online and hybrid lectures with the Nasa-TLX method, to test whether there is a difference in the level of mental workload in the two learning methods, and to test the relationship between study programs and gender on students' mental burden. The Nasa-TLX questionnaire was filled out by 83 students of the Faculty of Science and Technology, batch 2020, Muhammadiyah University of Bandung. This study found that the mental burden value of online lectures was 80.95 in the heavy category, while the mental burden value of hybrid lectures was 83.87 in the heavy category. Both have the same highest indication of mental burden, namely Effort Level (TU). From the results of the t-test, the mental burden value of online lectures is much different from hybrid lectures. Meanwhile, the Spearman Correlation Test, the gender variable has a strong relationship with mental effort, while the study program variable does not have a strong relationship.

Keywords: Mental Workload, Online Lecture, Hybrid Lecture, Nasa-TLX, Learning Method

1. Pendahuluan

Pandemi Covid 19 telah menimbulkan gangguan serius di berbagai sektor, termasuk pendidikan, yang mendorong perubahan sistem pembelajaran pada perguruan tinggi (Gunawan dkk., 2020). Perkuliahan daring merupakan salah satu bentuk kegiatan belajar mengajar yang memanfaatkan *platform* teknologi untuk memudahkan proses pembelajaran dan dilakukan dari jarak jauh dengan berbagai perangkat (Hoi dkk., 2021). Sementara dalam perkuliahan tatap muka, dosen dapat memberikan penjelasan materi secara detail dan mahasiswa dapat langsung berdiskusi dengan dosen dan teman-teman sekelasnya (Marliani, 2024). Perkuliahan tatap muka dianggap lebih efektif dibandingkan dengan pembelajaran secara *online*, terutama untuk memfasilitasi interaksi sosial dan kognitif antara mahasiswa dan dosen (Marliani, 2024).

Pada tanggal 2 Desember 2020, Kemendikbud memberikan izin kegiatan pembelajaran tatap muka di perguruan tinggi dan politeknik/akademi komunitas pada semester genap Tahun Akademik 2020/2021 dengan metode campuran (*hybrid learning*), daring, dan tatap muka dengan protokol kesehatan yang ketat (Kemendikbud, 2022). Selain itu, ditegaskan bahwa perguruan tinggi harus tetap memprioritaskan kesehatan dan keselamatan warga kampus yang meliputi mahasiswa, dosen, tenaga kependidikan, serta masyarakat sekitar (Kemendikbud, 2022). Menurut Hrastinski (2019), pembelajaran *hybrid* sering kali dirancang untuk "mengintegrasikan keunggulan pembelajaran daring yang fleksibel dengan interaksi personal yang mendalam dari pembelajaran tatap muka, menciptakan pendekatan belajar yang adaptif dan partisipatif.

Info Makalah:

Dikirim : 08-29-24;
Revisi 1 : 11-18-24;
Revisi 2 : 12-05-24;
Diterima : 01-03-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-858-604-99917
e-mail : dedychandra@umbandung.ac.id

Menanggapi arahan Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, kampus Universitas Muhammadiyah Bandung tanggal 11 Oktober 2021, Dengan Surat Keputusan Rektor No 001/REK/EDR/II.3.AU/A/2021, diberitahukan bahwa kuliah *hybrid* akan dimulai dengan persyaratan dan persyaratan yang ketat yang disesuaikan dengan protokol kesehatan, sehingga mahasiswa dapat kembali mengikuti kuliah secara luring. Perkuliahan tatap muka dianggap lebih efektif dibandingkan dengan pembelajaran secara *online*, terutama untuk memfasilitasi interaksi sosial dan kognitif antara mahasiswa dan dosen (Marliani, 2024). Bahkan sebelum pandemi COVID-19, perhatian terhadap masalah kesehatan mental mahasiswa telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir. (Qonita, 2024)

Berdasarkan penelitian terdahulu, pergeseran pola pembelajaran tersebut mengakibatkan munculnya beban mental bagi peserta didik (Kusnayat dkk., 2020). Lebih lanjut, penelitian pendahuluan terhadap mahasiswa Teknik Industri angkatan 2020 Universitas Muhammadiyah Bandung menemukan bahwa 94,4% mengalami kesulitan memahami materi kuliah, 47,2% mengalami kelelahan karena banyaknya tugas, 30,6% mengalami kesulitan mengatur waktu, dan 27,8 persen mengatakan bahwa mereka mengalami gejala kecemasan yang lebih buruk. Perubahan metode belajar mengajar tersebut mengakibatkan peningkatan beban mental bagi peserta didik (Febriliandika, 2020). Beban mental dapat mempengaruhi kinerja pekerjaan yang diukur dari efektivitas dan efisiensi, serta dapat memengaruhi produksi (Hasibuan, 2019).

Dari latar belakang, ada tiga rumusan masalah dari penelitian ini yakni:

1. Bagaimana skor beban kerja mental mahasiswa Fakultas Saintek Universitas Muhammadiyah Bandung saat melaksanakan kuliah daring dan *hybrid* menggunakan metode Nasa-TLX?
2. Apakah terdapat perbedaan tingkat beban kerja mental pada kuliah daring dan *hybrid*?
3. Apakah terdapat hubungan antara program studi dan jenis kelamin terhadap tingkat beban kerja mental mahasiswa pada saat kuliah daring dan *hybrid*?

Universitas Muhammadiyah Bandung akan memperoleh manfaat dari penelitian ini karena akan memberikan informasi mengenai besarnya beban mental mahasiswa ketika perkuliahan daring dan *hybrid* dilaksanakan. Selain itu, dapat diamati pengaruh program studi dan jenis kelamin terhadap beban mental. Manfaat bagi peneliti antara lain memberi wawasan yang mendalam mengenai kajian beban mental dan dampak Pandemi Covid 19 pada besarnya beban mental mahasiswa. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar bagi Universitas untuk mengevaluasi kebijakan terkait pembelajaran daring atau *hybrid* yang lebih ergonomis dan lebih memerhatikan beban mental mahasiswa. Hal tersebut termasuk perubahan kurikulum, jadwal perkuliahan, atau metode *assesment*.

2. Metode

2.1. Populasi dan Sampling

Penelitian ini melibatkan 485 mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Bandung angkatan 2020. Metode pengambilan sampel ialah Quota Sampling, metodologi pemilihan sampel dari suatu populasi berdasarkan ciri-ciri tertentu (kuota) (Sugiyono, 2013). Metode Slovin dengan tingkat kesalahan 10% dan tingkat kepercayaan 95% menghasilkan 83 sampel penelitian yang dibagi secara proporsional. Tabel 1 menampilkan besarnya sampel penelitian.

Tabel 1. Ukuran Sampel

Program Studi	Jumlah Mahasiswa	Persentase (%)	Jumlah Sampel
Teknologi Pangan Halal	46	9,485	8
Agribisnis	41	8,454	7
Elektro	40	8,247	7
Teknik Industri	52	10,722	9
Farmasi	170	35,052	29
Informatika	93	19,175	16
Bioteknologi	43	8,866	7
Total	485	100	83

2.2. Tahap Penelitian

Penelitian dimulai dengan identifikasi masalah yang didasarkan oleh fenomena beban mental dalam perkuliahan selama Pandemi Covid 19. Kemudian, survei pendahuluan dilakukan terhadap mahasiswa dan dilakukan tinjauan literatur tentang metode Nasa-TLX dan beban mental. Selanjutnya, sampel dipilih dan kuesioner Nasa-TLX dibuat.

Data dalam penelitian ini diperoleh dengan pendekatan survei, dengan menyebarkan kuesioner kepada 83 mahasiswa Fakultas Saintek Universitas Muhammadiyah Bandung angkatan 2020 yang jumlahnya telah dibagi berdasarkan proporsi pada Tabel 1. Mahasiswa tersebut dipilih karena telah mengikuti perkuliahan secara daring dan *hybrid* sehingga relevan dengan tujuan penelitian. Para responden akan menilai secara subjektif enam dimensi pada kuesioner Nasa-TLX, yang penjelasannya terdapat pada Tabel 2 (Hendrawan dan Hidayat, 2013).

Tabel 2. Dimensi Beban Kerja Mental

No	Jenis Skala	Keterangan
1	<i>Mental Demand</i> (MD)	Kegiatan mental yang diperlukan dalam melakukan aktivitas, seperti mengingat, berpikir, dll.
2	<i>Physical Demand</i> (PD)	Besarnya kegiatan fisik yang diperlukan atau dilakukan untuk melaksanakan aktivitas (misal mendorong, mengangkat, berjalan, dll)
3	<i>Temporal Demand</i> (TD)	Jumlah beban yang berhubungan dengan waktu yang dirasakan selama elemen pekerjaan dilakukan.
4	<i>Performance</i> (P)	Seberapa besar keberhasilan dan kepuasan seseorang terhadap hasil kerjanya.
5	<i>Frustration Level</i> (F)	Gabungan antara kerja mental dan kegiatan fisik yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan.
6	<i>Effort</i> (EF)	Perasaan tidak aman, cemas, dan terganggu, dibandingkan dengan perasaan aman dan nyaman saat melakukan pekerjaan.

Sumber: Hendrawan dan Hidayat, 2013

Pengisian kuesioner Nasa-TLX akan diawali tahap pembobotan, responden akan diminta untuk memilih satu dari dua kategori beban mental menurut mereka lebih menonjol dalam perkuliahan. Kuesioner Nasa-TLX akan mencakup 15 perbandingan berpasangan mewakili enam karakteristik stres mental. Setelah itu, jumlah penghitungan dari setiap dimensi ditentukan, dan nilainya mewakili bobot dimensi tersebut.

Pada tahap ini, responden akan diminta untuk menilai keenam dimensi beban mental tersebut pada skala 1 hingga 100 poin (Susetyo dkk. 2012). Penilaian bersifat subjektif, dan responden akan memberikan skala berdasarkan beban kerja yang mereka hadapi di tempat kerja (Widyanti dkk, 2013).

Setelah kuesioner diisi, langkah pengolahan data akan dimulai, yang meliputi perhitungan produk. Untuk mendapatkan nilai produk, kalikan rating dengan bobot faktor untuk setiap dimensi usaha mental.

$$Produk = Bobot \times Rating \quad (1)$$

Setelah itu akan dilakukan perhitungan *Weighted Workload* (WWL). WWL diperoleh dengan cara menjumlahkan keenam nilai produk.

$$Weighted Workload = \Sigma Produk \quad (2)$$

Laluskor akhir beban mental diperoleh dengan mengalikan bobot dengan rating setiap dimensi, kemudian dijumlahkan dan dibagi 15.

$$Skor Beban Mental = (\Sigma Bobot \times Rating) / 15 \quad (3)$$

Dalam metode Nasa TLX, skor beban kerja mental yang telah dihitung akan dikategorikan sesuai penjelasan pada Tabel 3 (Kim, 2016).

Tabel 3. Kategori Skor Beban Kerja Mental

Nilai Skor	Kategori Beban Kerja Mental
> 80	Beban kerja mental kategori berat (B)
50–80	Beban kerja mental kategori sedang (S)
< 50	Beban kerja mental kategori ringan (R)

Sumber: Kim, 2016

Setelah data diolah, akan dilakukan uji t untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan antara skor beban mental kuliah *hybrid* dan daring mahasiswa. Selain itu, untuk mengetahui keeratan hubungan antara kedua variabel dilakukan uji koefisien korelasi *rank spearman* (Sugiyono, 2013). Penelitian ini akan membandingkan besarnya beban kerja mahasiswa. Dengan variabel program studi dan jenis kelamin.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Uji Kecukupan Data

Uji kecukupan data dilakukan dengan tingkat keyakinan 95% dan derajat ketelitian 5%.

$$N' = \frac{\frac{k}{s} \sqrt{N \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2}}{\Sigma X} \quad (4)$$

$$N' = \frac{\frac{2}{0,05} \sqrt{84(514912,44) - 41860900}}{6470}$$

$$N' = 7,293$$

Nilai N' yang diperoleh 7,293 dan nilai tersebut < 83 atau $N' < N$. Hal tersebut menyatakan bahwasanya data dianggap cukup dan menggambarkan kondisi sampel sehingga tidak diperlukan adanya penambahan data.

3.2. Uji Keseragaman Data

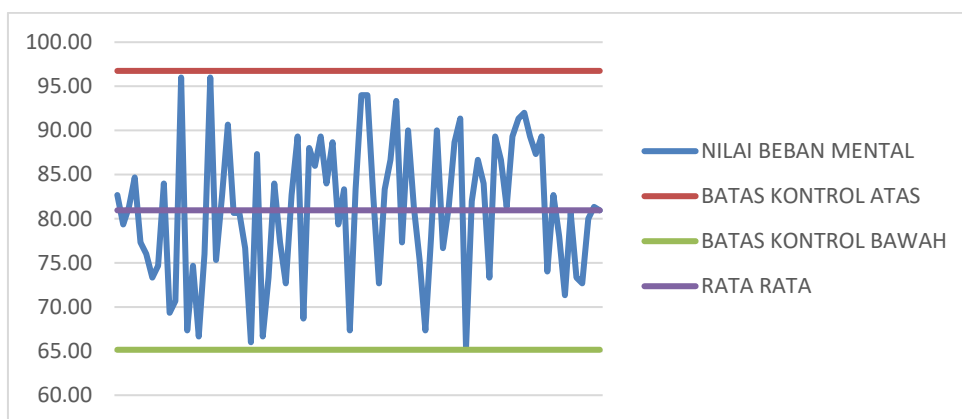
Uji keseragaman data dilakukan dengan tingkat kepercayaan 95%. Perhitungan nilai batas kontrol adalah sebagai berikut:

a. Beban Kerja Mental Daring

$\sigma = 7,89$

BAK = $80,95 + k\sigma (7,89)$
 $= 80,95 + 2 (7,89)$
 $= 96,75$

BKB = $80,95 - k\sigma (7,89)$
 $= 80,95 - 2 (7,89)$
 $= 65,15$



Gambar 1. Grafik Uji Keseragaman Data Kuliah Daring

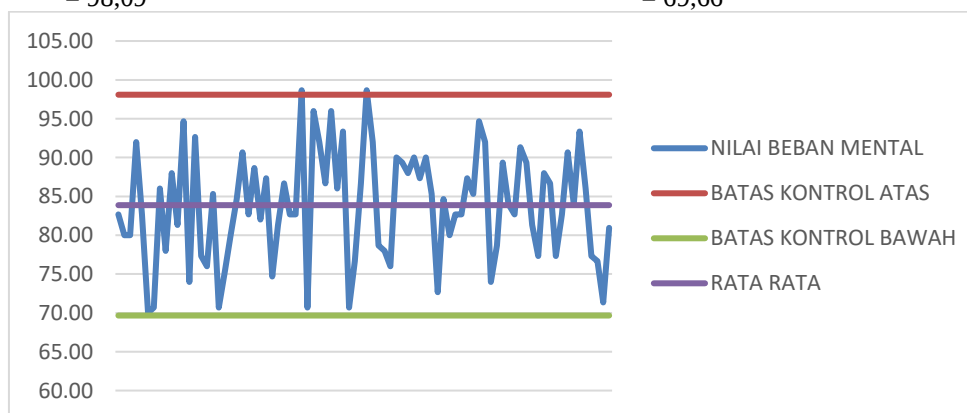
Berdasarkan Gambar 1, nilai terbesar dari skor Nasa-TLX adalah 96 dan nilai terkecilnya adalah 65,33. Nilai batas yang dihitung yaitu Batas Kontrol Atas adalah 96,75 dan nilai Batas Kontrol Bawah adalah 65,15. Data yang telah diolah menjadi skor beban kerja mental tersebut dapat dikatakan seragam karena masih berada di dalam *range* BKA dan BKB.

b. Beban Kerja Mental *Hybrid*

$\sigma = 7,10$

BAK = $X + k\sigma (5)$
 $= 83,97 + 2 (7,10)$
 $= 98,09$

BKB = $X + k\sigma (5)$
 $= 83,97 - 2 (7,10)$
 $= 69,66$



Gambar 2. Grafik Uji Keseragaman Data Kuliah *Hybrid*

Berdasarkan Gambar 2, nilai terbesar dari skor Nasa-TLX adalah 98,66 dan nilai terkecil adalah 70. Nilai batas yang dihitung yaitu Batas Kontrol Atas adalah 98,09 dan nilai Batas Kontrol Bawah adalah 69,66. Data yang telah

diolah menjadi skor beban kerja mental tersebut dapat dikatakan seragam karena masih berada di dalam *range* BKA dan BKB.

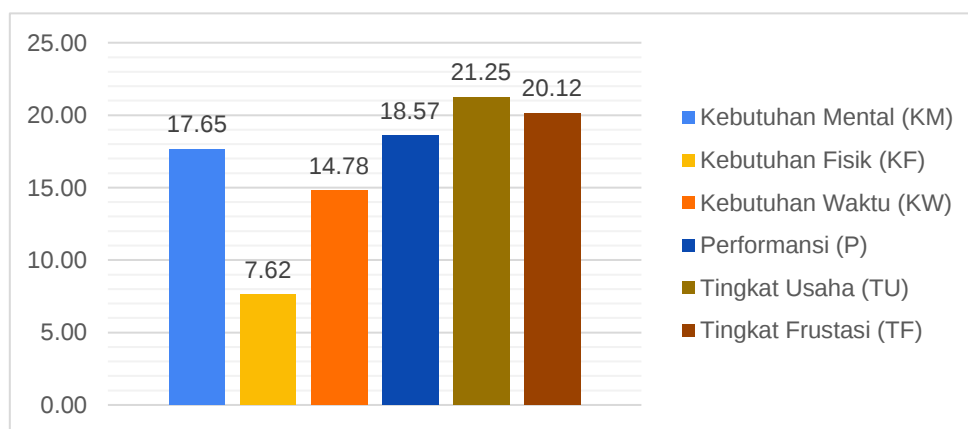
3.3. Perhitungan Nilai NASA-TLX Kuliah Daring

Berikut ini adalah hasil penilaian skor beban mental kuliah daring dari masing-masing responden yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Beban Mental Kuliah Daring

No	Weighted Workload	Skor	Ket	No	Weighted Workload	Skor	Ket	No	Weighted Workload	Skor	Ket
1	1090	72,67	S	30	1240	82,67	B	59	1340	89,33	B
2	1240	82,67	B	31	1190	79,33	S	60	1310	87,33	B
3	1340	89,33	B	32	1220	81,33	B	61	1340	89,33	S
4	1030	68,67	S	33	1270	84,67	B	62	1110	74,00	S
5	1320	88,00	B	34	1160	77,33	S	63	1240	82,67	B
6	1290	86,00	B	35	1140	76,00	S	64	1170	78,00	S
7	1340	89,33	B	36	1100	73,33	S	65	1070	71,33	S
8	1260	84,00	B	37	1120	74,67	S	66	1210	80,67	B
9	1330	88,67	B	38	1260	84,00	B	67	1100	73,33	S
10	1190	79,33	S	39	1040	69,33	S	68	1090	72,67	S
11	1250	83,33	B	40	1060	70,67	S	69	1200	80,00	B
12	1010	67,33	S	41	1440	96,00	B	70	1220	81,33	B
13	1250	83,33	B	42	1010	67,33	S	71	1380	92,00	S
14	1410	94,00	B	43	1120	74,67	S	72	1330	88,67	B
15	1410	94,00	B	44	1000	66,67	S	73	1370	91,33	B
16	1240	82,67	B	45	1140	76,00	S	74	980	65,33	S
17	1090	72,67	S	46	1440	96,00	B	75	1230	82,00	S
18	1250	83,33	B	47	1130	75,33	S	76	1300	86,67	B
19	1300	86,67	B	48	1240	82,67	B	77	1260	84,00	S
20	1400	93,33	B	49	1360	90,67	B	78	1100	73,33	S
21	1160	77,33	S	50	1210	80,67	B	79	1340	89,33	B
22	1350	90,00	B	51	1210	80,67	B	80	1300	86,67	B
23	1220	81,33	B	52	1150	76,67	S	81	1220	81,33	B
24	1130	75,33	S	53	990	66,00	S	82	1340	89,33	B
25	1010	67,33	S	54	1310	87,33	B	83	1370	91,33	B
26	1170	78,00	S	55	1000	66,67	S	Rata- Rata		80,95	B
27	1350	90,00	B	56	1100	73,33	S				
28	1150	76,67	S	57	1260	84,00	B				
29	1220	81,33	B	58	1160	77,33	S				

Nilai rata-rata beban kerja mental aktivitas kuliah daring sebesar 80,95 atau termasuk dalam kategori berat (B). Adapun proporsi masing-masing indikator dalam beban kerja mental dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan Persentase Indikator Beban Kerja Mental Kuliah Daring

Berdasarkan pengolahan data, indikator yang memiliki proporsi tertinggi dalam mempengaruhi beban kerja mental kuliah daring adalah Tingkat Usaha (TU) sebesar 21,25%. Indikator ini menunjukkan nilai yang tinggi berkaitan dengan usaha mahasiswa untuk mencapai target IPK pada semester tersebut. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa

dalam pelaksanaan kuliah daring mahasiswa harus melakukan usaha ekstra keras untuk memahami materi yang disampaikan secara *online* dan mengerjakan tugas serta mengikuti ujian agar bisa mendapatkan nilai IPK yang maksimal pada semester tersebut. Sedangkan indikator yang memiliki proporsi terkecil adalah Kebutuhan Fisik (KU) sebesar 7,62%. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa dalam pelaksanaan kuliah daring mahasiswa tidak membutuhkan aktivitas fisik yang besar saat mengikuti proses perkuliahan karena pelaksanaannya secara daring.

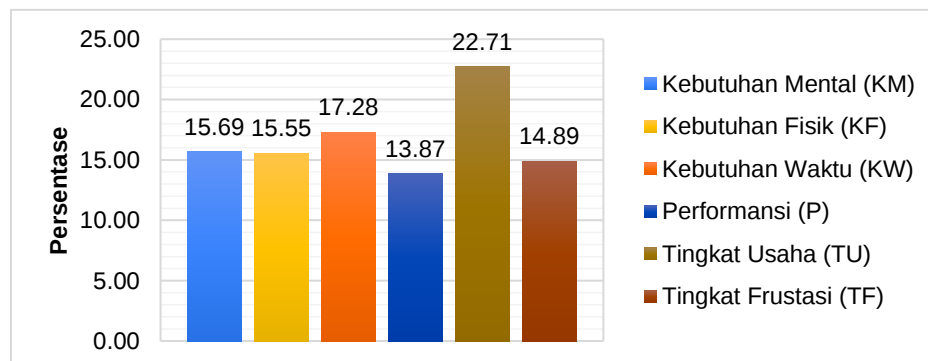
3.4 Perhitungan Nilai NASA-TLX Kuliah *Hybrid*

Berikut ini adalah hasil penilaian skor beban mental kuliah *hybrid* masing-masing responden.

Tabel 5. Nilai Beban Mental Kuliah *Hybrid*

No	Weighted Workload	Skor	Ket	No	Weighted Workload	Skor	Ket	No	Weighted Workload	Skor	Ket
1	1240	82,67	S	30	1240	82,67	B	59	1160	77,33	S
2	1240	82,67	B	31	1200	80,00	B	60	1320	88,00	B
3	1480	98,67	B	32	1200	80,00	B	61	1300	86,67	B
4	1060	70,67	B	33	1380	92,00	B	62	1160	77,33	S
5	1440	96,00	S	34	1240	82,67	B	63	1240	82,67	B
6	1380	92,00	B	35	1050	70,00	S	64	1360	90,67	B
7	1300	86,67	B	36	1060	70,67	S	65	1260	84,00	S
8	1440	96,00	B	37	1290	86,00	B	66	1400	93,33	B
9	1290	86,00	B	38	1170	78,00	S	67	1290	86,00	B
10	1400	93,33	B	39	1320	88,00	B	68	1160	77,33	S
11	1060	70,67	B	40	1220	81,33	B	69	1150	76,67	S
12	1150	76,67	S	41	1420	94,67	B	70	1070	71,33	S
13	1300	86,67	B	42	1110	74,00	S	71	1220	81,33	B
14	1480	98,67	B	43	1390	92,67	B	72	1240	82,67	B
15	1380	92,00	B	44	1160	77,33	S	73	1310	87,33	B
16	1180	78,67	B	45	1140	76,00	S	74	1280	85,33	B
17	1170	78,00	S	46	1280	85,33	B	75	1420	94,67	B
18	1140	76,00	S	47	1060	70,67	S	76	1380	92,00	B
19	1350	90,00	B	48	1130	75,33	S	77	1110	74,00	S
20	1340	89,33	B	49	1200	80,00	B	78	1180	78,67	S
21	1320	88,00	B	50	1270	84,67	B	79	1340	89,33	B
22	1350	90,00	B	51	1360	90,67	B	80	1260	84,00	B
23	1310	87,33	B	52	1240	82,67	B	81	1240	82,67	B
24	1350	90,00	B	53	1330	88,67	B	82	1370	91,33	B
25	1280	85,33	B	54	1230	82,00	B	83	1340	89,33	B
26	1090	72,67	S	55	1310	87,33	B	Rata- Rata		83,87	B
27	1270	84,67	B	56	1120	74,67	S				
28	1200	80,00	B	57	1220	81,33	B				
29	1240	82,67	B	58	1300	86,67	B				

Nilai rata-rata beban kerja mental kuliah *hybrid* sebesar 83,87 atau termasuk dalam kategori berat (B). Adapun proporsi masing-masing skala dalam beban kerja mental dapat dilihat pada Gambar 4.



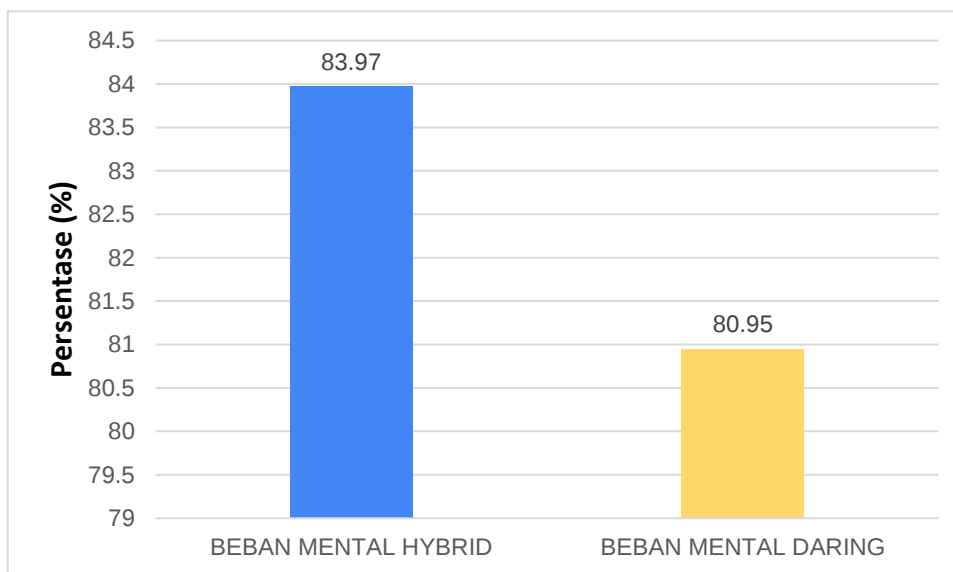
Gambar 4. Perbandingan Persentase Indikator Beban Kerja Mental Kuliah *Hybrid*

Berdasarkan pengolahan data, indikator yang memiliki proporsi tertinggi dalam mempengaruhi beban kerja mental kuliah daring adalah Tingkat Usaha (TU) sebesar 22,71%. Indikator ini berkaitan dengan tingkat usaha mahasiswa untuk mencapai target IPK pada semester tersebut. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa dalam pelaksanaan kuliah

hybrid mahasiswa harus melakukan usaha ekstra keras untuk memahami materi yang disampaikan secara *hybrid* dan mengerjakan tugas serta mengikuti ujian agar bisa mendapatkan nilai IPK yang maksimal. Menurut Garba dkk (2024), mahasiswa sering menghadapi hambatan seperti kurangnya interaksi langsung dengan dosen selama pembelajaran daring dan kebutuhan untuk menyeimbangkan waktu antara tugas daring dan persiapan sesi tatap. Sedangkan indikator yang memiliki proporsi terkecil adalah Performasi (P) sebesar 13,87%. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa dalam pelaksanaan kuliah *hybrid* mahasiswa tidak merasa puas dengan nilai IPK pada semester tersebut. Penelitian oleh Vitolo dan Issac (2023) menemukan bahwa tingkat kepuasan dan performa akademik dalam pembelajaran *hybrid* sangat bergantung pada dukungan yang diberikan institusi, seperti kualitas konten daring, keterlibatan dosen, dan desain pembelajaran yang mendukung kebutuhan mahasiswa.

3.5. Perbandingan Rata - Rata Beban Kerja Mental Kuliah Daring dan Hybrid

Perbandingan rata-rata beban kerja mental antara kuliah daring dan *hybrid* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan Rata-Rata Beban Kerja Mental Kuliah Daring dan Hybrid

Berdasarkan pengolahan data, dapat diketahui rata-rata beban kerja mental kuliah hybrid adalah 83,97 dan rata-rata beban kerja mental kuliah daring adalah 80,95. Terlihat bahwa, skor beban kerja mental kuliah hybrid lebih tinggi 3,02 daripada skor beban kerja mental kuliah daring. Perbedaan skor beban kerja mental (mental workload) dalam kuliah hybrid (83,97) dan daring (80,95) menunjukkan bahwa pembelajaran hybrid memerlukan upaya kognitif lebih tinggi. Hal ini disebabkan kompleksitas tugas yang dihadapi mahasiswa dalam pembelajaran hybrid, seperti beradaptasi dengan dua lingkungan pembelajaran yang berbeda (tatap muka dan daring), mengatur waktu secara lebih efisien, serta memahami materi dari berbagai media pembelajaran. Studi terbaru mendukung bahwa beban kerja mental lebih tinggi pada lingkungan hybrid karena kebutuhan multitasking dan transisi antara mode daring dan tatap muka (Vitolo dan Issac, 2023).

3.6. Uji t Dua Sampel Berpasangan

Dalam penelitian ini, dilakukan uji t untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata nilai beban kerja mental kuliah *hybrid* dan beban kerja mental kuliah daring yang hasilnya dilihat Tabel 6 di bawah.

Tabel 6. Hasil Uji t Dua Sampel Berpasangan

Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	Beban Kerja Hybrid - Beban Kerja Daring	4,5133	10,5691	1,1601	2,2055	6,8212	3,89	82	,000

Berdasarkan Uji t, diperoleh nilai sig sebesar 0,00 atau $< 0,05$ hingga disimpulkan adanya perbedaan yang signifikan antar nilai rata-rata beban kerja *hybrid* dan beban kerja daring. Hal ini dapat diinterpretasikan bahwa pelaksanaan metode perkuliahan yang berbeda tersebut menyebabkan perbedaan tingkat beban kerja mental yang dirasakan oleh mahasiswa.

3.7. Uji Korelasi Spearman

Uji korelasi dilakukan dengan metode uji korelasi spearman dengan tingkat signifikansi 5% untuk menguji korelasi variabel Program Studi dan Jenis Kelamin terhadap variabel Skor Beban Kerja Mental kuliah *hybrid* dan daring yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Uji Korelasi Spearman Kuliah *Hybrid*

No	Pasangan Variabel	Nilai Signifikansi (p)	Koefisien Korelasi (r)	Kesimpulan
1	Jenis Kelamin – Skor Beban Kerja Mental	0,04	0,316	Berkorelasi Signifikan
2	Program Studi – Skor Beban Kerja Mental	0,433	0,085	Tidak Berkorelasi

Berdasarkan uji korelasi spearman antara variabel Jenis Kelamin dengan variabel Skor Beban Kerja Mental pada kuliah *hybrid*, diperoleh nilai signifikansi senilai 0,04 atau $> 0,05$ hingga disimpulkan adanya korelasi signifikan antar variabel Jenis Kelamin dengan variabel Skor Beban Kerja Mental. Sedangkan pada hubungan antara variabel Program Studi dengan variabel Skor Beban Kerja Mental, nilai signifikansinya sebesar 0,433 atau $> 0,05$ sehingga diperoleh kesimpulan bahwa tidak ada korelasi signifikan antara variabel Program Studi dengan variabel Skor Beban Kerja Mental pada kuliah *hybrid*. Hal ini menunjukkan bahwa jenis program studi yang diambil mahasiswa tidak memengaruhi tingkat beban kerja mental mereka secara langsung dalam konteks pembelajaran *hybrid*. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya dari Garba dan Abdulhamid (2024) yang menyatakan bahwa beban kerja mental lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti desain pembelajaran, strategi pengajaran, kompleksitas tugas, dan kemampuan individu dalam mengelola beban kerja, daripada jenis program studi itu sendiri.

Tabel 8. Uji Korelasi Spearman Kuliah Daring

No	Pasangan Variabel	Nilai Signifikansi (p)	Koefisien Korelasi (r)	Kesimpulan
1	Jenis Kelamin – Skor Beban Kerja Mental	0,00	0,416	Berkorelasi Signifikan
2	Program Studi – Skor Beban Kerja Mental	0,586	0,061	Tidak Berkorelasi

Berdasarkan uji korelasi antara variabel Jenis Kelamin dengan variabel Skor Beban Kerja Mental pada kuliah daring, diperoleh nilai signifikansi senilai 0,00 atau $> 0,05$ sehingga disimpulkan adanya korelasi signifikan antara variabel Jenis Kelamin dengan Variabel Beban Kerja Mental pada kuliah daring. Sedangkan pada hubungan antara variabel Program Studi dengan Skor Beban Kerja Mental kuliah daring, diperoleh nilai signifikansinya sebesar 0,586 atau $> 0,05$ sehingga dapat disimpulkan tidak ada korelasi signifikan antara variabel Program Studi dengan Beban Kerja Mental kuliah daring. Hal tersebut menunjukkan bahwa jenis program studi yang diambil oleh mahasiswa tidak menjadi faktor utama memengaruhi tingkat beban kerja mental pada pembelajaran daring. Hal ini mencerminkan bahwa faktor-faktor lain, seperti desain pembelajaran daring, kompetensi digital mahasiswa, serta pengalaman penggunaan teknologi, lebih berperan dalam menentukan tingkat beban kerja mental. Penelitian oleh (Vitolo dan Issac, 2023) menemukan bahwa perbedaan tingkat beban kerja mental pada pembelajaran daring lebih berkaitan dengan kompetensi digital mahasiswa, seperti kemampuan pengoperasian perangkat lunak, mengelola informasi, dan menghadapi gangguan teknis, yang tidak selalu berbeda berdasarkan program studi.

Kesimpulan

Menurut penelitian ini, terdapat perbedaan nilai sebesar 3,02 antara kedua metode pembelajaran daring dan *hybrid* dalam beban kerja mental. Hasil uji t menyatakan bahwasanya nilai beban kerja mental aktivitas kuliah *daring* secara signifikan lebih rendah daripada kuliah *hybrid*, dengan rata-rata 83,87 (kategori berat) dan 80,95 (kategori berat). Berdasarkan Uji korelasi spearman, terdapat korelasi signifikan antara variabel jenis kelamin dan variabel skor beban kerja mental kuliah daring dan *hybrid* namun tidak terdapat korelasi signifikan antara variabel program studi dan variabel nilai dari variabel skor beban kerja mental kuliah daring dan *hybrid*. Penelitian lanjutan dapat dilakukan untuk mengukur tingkat beban kerja mental mahasiswa pada kuliah luring sehingga dapat diperoleh perbandingan antara kuliah luring, daring dan *hybrid*.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih saya sampaikan untuk Kemdikbudristek yang telah mendanai pelaksanaan penelitian ini melalui program hibah penelitian dosen pemula tahun 2022 serta pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan penelitian ini khususnya civitas akademika Universitas Muhammadiyah Bandung.

Daftar Notasi

B = Beban Kerja Mental Kategori Berat
S = Beban Kerja Mental Kategori Sedang
R = Beban Kerja Mental Kategori Ringan
WWL = *Weighted Workload*
EF = *Effort*
MD = *Mental Demand*

TD = Temporal Demand
PD = Physical Demand
F = Frustration Level
P = Performance
N = Jumlah data yang dikumpulkan
N' = Batas Kecukupan data
BKA = Batas Kontrol Atas
BKB = Batas Kontrol Bawah
 σ = Standar Deviasi
p = Nilai Signifikansi
r = Koefisien Korelasi

Daftar Pustaka

- Bower, M., Dalgarno, B., Kennedy, G. E., Lee, M. J., & Kenney, J. (2015). Design and implementation factors in blended synchronous learning environments: Outcomes from a cross-case analysis. *Computers & Education*. 2015; March 13;86;1-17.
- Febrilliandika, B., Nasution, A. E. (2020). Pengukuran beban kerja mental kuliah daring mahasiswa teknik industri usu dengan metode Nasa-TLX. *Seminar dan Konferensi Nasional IDEC*. 2020; Nov 2.
- Garba, Sani Alhaji, dan Lawan Abdulhamid. (2024) "Students' Instructional Delivery Approach Preference for Sustainable Learning amidst the Emergence of Hybrid Teaching Post-Pandemic." *Sustainability*, vol. 16, no. 17, 6 Sept. 2024, p. 7754, <https://doi.org/10.3390/su16177754>. Accessed 26 Oct. 2024.
- Gunawan, G., Suranti, N. M. Y., Fathoroni, F. (2020). Variations Of Models And Learning Platforms For Prospective Teachers During The Covid-19 Pandemic Period. *Indonesian Journal of Teacher Education*. 2020; Apr 25;1(2);61-70.
- Hasibuan, C. F., Banjarnahor, M. (2019). Analisis beban kerja mental pada pekerja di pt xyz dengan menggunakan Nasa-TLX. *Jurnal Ergonomi dan K3*. 2019; 4(1);24-8.
- Hendrawan, B., Ansori, dan M., Hidayat, R/ (2013).Pengukuran dan Analisis Beban Kerja Pegawai Bandara Hang Nadim. *Jurnal Akuntansi, Ekonomi Dan Manajemen Bisnis*. 2013; July;1(1);55–67.
- Hoi, S. C. H., Sahoo, D., Lu, J., & Zhao, P. (2021). Online learning: A comprehensive survey. *Neurocomputing*. 2021; Oct 12;459;249-89.
- Hrastinski, S. (2019). What do we mean by blended learning? *TechTrends*, 63(5), 564–569. DOI: 10.1007/s11528-019-00375-5
- Kemendikbud. (2021). Perkuliahan dapat dilakukan secara tatap muka dan dalam jaringan tahun 2021. 2021 [cited 2022 Jan 18] Available from: <https://www.kemdikbud.go.id/main/blog/2020/12/perkuliahan-dapat-dilakukan-secara-tatap-muka-dan-dalam-jaringan-tahun-2021>.
- Kim, I. J. (2016). Cognitive ergonomics and its role for industry safety enhancements. *Journal of Ergonomics*. 2016; Jan;6(4);01-17.
- Kusnayat A Watnaya, M. hifzul Muiz, Nani Sumarni, A. salim Mansyur, dan Q. Yulianti Zaqiah. (2020) "Pengaruh Teknologi Pembelajaran Kuliah Online Di Era Covid-19 dan Dampaknya Terhadap Mental Mahasiswa," *EduTeach : Jurnal Edukasi dan Teknologi Pembelajaran*, vol. 1, no. 2, pp. 153–165, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.37859/eduteach.v1i2.1987>
- Qonita. (2021) "Kontribusi Konsep Diri Akademik Terhadap Keterlibatan Mahasiswa Dalam Perkuliahan Daring yang Dimediasi Stres Akademik," S1 thesis, Universitas Pendidikan Indonesia,[Online]. Available: <http://repository.upi.edu/59978/>. [Accessed: Feb. 17, 2024]
- Marliani, R. (2021)"Perbandingan Motivasi Belajar Siswa Saat Pembelajaran Tatap Muka dan Saat Pembelajaran Daring Masa Pandemi COVID-19 di SMK Negeri 1 Sumedang," S1 thesis, Universitas Pendidikan Indonesia, 2021. Available: https://repository.upi.edu/66608/1/S_TA_1700730_Title.pdf. [Accessed: Feb. 17, 2024]
- Sugiyono. (2013). Metode penelitian pendidikan pendekatan kuantitatif, kualitatif dan r&d. Bandung. Alfabeta, 2013.
- Susetyo Joko, Oesman Titin Isna, Sudharman Sigit T. (2012). Pengaruh shift kerja terhadap kelelahan karyawan dengan metode bourdon wiersma dan 30 items of rating scale. *Jurnal Teknologi*. 2012; 5(1),
- Widyanti, A., Johnson, A., Waard, D. De. (2013). Adaptation of the rating scale mental effort (RSME) for use in Indonesia. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2013; Jan; 43(1);70–76.
- Yudhistira, A Gisya., Milana, A Fitri. (2021). Pengukuran beban kerja mental mahasiswa universitas xyz yogyakarta pada saat e-learning. *Seminar dan Konferensi Nasional IDEC*. 2021.
- Vitolo, K., dan Isaac, Ph.D., L. (2023). The Impact of Hybrid Learning on College Students' Attention. *Journal of Student Research*, 11(4). <https://doi.org/10.47611/jsr.v11i4.1771>

Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (*Sheet Pile*) Dermaga yang Tidak Sesuai *Detail Engineering Design* (DED)

Farid Irawan¹, Agus Sulaeman¹, dan Xbal Meiprasetyo²

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

farid.irw@gmail.com, agussulaeman@lecture.unjani.ac.id, xbal.meiprasetyo@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Dermaga merupakan suatu bangunan pelabuhan yang digunakan untuk merapat dan menambatkan kapal yang melakukan bongkar muat barang dan menaik-turunkan penumpang. konstruksi pada tebing dermaga harus direncanakan sekuat mungkin supaya kapal bisa berlabuh dengan aman. Pada perkuatan tebing yang digunakan dalam proyek dermaga adalah konstruksi berbentuk *sheet pile*. Dalam merencanakan *sheet pile* yang perlu diperhatikan adalah kedalaman *sheet pile* dan jenis tanah. Dalam pembangunan dermaga terdapat kendala pada pelaksanaan pengerjaan konstruksi perkuatan stabilitas dermaga, di mana konstruksi yang di aplikasikan pada lapangan tidak sesuai dengan desain yang sudah di rencanakan pada *Detail Engineering Design* (DED). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah perkuatan tersebut memenuhi kriteria dan persyaratan untuk meminimalisir kegagalan konstruksi pada dermaga, salah satunya dilakukan rekayasa sipil berupa analisis ulang perkuatan stabilitas perkuatan yang sudah direalisasikan pada lapangan. Metode dari penelitian ini yaitu menghitung stabilitas perkuatan pada dermaga dengan perkuatan *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP), *Concrete Sheet Pile* (CSP), dan Tie Rod dengan perhitungan dan analisis menggunakan program Plaxis.

Kata kunci: Dermaga, Stabilitas Perkuatan, *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP), *Concrete Sheet Pile* (CSP), Tie Rod.

Abstract

A wharf is a key infrastructure at a port that functions as a place for ships to dock and moor while conducting the loading and unloading of cargo, as well as passenger activities. The structural integrity of the wharf, especially along the bank, must be carefully designed to ensure ships can anchor securely. In pier construction, slope reinforcement is often done using sheet piles. When designing sheet piles, important factors such as pile depth and soil type must be considered. However, in practice, challenges arise when the construction in the field does not align with the specifications outlined in the *Detail Engineering Design* (DED), potentially compromising the wharf's stability. This research aims to determine whether the reinforcement already implemented meets safety standards and technical requirements to prevent structural failure. A civil engineering approach is applied by reanalyzing the stability of existing reinforcements. The method involves evaluating the strength of the pier structure using various reinforcement types, including *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP), *Concrete Sheet Pile* (CSP), and Tie Rods. These evaluations are carried out through numerical calculations and structural analysis using the Plaxis program to simulate performance and ensure the design's reliability under both normal and seismic conditions.

Keywords: Ship dock, Reinforcement Stability, *Corrugated Concrete Sheet Pile* (CCSP), *Concrete Sheet Pile* (CSP), Tie Rod

1. Pendahuluan

Dermaga adalah bagian dari pelabuhan yang di bangun untuk menghubungkan antara darat dengan laut atau sungai dan terdiri dari balok, pelat lantai dan tiang pancang untuk mendukung bangunan di atas dermaga. Dalam pembangunan dermaga terdapat kendala dalam pelaksanaan pengerjaan konstruksi perkuatan lereng, dimana konstruksi yang di aplikasikan pada lapangan tidak sesuai dengan desain yang sudah direncanakan. Sebelumnya. Berdasarkan permasalahan tersebut studi penelitian ini melakukan analisis terhadap perkuatan stabilitas dinding penahan tanah pada suatu dermaga yang dilakukan secara komputerisasi menggunakan *Software Plaxis*. sehingga dengan uraian yang telah dikemukakan diatas penulis melakukan penelitian ini dengan judul “Analisis Perkuatan Stabilitas Struktur Dinding Penahan Tanah (*Sheet Pile*) Dermaga yang Tidak Sesuai *Detail Engineering Design* (DED)” guna menganalisa dan memastikan kembali aplikasi di lapangan aman dan tidak bermasalah di kemudian hari.

Pokok permasalahan pada penelitian ini berkaitan dengan analisis perkuatan stabilitas dinding penahan tanah pada dermaga yang tidak sesuai DED antara lain: bagaimana hasil pelaksanaan perkuatan dan pengecekan stabilitas dinding penahan tanah pada dermaga sesuai dengan kondisi di lapangan, bagaimana hasil analisa stabilitas *Tie Rod* dan *Concrete Sheet Pile* (CSP) yang tidak sesuai *Detail Engineering*

Info Makalah:

Dikirim : 06-05-23;
Revisi 1 : 08-01-24;
Revisi 2 : 10-28-24;
Diterima : 02-13-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -
e-mail : agussulaeman@lecture.unjani.ac.id

Design (DED), bagaimana hasil analisa pelaksanaan perkuatan stabilitas (kedalaman dan kemiringan) dinding penahan tanah pada dermaga yang tidak sesuai dengan *Detail Engineering Design (DED)*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui stabilitas perkuatan dermaga pada lapangan dengan memberikan beberapa alternatif perkuatan.

1.1. Dinding Penahan Tanah

Dinding penahan tanah (*Retaining wall*) adalah suatu bangunan yang dibangun untuk mencegah keruntuhan tanah yang curam atau lereng yang dibangun di tempat dimana kemantapannya tidak dapat dijamin oleh lereng tanah itu sendiri, dipengaruhi oleh kondisi gambaran topografi tempat itu. Bila jalan dibangun berbatasan dengan sungai atau danau tanah paya, dinding penahan itu dibangun untuk melindungi kemiringan tanah dan melengkapi kemiringan dengan fondasi yang kokoh. Dinding penahan tipe kantilever dibuat dari beton bertulang yang tersusun dari suatu dinding vertikal dan tapak lantai. Masing-masing berperan sebagai balok atau pelat kantilever. Dinding penahan tanah massa (*Gravity Retaining Wall*) digunakan untuk menahan tekanan tanah lateral pada tebing-tebing yang landai. (Nazir, Muhammad Shahid et al. 2018).

1.2. Stabilitas Lereng

Lereng adalah bidang miring tanah yang menghubungkan permukaan tanah dengan elevasi yang lebih tinggi dengan permukaan tanah dengan elevasi yang lebih rendah, lereng dapat terbentuk secara alamiah maupun dengan bantuan manusia

(Ciptaning dkk., 2018). Faktor keamanan lereng yang disyaratkan untuk analisis kestabilan lereng tanah menurut SNI Perancangan Geoteknik 8460-2017 digunakan untuk mengidentifikasi stabilitas lereng yang didefinisikan sebagai perbandingan antara kuat geser tanah (τ_f) dan tegangan geser (τ_d) yang bekerja pada massa tanah.

$FK > 1.5$ menunjukkan lereng stabil;

$FK < 1.5$ menunjukkan lereng tidak stabil; dan

$FK = 1.5$ menunjukkan lereng dalam kondisi keseimbangan batas kritis.

1.3. Sheet Pile

Dinding penahan tanah *Sheet Pile* adalah dinding vertikal relatif tipis yang berfungsi kecuali untuk menahan tanah juga berfungsi untuk menahan masuknya air ke dalam lubang galian. *Sheet pile* merupakan salah satu jenis *retaining wall*. *Sheet Pile* sendiri terbuat dari beberapa bahan yaitu baja, beton, kayu atau *Sheet pile* dari plastik yang berhubungan satu sama lainnya membentuk sebuah dinding kontinu sepanjang tebing saluran karena pemasangan yang mudah dan biaya pelaksanaan yang relatif murah, *Sheet Pile* banyak digunakan pada pekerjaan-pekerjaan seperti: penahan tebing galian sementara, bangunan-bangunan di pelabuhan, dinding penahan tanah, bendungan elak dan lain-lain. (Anbya, Yasinta dkk., 2015).

1.4. Bored Pile

Bored pile adalah suatu pondasi yang dipasang dengan cara mengebor tanah dengan diameter tertentu hingga mencapai kedalaman yang sudah ditentukan, kemudian tulangan baja yang telah dirakit dimasukkan ke dalam lubang bor tersebut dan dilanjutkan dengan pengisian agregat material beton ke dalam lubang. *Bored pile* digunakan apabila lokasi pekerjaan memiliki sifat tanah yang kokoh/stabil sehingga mempunyai daya dukung besar dengan kedalaman kurang lebih 15 meter. (Putranto dkk., 2017).

1.5. Tie Rod

Tie rod berfungsi sebagai perletakan dan penyangga *sheet pile* sehingga ujung atasnya dalam posisi terjepit (tidak balok bebas). Umumnya, *Tie rod* dibuat dengan menggunakan besi beton yang disambungkan pada plat besi dan as drat. *Tie rod* paling banyak digunakan dan umumnya dipasang dengan kombinasi adanya dinding angker. Namun sistem *Tie rod* ini dapat dipasang sendirian ataupun dalam jumlah lebih dari satu dan tanpa adanya *deadman* angker. *Tie rod* ini ditempatkan di tengah-tengah lekukan penampang *Sheet pile*, pada setiap interval 2 lembaran atau 4 lembaran jadi spasinya antara 0,8 m hingga 2 m bergantung pada ukuran per lembar *Sheet pile*. (Alfianty, Desi dkk., 2019).

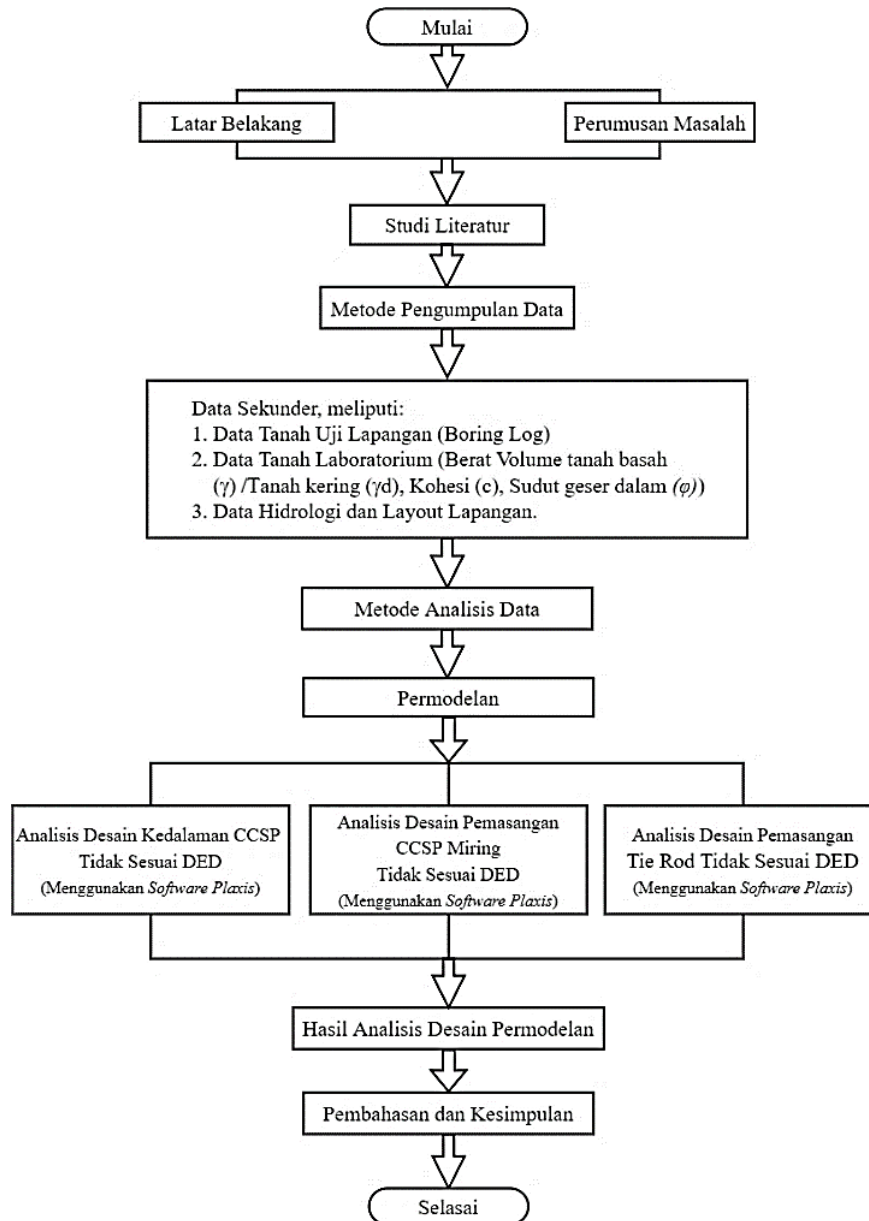
1.6. Detail Engineering Design (DED)

Detail Engineering Design (DED) adalah produk perencanaan (detail gambar kerja) yang dibuat oleh konsultan perencanaan untuk pekerjaan bangunan sipil seperti gedung, kolam renang, jalan, jembatan, bendungan, dan pekerjaan konstruksi lainnya. Selain sebagai rencana gambar kerja, DED juga bisa digunakan sebagai pedoman dalam pelaksanaan perawatan dan perbaikan sebuah gedung atau bangunan. Proyek yang membutuhkan DED pada umumnya merupakan proyek EPC (*Engineering, Procurement, dan Construction*), dimana yang dimaksud EPC sendiri yaitu sistem proyek pembangunan berbasis proses dengan lingkup tanggung jawab kegiatan pada teknik, pengadaan dan bangunan yang dilaksanakan oleh suatu unit usaha atau perusahaan kontraktor. Perusahaan kontraktor

di bidang EPC tersebut, dapat memulai pekerjaan dari tahap atau pada tahap penyusunan DED (*Detail Engineering Design*). (Lamudi.co.id/journal., 2023)

2. Metode

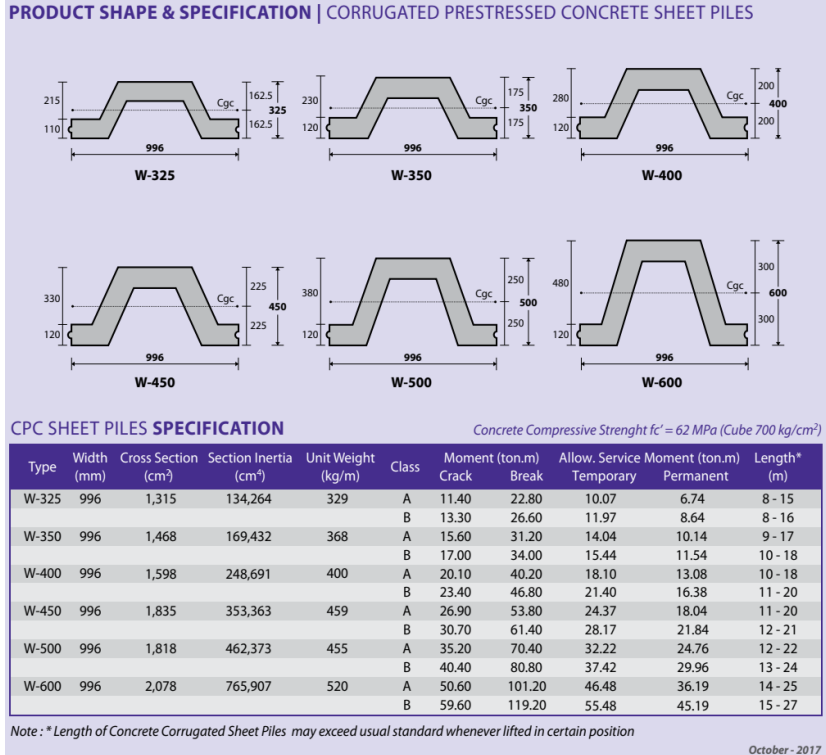
2.1. Tahapan Penelitian



Gambar 1. Bagan Alur Pikir Penelitian

2.2. Kriteria Desain

Dalam kegiatan analisis perkuatan struktur stabilitas tanah (*Sheet Pile*) dermaga harus bertujuan aman dan ekonomis. Metode analisis untuk stabilitas struktur dermaga tidak terlepas dari pengetahuan mengenai mekanisme keruntuhan, jenis material dan beban yang direncanakan pada perkuatan tersebut. Kondisi tersebut menentukan batasan-batasan dari penerapan metode yang dipilih. Umur rancangan dari masa layan dermaga *Dumping 1 Section* sisi timur adalah 50 tahun berdasarkan (Dokumen *Desain and Build Section Dumping 1*). Beban rencana yang diinput pada pemodelan adalah beban merata sebesar 15 kPa berdasarkan (Dokumen *Desain and Build Section Dumping 1*). Analisis perkuatan terhadap stabilitas *sheet pile Section Dumping 1* Sisi Timur akan menggunakan tipe *sheet pile* yaitu W-600-A1000, CSP 600T100 mm dan angkur *pile* CSP 500 T90 mm. Keseluruhan *properties* material bersumber dari tabel *product* material, berikut adalah tabel material *properties* yang digunakan di lapangan baik jenis material *Sheet pile* maupun CSP:



Gambar 2. Product Shape and Spesification Sheet Pile – W-600 A1000

PRESTRESSED CONCRETE PRETENSION SPUN PILES SPECIFICATION
Concrete Compressive Strength $f'_c = 52 \text{ MPa}$ (Cube 600 kg/cm^2)

Size (mm)	Thickness Wall (t)	Cross Section (cm^2)	Section Inertia (cm^4)	Unit Weight (kg/m)	Class	Bending Moment		Allowable Compression (ton)	Decompression Tension (ton)	Length of Pile ** (m)
						Crack * (ton.m)	Break (ton.m)			
300	60	452.39	34,607.78	113	A2	2.50	3.75	72.60	23.11	6 - 12
					A3	3.00	4.50	70.75	29.86	6 - 13
					B	3.50	6.30	67.50	41.96	6 - 14
					C	4.00	8.00	65.40	49.66	6 - 15
					A1	3.50	5.25	93.10	30.74	6 - 13
350	65	581.98	62,162.74	145	A3	4.20	6.30	89.50	37.50	6 - 14
					B	5.00	9.00	86.40	49.93	6 - 15
					C	6.00	12.00	85.00	60.87	6 - 16
					A2	5.50	8.25	121.10	38.62	6 - 14
					A3	6.50	9.75	117.60	45.51	6 - 15
400	75	765.76	106,488.95	191	B	7.50	13.50	114.40	70.27	6 - 16
					C	9.00	18.00	111.50	80.94	6 - 17
					A1	7.50	11.25	149.50	39.28	6 - 14
					A2	8.50	12.75	145.80	53.39	6 - 15
					A3	10.00	15.00	143.80	66.57	6 - 16
450	80	929.91	166,570.38	232	B	11.00	19.80	139.10	78.84	6 - 17
					C	12.50	25.00	134.90	100.45	6 - 18
					A1	10.50	15.75	185.30	54.56	6 - 15
					A2	12.50	18.75	181.70	68.49	6 - 16
					A3	14.00	21.00	178.20	88.00	6 - 17
500	90	1,159.25	255,324.30	290	B	15.00	27.00	174.90	94.13	6 - 18
					C	17.00	34.00	169.00	122.04	6 - 19
					A1	17.00	25.50	252.70	70.52	6 - 16
					A2	19.00	28.50	249.00	77.68	6 - 17
					A3	22.00	33.00	243.20	104.94	6 - 18
600	100	1,570.80	510,508.81	393	B	25.00	45.00	238.30	131.10	6 - 19
					C	29.00	58.00	229.50	163.67	6 - 20
					A1	40.00	60.00	415.00	119.34	6 - 20
					A2	46.00	69.00	406.10	151.02	6 - 21
					A3	51.00	76.50	399.17	171.18	6 - 22
800	120	2,563.54	1,527,869.60	641	B	55.00	99.00	388.61	215.80	6 - 23
					C	65.00	130.00	368.17	290.82	6 - 24
					A1	75.00	112.50	613.52	169.81	6 - 22
					A2	82.00	123.00	601.27	215.16	6 - 23
					A3	93.00	139.50	589.66	258.19	6 - 24
1000 ***	140	3,782.48	3,589,571.20	946	B	105.00	189.00	575.33	311.26	6 - 24
					C	120.00	240.00	555.23	385.70	6 - 24
					A1	120.00	180.00	802.80	221.30	6 - 24
					A2	130.00	195.00	794.50	252.10	6 - 24
					A3	145.00	217.50	778.60	311.00	6 - 24
1200 ***	150	4,948.01	6,958,136.85	1,237	B	170.00	306.00	751.90	409.60	6 - 24
					C	200.00	400.00	721.50	522.20	6 - 24
					A1	120.00	180.00	802.80	221.30	6 - 24
					A2	130.00	195.00	794.50	252.10	6 - 24
					A3	145.00	217.50	778.60	311.00	6 - 24

Note : *) Crack Moment Based on JIS A 5335-1987 (Prestressed Spun Concrete Piles)
**) Length of pile may exceed usual standard whenever lifted in certain position
***) Type of Shoe for Bottom Pile is Mamira Shoe

Unit Conversion : 1 ton = 9.8060 kN

Gambar 3. Material CSP

2.3. Analisis Desain Stabilitas Perkuatan

Stabilitas perkuatan yang akan digunakan dalam Pengecekan Ketidaksesuaian pekerjaan dengan DED dalam pelaksanaan stabilitas perkuatan tanah Dermaga Benoa ini adalah *Sheet Pile* CCSP W600 A1000 mm dengan variasi kedalaman dan kemiringan yang berbeda. Analisis yang dilakukan akan dimodelkan dalam bentuk Mohr-Coulomb. Model Mohr-Coulomb menggunakan 5 parameter yaitu kohesi (c) dan sudut geser (ϕ) untuk menggambarkan *plastisitas* tanah, *Modulus Young* (E) dan *poisson ratio* (ν) untuk menggambarkan elastisitas tanah, sudut dilatasi (ψ) dari tanah dan γ_{sat} serta γ_{unsat} untuk menggambarkan berat isi dari tanah. Pada model Mohr-Coulomb setiap lapisan tanah dimodelkan dengan sebuah nilai kekakuan rata-rata yang konstan. Dengan nilai kekakuan yang konstan tersebut, maka perhitungan cenderung cepat dan dapat diperoleh perkiraan awal dari bentuk deformasi dari pemodelan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data Tanah

Data yang digunakan dalam kegiatan analisis perkuatan stabilitas struktur dinding penahan tanah (*Sheet Pile*) dermaga yang tidak sesuai dengan *Detail Engineering design (DED)* di Kota Denpasar Bali yaitu berupa data sondir, logbore/bor dalam dan data laboratorium.

Project

Location

Borelog

Elevation

Date

: PELABUHAN BENOA (AREA DUMPING 1)

: BENOA - BALI

: BHL-03 (SISI KOLAM DERMAGA PERIKANAN)

: + 1.60 mLWS

:

C1 : Clay (very soft to soft)

C2 : Clay (medium to hard)

c : Clay (based on laboratory)

S : Sand

M : Silt

Input and Laboratorium Parameters

Depth (m)			Soil Type	PI	c _u or c (<i>f_{lab}</i>)	OCR	E _u /c _u (<i>lab</i>)	K _x	K _y
				%	kN/m ²			m/day	
0.0	-	2.0	Fine to Coarse Sand	-	12	-	-	3.4560000	3.4560000
2.0	-	4.0	Very Soft Clay	-	-	-	-	0.0000864	0.0000864
4.0	-	6.0	Fine to Coarse Sand	-	11	-	-	3.4560000	3.4560000
6.0	-	8.0	Very Dense Sand	-	-	-	-	3.4560000	3.4560000
8.0	-	10.0	Soft Clay	-	-	-	-	0.0000864	0.0000864
10.0	-	12.0	Very Soft Clay	-	-	-	-	0.0000864	0.0000864
12.0	-	14.0	Very Stiff Clay	-	-	-	-	0.0000864	0.0000864
14.0	-	16.0	Very Stiff Clay	28	22	1.53	962	0.0000864	0.0000864
16.0	-	18.0	Very Dense Sand	-	-	-	-	3.4560000	3.4560000
18.0	-	20.0	Very Dense Sand	-	-	-	-	3.4560000	3.4560000
20.0	-	22.0	Limestone and Clay	22	20	1.00	1050	0.0000864	0.0000864
22.0	-	24.0	Very Dense Sand	-	-	-	-	3.4560000	3.4560000
24.0	-	26.0	Very Dense Sand	-	-	-	-	3.4560000	3.4560000
26.0	-	28.0	Loose Sand	-	15	-	-	3.4560000	3.4560000
28.0	-	30.0	Fine Sand	-	-	-	-	3.4560000	3.4560000

Recommendation Parameters

Depth (m)			Soil Type	N - SPT	Symbol	Undrained B			Undrained A & Drained				γ _{sat}	γ _{unsat}	
						c _u	φ	E _u	ν	c	φ'	E _d			ν'
						kN/m ²		kN/m ²		kN/m ²		kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	
0.0	-	2.0	Fine to Coarse Sand	5	S	17	30	5000	0.25	17	30	5000	0.15	17.20	17.20
2.0	-	4.0	Very Soft Clay	1	C1	5	-	1500	0.35	5	23	1200	0.20	15.40	15.40
4.0	-	6.0	Fine to Coarse Sand	9	S	35	30	9000	0.25	35	30	9000	0.15	17.80	17.80
6.0	-	8.0	Very Dense Sand	50	S	80	44	50000	0.25	80	44	50000	0.15	22.00	22.00
8.0	-	10.0	Soft Clay	4	C1	20	-	6000	0.35	6	27	4800	0.20	15.90	15.90
10.0	-	12.0	Very Soft Clay	1	C1	5	-	1500	0.35	5	23	1200	0.20	15.40	15.40
12.0	-	14.0	Very Stiff Clay	24	C2	156	-	46800	0.25	36	37	37440	0.20	19.00	19.00
14.0	-	16.0	Very Stiff Clay	16	C	80	-	20000	0.25	22	34	16000	0.20	17.20	17.20
16.0	-	18.0	Very Dense Sand	38	S	53	41	38000	0.25	53	41	38000	0.15	20.60	20.60
18.0	-	20.0	Very Dense Sand	50	S	80	44	50000	0.25	80	44	50000	0.15	22.00	22.00
20.0	-	22.0	Limestone and Clay	24	C	120	-	30000	0.25	20	36	24000	0.20	19.10	19.10
22.0	-	24.0	Very Dense Sand	50	S	80	44	50000	0.25	80	44	50000	0.15	22.00	22.00
24.0	-	26.0	Very Dense Sand	25	S	40	37	25000	0.25	40	37	25000	0.15	18.70	18.70
26.0	-	28.0	Loose Sand	6	S	24	33	6000	0.25	24	33	6000	0.15	17.60	17.60
28.0	-	30.0	Fine Sand	10	S	16	31	10000	0.25	16	31	10000	0.15	16.50	16.50

Gambar 4. Parameter Tanah yang Digunakan untuk Pemodelan

3.2. Korelasi Parameter Tanah

Korelasi pada penelitian ini yaitu dengan bantuan grafik maupun tabel yang dibuat oleh para ahli tanah. Penelitian ini melihat sebaran data dan bentuk hubungan antara nilai N-SPT dengan parameter-parameter yang dipakai untuk analisis stabilitas lereng. Analisis korelasi ini diperlukan untuk melengkapi data-data yang kurang, dengan menghubungkan antara dua variabel agar mengetahui nilai yang belum diketahui seperti:

- 1) Nilai modulus elastisitas ditentukan dengan korelasi hasil pengujian lapangan SPT terhadap tanah berdasarkan tabel dari Bowles.
- 2) Konsistensi tanah sama dengan SPT terhadap tanah berdasarkan tabel dari Meyerhoff.
- 3) Nilai kuat geser (*shear strength*) didapatkan dengan korelasi SPT berdasarkan persamaan dari Terzaghi dengan rumus $(2/3 \times N)$.
- 4) Nilai *poisson ratio* ditentukan dengan korelasi hasil pengujian lapangan SPT terhadap tanah lempung dan pasir berdasarkan tabel.
- 5) Berat volume tanah didapatkan dengan korelasi hasil pengujian lapangan SPT terhadap tanah tabel dari Terzaghi dan Peck.
- 6) Nilai sudut geser dalam ditentukan dengan korelasi nilai SPT dengan grafik sudut geser dari Terzaghi atau menghitungnya dengan persamaan $\Phi = \sqrt{12N} + 15$.

Dimana untuk menentukan *Undrained Shear Strength* untuk *cohesive soils* dan diusulkan untuk menggunakan:

$C_u = 6,5 \text{ N (kN/m}^2) \rightarrow \text{Lempung}$

$C_u = 3,002 \text{ N (kN/m}^2) \rightarrow \text{Lempung Pasiran}$

Dengan: $C_u = \text{Undrained Shear Strength}$ Berdasarkan hasil review *Danish code of practice foundation* untuk analisa nilai C_u kondisi Undrained menjadi kondisi c' kondisi Drained adalah sebesar $(c' = 0,1 - 0,2 C_u)$.

Sedangkan menunjukkan korelasi antara N' -SPT vs ϕ , untuk hal tersebut digunakan:

$$\phi = \sqrt{12N'} + 20 \rightarrow \text{Pasir} \quad (1)$$

$$\phi = -0.004N^2 + 0.441N + 25.55 \rightarrow \text{Pasir Lempungan} \quad (2)$$

Sedangkan Korelasi nilai modulus tanpa menggunakan parameter IP (*indeks plastisitas*) dan kondisi parameter *drained* modulus dari tanah E_d dikorelasikan sebagai berikut (Ref: Padfield, C.J., and Sharrock, M.J., *Settlement of Structures on Clay Soils*, Ciria, 1983):

1. Untuk NC Lempung
Lempung lunak: *undrained modulus*, $E_u = (150-200) C_u$
Lempung keras: *undrained modulus*, $E_u = (250 - 300) C_u$
2. Untuk OC Lempung
 $E_u = (400 - 500) C_u$
 $E_d = 0.7 - 0.8 E_u$
3. Untuk Pasir
 $E_d = 700-1000 \text{ N [kPa]}$

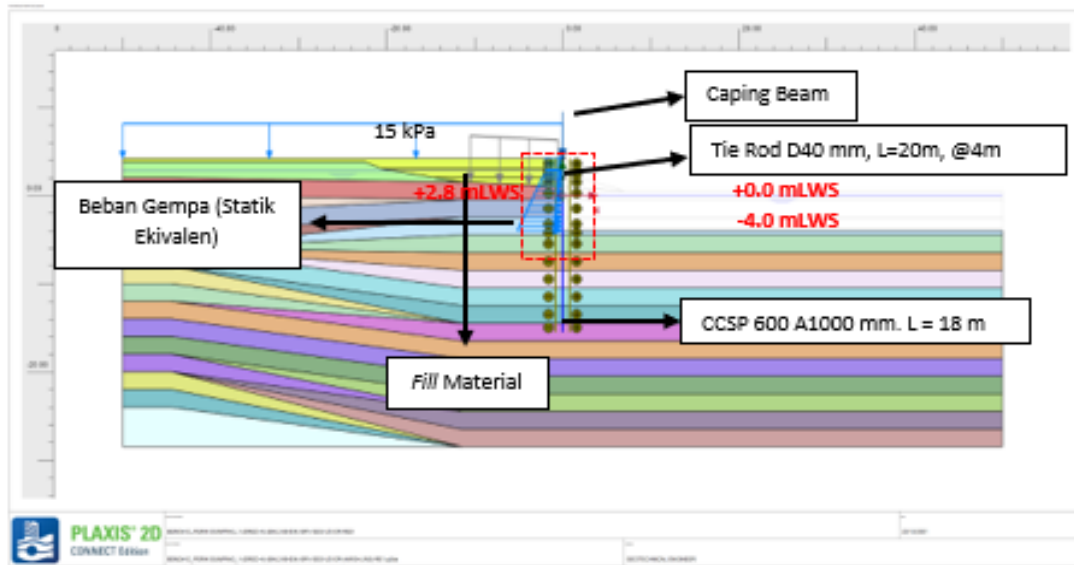
Untuk menentukan nilai berat isi tanah menggunakan korelasi empiris berdasarkan "*Soil Mechanics and Foundation Muni Budhu*"

Sand $\rightarrow \gamma = 0.1341N + 15.066$

Clay and Silt $\rightarrow \gamma = 0.1539N + 15.292$

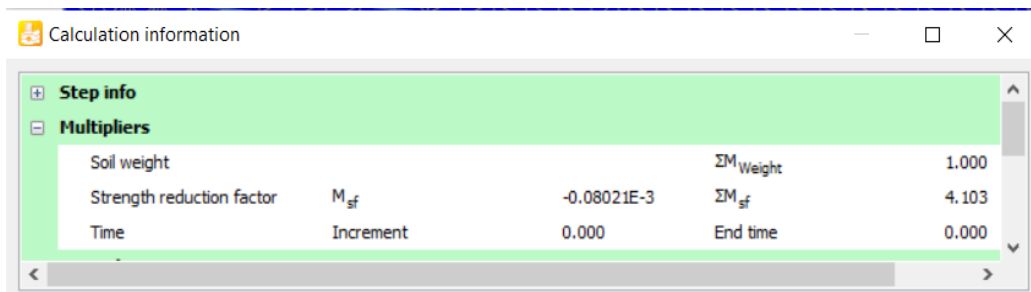
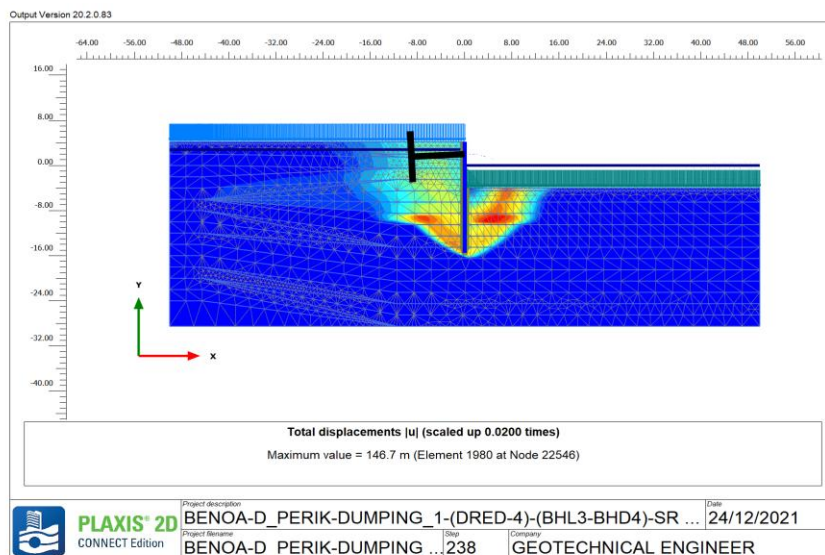
3.3. Pemodelan Hasil DED

Berikut ditampilkan desain stabilitas perkuatan hasil analisa DED mengenai stabilitas *Sheet Pile* CCSP W600 A1000 mm dengan panjang total *Sheet Pile* 18 m menggunakan perkuatan *tie rod* D40 mm dengan spasi 4 m pada elevasi +2,0 mLWS dan tiang angkur CSP 500 T90 mm dengan panjang 18 m dengan kondisi rencana kolam dermaga akan di keruk hingga el -4 mLWS. Muka air yang digunakan dalam analisa adalah menggunakan muka air kondisi kritis dimana muka air HWL +2,8 mLWS pada sisi darat *Sheet Pile* dan pada sisi laut menggunakan LWS +0,0 mLWS.



Gambar 5. Pemodelan Dermaga Sisi Timur Section 3 dengan PLAXIS 2D

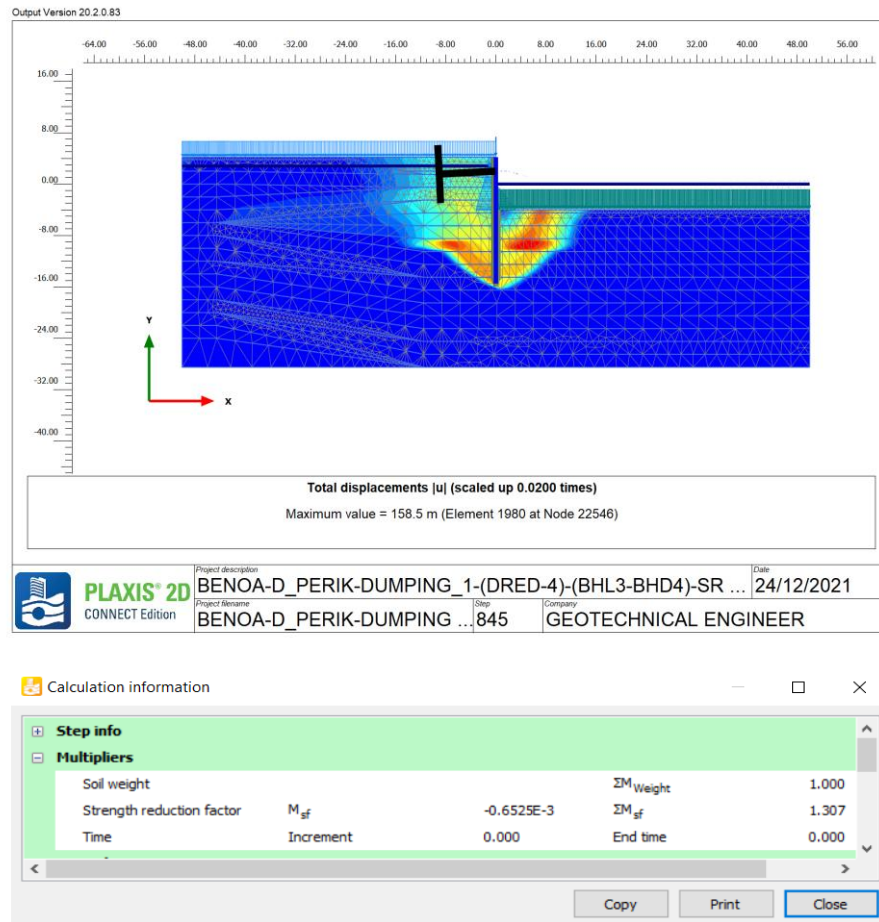
1. Analisa Kestabilan Dermaga Sisi Timur Section 3 Kondisi Normal



Gambar 6. Stabilitas Global Dermaga Section 3 Kondisi Normal, SF = 4,103

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi normal dermaga Sisi Timur Section 3 angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 4,103$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1,5$.

2. Analisa Kestabilan Dermaga Sisi Timur *Section 3* Kondisi Gempa



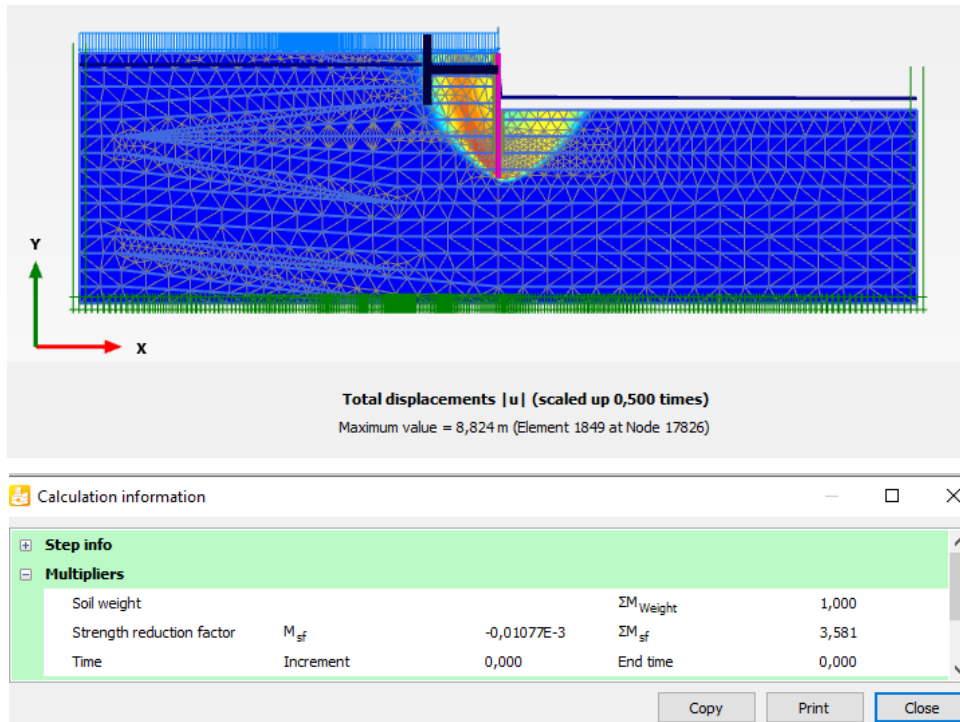
Gambar 7. Stabilitas Global Dermaga *Section 3* Kondisi Gempa, SF = 1,307

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi gempa dermaga Sisi Timur *Section 3* angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 1,307$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1,1$.

3.4. Pemodelan Tidak Sesuai dengan DED

Berdasarkan pengaplikasian pemasangan perkuatan pada lapangan yang tidak sesuai dengan desain rencana yang sudah di tuangkan pada *Detail Engineering Design* (DED), diperlukan analisis lebih lanjut terkait stabilitas perkuatan yang ada pada lapangan.

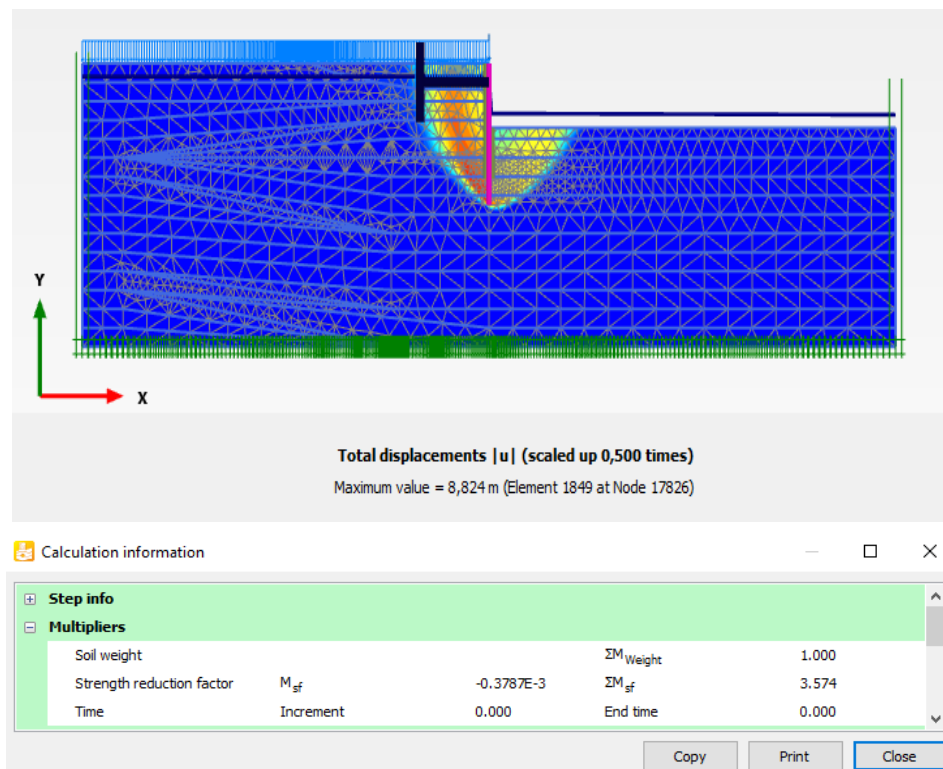
1. Analisa Stabilitas dengan Sheet Pile L 15 m Kondisi Normal



Gambar 8. Stabilitas Global Dermaga *Section 3* Kondisi Normal, SF = 3.581

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi normal dermaga Sisi Timur *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 3.581$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1.5$.

2. Analisis Stabilitas dengan Sheet Pile L 15 m dan L Spacing Tie Rod 2 m Kondisi Normal



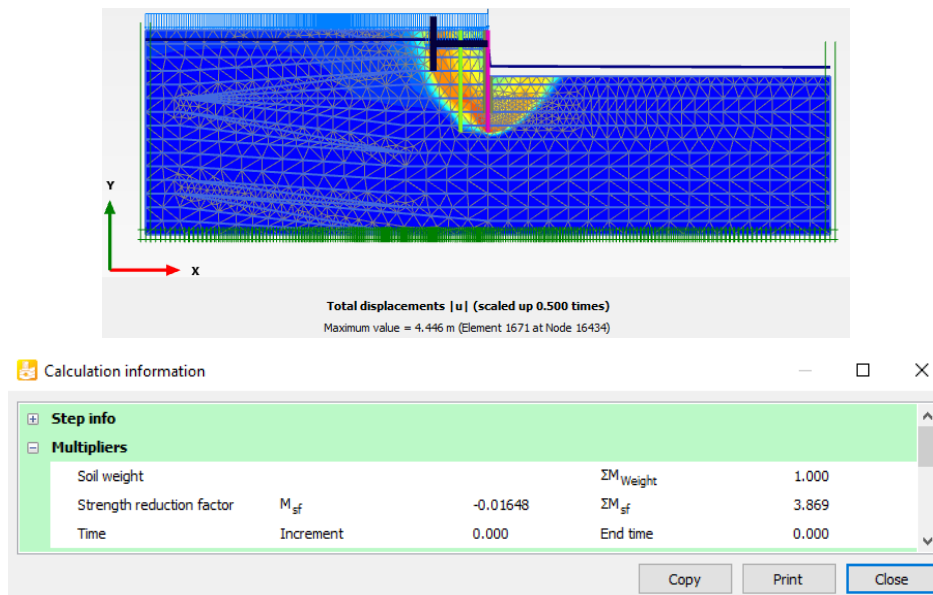
Gambar 9. Stabilitas Global Dermaga *Section 3* Kondisi Normal, SF = 3.574

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi normal dermaga Sisi Timur *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m dan perkuatan L *Spacing Tie Road* 2 m angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 3.574$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1.5$.

3.5. Pemodelan Alternatif Perkuatan

Berdasarkan hasil analisa stabilitas sheet pile pada lapangan yang tidak sesuai dengan desain rencana yang sudah di tuangkan pada DED, diperlukan analisis lebih lanjut terkait stabilitas perkuatan yang ada pada lapangan. Maka dari itu dilakukan analisis dengan beberapa alternatif yang kemungkinan diaplikasikan pada lapangan, seperti penambahan Tiang Pancang dengan Tie Road L spacing 2 m, penambahan Tiang Pancang dengan jarak Anchor-Tie Road 10 meter, dan penambahan Tiang Pancang dengan Tie Road sesuai DED .

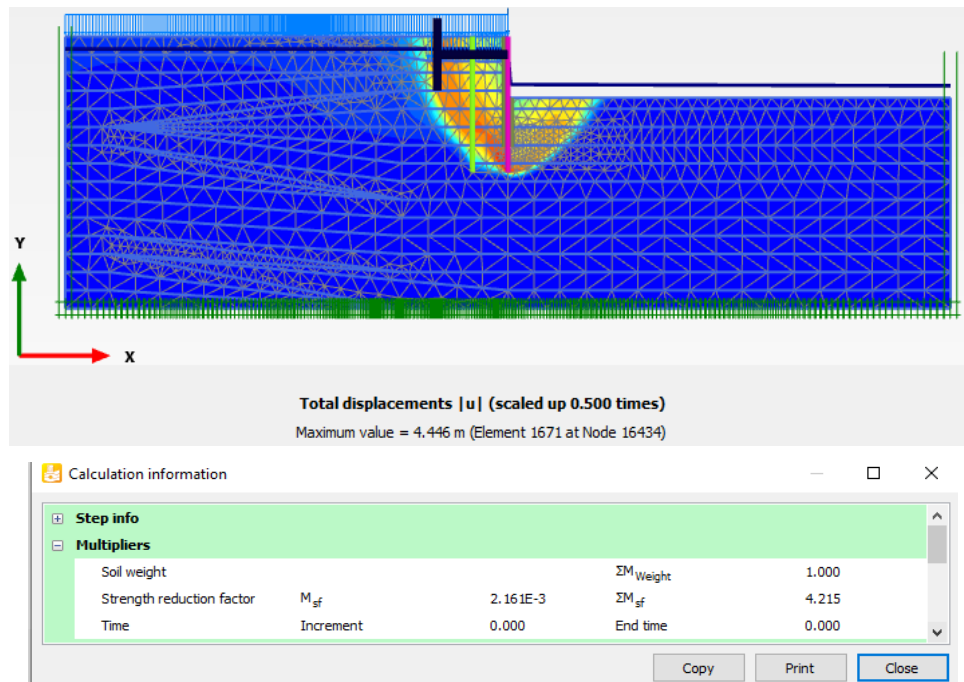
1. Alternatif Perkuatan Analisis Stabilitas Dermaga dengan Sheet Pile L 15 m, Tiang Pancang 15 m, dan L Spacing Tie Rod 2 m Kondisi Normal



Gambar 10. Stabilitas Global Dermaga *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m dan L *Spacing Tie Road* 2 m Kondisi Normal, $SF = 3.869$

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi normal dermaga Sisi Timur *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m dan perkuatan L *Spacing Tie Road* 2 m angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 3.869$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1.5$.

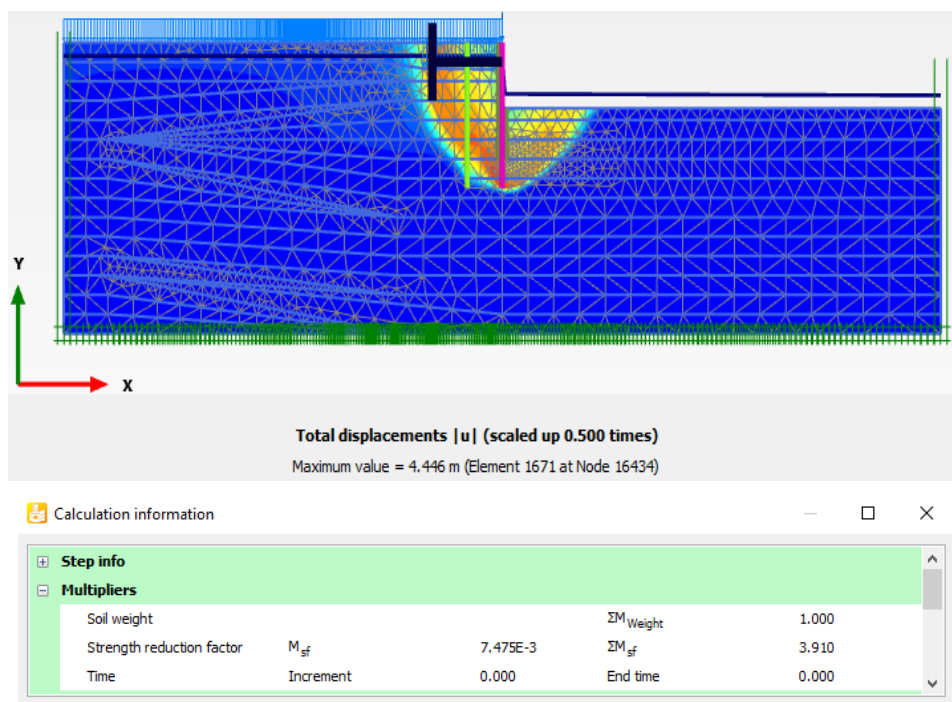
2. Alternatif Perkuatan Stabilitas Dermaga dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m, dan L *Spacing Tie Rod* 2 m dengan jarak *Anchor – Tie Rod* 10 m Kondisi Normal



Gambar 11. Stabilitas Global Dermaga *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m dan L *Spacing Tie Road* 2 m dengan jarak *Anchor – Tie Road* 10 m Kondisi Normal, SF = 4,125

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi normal dermaga Sisi Timur *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m dan perkuatan L *Spacing Tie Road* 2 m dengan jarak *Anchor – Tie Road* 10 m angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 4,125$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1,5$.

3. Alternatif Perkuatan Penambahan Tiang Pancang dengan Tie Rod Sesuai DED



Gambar 12. Stabilitas Global Dermaga *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m, dan L *Spacing* 4 m Kondisi Normal, SF = 3.918

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng kondisi normal dermaga Sisi Timur *Section 3* dengan *Sheet Pile* L 15 m, Tiang Pancang 15 m dan perkuatan L *Spacing Tie Road* 4 m angka keamanan yang dihasilkan adalah $SF_{pred} = 3.910$ lebih besar dari angka keamanan minimum lereng berdasarkan SNI GEOTEKNIK 8460:2017 dimana $SF_{min} = 1.5$.

3.6. Rekapitulasi

Tabel 1. Rekapitulasi Perbandingan Antara Pemodelan Sesuai dengan Tidak Sesuai DED

No	Perkuatan	Safety Factor		Defleksi Max (cm)		Banding Moment (kN.m/m)		Gaya Angkur (MAX) kN	Keterangan
		Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa		
		$SF_{min} = 1,5$	$SF_{min} = 1,1$	$D_{max} = 5 \text{ cm}$	$D_{max} = 5 \text{ cm}$	$M_{pred} < M_{crack} (506)$	$M_{pred} < 1,5 \times M_{crack} (759)$		
1	Pemodelan hasil sesuai DED (CCSP 18m)	4,103	1,307	2,83	3,87	184,8	178,4	439,9	OK
2	Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 15m)	3,581	1,305	3,5	12,19	423,9	606,9	886,9	NOT OK
3	Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 12m)	1,945	1,125	6,91	26,1	588,1	772,3	935,2	NOT OK
4	Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 10m)	1,833	1,04	9,88	27,04	650,1	805,6	959,1	NOT OK
5	Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 15m) dan L Spacing Tie Road 2 m	3,574	1,301	2,38	11,94	355,9	545,6	673,2	NOT OK
6	Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 12m) dan L Spacing Tie Road 2 m	1,946	1,125	5,57	24,24	423,9	606,9	698,5	NOT OK
7	Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 10m) dan L Spacing Tie Road 2 m	1,834	1,039	7,15	24,12	588,1	723,3	718,1	NOT OK

Tabel 2. Rekapitulasi Perbandingan Pemodelan Sesuai *Detail Engineering Design* (DED) dengan Alternatif Perkuatan Penambahan Tiang Pancang dengan *Tie Road* L Spacing 2 m

Perkuatan	Safety Factor		Defleksi Max (cm)		Banding Moment (kN.m/m)		Defleksi Max Pancang (cm)		Banding Moment Pancang (kN.m/m)		Gaya Angkur (MAX) kN	Keterangan
	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa		
	$SF_{min} = 1,5$	$SF_{min} = 1,1$	$D_{max} = 5 \text{ cm}$	$D_{max} = 5 \text{ cm}$	$M_{pred} < M_{crack} (506)$	$M_{pred} < 1,5 \times M_{crack} (759)$	$D_{max} = 5 \text{ cm}$	$D_{max} = 5 \text{ cm}$	$M_{pred} < M_{crack} (218)$	$M_{pred} < 1,5 \times M_{crack} (328)$		
Pemodelan hasil sesuai DED (CCSP 18m)	4,103	1,307	2,830	3,870	184,8	178,4	-	-	-	-	439,9	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 15m)	3,869	1,310	2,660	4,530	398,5	579,7	2,980	4,170	104,2	137,0	405,0	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 12m)	2,007	1,150	3,240	4,700	448,2	650,1	2,980	4,380	137,7	137,7	439,3	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 10m)	1,865	1,116	3,870	5,530	536,7	714,8	3,540	4,440	139,0	177,5	460,6	NOT OK

Tabel 3. Rekapitulasi Perbandingan Pemodelan Sesuai *Detail Engineering Design* (DED) dengan Alternatif Perkuatan Penambahan Tiang Pancang dengan Jarak *Anchor – Tie Road* 10 m

Perkuatan	Safety Factor		Defleksi Max (cm)		Banding Moment (kN.m/m)		Defleksi Max Pancang (cm)		Banding Moment Pancang (kN.m/m)		Gaya Angkur (MAX) kN	Keterangan
	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa		
	SF _{min} = 1,5	SF _{min} = 1,1	D _{max} = 5 cm	D _{max} = 5 cm	M _{pred} < M _{crack} (506)	M _{pred} < 1,5 × M _{crack} (759)	D _{max} = 5 cm	D _{max} = 5 cm	M _{pred} < M _{crack} (218)	M _{pred} < 1,5 × M _{crack} = (328)		
Pemodelan hasil sesuai DED (CCSP 18m)	4,103	1,307	2,830	3,870	184,8	178,4	-	-	-	-	439,9	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 15m)	4,215	1,654	2,187	3,850	398,5	579,7	2,980	4,170	104,2	137,0	374,9	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 12m)	2,596	1,508	3,713	3,850	400,6	584,5	2,980	4,380	137,7	137,7	388,9	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 10m)	2,08	1,368	4,26	5,07	448,2	650,1	3,540	4,440	139,0	177,5	398,2	OK

Tabel 4. Rekapitulasi Perbandingan Pemodelan Sesuai *Detail Engineering Design* (DED) dengan Alternatif Perkuatan Penambahan Tiang Pancang dengan Tie Road sesuai *Detail Engineering Design* (DED)

Perkuatan	Safety Factor		Defleksi Max (cm)		Banding Moment (kN.m/m)		Defleksi Max Pancang (cm)		Banding Moment Pancang (kN.m/m)		Gaya Angkur (MAX) kN	Keterangan
	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa	Kondisi Normal	Kondisi Gempa		
	SF _{min} = 1,5	SF _{min} = 1,1	D _{max} = 5 cm	D _{max} = 5 cm	M _{pred} < M _{crack} (506)	M _{pred} < 1,5 × M _{crack} (759)	D _{max} = 5 cm	D _{max} = 5 cm	M _{pred} < M _{crack} (218)	M _{pred} < 1,5 × M _{crack} = (328)		
Pemodelan hasil sesuai DED (CCSP 18m)	4,103	1,307	2,830	3,870	184,8	178,4	-	-	-	-	439,9	OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 15m)	3,91	1,326	4,74	7,71	455,7	519	2,980	4,170	104,2	137,0	597,1	NOT OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 12m)	2,006	1,232	7,93	8,27	530,2	621,4	2,980	4,380	137,7	137,7	650,3	NOT OK
Pemodelan tidak sesuai DED (CCSP 10m)	1,798	1,156	8,69	11,93	898	947,8	3,540	4,440	139,0	177,5	685,9	NOT OK

Sehingga Pemodelan yang paling efektif yang di rekomendasikan dari alternatif perkuatan yaitu pemasangan tiang pancang dengan *Lspacing Tie Rod* 2meter pada kedalaman *Sheet Pile* dan tiang pancang 12 meter.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada dermaga *section 3* sisi Timur dengan pemodelan stabilitas yang tidak sesuai DED dan beberapa alternatif yang diterapkan, maka dapat disimpulkan bahwa hasil deformasi serta reaksi *pile* pada pemodelan stabilitas yang tidak sesuai DED dengan *sheetpile* L15m pada kondisi normal didapat nilai *displacement* D_{pred} sebesar $3,50\text{cm} < D_{allow}$ (kondisi stabil) pada kondisi gempa didapat nilai *displacement* D_{pred} sebesar $12,19\text{cm} > D_{allow}$ (kondisi tidak stabil) nilai banding *moments* kondisi normal M_{pred} sebesar $423\text{ kN,m/m} < M_{crack} = 506\text{ kN,m/m}$ (kondisi stabil) nilai banding *moments* kondisi gempa M_{pred} sebesar $606,9\text{ kN,m/m} < M_{crack} = 759\text{ kN,m/m}$ (kondisi stabil), pada *sheet pile* L12m pada kondisi normal didapat nilai *displacement* D_{pred} sebesar $6,91\text{cm} < D_{allow}$ (kondisi tidak stabil) pada kondisi gempa didapat nilai *displacement* D_{pred} sebesar $26,1\text{ cm} > D_{allow}$ (kondisi tidak stabil) nilai banding *moments* kondisi normal M_{pred} sebesar $588,1\text{ kN,m/m} < 506\text{ kN,m/m}$ (kondisi stabil) nilai banding *moments* kondisi gempa M_{pred} sebesar $772,3\text{ kN,m/m} < M_{crack} = 759\text{ kN,m/m}$ (kondisi stabil), pada *sheet pile* L10m kondisi normal didapat nilai *displacement* D_{pred} sebesar $9,88\text{ cm} < D_{allow}$ (kondisi tidak stabil) pada kondisi gempa didapat nilai *displacement* D_{pred} sebesar $27,04\text{ cm} > D_{allow}$ (kondisi tidak stabil) nilai banding *moments* kondisi normal M_{pred} sebesar $650,1\text{ kN,m/m} < 506\text{ kN,m/m}$ (kondisi stabil) nilai banding *moments* kondisi gempa M_{pred} sebesar $805,6\text{ kN,m/m} > M_{crack} = 759\text{ kN,m/m}$ (kondisi tidak stabil),

Daftar Notasi

ϕ = internal friction (°)
 N' = corrected N-SPT

Daftar Pustaka

- Alfianty, Desi, 2019, “Studi Kestabilan Perkuatan Tebing Dermaga Quay Wall Di Matan Kabupaten Kayong Utara,” : 1–10,
Anbya, Yasinta Yati Nur, 2015, “Studi Perencanaan Desain Turap Baja Dengan Metode Finite Element Di Bantaran Sungai Jelarai Tanjung Selor,”
Craig, R.F., and Budi Susilo, 1989, “Mekanika Tanah, Edisi IV,”: 6, 19, 109,110, 171,174,176,<https://labmekanikatanah.files.wordpress.com/2013/07/mekanika-tanah-r-f-craig.pdf>,
Das, Braja M, 1993, “Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2,” *Erlangga*: 239,
Hardiyatmo, Hary Christady, 2010, “Mekanika Tanah I, Edisi III,” *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952,
Ihsan, Pemi, “Fenomena Cerucuk Sebagai Peningkatan Daya Dukung Dan Mereduksi Penurunan Beban Bangunan Di Atas Tanah Lembek,”
Nazir, Muhammad Shahid et al, 2018, “Analisis Kestabilan Lereng Studi Kasus Kelongsoran Ruas Jalan Sicincin-Malalak KM 27,6 Kecamatan Malalak, Kabupaten Agam,” *Spectrochimica Acta - Part A*,
Pasaribu, Bangun, Jupriah Sarifah, and Ahmad Fidel Rifky, 2021, “Analisa Faktor Keamanan Tiang Pada Pembangunan Dermaga SImiando Kabupaten Samosir,”
SNI-8460 (2017), “Persyaratan Perancangan Geoteknik,” *SNI 8460-2017 8460:2017*,
Swardana, Ryan, 2019, Universitas Internasional Batam Perencanaan Pembangunan Dinding Penahan Tanah Tipe Gravitasi Di Universitas Internasional Batam, Batam,
Wesley, Laurence D, 2012, “Mekanika Tanah Untuk Tanah Endapan Dan Residu,” : 577, [http://web.ipb.ac.id/~erizal/mektan/2010_Mekanika Tanah untuk Tanah endapan dan residu.pdf](http://web.ipb.ac.id/~erizal/mektan/2010_Mekanika_Tanah_untuk_Tanah_endapan_dan_residu.pdf),
Zulfikar, A, 2020, “Mengenal Fungsi Dan Jenis Dinding Penahan Tanah, Konstruksi Lahan Miring,”

Analisa Manajemen Risiko proyek di daerah 3T (Terluar–Terdepan–Tertinggal). Studi Kasus Pembangunan Jalan di Pulau Siberut, Kep. Mentawai, Sumatera Barat

Miftahul Iman Hamid, dan Ferry Rusgiarto

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

mftiman@gmail.com, ferry.rusgiarto@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Pelaksanaan proyek di daerah 3T memiliki karakteristik tersendiri disebabkan kondisi geografis proyek yang menyebabkan sulitnya mobilisasi alat, material, dan tenaga. Penelitian ini bertujuan mencari risiko dominan pada pelaksanaan proyek di daerah 3T. Metode penelitian dilakukan dengan melakukan kuesioner kepada 56 responden, dengan responden dibagi berdasarkan pernah atau tidaknya mereka melaksanakan proyek di daerah 3T, instansi asal responden (dinas bina marga, kontraktor, konsultan), pendidikan responden, dan lokasi pekerjaan dominan responden (Jawa, luar Jawa). Langkah pertama dari penelitian adalah melakukan uji validitas dan reliabilitas kuesioner, dilanjutkan dengan skoring probabilitas, dampak dan tingkat risiko yang didapat dari hasil kuesioner dengan perhitungan Severity Index, selain itu juga dilihat kecenderungan jawaban responden berdasarkan klasifikasi responden. Hasil penelitian menunjukkan bahwa responden yang pernah melaksanakan proyek di daerah 3T, responden yang berasal dari kontraktor, berpendidikan S1, dan lokasi pekerjaan dominan di luar Jawa, cenderung menilai bahwa risiko melaksanakan pekerjaan di daerah 3T cukup tinggi dibanding responden lain. Penelitian juga menunjukkan bahwa pekerjaan di daerah 3T memiliki tingkat risiko dari sedang sampai sangat tinggi.

Kata kunci: 3T, risiko, dominan

Abstract

Project implementation in 3T (frontier, outermost, and disadvantaged) areas presents unique challenges due to difficult geographic conditions, which hinder the mobilization of equipment, materials, and labor. This research aims to identify the most dominant risks encountered during project execution in these regions. The study involved distributing questionnaires to 56 respondents, categorized by experience with 3T projects, agency affiliation (road construction and maintenance, contractor, consultant), educational background, and primary work location (Java or outside Java). The research began with validity and reliability testing of the questionnaire. It then proceeded to assess the probability, impact, and overall risk level using the Severity Index method. In addition, the analysis explored trends in responses based on the respondent classifications. The findings indicated that participants with experience in 3T projects, those working in contractor agencies, holding a bachelor's degree, and primarily working outside Java, generally perceived higher risks in 3T project implementation compared to other groups. The study concluded that project work in 3T regions is associated with risk levels ranging from moderate to very high, highlighting the importance of careful planning and risk management when operating in these challenging environments.

Keywords: 3T, risk, dominant

1. Pendahuluan

Ide penelitian ini bermula dari hasil pengamatan awal pada pelaksanaan proyek di daerah 3T (Terluar-Terdepan-Tertinggal), yaitu pada proyek pembangunan jalan Labuhan Bajau – Sigapokna, Pulau Siberut, Kepulauan Mentawai, Sumatera barat (PPK 1.6, Sumatera Barat). Kepulauan Mentawai merupakan salah satu daerah 3T (Perpres No.63 tahun 2020) yang kurang dikenal oleh sebagian masyarakat Indonesia, juga kurang mendapat perhatian dari pemerintah dalam pembangunan infrastruktur. Di sisi lain sebenarnya Kepulauan Mentawai memiliki destinasi wisata yang terkenal bagi *traveler* asing terutama pecinta olahraga selancar, karena ombak di kepulauan Mentawai setara dengan ombak di kepulauan Hawaii, Amerika Serikat (Wonderful Indonesia, 2024, dan InNalar, 2025)). Tertinggalnya pembangunan infrastruktur di kepulauan Mentawai tentu merupakan kerugian bagi negara karena menyebabkan terhambatnya devisa negara dari sektor pariwisata. Hal ini juga bisa terjadi pada daerah 3T lainnya yang sebenarnya memiliki potensi devisa, baik itu potensi pariwisata atau hasil alam.

Beberapa penelitian sebelumnya tentang manajemen risiko pada pelaksanaan proyek, seperti Rachmawati, N

Info Makalah:

Dikirim : 01-22-25

Revisi 1 : 03-04-25;

Diterima : 03-10-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-822-5504-9556

e-mail : mftiman@gmail.com

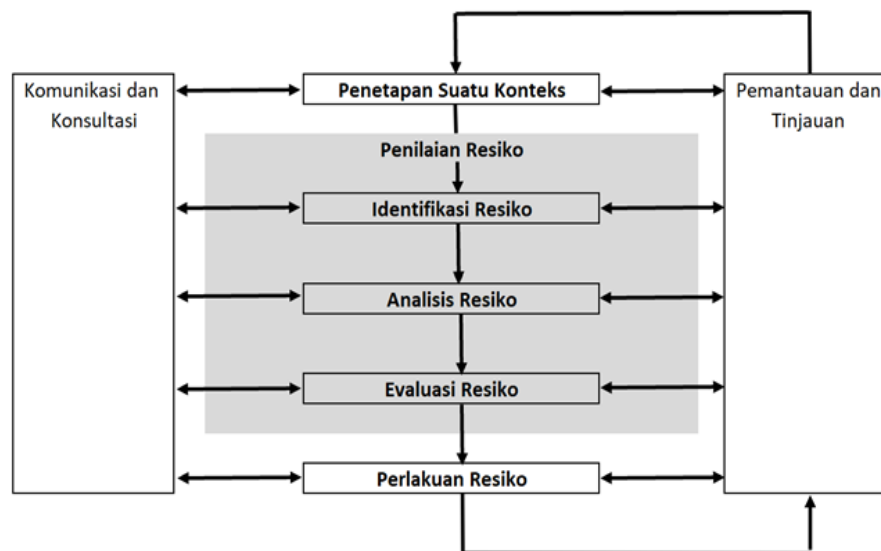
dan Tenrisuki, A (2021), risiko dominan pada pembangunan jalan tol Becakayu adalah risiko politis, lingkungan, pembiayaan, alam, manusia, teknis, kriminal dan keselamatan. Moi, F., dan Purnawirati, N., (2021) , juga melakukan penelitian analisa manajemen risiko pada proyek jalan Waebet – Tarawaja, NTT, dengan kesimpulan risiko dominan adalah : penolakan warga pada masalah pembebasan tanah dan kerusakan alat berat pada saat pelaksanaan proyek. Adapun perbedaan utama penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah pada lokasi pekerjaan

yaitu daerah 3T yang memiliki ciri dan karakteristik tersendiri, yaitu kondisi geografis proyek yang menyebabkan sulitnya mobilisasi alat, material dan tenaga, terbatasnya kontraktor yang bersedia melaksanakan pekerjaan di daerah tersebut, terbatasnya sumber daya manusia, alat dan material di lokasi proyek, serta lokasi proyek yang rawan bencana alam (gempa bumi, tsunami, badai laut).

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis risiko dominan yang terjadi pada pelaksanaan proyek di daerah 3T, dan mencari langkah-langkah yang diperlukan untuk meminimalkan risiko yang akan terjadi. Batasan lingkup penelitian akan difokuskan pada risiko dominan akibat kondisi geografis proyek yang berakibat pada kelancaran pelaksanaan pekerjaan. Responden juga akan dibatasi pada mereka yang pernah terlibat dalam pelaksanaan proyek daerah 3T, atau mereka yang pernah melaksanakan proyek pembangunan jalan yang cukup kompleks, sehingga mereka mengerti tentang manajemen logistik, peralatan, tenaga, keuangan juga mengerti tentang kondisi sosial masyarakat. Hasil yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah hasil penelitian akan menguatkan dan membuktikan hipotesis awal tentang sulitnya pelaksanaan proyek di daerah 3T, sehingga hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan bagi pihak-pihak yang terlibat dalam perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan di daerah 3T. Pihak-pihak yang terlibat bisa dari pemerintah pusat maupun daerah, pengguna jasa (kementerian PU), penyedia jasa (kontraktor), konsultan perencanaan dan pengawas, juga instansi-instansi lain yang berhubungan dengan perencanaan maupun pelaksanaan proyek.

Menurut Muallif (2024), daerah 3T adalah singkatan dari daerah terluar, terdepan dan tertinggal. Wilayah-wilayah ini umumnya terletak di pulau-pulau kecil, terpencil, perbatasan negara, atau daerah pedalaman yang sulit dijangkau. Beberapa permasalahan kompleks yang menghambat pembangunan dan kesejahteraan masyarakat antara lain ; Infrastruktur yang kurang memadai (jalan, jembatan, pelabuhan, bandara), akses terbatas dalam layanan dasar (pendidikan, kesehatan, air bersih, sanitasi), kualitas SDM yang rendah (tingkat pendidikan yang rendah, kurangnya tenaga terampil, minimnya pelatihan), kemiskinan (terbatasnya peluang ekonomi, rendahnya pendapatan, harga kebutuhan pokok yang tinggi), kerentanan terhadap bencana alam (gempa bumi, tsunami, banjir, kekeringan). Daerah 3T memiliki potensi yang sangat besar untuk dikembangkan, namun berbagai permasalahan kompleks yang dihadapi membutuhkan solusi yang komprehensif dan berkelanjutan antara pemerintah dan swasta.

Selanjutnya yang dimaksud dengan risiko adalah “Segala kejadian dalam suatu organisasi dalam menghadapi faktor dan pengaruh internal maupun eksternal yang membuat organisasi tersebut menjadi tidak pasti dalam mencapai tujuannya” (SNI ISO 31000, 2011), “Risiko adalah paparan terhadap konsekuensi dari ketidakpastian. Hal ini mencakup kemungkinan kerugian atau keuntungan, atau variasi dari hasil yang diinginkan atau direncanakan, sebagai konsekuensi dari ketidakpastian yang terkait dengan tindakan tertentu” (Cooper, D., 2005). Kemudian yang dimaksud dengan manajemen risiko adalah “Suatu kegiatan terkoordinasi untuk mengarahkan dan mengendalikan organisasi terkait dengan risiko” (SNI-ISO 31000, 2011), atau “Cara terstruktur untuk menilai dan menangani ketidakpastian yang akan terjadi” (Cooper, D., 2005).



Gambar 1. Bagan Manajemen Risiko
Sumber : SNI-ISO 31000. (2011)

Dalam Modul Penyusunan *Risk Register* (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, Kementerian PUPR, Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, 2017), besarnya tingkat risiko dari setiap potensi risiko ditentukan oleh tingkat probabilitas dan tingkat dampak dari risiko itu sendiri. Probabilitas adalah kemungkinan terjadinya potensi risiko, yang nilainya dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1. Penilaian Probabilitas

Tingkat	Uraian
1	Sangat jarang terjadi
2	Kadang-kadang terjadi
3	Dapat terjadi
4	Sering terjadi
5	Hampir pasti terjadi

Sumber : Setyaning, LB., dkk. (2023)

Selanjutnya tingkat keparahan atau dampak dari suatu risiko dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. Tingkat Keparahannya Risiko

Tingkat	Uraian
1	Tidak Signifikan
2	Kecil
3	Sedang
4	Berat
5	Sangat Berat/Bencana

Sumber : Setyaning, LB., dkk. (2023)

Nilai tingkat risiko adalah hasil perkalian dari nilai probabilitas dengan nilai dampak (tingkat risiko = probabilitas X dampak), disusun dalam bentuk peta risiko sebagai berikut :

Tabel 3. Peta Risiko dan Tingkat Risiko

Matriks Analisis Risiko			Dampak				
			1	2	3	4	5
			Tidak signifikan	Kecil	Sedang	Berat	Sangat berat
Kemungkinan	5	Hampir pasti terjadi	5	10	15	20	25
	4	Sering terjadi	4	8	12	16	20
	3	Dapat terjadi	3	6	9	12	15
	2	Kadang-kadang terjadi	2	4	6	8	10
	1	Sangat jarang terjadi	1	2	3	4	5

Peta Risiko	Tingkat Risiko
< 2	Sangat Rendah
3 < 4	Rendah
5 < 9	Sedang
10 < 12	Tinggi
> 15	Sangat Tinggi

Sumber : Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017)

2. Metode

2.1. Perancangan Bentuk Kuesioner

PT Penjaminan Infrastruktur Indonesia, Acuan Alokasi Risiko (2016), telah membagi potensi risiko untuk sektor jalan tol dan non tol, perumahan rakyat, air minum, persampahan, air limbah dan perkotaan menjadi 11 kategori sebagai berikut :

1. Risiko lokasi
2. Risiko desain, konstruksi dan uji operasi
3. Risiko sponsor
4. Risiko finansial
5. Risiko operasi
6. Risiko pendapatan
7. Risiko konektivitas jaringan
8. Risiko *interface*
9. Risiko politik
10. Risiko *force majeure*
11. Risiko kepemilikan aset

Dari kategori risiko di atas, maka sesuai dengan batasan lingkup penelitian, maka dirancang bentuk kuesioner sebagai berikut :

Nama :
Jabatan :

Topik Kuisisioner : Identifikasi Resiko ; **PROYEK PEMBANGUNAN DI DAERAH 3T (TERLUAR-TERDEPAN-TERTINGGAL)**

Catatan : 1. Penelitian dalam rangka tesis magister teknik sipil tentang pembangunan daerah 3T
2. Responden adalah mereka yang pernah terlibat dalam pelaksanaan proyek di daerah 3T, atau
3. Responden pernah terlibat dalam pelaksanaan proyek pembangunan jalan yang cukup kompleks

Identifikasi Resiko		Probabilitas (*)	Dampak (**)
A	Resiko Lokasi		
	1 Sulitnya mendapatkan material dasar di lokasi proyek (batu, urugan pilihan)		
	2 Sulitnya pengiriman material dari luar lokasi		
	3 Sulitnya pengiriman alat-alat berat dan alat angkut		
	4 Data tentang kondisi proyek yang diberikan pengguna jasa kurang lengkap		
	5 Penyedia Jasa kurang akurat dalam survey awal proyek terkait kondisi lokasi dan geografis proyek		
B	Resiko Biaya		
	1 Terjadinya kenaikan harga-harga material setempat akibat pelaksanaan proyek		
	2 Naiknya biaya pelaksanaan akibat penyedia jasa kurang akurat memperhitungkan kondisi geografis proyek		
	3 Naiknya biaya pelaksanaan akibat perubahan kontrak/adendum		
	4 Terlambatnya pembayaran sertifikat bulanan sehingga mempengaruhi cashflow penyedia jasa		
C	Resiko Pelaksanaan		
	1 Berkurangnya kualitas hasil pekerjaan karena sulitnya pengadaan material		
	2 Bertambahnya waktu pelaksanaan karena sulitnya pengadaan material dan spare part alat berat		
	3 Hasil pekerjaan yang kurang optimal karena sulitnya SDM berkualitas yang bersedia bekerja di proyek		
	4 Bertambahnya waktu pelaksanaan karena sulitnya pengurusan ijin quarry setempat dan ijin pengangkutan alat dan material		

Probabilitas (*) : 1 - sangat jarang terjadi
2 - kadang-kadang terjadi
3 - dapat terjadi
4 - sering terjadi
5 - hampir pasti terjadi

Dampak (**) : 1 - tidak signifikan
2 - kecil
3 - sedang
4 - berat
5 - bencana

Gambar 1. Bentuk Kuesioner
Sumber : Hasil olahan penulis

2.2. Penentuan Responden

Responden diambil dari mereka yang pernah terlibat dalam pelaksanaan proyek di daerah 3T, atau mereka yang pernah terlibat dalam proyek pembangunan jalan yang cukup kompleks. Responden diambil dari unsur pengguna jasa (dinas bina marga), penyedia jasa (kontraktor), dan pengawas pekerjaan (konsultan). Selanjutnya kecenderungan jawaban responden juga akan dilihat berdasarkan pernah tidaknya responden terlibat dalam pelaksanaan proyek daerah 3T, instansi asal responden, tingkat pendidikan responden, dan lokasi pekerjaan dominan responden.

2.3. Uji Validitas dan Reliabilitas Kuesioner

Uji validitas adalah suatu standar ukuran yang menunjukkan ketepatan atau akurasi dari instrumen yang digunakan (Rakhman, 2022), dalam hal ini adalah kuesioner, kuesioner diuji kepada beberapa responden sebelum disebarkan, “jumlah minimal responden untuk uji validitas adalah 30 orang” (Sugiyono, 2005). Untuk mencari validitas, digunakan rumus korelasi Pearson sebagai berikut :

$$r_{xy} = \frac{nx_i y_i - (x_i)(y_i)}{\sqrt{(nx_i^2 - (x_i)^2)(ny_i^2 - (y_i)^2)}} \quad (1)$$

Selanjutnya apabila $r_{xy} > r$ tabel (Wahyudi, 2019), maka kuesioner dianggap valid.

Uji reliabilitas adalah prosedur statistik yang digunakan untuk menilai tingkat konsistensi dan stabilitas suatu instrumen pengukuran, dan memastikan bahwa instrumen pengukuran memberi hasil yang konsisten dan akurat (Rakhman, 2022). Untuk mencari reliabilitas digunakan persamaan *Cronbach Alpha* sebagai berikut :

$$r_i = \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(1 - \frac{\sum \sigma_b^2}{\sigma_t^2} \right) \quad (2)$$

Hasil dari reliabilitas (r_i) dapat dilihat pada koefisien reliabilitas *Guilford* sebagai berikut :

- $0,80 \leq r_i \leq 1,00$: reliabilitas sangat tinggi
- $0,60 \leq r_i \leq 0,80$: reliabilitas tinggi
- $0,40 \leq r_i \leq 0,60$: reliabilitas sedang
- $0,20 \leq r_i \leq 0,40$: reliabilitas rendah
- $0,00 \leq r_i \leq 0,20$: reliabilitas sangat rendah

2.4. Pembobotan Hasil Kuesioner dengan *Severity Index* (SI)

Analisa data menggunakan metode *Severity Index* memiliki tujuan untuk menentukan kategori probabilitas (P) dan dampak (I). *Severity Index* dihitung dengan berdasar kepada jawaban seluruh responden. Selanjutnya dikategorikan berdasarkan besarnya hasil perhitungan probabilitas dan dampak. *Severity Index* dengan skala likert (1 – 5) dihitung dengan menggunakan rumus dari Al-Hammad (1996) :

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i x_i}{5 \sum_{i=1}^5 x_i} \quad (3)$$

Tabel 4. Kategori Matriks Probabilitas

Tingkat Probabilitas	SI (%)	Skala
Hampir pasti terjadi	81 – 100	5
Sering terjadi	61 – 80	4
Dapat terjadi	41 – 60	3
Kadang-kadang terjadi	21 – 40	2
Sangat jarang terjadi	≤ 20	1

Sumber : Setyaning, LB., dkk.(2023)

Tabel 5. Kategori Matriks Dampak

Tingkat Dampak	SI (%)	Skala
Bencana	81 – 100	5
Berat	61 – 80	4
Sedang	41 – 60	3
Kecil	21 – 40	2
Tidak signifikan	≤ 20	1

Sumber : Setyaning, LB., dkk.(2023)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil uji validitas dan reliabilitas

Uji validitas dan reliabilitas terhadap 30 responden didapat hasil sebagai berikut :

- a. Kuesioner probabilitas risiko : valid dan reliabel
- b. Kuesioner dampak risiko : valid dan reliabel

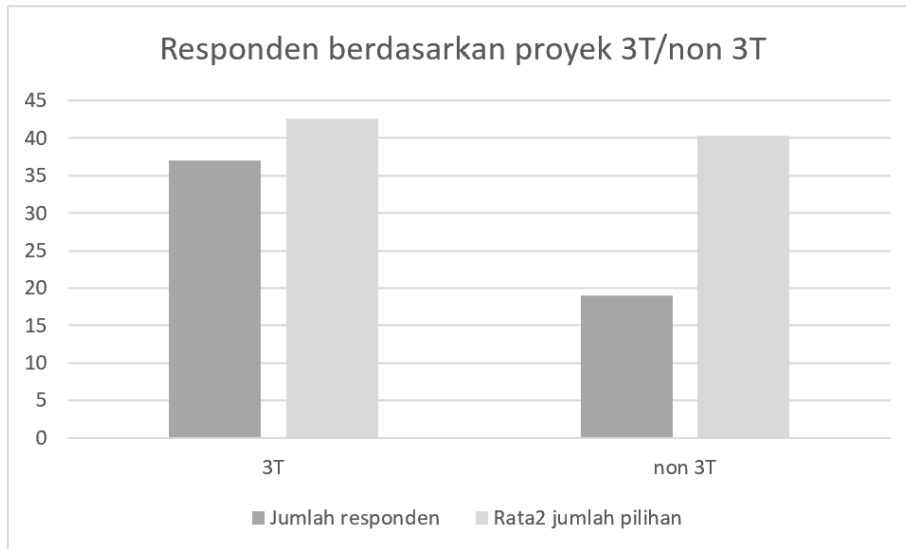
Dari hasil uji validitas dan reliabilitas di atas, terlihat kuesioner adalah valid dan reliabel, sehingga data kuesioner dapat dianalisa lebih lanjut.

3.2. Analisa responden

Jumlah seluruh responden adalah 56 orang, dengan hasil sebagai berikut :

1. Pernah tidaknya terlibat dalam proyek di daerah 3T.

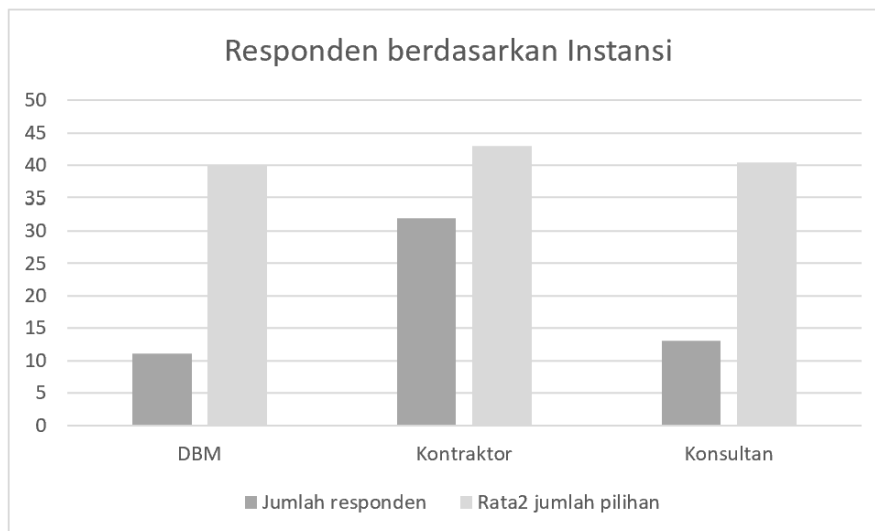
3T/non 3T	3T	non 3T
Jumlah responden	37	19
Rata2 jumlah pilihan	42.57	40.37



Gambar 2. Diagram Keterlibatan Responden pada Proyek 3T
Sumber : Hasil olahan data

2. Instansi asal responden.

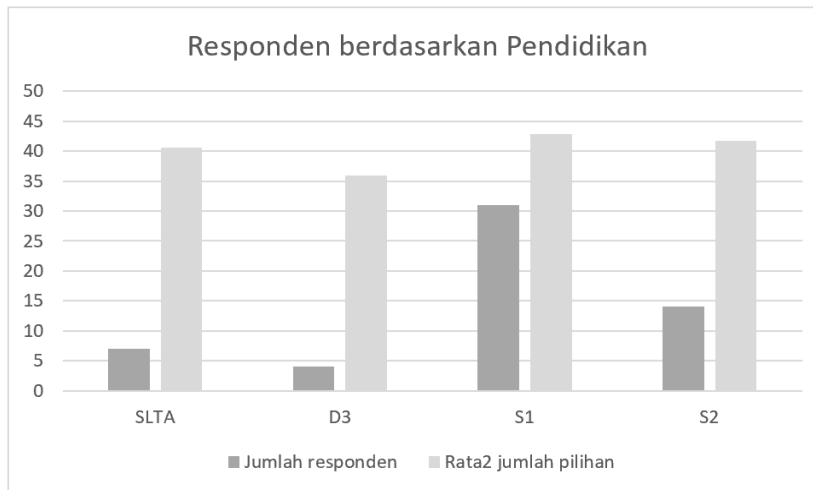
Instansi	DBM	Kontraktor	Konsultan
Jumlah responden	11	32	13
Rata2 jumlah pilihan	40.00	43.00	40.46



Gambar 3. Diagram Instansi Asal Responden
Sumber : Hasil olahan data

3. Tingkat pendidikan responden.

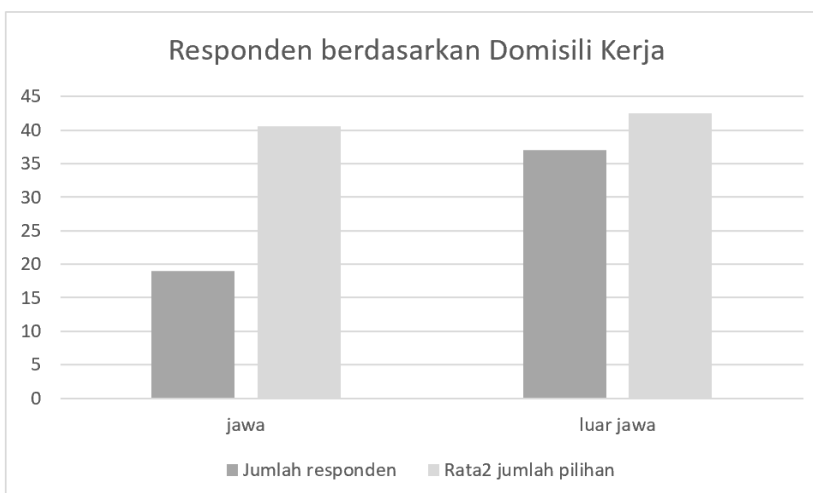
Pendidikan	SLTA	D3	S1	S2
Jumlah responden	7	4	31	14
Rata2 jumlah pilihan	40.57	36.00	42.90	41.71



Gambar 4. Diagram Tingkat Pendidikan Responden
Sumber : Hasil olahan data

4. Lokasi pekerjaan dominan.

Domisili kerja	jawa	luar jawa
Jumlah responden	19	37
Rata2 jumlah pilihan	40.63	42.43



Gambar 5. Diagram Lokasi Pekerjaan Dominan Responden
Sumber : Hasil olahan data

Dari kategori responden dan kecenderungan jawaban kuesioner, terlihat untuk responden yang pernah terlibat dalam proyek 3T menilai tingkat probabilitas dan dampak risiko yang lebih besar, hal ini dikarenakan mereka memang mengetahui kesulitan apa saja dalam menangani proyek di daerah 3T. Untuk kategori instansi asal responden, terlihat bahwa responden yang berasal dari kontraktor menilai tingkat probabilitas dan dampak risiko yang lebih besar, hal ini dikarenakan mereka menangani langsung hal-hal yang berkaitan dengan pengadaan material, alat, tenaga, pengurusan ijin-ijin, dan kondisi sosial masyarakat, juga mereka akan terkena dampak langsung apabila terjadi keterlambatan dari segi pembiayaan pelaksanaan proyek. Untuk tinjauan pada tingkat pendidikan responden, terlihat bahwa responden yang berpendidikan S1 menilai tingkat probabilitas dan dampak yang lebih besar, hal ini dikarenakan mereka yang berpendidikan S1 umumnya memegang jabatan manajer menengah-atas pada struktur organisasi proyek, dan mereka bertanggung jawab sebagai pengambil keputusan pertama di lapangan. Yang terakhir tinjauan pada responden yang

memiliki lokasi pekerjaan dominan di Jawa/luar Jawa, hasil kuesioner menunjukkan bahwa responden yang bekerja di luar Jawa menilai bahwa probabilitas dan dampak risiko akan lebih besar, hal ini dikarenakan umumnya proyek di luar Jawa lebih sulit pada pengadaan tenaga, alat dan material.

3.3. Tingkat Risiko

Dari hasil kuesioner, didapat nilai probabilitas, dampak dan tingkat risiko sebagai berikut :

Tabel 6. Tingkat Risiko

No	Identifikasi Risiko	Probabilitas	Dampak	Tingkat Risiko
A	Risiko Lokasi	4	4	16 , Sangat tinggi
1	Sulitnya mendapat material dasar di lokasi proyek	4	4	16 , Sangat tinggi
2	Sulitnya pengiriman material dari luar lokasi proyek	4	4	16 , Sangat tinggi
3	Sulitnya pengiriman alat-alat berat dan alat angkut	4	4	16 , Sangat tinggi
4	Data tentang kondisi proyek yang diberikan pengguna jasa kurang lengkap	4	3	12 , Tinggi
5	Penyedia jasa kurang akurat dalam survei awal proyek terkait kondisi lokasi dan geografis proyek	4	4	16 , Sangat tinggi
B	Risiko Biaya			
1	Terjadinya kenaikan harga-harga material setempat akibat pelaksanaan proyek	4	4	16 , Sangat tinggi
2	Naiknya biaya pelaksanaan akibat penyedia jasa kurang akurat memperhitungkan kondisi geografis proyek	4	4	16 , Sangat tinggi
3	Naiknya biaya pelaksanaan akibat perubahan kontrak/ <i>addendum</i>	3	3	9 , Sedang
4	Terlambatnya pembayaran sertifikat bulanan sehingga mempengaruhi <i>cashflow</i> penyedia jasa	4	4	16 , Sangat tinggi
C	Risiko Pelaksanaan			
1	Berkurangnya kualitas hasil pekerjaan karena sulitnya pengadaan material	4	4	16 , Sangat tinggi
2	Bertambahnya waktu pelaksanaan karena sulitnya pengadaan material dan suku cadang alat berat	4	4	16 , Sangat tinggi
3	Hasil pekerjaan yang kurang optimal karena sulitnya SDM berkualitas yang bersedia bekerja di proyek	4	4	16 , Sangat tinggi
4	Bertambahnya waktu pelaksanaan karena sulitnya pengurusan izin kuari setempat dan izin pengangkutan alat dan material	4	4	16 , Sangat tinggi

Sumber : Hasil Olahan Data

3.4. Pengendalian Lanjutan

Langkah-langkah yang perlu diambil untuk meminimalkan tingkat risiko didapat dari pengalaman dan asumsi penulis dalam melaksanakan proyek di daerah 3T maupun non 3T sebagai berikut :

Tabel 7. Pengendalian Lanjutan Risiko

No	Deskripsi Risiko	Tingkat Risiko	Pengendalian Lanjutan Risiko
A	Risiko Lokasi		
1	Sulitnya mendapat material dasar di lokasi proyek	Sangat tinggi	Melakukan inovasi dengan material setempat
2	Sulitnya pengiriman material dari luar lokasi proyek	Sangat tinggi	Koordinasi lebih awal dengan pihak pemilik angkutan
3	Sulitnya pengiriman alat-alat berat dan alat angkut	Sangat tinggi	Koordinasi lebih awal dengan pihak pemilik angkutan
4	Data tentang kondisi proyek yang diberikan pengguna jasa kurang lengkap	Tinggi	Melakukan survei awal yang lebih rinci sebelum memasukkan penawaran
5	Penyedia jasa kurang akurat dalam survei awal proyek terkait kondisi lokasi dan geografis proyek	Sangat tinggi	Melakukan survei awal yang lebih rinci sebelum memasukkan penawaran
B	Risiko Biaya		
1	Terjadinya kenaikan harga-harga material setempat akibat pelaksanaan proyek	Sangat tinggi	Melakukan kontrak lebih awal dengan pemasok, atau menyimpan deposit uang untuk mencegah kenaikan biaya
2	Naiknya biaya pelaksanaan akibat penyedia jasa kurang akurat memperhitungkan kondisi geografis proyek	Sangat tinggi	Melakukan survei awal yang lebih rinci sebelum pelaksanaan pekerjaan
3	Naiknya biaya pelaksanaan akibat perubahan kontrak/ <i>addendum</i>	Sedang	Mempersiapkan data-data yang akurat untuk negosiasi harga item baru dengan pengguna jasa
4	Terlambatnya pembayaran sertifikat bulanan sehingga mempengaruhi <i>cashflow</i> penyedia jasa	Sangat tinggi	Mempersiapkan administrasi penagihan lebih awal
C	Risiko Pelaksanaan		
1	Berkurangnya kualitas hasil pekerjaan karena sulitnya pengadaan material	Sangat tinggi	Melakukan inovasi dengan material setempat, dan melakukan koordinasi lebih awal dengan pihak pemilik angkutan
2	Bertambahnya waktu pelaksanaan karena sulitnya pengadaan material dan suku cadang alat berat	Sangat tinggi	Melakukan inovasi dengan material setempat, koordinasi lebih awal dengan pihak angkutan, mempersiapkan stok suku cadang alat berat
3	Hasil pekerjaan yang kurang optimal karena sulitnya SDM berkualitas yang bersedia bekerja di proyek	Sangat tinggi	Menawarkan imbalan gaji dan insentif yang lebih menarik
4	Bertambahnya waktu pelaksanaan karena sulitnya pengurusan ijin kuari setempat dan ijin pengangkutan alat dan material	Sangat tinggi	Meningkatkan “kualitas” koordinasi dengan aparat/dinas terkait

Sumber : Hasil Olahan Data

Kesimpulan

Dari tabel 6. (Tingkat risiko), didapat kesimpulan untuk risiko lokasi, tingkat risiko berkisar dari tinggi sampai sangat tinggi. Untuk risiko biaya, tingkat risiko berkisar dari sedang sampai sangat tinggi. Untuk risiko pelaksanaan, tingkat risiko adalah sangat tinggi. Dari kesimpulan ini, saran yang diberikan adalah agar pihak-pihak yang terlibat dalam perencanaan maupun pelaksanaan proyek, khususnya pengguna dan penyedia jasa, agar lebih akurat dalam melaksanakan survei awal dan koordinasi dengan pihak-pihak atau instansi terkait, tidak sekedar mengejar target penyerapan anggaran bagi pengguna jasa dan target keuntungan perusahaan bagi penyedia jasa. Karena tanpa memperhitungkan risiko, ada kemungkinan proyek tidak selesai, anggaran tidak terserap, penyedia jasa mengalami kerugian, dan yang terutama niat baik pemerintah untuk meningkatkan taraf hidup masyarakat di daerah 3T tidak tercapai, mereka tetap berada dalam kesulitan, kemiskinan dan keterbelakangan.

Daftar Notasi

- Σ = Jumlah
 $\Sigma \sigma_b^2$ = Jumlah varians butir
 σ_t^2 = Varians total
 a_i = Konstanta penilaian
 k = jumlah pertanyaan kuesioner
 n = Banyaknya nilai
 r_{xy} = Korelasi antara x dan y

x_i = Nilai x ke i

y_i = Nilai y ke i

Daftar Pustaka

- Cooper, D., dkk., (2005). *Project Risk Managements Guidelines. Managing Risk in Large Projects and Complex Procurements*. pp. 1–4.
- InNalar., (2025). Gak Perlu ke Hawaii, Wisata Alam di Mentawai ini suguhkan Ombak Surfing Telescope Kelas Dunia.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Kontruksi, (2017). Pelatihan Manajemen Risiko Investasi Infrastruktur.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat,. (2016). Manajemen Risiko pada kegiatan Pembangunan Terowongan Jalan.
- Moi, F., Purnawirati, N., (2021). Analisa Manajemen Risiko Proyek Pembangunan Jalan Ruas Jala Baru Waebetu – Tarawaja, NTT. Politeknik Negeri Bali. Jurnal Talenta Sipil, Vol 4 no 1.
- Muallif., (2024). Daerah 3T. Pengertian, Permasalahan dan daftar wilayahnya di Indonesia. website Universitas Islam An Nur – Lampung.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 63, (2020). Penetapan Daerah Tertinggal Tahun 2020 – 2024.
- PPK 1.6, Provinsi Sumatera Barat., (2022). Kontrak Tipis Siberut. Paket Peningkatan Jalan dan Jembatan Bailley, Labuhan Bajau – Sigapokna, Pulau Siberut.
- Rakhman, A., (2022). Pengertian Uji Validitas dan Reabilitas. Rakhman.net.
- Rachmawati, N., Tenrisukki, A., (2020). Analisa Manajemen Risiko Pembangunan Jalan Tol (Studi Kasus Jalan Tol Becakayu). Universitas Gunadharma. Jurnal Rekayasa Sipil, Vol 14 no 1.
- Setyaning, LB., dkk., (2023). Analisa Manjemen Risiko Proyek pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Yogyakarta-Bawen. Jurnal Aplikasi Teknik Sipil, Vol.21, No. 4, 2023.
- SNI ISO 31000, (2011). Manajemen Risiko, Prinsip dan Pedoman.
- Sugiyono., (2005). Statistika untuk Penelitian. CV Alfabeta, Anggota Ikatan Penerbit Indonesia.
- Wahyudi, S., (2019). Tabel R Statistika. Rumushitung.com. 2019
- Wonderful Indonesia., (2024). Pulau Mentawai : Surga Selancar dan Keindahan Alam Tropis.

Pengembangan Katalis Berbasis Tungsten Oksida (WO_3) untuk Degradasi Limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan Teknologi Fotokatalitik

Rospita Uli, Wibawa Hendra Saputera, Dwiwahju Sasongko, dan Hary Devianto

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

Rospitauli24@gmail.com, whsaputera@itb.ac.id, sasongko@itb.ac.id, hardev@itb.ac.id

Abstrak

Industri minyak kelapa sawit menghasilkan limbah signifikan seperti POME yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. POME dapat merusak lingkungan terutama ekosistem perairan. Pengolahan POME penting untuk keberlanjutan industri ini. *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), termasuk fotokatalitik, merupakan salah satu opsi teknologi yang dikembangkan untuk mendegradasi senyawa organik dalam limbah POME. Dalam studi ini, degradasi fotokatalitik limbah POME menggunakan katalis berbasis WO_3 dengan menggunakan lampu Xenon 500 W menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam mengurai limbah POME. Fotokatalis WO_3 disintesis menggunakan metode hidrotermal pada temperatur 180, 200, 220, dan 240 °C, menghasilkan struktur kristal *Hexagonal* dan *Orthorhombic*, dan Tipe V mesopori. Penggunaan katalis WO_3 dengan konsentrasi 1 g/L mampu mengurangi *Chemical Oxygen Demand* (COD) hingga 48,05%, degradasi warna hingga 36,22%, dengan konstanta laju reaksi COD sebesar $3,7 \times 10^{-3} \text{ menit}^{-1}$.

Kata kunci: WO_3 , POME, Fotokatalitik, AOPs, COD

Abstract

The palm oil industry generates significant waste, such as POME, which can pollute the environment if not properly managed. POME can particularly damage aquatic ecosystems. Treating POME is crucial for the sustainability of this industry. *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), including photocatalysis, are being developed as a technological option to degrade organic compounds in POME waste. In this study, the photocatalytic degradation of POME waste using WO_3 -based catalysts and a 500 W Xenon lamp showed that this method effectively breaks down POME waste. WO_3 photocatalysts were synthesized using a hydrothermal method at temperatures of 180, 200, 220, and 240°C, resulting in hexagonal and orthorhombic crystal structures and Type V mesopores. Using WO_3 at a concentration of 1 g/L can reduce *Chemical Oxygen Demand* (COD) up to 48.05%, color degradation by 36.22%, with a COD reaction rate constant of $3.7 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

Keywords: WO_3 , POME, Photocatalysis, AOPs, COD

1. Pendahuluan

Industri minyak kelapa sawit merupakan sektor ekonomi yang penting, namun juga menghasilkan limbah yang cukup besar, termasuk *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Menurut data Kemenperin (2022), setiap ton minyak sawit dapat menghasilkan 2,5 m³ POME. Limbah ini merupakan hasil dari proses pengolahan tandan buah kelapa sawit dan mengandung senyawa organik, minyak, lemak, serta berbagai senyawa kimia lainnya. Konsentrasi senyawa organik yang tinggi dalam POME dapat menyebabkan dampak lingkungan yang serius jika tidak dikelola dengan baik, seperti pencemaran sumber air, penurunan kualitas air tanah, gangguan ekosistem perairan, dan kerusakan kehidupan akuatik. Oleh karena itu, pengolahan POME menjadi prioritas penting untuk menjaga kelestarian lingkungan dan keberlanjutan industri kelapa sawit.

Untuk mencari solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, teknologi fotokatalitik telah muncul sebagai alternatif teknologi yang unggul. Metode ini menggunakan katalis berbasis semikonduktor seperti Titanium Dioksida (TiO_2), Seng Oksida (ZnO), Besi (III) Oksida (Fe_2O_3), dan Tungsten Oksida (WO_3), yang diaktifkan oleh cahaya (Ultraviolet, cahaya tampak, dll) untuk mempercepat proses oksidasi senyawa organik dalam POME. Proses ini sangat efektif dalam mengurangi kandungan bahan organik dan polutan, menghadirkan solusi yang menjanjikan, berkelanjutan, dan efisien untuk pengolahan POME dalam industri kelapa sawit (Putri dkk., 2022).

WO_3 dipilih sebagai fotokatalis karena memiliki aktivitas fotokatalitik tinggi, stabilitas termal dan kimia yang baik, serta kemampuan menyerap cahaya UV dan tampak (Fakhri & Behrouz, 2015). Ketika terpapar cahaya, WO_3 menghasilkan pasangan elektron dan lubang untuk reaksi redoks, yang menguraikan senyawa organik dalam POME menjadi CO_2 dan H_2O (Prabhu dkk., 2018). Penelitian menunjukkan bahwa WO_3 efektif dalam mengurangi kandungan bahan organik, COD 48%, degradasi warna 51.15%, dan senyawa berbahaya lainnya dalam POME (Aqilah dkk., 2021).

Pada penelitian ini, pengembangan katalis WO_3 dengan variasi sintesis temperatur hidrotermal pada rentang 180-240°C dilakukan untuk melihat pengaruh temperatur sintesis pada struktur fasa kristal yang dihasilkan sehingga dapat

Info Makalah:

Dikirim : 07-29-24;
Revisi 1 : 10-29-24;
Revisi 2 : 02-21-25;
Diterima : 03-10-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -
e-mail : whsaputera@itb.ac.id

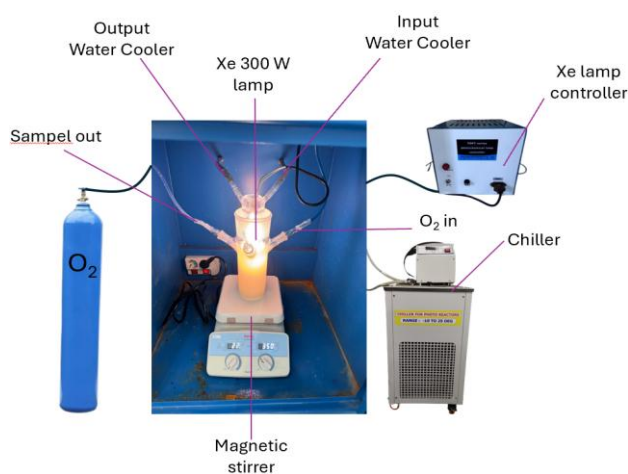
diketahui fasa kristal mana yang lebih ideal dan efisien untuk menguraikan limbah POME. Katalis yang dihasilkan dikarakterisasi sifat fisik dan kimia dengan menggunakan isoterm fisisorpsi nitrogen untuk menentukan luas permukaan dan ukuran pori dan difraksi sinar-X untuk menentukan kristalinitas dan struktur kristal WO₃. Pengujian aktivitas fotokatalitik untuk mendegradasi limbah POME dengan meninjau penurunan COD dan perubahan warna dilakukan dalam reaktor *batch* dengan menggunakan sumber sinar Xenon (Xe) 500 W ($\lambda = 200-100$ nm).

2. Metode

Penelitian ini dilakukan berdasarkan dua variabel yaitu variabel tetap dan berubah. Untuk variabel tetapnya adalah konsentrasi umpan katalis yaitu 1 g/L dan laju alir oksigen 100 mL/menit, sedangkan untuk variabel berubahnya adalah temperatur sintesis hidrotermal fotokatalis yaitu 180, 200, 220, dan 240 °C.

2.1. Bahan dan Peralatan Utama

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah WO₃ yang disintesis dengan metode hidrotermal menggunakan prekursor Na₂WO₄·2H₂O (Merck, ≥ 98%). Selain itu bahan kimia yang digunakan untuk sintesis fotokatalis adalah NaCl (Merck, ≥ 98%), HCl (Merck, ≥ 98%), dan aqua DM. Peralatan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah fotoreaktor *immersed illumination* dengan volume 500 mL seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Foto Reaktor *Immersed Illumination*

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu : persiapan fotokatalis, persiapan limbah POME, karakterisasi katalis, Uji aktivitas, fotokatalis dengan menguji kadar COD dan warna.

2.2. Sintesis Fotokatalis WO₃

WO₃ disintesis dengan metode hidrotermal. Sebanyak 0,290 gram NaCl dan 0,825 gram Na₂WO₄·2H₂O ditimbang dan dilarutkan dalam larutan aquades 13 ml dan 4 ml HCl. Larutan diaduk selama 30 menit menggunakan *magnetic stirrer*. Larutan dipindahkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan pada temperatur 180°C selama 24 jam di dalam *Oven* (Memmert UN30, Jerman). Setelah 24 jam oven dibiarkan dingin sampai mencapai suhu ruang lalu *autoclave* diambil, larutan WO₃ dicuci dengan air menggunakan corong *buchner* beberapa kali dan dikeringkan pada temperatur 100°C selama 12 jam.

2.3. Karakterisasi Katalis dan Analisis COD serta Warna Pada POME

Karakterisasi katalis penting untuk mempelajari struktur material, termasuk morfologi dan analisis fisik-kimia. Dalam penelitian ini, karakterisasi dilakukan menggunakan *X-ray diffraction* (XRD, Bruker D2 PHASER, Jerman) untuk menentukan struktur kristal material dan isoterm fisisorpsi nitrogen (Nova Touch LUX 4, USA) untuk menentukan klasifikasi pori dan luas permukaan dari fotokatalis.

2.4. Uji Aktivitas Fotokatalis untuk Degradasi Limbah POME

Pertama katalis yang telah disintesis ditimbang sebanyak 0,5 gram lalu dilarutkan ke dalam 12,5 mL POME yang telah disaring untuk memisahkan padatan-padatan yang terdapat di dalamnya. Selanjutnya disonikasi (Hwashin Ultrasonic, Power Sonic 410) selama 45 menit. Larutan yang telah disonikasi selanjutnya dilakukan penjenjuran gas oksigen (≥99%, CV Sangkuriang) 100 mL/menit selama 30 menit agar mencapai kondisi setimbang. Setelah setimbang, *chiller* yang berfungsi sebagai pendingin air *input-output* pada reaktor dan lampu xenon 500 W dinyalakan selama 180 menit dan dilakukan pengambilan sampel setiap 30 menit. Sampel POME diambil dari sistem fotoreaktor setiap 30 menit menggunakan *syringe disposable* 10 mL dengan *syringe filter* (ukuran 0,22 µm). Sebanyak 2,5 mL

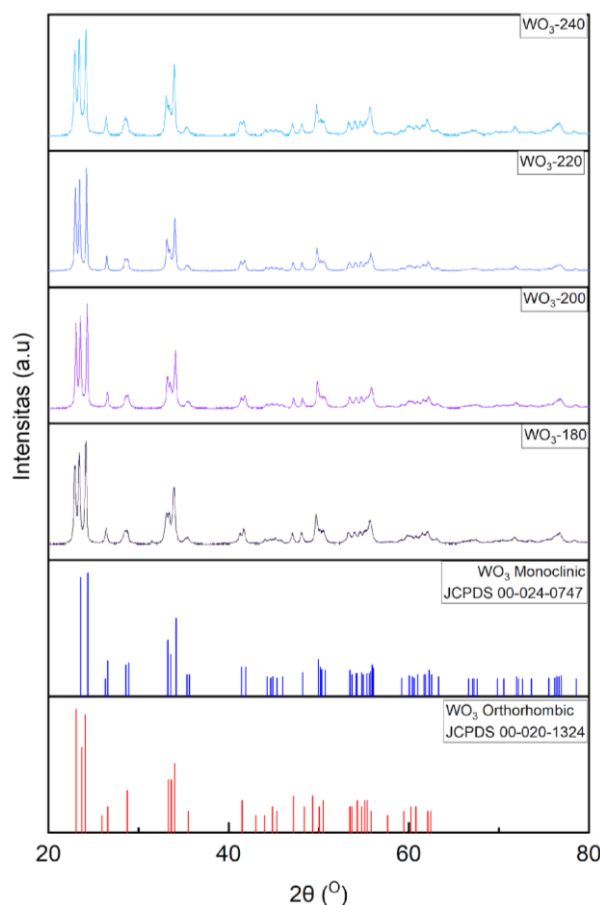
sampel yang telah difiltrasi dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang berisi pelarut dan kemudian dipanaskan pada temperatur 150°C selama 2 jam menggunakan *Thermostat Hach DRB-200 COD*. Sampel kemudian didinginkan hingga temperatur ruang sebelum dianalisis absorbansinya menggunakan spektrofotometer ganda (Shimadzu 1800, Jepang) pada panjang gelombang 550 – 650 nm. Analisis COD ini mengikuti prosedur SNI 6989:2019. Selain itu pengujian warna POME dilakukan berdasarkan SNI 6989.80:2011 tentang Air dan Air Limbah dengan metode spektrofotometri. Kurva kalibrasi ditentukan dengan mengencerkan larutan induk 500 PtCo ke berbagai konsentrasi dan mengukur absorbansi POME yang telah difiltrasi pada panjang gelombang 400 nm.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Katalis

3.1.1. X-Ray Diffraction

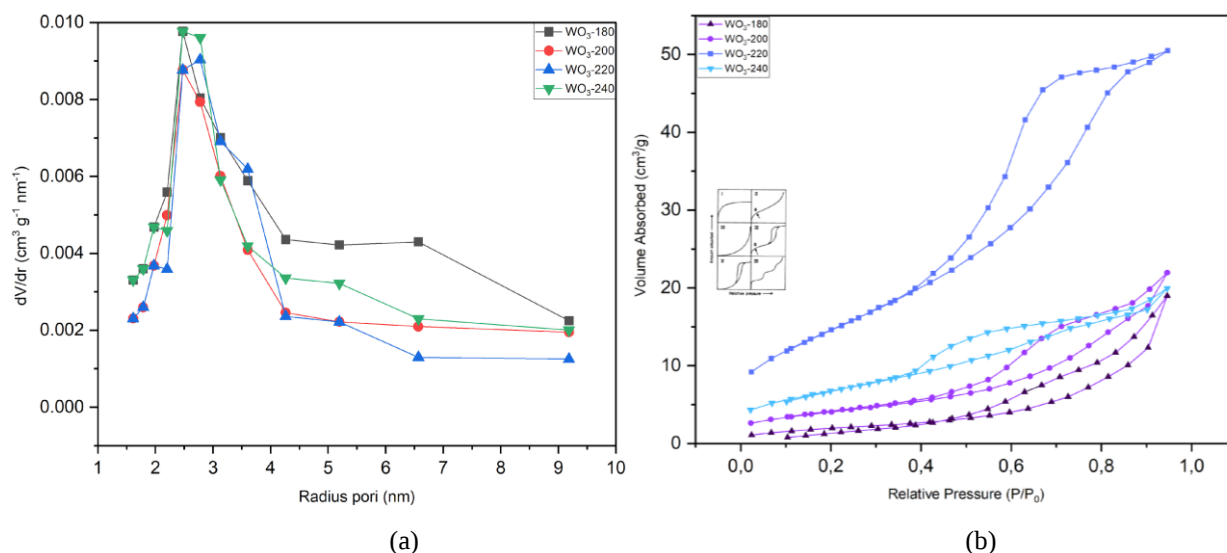
Karakterisasi XRD bertujuan untuk menentukan struktur kristal dan senyawa penyusun dari sebuah fotokatalis. Hasil karakterisasi XRD WO₃ yang disintesis dari prekursor Na₂WO₄·2H₂O dengan proses hidrotermal ditunjukkan pada Gambar 2 kemudian dicocokkan dengan *database JCPDS International Center of Diffraction Data* menggunakan *software X'pert Highscore*. Dari sini diketahui bahwa jenis struktur kristal untuk WO₃ adalah *orthorhombic* dan *monoclinic* ditunjukkan oleh Gambar 2. Fasa *orthorhombic* teridentifikasi dengan munculnya puncak difraksi pada $2\theta = 23,08^\circ, 23,70^\circ, 24,09^\circ$, dan $25,95^\circ$, yang menunjukkan bidang kristal (001), (020), (200), dan (011) dari struktur *orthorhombic* (JCPDS 00-020-1324) (Roth, 1966). Fasa *monoclinic* teridentifikasi dengan munculnya puncak difraksi pada $2\theta = 23,58^\circ, 24,28^\circ, 26,31^\circ$, dan $26,59^\circ$, yang menunjukkan bidang kristal (020), (200), (021), dan (120) dari struktur *monoclinic* (JCPDS 00-024-0747) (Smith, 1973). Adapun persentase kristalin yang diperoleh berdasarkan analisis tersebut pada variasi temperatur 180, 200, 220, dan 240°C secara berturut-turut adalah 78,6%, 78,9%, 80,2%, 78,1%. Berdasarkan hasil XRD, temperatur 200 dan 220°C menghasilkan persentase kristalinitas WO₃ lebih besar daripada variasi temperatur lainnya. Pada suhu yang terlalu rendah, seperti 180°C, energi termal yang tersedia mungkin tidak cukup untuk mendorong pembentukan kristal yang teratur. Akibatnya, persentase kristalinitas lebih rendah karena fase amorf atau partikel yang kurang teratur lebih dominan. Pada suhu menengah seperti 200°C dan 220°C, energi termal yang tersedia optimal untuk pembentukan kristal yang teratur, sehingga persentase kristalinitas meningkat (Zhang dkk., 2018).



Gambar 2. Pola XRD pada Variasi Temperatur Sintesis Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

3.1.2. Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen

Analisis isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ bertujuan untuk menentukan kurva isoterm, ukuran pori distribusi, luas permukaan, volume pori, dan radius pori. Gambar 3 menunjukkan kurva isoterm dari WO₃ yang telah disintesis pada berbagai variasi temperatur. Berdasarkan klasifikasi IUPAC, kurva adsorpsi pada Gambar 3 (a) dan (b) menunjukkan adanya mesopori (2-50 nm) dengan tipe V, yang ditandai dengan peningkatan volume adsorpsi yang tajam pada temperatur tinggi tekanan relatif ($P/P_0 \sim 1$) (Shang dkk., 2012). Kurva ini juga menampilkan *loop histeresis* H1 yang khas, yang terkait dengan pori-pori silinder yang seragam atau struktur menyerupai kapsul (Lv dkk., 2011).



Gambar 3 (a) Kurva Distribusi Jari-jari Pori dan (b) Kurva Isoterm Fisisorpsi Nitrogen pada Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Luas permukaannya adalah diukur menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET), dan volume pori serta pori rata-rata radius dihitung menggunakan metode Barrett-Joyner-Halenda (BJH). Tabel 1 menyajikan rekapitulasi data luas permukaan, volume pori, dan rata-rata jari-jari pori untuk fotokatalis WO₃ pada berbagai temperatur sintesis.

Tabel 1. Rekapitulasi Luas Permukaan, Volume Pori, dan Rata-Rata Jari-Jari Pori Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Fotokatalis	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (cm ³ /g)	Rata-rata Jari-jari Pori (nm)
WO ₃ -180	14,01	0,03	1,5
WO ₃ -200	23,98	0,04	1,6
WO ₃ -220	40,08	0,06	2,0
WO ₃ -240	17,4	0,04	1,8

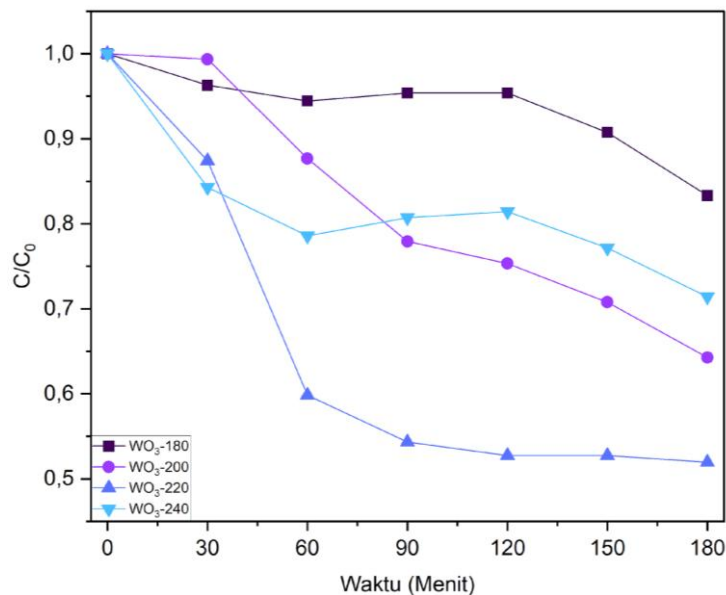
Data Tabel 1 dapat dilihat bahwa luas permukaan, volume pori, dan rata-rata jari-jari pori fotokatalis WO₃ mengalami variasi yang signifikan tergantung pada temperatur pemanasan. Pada temperatur 180 °C, luas permukaan adalah 14,01 m²/g dengan volume pori 0,03 cm³/g dan jari-jari pori rata-rata 1,5 nm. Saat temperatur pemanasan meningkat menjadi 200°C, luas permukaan meningkat menjadi 23,98 m²/g, volume pori menjadi 0,04 cm³/g, dan jari-jari pori rata-rata sedikit bertambah menjadi 1,6 nm. Kondisi optimal tampak pada temperatur 220°C, di mana luas permukaan mencapai 40,08 m²/g, volume pori 0,06 cm³/g, dan jari-jari pori 2,0 nm, menunjukkan peningkatan signifikan dalam struktur pori yang lebih terbuka. Namun, pada temperatur 240°C, terjadi penurunan luas permukaan menjadi 17,4 m²/g, volume pori kembali menurun menjadi 0,04 cm³/g, dan jari-jari pori rata-rata berkurang menjadi 1,8 nm, kemungkinan disebabkan oleh proses *sintering* atau aglomerasi partikel (Qin dkk., 2017). Dengan demikian, temperatur pemanasan mempengaruhi karakteristik fisik WO₃, di mana temperatur 220 °C menghasilkan sifat optimal untuk aplikasi fotokatalitik, sedangkan temperatur yang lebih tinggi dapat menurunkan efisiensi karena perubahan struktural.

3.2. Uji Aktivitas Katalis

3.2.1. Penurunan Parameter COD pada Limbah POME

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah parameter yang mengukur jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air limbah secara kimiawi. Prosedur pengukuran COD mengikuti regulasi

yang ditetapkan oleh pemerintah melalui SNI 6989.2:2019. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, performa degradasi keempat fotokatalis WO₃ yang telah disintesis dapat dilihat pada Gambar 4.

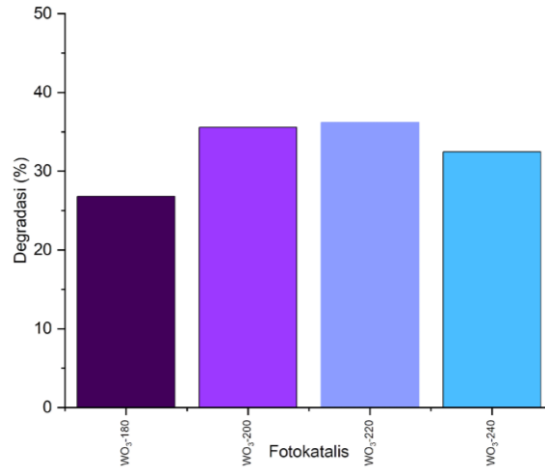


Gambar 4. Hasil Uji Aktivitas Fotokatalitik COD menggunakan Katalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Sintesis Hidrotermal.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa temperatur sintesis mempengaruhi kinerja fotokatalis. Pada penelitian ini fotokatalis WO₃ yang disintesis pada temperatur 180, 200, 220, dan 240°C, memperoleh hasil yang menarik. Secara berturut-turut tingkat degradasi yang dicapai adalah masing-masing 16,67%, 35,72%, 48,05% dan 28,58%. Pada temperatur 180°C, kinerja fotokatalis rendah, disebabkan oleh luas permukaan dan volume pori yang kecil (Jiang dkk., 2023). Peningkatan temperatur hingga 200 °C dan 220°C menunjukkan peningkatan signifikan dalam kinerja, dengan temperatur 220 °C memberikan hasil terbaik. Hal ini berkaitan dengan luas permukaan dan volume pori yang maksimal, meningkatkan jumlah permukaan aktif untuk reaksi fotokatalitik (Amadine dkk., 2017; H. Cheng dkk., 2014). Namun, pada temperatur 240°C, kinerja fotokatalis menurun, diduga akibat sintering yang menyebabkan aglomerasi partikel dan penurunan luas permukaan serta volume pori (Qin dkk., 2017). Dengan demikian, temperatur sintesis optimal untuk WO₃ adalah 220°C, di mana kinerja fotokatalitik mencapai puncaknya. Selain luas permukaan dan volume pori, kristalinitas katalis juga berpengaruh langsung terhadap efisiensi degradasi polutan. Katalis dengan kristalinitas tinggi memiliki struktur yang teratur, memudahkan pergerakan dan pemisahan pasangan elektron-hole yang dihasilkan saat terpapar cahaya. Pemisahan yang efektif ini mengurangi rekombinasi pasangan elektron-hole, sehingga meningkatkan interaksi dengan polutan dan mempercepat degradasi (Zhang dkk., 2018).

3.2.2. Penurunan Parameter Warna pada Limbah POME

Palm Oil Mill Effluent (POME) memiliki karakteristik visual berupa warna coklat, konsistensi kental, dan bau yang tajam. Gambar 5 menunjukkan efek temperatur sintesis terhadap penurunan warna dalam POME. Temperatur sintesis WO₃ sangat mempengaruhi kinerja fotokatalis, Penggunaan katalis yang tepat dan dalam konsentrasi yang optimal dapat mempercepat proses degradasi bahan organik dan meningkatkan kualitas air hasil pengolahan limbah tersebut (Ameta dkk., 2013). Perubahan warna pada POME dipantau selama proses, dengan harapan warna tersebut sesuai akan menjadi lebih jelas seiring berjalannya waktu. Adapun perubahan warna dapat ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil menunjukkan bahwa performa terbaik terdapat pada fotokatalis WO₃-220 dengan persentase 36,22%.



Gambar 5. Persentase Degradasi Warna Limbah POME setelah Waktu Reaksi 3 Jam menggunakan Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Peningkatan temperatur sintesis memberikan beberapa manfaat yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi degradasi. Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan kristalinitas dan interaksi antara partikel, menghasilkan struktur yang lebih teratur dan homogen (Xu dkk., 2017). Hal ini memungkinkan terbentuknya lebih banyak area aktif pada permukaan fotokatalis, yang penting untuk reaksi fotokatalitik degradasi limbah POME.

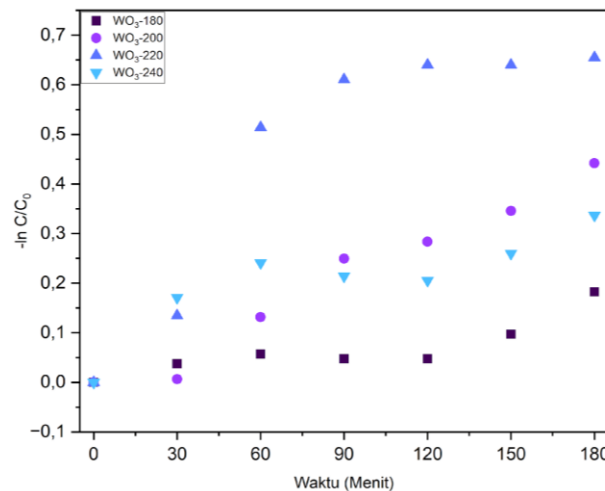
3.2.3. Analisa Konstanta Kinetika Degradasi Limbah POME

Berdasarkan data degradasi kandungan organik (COD) dan perubahan warna, kinetika reaksi penurunan dapat dianalisis. Terdapat tiga pendekatan umum untuk menentukan kinetika reaksi, yaitu Langmuir-Hinshelwood (L-H), Eley-Rideal (ER), dan Mars Van Krevelen (MVK). Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan L-H dengan asumsi bahwa reaksi terjadi di permukaan katalis, melibatkan proses adsorpsi dan desorpsi dua reaktan. Selain itu, reaksi diasumsikan mengikuti model kuasi orde pertama, dengan satu reaktan (oksigen) dalam kondisi jenuh, sehingga hanya perubahan konsentrasi senyawa organik yang dianalisis melalui perubahan COD dan warna. Dengan asumsi ini, kinetika reaksi dapat diekspresikan dalam bentuk Persamaan 1 dan 2.

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (1)$$

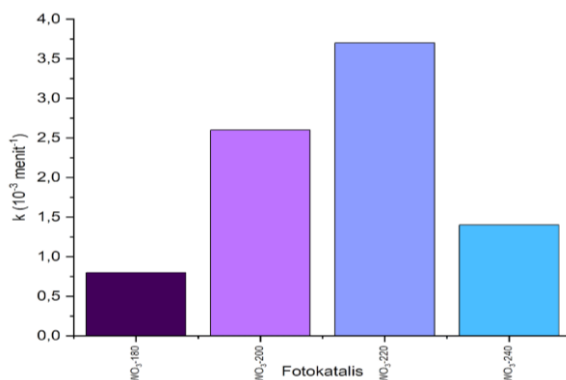
$$-\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad (2)$$

Untuk menentukan konstanta laju reaksi (k), dilakukan plot linear antara $\ln(C_0/C)$ terhadap waktu (t), di mana k merupakan kemiringan dari plot linear tersebut. Analisis ini memberikan pemahaman tentang kinetika degradasi penggunaan POME fotokatalis WO₃ pada berbagai temperatur sintesis seperti yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva Kinetika Degradasi COD menggunakan Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Gambar 6 menunjukkan laju degradasi COD dari fotokatalis WO₃ yang disintesis pada berbagai temperatur pemanasan: 180, 200, 220, dan 240°C. Fotokatalis yang disintesis pada temperatur 200°C dan 220°C menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan temperatur lainnya. Pada temperatur 200°C, degradasi COD meningkat secara konsisten seiring waktu, mencapai nilai $-\ln C/C_0$ 0,44 setelah 180 menit. Sementara itu, fotokatalis pada temperatur 220°C menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai $-\ln C/C_0$ 0,65 setelah 180 menit, menunjukkan aktivitas fotokatalitik tertinggi, hal ini disebabkan oleh luas permukaan dan volume pori yang optimal yang menyediakan lebih banyak permukaan aktif untuk reaksi (Amadine dkk., 2017). Sebaliknya, fotokatalis yang disintesis pada temperatur 180°C menunjukkan kinerja terendah dengan nilai $-\ln C/C_0$ hanya sekitar 0,18 setelah 180 menit, hal ini dikarenakan luas permukaan dan volume pori yang kecil (H. Cheng dkk., 2014). Fotokatalis pada temperatur 240°C juga menunjukkan penurunan kinerja, dengan nilai $-\ln C/C_0$ sekitar 0,33 setelah 180 menit, yang mungkin disebabkan oleh proses *sintering* pada temperatur tinggi yang menyebabkan aglomerasi partikel dan mengurangi luas permukaan spesifik serta jumlah permukaan aktif (Qin dkk., 2017). Secara keseluruhan, temperatur sintesis optimal untuk fotokatalis WO₃ adalah 220 °C, dimana luas permukaan dan volume pori berada pada kondisi yang paling menguntungkan untuk reaksi fotokatalitik (Zhu dkk., 2017). Nilai konstanta laju reaksi (k) untuk COD ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Konstanta Laju Reaksi untuk Degradasi COD menggunakan Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Dari Gambar 7, dapat dilihat bahwa untuk nilai k untuk COD (*Chemical Oxygen Demand*) dari fotokatalis WO₃ yang diperoleh dari variasi temperatur sintesis memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi degradasi COD. Pada temperatur 180°C, nilai k adalah $0,8 \times 10^{-3}$ menit⁻¹, pada saat temperatur sintesis dinaikkan menjadi 200°C nilai k yang diperoleh juga meningkat menjadi $12,6 \times 10^{-3}$ menit⁻¹. Puncaknya adalah pada temperatur sintesis 220°C dimana nilai k tertinggi diperoleh yaitu $3,7 \times 10^{-3}$ menit⁻¹, sedangkan pada temperatur 240°C nilai k berkurang menjadi $1,4 \times 10^{-3}$ menit⁻¹. Hal ini sejajar dengan hasil karakterisasi serta hasil uji degradasi untuk COD dan warna bahwa pada temperatur 200 dan 220°C memiliki hasil terbaik. Berdasarkan penelitian yang telah diperoleh kemudian dapat ditabulasikan perbandingan kinetika degradasi antara penelitian ini dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Perbandingan Hasil Penelitian dalam Pengembangan Fotokatalis untuk Degradasi Limbah POME

Fotokatalis	Konsentrasi Fotokatalis (g/L)	Celah Pita (eV)	Sumber Sinar	Waktu Reaksi (Menit)	Penurunan COD (%)	Penurunan Warna (%)	Konstanta kinetika laju reaksi (menit ⁻¹)	Referensi
WO ₃	1,0	-	Xenon 500 W	180	48,05	36,22	$3,7 \times 10^{-3}$	Penelitian ini
WO ₃ / g-C ₃ N ₄	1,0	2,80	Xenon 100 W	420	17,00	30,00	$2,4 \times 10^{-3}$	(Razali dkk., 2022)
Ag/ TiO ₂	1,5	2,69	UV-Vis	480	26,77	-	$6,61 \times 10^{-4}$	(Ng dkk., 2016)
3LaCa	3,0	3,10	UV-Vis	240	54,00	-	$3,6 \times 10^{-3}$	(Shariah Ghazali dkk., 2019)
Pt/TiO ₂	0,2	3,16	UV 100 W	80	11,00	-	$1,34 \times 10^{-3}$	(C. K. Cheng dkk., 2015)
WO ₃	1,0	3,20	UV-Vis	240	48,00	51,15		(Aqilah dkk., 2021)
BiVO ₄	1,0	2,50	Xenon 300 W	240	47,00	-	$1,04 \times 10^{-3}$	(Saputera dkk., 2021)

Efisiensi fotokatalitik sangat bergantung pada sifat elektrik material, terutama celah pita (*band gap*) dan kemampuan pemisahan muatan (*electron-hole separation*). Berdasarkan data pada tabel terdapat dua aspek penting yang dapat dikaitkan dengan kinerja katalis yaitu:

a. Celah Pita dan Penyerapan Cahaya:

WO₃ (3,20 eV) dan TiO₂ (3,16 eV) hanya dapat diaktifkan dalam rentang UV, sehingga sistem berbasis UV-Vis menunjukkan performa yang baik dalam degradasi COD, sedangkan untuk WO₃/g-C₃N₄ (2,80 eV) dan BiVO₄ (2,50 eV) memiliki celah pita lebih kecil, sehingga dapat menyerap lebih banyak cahaya tampak. Namun, penurunan COD pada WO₃/g-C₃N₄ relatif rendah (17%) dibandingkan WO₃ murni, yang dapat disebabkan oleh tingkat rekombinasi elektron-hole yang masih cukup tinggi (Razali dkk., 2022).

b. Modifikasi dengan Logam Mulia dan Oksida Lain:

Ag/TiO₂ dan Pt/TiO₂ menunjukkan konstanta kinetika (*k*) yang lebih rendah dibandingkan WO₃, meskipun Pt dan Ag biasanya dapat meningkatkan efisiensi pemisahan muatan. Menurut Cheng dkk (2017), hal ini mungkin disebabkan oleh perbedaan sumber cahaya dan intensitasnya.

Sementara itu konsentrasi katalis mempengaruhi jumlah situs aktif yang tersedia untuk reaksi fotokatalitik. Namun, ada batas optimal di mana peningkatan konsentrasi katalis dapat menurunkan efisiensi karena *scattering* cahaya dan penggumpalan partikel (Wang dkk., 2021). Katalis Pt/TiO₂ (0,2 g/L) memiliki efisiensi degradasi COD rendah (11%), dikarenakan jumlah situs aktif yang terlalu sedikit (Cheng dkk., 2015) sedangkan WO₃ (1,0 g/L) dalam penelitian ini menunjukkan efisiensi tinggi (48,05%), menunjukkan bahwa konsentrasi ini cukup optimal untuk sistem fotokatalitik dengan lampu Xenon 500 W. Meskipun Pt/TiO₂ dikenal memiliki efisiensi pemisahan muatan yang baik karena keberadaan logam mulia (*platinum*), efisiensinya tergantung pada sumber cahaya yang digunakan (Cheng dkk., 2015).

Pada penelitian ini, WO₃ diaktifkan menggunakan lampu Xenon 500 W, yang memancarkan spektrum cahaya yang lebih luas, termasuk cahaya tampak. Sementara itu, Pt/TiO₂ hanya menggunakan UV 100 W, yang mungkin membatasi efektivitas katalis tersebut.

Kesimpulan

Penggunaan WO₃ untuk mendegradasi limbah POME belum banyak dieksplorasi, meskipun memiliki potensi besar sebagai fotokatalis untuk aplikasi ini. Penelitian ini membuktikan bahwa semikonduktor WO₃ dapat disintesis dengan sukses melalui metode hidrotermal pada variasi temperatur 180, 200, 220, dan 240 °C. Hasil karakterisasi menunjukkan pembentukan struktur kristal *orthorhombic* dan *monoclinic* serta klasifikasi mesopori (Tipe V). Uji aktivitas fotokatalitik menunjukkan bahwa WO₃ yang disintesis pada temperatur 220 °C dengan konsentrasi katalis 1gr/L dengan menggunakan lampu Xenon 500W memiliki efisiensi degradasi tertinggi. Fotokatalis ini mampu mengurangi COD 48,05%, warna 36,22% dengan nilai konstanta laju reaksi (*k*) pengurangan COD sebesar $3,7 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Temuan ini menunjukkan potensi besar WO₃ sebagai fotokatalis dalam mendegradasi limbah POME, yang dapat menjadi solusi yang berharga dalam pengelolaan lingkungan.

Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan performa fotokatalis WO₃ yang lebih baik, yaitu:

- Modifikasi material katalis: mengingat potensi WO₃ yang tinggi, penambahan material lain seperti TiO₂, atau doping dengan logam transisi atau non-logam, dapat dilakukan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan memperluas spektrum penyerapan cahaya hingga area cahaya tampak.
- Optimasi parameter proses: meskipun penelitian ini menunjukkan hasil yang optimum pada suhu 220°C, diperlukan studi lebih lanjut untuk mengoptimalkan parameter lain seperti pH larutan, intensitas cahaya, dan waktu kontak.
- Menggunakan sumber cahaya yang berbeda: penggunaan lampu xenon pada penelitian ini memberikan hasil yang baik, namun perlu dieksplorasi potensi sumber cahaya lain yang lebih ramah lingkungan.

Daftar Notasi

C = Konsentrasi warna pada waktu t menit [mg/L]

C₀ = Konsentrasi warna pada t = 0 [mg/L]

k = Konstanta laju reaksi [menit⁻¹]

Daftar Pustaka

- Amadine, O., Essamlali, Y., Fihri, A., Larzek, M., & Zahouily, M. (2017). Effect of calcination temperature on the structure and catalytic performance of copper-ceria mixed oxide catalysts in phenol hydroxylation. *RSC Advances*, 7(21), 12586–12597. <https://doi.org/10.1039/c7ra00734e>
- Ameta, R., Benjamin, S., Ameta, A., & Ameta, S. C. (2013). Photocatalytic degradation of organic pollutants: A review. *Materials Science Forum*, 734, 247–272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.734.247>

- Aqilah, N., Razali, M., Norharyati, W., Salleh, W., Rosman, N., & Hafiza, N. (2021). Materials Today : Proceedings Palm oil mill effluent treatment using tungsten trioxide: Adsorption and photocatalytic degradation. *Materials Today: Proceedings*, 42, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.424>
- Cheng, C. K., Rizaiddin Derahman, M., & Khan, M. R. (2015). Evaluation of the photocatalytic degradation of pre-treated palm oil mill effluent (POME) over Pt-loaded titania. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.10.016>
- Cheng, H., Wang, J., Zhao, Y., & Han, X. (2014). Effect of phase composition, morphology, and specific surface area on the photocatalytic activity of TiO₂ nanomaterials. *RSC Advances*, 4(87), 47031–47038. <https://doi.org/10.1039/c4ra05509h>
- Fakhri, A., & Behrouz, S. (2015). Photocatalytic properties of tungsten trioxide (WO₃) nanoparticles for degradation of Lidocaine under visible and sunlight irradiation. *Solar Energy*, 112, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.014>
- Jiang, S., You, Z., & Tang, N. (2023). Effects of Calcination Temperature and Calcination Atmosphere on the Performance of CO₃O₄ Catalysts for the Catalytic Oxidation of Toluene. *Processes*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/pr11072087>
- Lv, K., Li, J., Qing, X., Li, W., & Chen, Q. (2011). Synthesis and photo-degradation application of WO₃/TiO₂ hollow spheres. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1–2), 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.038>
- Ng, K. H., Lee, C. H., Khan, M. R., & Cheng, C. K. (2016). Photocatalytic degradation of recalcitrant POME waste by using silver doped titania: Photokinetics and scavenging studies. *Chemical Engineering Journal*, 286, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.072>
- Prabhu, S., Cindrella, L., Kwon, O. J., & Mohanraju, K. (2018). Photoelectrochemical and photocatalytic activity of TiO₂-WO₃ heterostructures boosted by mutual interaction. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 88(June), 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.07.028>
- Putri, R. M., Almunadya, N. S., Amri, A. F., Afnan, N. T., Nurachman, Z., Devianto, H., & Saputera, W. H. (2022). Structural Characterization of Polycrystalline Titania Nanoparticles on C. striata Biosilica for Photocatalytic POME Degradation. *ACS Omega*, 7(48), 44047–44056. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05450>
- Qin, Y., Xun, S., Zhan, L., Lu, Q., He, M., Jiang, W., Li, H., Zhang, M., Zhu, W., & Li, H. (2017). Synthesis of mesoporous WO₃/TiO₂ catalyst and its excellent catalytic performance for the oxidation of dibenzothiophene. *New Journal of Chemistry*, 41(2), 569–578. <https://doi.org/10.1039/c6nj02503j>
- Razali, N. A. M., Salleh, W. N. W., Aziz, F., Jye, L. W., Yusof, N., Jaafar, J., & Ismail, A. F. (2022). Influence of g-C₃N₄ and PANI onto WO₃ photocatalyst on the photocatalytic degradation of POME. *Materials Today: Proceedings*, 65, 3054–3059. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.118>
- Saputera, W. H., Amri, A. F., Mukti, R. R., Suendo, V., Devianto, H., & Sasongko, D. (2021). Photocatalytic degradation of palm oil mill effluent (Pome) waste using bivo4 based catalysts. *Molecules*, 26(20). <https://doi.org/10.3390/molecules26206225>
- Shang, X., Hu, G., He, C., Zhao, J., Zhang, F., Xu, Y., Zhang, Y., Li, J., & Chen, J. (2012). Regeneration of full-scale commercial honeycomb monolith catalyst (V₂O₅-WO₃/TiO₂) used in coal-fired power plant. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(1), 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.070>
- Shariah Ghazali, S., Jusoh, R., & Haslinda Shariffuddin, J. (2019). Parameter Affecting Photocatalytic Degradation of POME using LaCa as Photocatalyst. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1173–1182. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.120>
- Wang, Q., Zhang, W., Hu, X., Xu, L., Chen, G., & Li, X. (2021). Hollow spherical WO₃/TiO₂ heterojunction for enhancing photocatalytic performance in visible-light. *Journal of Water Process Engineering*, 40(July 2020), 101943. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101943>
- Xu, T., Wang, Y., Zhou, X., Zheng, X., Xu, Q., Chen, Z., Ren, Y., & Yan, B. (2017). Fabrication and assembly of two-dimensional TiO₂/WO₃·H₂O heterostructures with type II band alignment for enhanced photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, 403, 564–571. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.242>
- Zhu, X., Zhang, P., Li, B., Hu, Q., Su, W., Dong, L., & Wang, F. (2017). Preparation, characterization and photocatalytic properties of La/WO₃ composites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(16), 12158–12167. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7030-3>

Review Optimalisasi Pengelolaan Pengotoran dan Korosi pada Sistem Perpindahan Panas terhadap *Reheater* pada PLTU

Sutiono Watiko Putro, dan Dani Rusirawan

Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia
sutionowatikoptr@gmail.com, danir@itenas.ac.id

Abstrak

Pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas pembangkit listrik termal dapat mengurangi efisiensi operasional dan memperpendek umur peralatan. Masalah pengotoran di pembangkit listrik termal telah menjadi tantangan signifikan dalam pengelolaan efisiensi operasional. Pengotoran, yang umumnya disebabkan oleh akumulasi abu atau endapan pada permukaan perpindahan panas seperti pemanas ulang (*reheater*), mengurangi efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi energi. Kondisi ini menyebabkan tidak hanya penurunan kinerja termal tetapi juga biaya operasional yang lebih tinggi akibat kebutuhan pembersihan yang lebih sering dan potensi kerusakan komponen *system*. Artikel ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi pengotoran dan korosi serta mengevaluasi upaya pencegahan yang dapat meningkatkan kinerja sistem. Metode yang digunakan adalah melihat hasil deskriptif studi kasus pada beberapa unit pembangkit listrik termal. Variabel yang dianalisis mencakup jenis material pipa, kualitas air, dan pengelolaan pemeliharaan, dengan cara pengumpulan data dari beberapa penelitian sebelumnya maka didapat perbandingan untuk ketahanan dan cara menambah efisiensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas air dan pemilihan material pipa yang tepat berperan signifikan dalam mengurangi tingkat pengotoran dan korosi sehingga proses pemanasan tidak terhambat oleh faktor-faktor tersebut. Implikasi penelitian ini dapat memberikan rekomendasi perbaikan pada sistem perpindahan panas pembangkit listrik termal, guna meningkatkan efisiensi operasional dan memperpanjang umur peralatan.

Kata kunci: *reheater*, pengotoran, korosi, sistem perpindahan panas, pembangkit listrik termal

Abstract

Fouling and corrosion within heat transfer systems of thermal power plants can significantly decrease operational efficiency and reduce equipment lifespan. Managing fouling has become a major concern, as it negatively impacts heat exchange performance and increases energy consumption. Typically, fouling occurs due to accumulation of ash or other deposits on heat transfer surfaces like reheaters. This buildup not only lowers thermal efficiency but also raises operational costs by necessitating more frequent cleaning and increasing the risk of damage to system components. The purpose of this study is to identify the key factors influencing fouling and corrosion, as well as to evaluate preventive strategies that can enhance system performance. A descriptive approach was applied by analyzing case studies from multiple thermal power plant units. The study focuses on variables such as pipe material, water quality, and maintenance practices. By reviewing data from prior research, comparisons were made to assess material durability and ways to optimize system efficiency. The findings reveal that maintaining good water quality and selecting appropriate pipe materials are critical in minimizing fouling and corrosion. These insights can help develop effective recommendations to improve heat transfer systems, leading to better efficiency and longer operational life for power plant equipment.

Keywords: *reheater*, fouling, corrosion, heat transfer system, thermal power plant

1. Pendahuluan

Energi sangat penting bagi aktivitas manusia dan kemajuan masyarakat, energi terbarukan yang dikenal karena keberlanjutannya dan jejak karbon yang sangat rendah dipandang penting untuk memenuhi tujuan lingkungan. Ada komitmen global yang berkembang untuk mengembangkan sumber energi ini diantaranya rencana implementasi untuk mempromosikan pengembangan energi baru berkualitas tinggi di era baru namun sifat sumber daya terbarukan yang tidak menentu ini menghadirkan tantangan bagi stabilitas jaringan dan penyediaan listrik yang handal. Masalah pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas di pembangkit listrik termal telah menjadi tantangan signifikan dalam pengelolaan efisiensi operasional. Pengotoran, yang umumnya disebabkan oleh akumulasi abu atau endapan

Info Makalah:

Dikirim : 12-31-25;
Revisi 1 : 03-11-25;
Diterima : 03-12-25.

Penulis Korespondensi:

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

pada permukaan perpindahan panas seperti pemanas ulang (*reheater*), mengurangi efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi energi. Kondisi ini menyebabkan tidak hanya penurunan kinerja termal tetapi juga biaya operasional yang lebih tinggi akibat kebutuhan pembersihan yang lebih sering dan potensi kerusakan komponen sistem. (Sivathanu & Subramanian, 2018). Dampak pengotoran diperparah oleh metode tradisional dalam mengelola peniupan jelaga, yang sering kali menggunakan jadwal konservatif

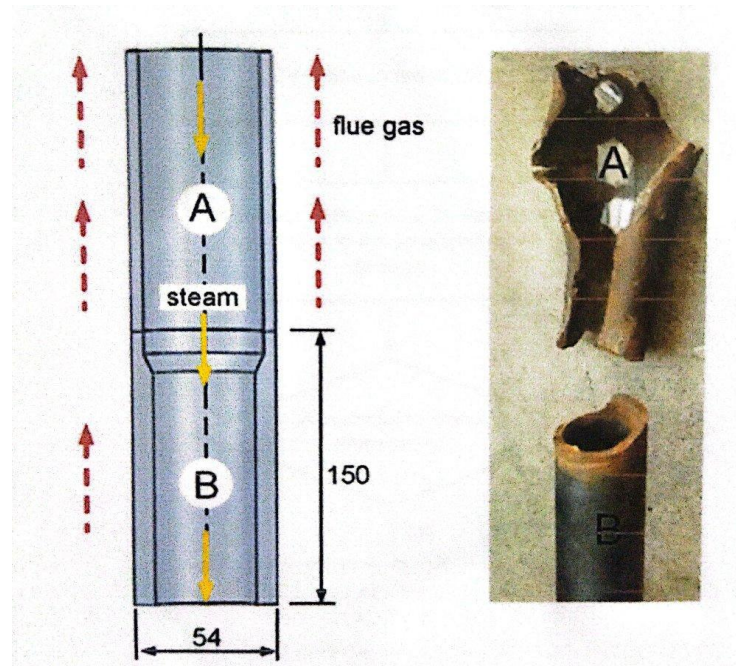
tanpa mempertimbangkan kondisi nyata dari tingkat pengotoran. Sebagai akibatnya, operasi peniupan jelaga yang terlalu sering dapat memboroskan sumber daya seperti uap dan menyebabkan erosi pada tabung. (Tallinn, 2023) Sebaliknya, peniupan jelaga yang tidak memadai dapat mempercepat penurunan efisiensi perpindahan panas dan bahkan merusak sistem lebih lanjut. Selain pengotoran, korosi yang disebabkan oleh pengotoran abu mengancam integritas mekanis dari *reheater* suhu rendah. Teknologi modern, seperti pemanas unggun terfluidisasi (*fluidized bed*), memberikan solusi parsial, namun, tantangan tetap ada dalam memprediksi secara akurat tingkat pengotoran dan korosi untuk mencegah kegagalan sistem (Khorampoor dkk., 2024).

Sebagai upaya untuk mengatasi masalah ini, diperlukan pendekatan berbasis teknologi yang mampu memberikan pemantauan dan estimasi pengotoran secara *real-time*. Penelitian terbaru mulai menjelajahi penggunaan metode berbasis model, seperti filter kalman ganda yang diperluas (*Dual Extended Kalman Filter* atau DEKF), untuk memberikan solusi yang lebih presisi dalam menganalisis tingkat pengotoran dan dampaknya pada efisiensi perpindahan panas. (Internasional dkk., 2021) Efisiensi sistem perpindahan panas di pembangkit listrik termal sering terhambat oleh pengotoran dan korosi, terutama pada pemanas ulang (*reheater*) suhu rendah. Permasalahan ini terjadi akibat akumulasi abu atau endapan pada permukaan perpindahan panas, yang menyebabkan penurunan drastis dalam kinerja termal. Dalam sistem yang bergantung pada operasi kontinu dan efisiensi tinggi, seperti pembangkit listrik, keterlambatan dalam mendeteksi dan menangani pengotoran dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan, kerusakan perangkat keras, serta potensi pemadaman unit yang tidak direncanakan. (C. Wang dkk., 2022) Salah satu tantangan utama adalah ketidakmampuan metode konvensional untuk mendeteksi dan memprediksi pengotoran secara *real-time*. Sistem peniupan jelaga, misalnya, umumnya dijalankan berdasarkan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan tingkat pengotoran aktual. Akibatnya, pengoperasian yang terlalu sering menyebabkan pemborosan sumber daya seperti uap, sementara frekuensi yang terlalu jarang mengakibatkan pengurangan efisiensi perpindahan panas dan memperburuk korosi (Chantasiriwan, 2023)

Lebih jauh, ketergantungan pada metode berbasis instrumen tradisional, seperti pengukuran suhu gas buang secara akustik, memiliki keterbatasan signifikan. Teknik ini hanya memberikan informasi lokal yang tidak mencerminkan kondisi pengotoran secara keseluruhan. Sementara itu, pendekatan berbasis model tradisional memerlukan data eksperimental yang besar dan sering kali bias karena keterbatasan parameter yang dapat diukur secara langsung. Tantangan ini menggarisbawahi perlunya metode baru yang lebih akurat untuk mendeteksi pengotoran dan memprediksi dampaknya pada efisiensi perpindahan panas. Pengembangan pendekatan berbasis model, seperti *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF), menawarkan potensi solusi yang signifikan. Teknologi ini dapat mengatasi keterbatasan pendekatan sebelumnya dengan menyediakan estimasi parameter pengotoran secara lebih presisi dan memungkinkan pengelolaan yang lebih efektif terhadap peniupan jelaga (Zima, 2019)

Artikel ini bertujuan untuk mengatasi tantangan pengelolaan pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas, khususnya pada pemanas ulang (*reheater*) suhu rendah di pembangkit listrik termal. Secara spesifik, bertujuan untuk merancang dan menerapkan metode berbasis model, seperti *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF), yang dapat memantau tingkat pengotoran secara *real-time*. Teknologi ini dirancang untuk memberikan estimasi parameter pengotoran yang akurat berdasarkan variabel operasi yang terukur, seperti suhu dan aliran massa gas buang. Pendekatan ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan metode konvensional yang cenderung bias dan kurang fleksibel dalam kondisi operasi nyata. Tujuan lain adalah untuk meningkatkan efektivitas peniupan jelaga dengan mengintegrasikan data prediksi pengotoran ke dalam pengaturan jadwal peniupan. Dengan cara ini, operasi peniupan dapat disesuaikan dengan kondisi aktual sistem, mengurangi pemborosan sumber daya seperti uap, serta menghindari erosi yang disebabkan oleh penguapan yang terlalu sering. (Xuan dkk., 2020) dari artikel ini kita dapat membandingkan kinerja DEKF dengan pendekatan konvensional seperti *Joint-Extended Kalman Filter* (JEKF) melalui simulasi dan validasi menggunakan data operasional pembangkit listrik. Hasil ini diharapkan dapat menunjukkan keunggulan DEKF dalam memperkirakan parameter model pengotoran dan efisiensi perpindahan panas

Dengan mengembangkan solusi berbasis teknologi yang lebih akurat, artikel ini dapat memberikan kontribusi praktis terhadap peningkatan efisiensi operasional pembangkit listrik termal. Hal ini mencakup pengurangan biaya operasional, pengurangan kerusakan perangkat keras, serta peningkatan keberlanjutan operasional seperti gambar berikut,



Gambar 1. Tabung *Superheater* Rusak Setelah Beroperasi Selama 115.360 jam

Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi berbagai pendekatan untuk mengatasi pengotoran dan korosi pada pemanas ulang di pembangkit listrik termal (Oyedepo dkk., 2020). Namun, sejumlah celah dalam literatur tetap memengaruhi efektivitas solusi yang ada metode berbasis instrumen, seperti pengukuran suhu gas buang secara akustik, sering kali hanya memberikan data lokal yang tidak mencerminkan kondisi pengotoran secara keseluruhan. Pendekatan ini tidak mampu memberikan gambaran yang komprehensif dan *real-time* tentang tingkat pengotoran pada seluruh permukaan perpindahan panas

Pendekatan berbasis model tradisional, seperti model termal berbasis persamaan diferensial parsial, membutuhkan parameter eksperimen yang besar dan sering kali bias karena tidak tersedianya data pengukuran yang lengkap. (Yanping, 2020) Selain itu, metode ini memerlukan solusi numerik yang kompleks, yang membatasi penerapan praktis dalam kondisi operasi nyata. Meskipun teknologi modern seperti jaringan saraf tiruan telah diterapkan untuk memprediksi efisiensi perpindahan panas, teknologi ini juga memiliki kelemahan, seperti kebutuhan akan data pelatihan yang besar dan sulitnya menangani data yang tidak konsisten atau bervariasi. Teknologi berbasis filter Kalman, seperti *Joint-Extended Kalman Filter* (JEKF), juga memiliki keterbatasan dalam menghadapi kompleksitas sistem nonlinier yang dinamis (Yanping, 2020)

Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada simulasi dan analisis teoritis tanpa validasi ekstensif menggunakan data operasional nyata. Hal ini mengurangi keandalan hasil penelitian dalam aplikasi praktis. Selain itu, kebutuhan akan sistem monitoring yang *real-time* dan adaptif belum sepenuhnya terjawab oleh pendekatan yang ada. *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF) menawarkan solusi inovatif untuk menjawab celah ini. Metode ini mampu mengatasi kelemahan pada pendekatan berbasis model dan instrumen tradisional dengan menyediakan prediksi parameter pengotoran secara presisi dan *real-time*. Namun, aplikasi DEKF dalam pengelolaan pengotoran pada pemanas ulang masih belum dieksplorasi secara mendalam

Artikel ini menawarkan kontribusi baru dalam pengelolaan pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas di pembangkit listrik termal. Keunikan dari artikel ini terletak pada penerapan metode *Dual Extended Kalman Filter* (DEKF) untuk mendeteksi dan memantau pengotoran secara *real-time*. Metode ini menghadirkan pendekatan yang lebih adaptif, presisi, dan efisien dibandingkan dengan metode konvensional seperti *Joint-Extended Kalman Filter* (JEKF) atau pendekatan berbasis instrumen tradisional

Integrasi Teknologi DEKF menjadi salah satu studi pertama yang mengaplikasikan teknologi DEKF untuk menganalisis tingkat pengotoran pada pemanas ulang (*reheater*) di pembangkit listrik termal. Teknologi ini memungkinkan pengelolaan data operasional secara lebih akurat dan efisien dibandingkan metode tradisional (X. Wang & Zhang, 2023) *Monitoring Real-Time*: DEKF menawarkan kemampuan *monitoring real-time* yang dapat memperbaiki prediksi tingkat pengotoran berdasarkan variabel terukur, seperti suhu dan aliran massa gas buang. Hal ini memberikan solusi yang inovatif untuk mengoptimalkan jadwal peniupan jelaga berdasarkan kondisi aktual sistem. Validasi dengan data operasional nyata: Studi ini memanfaatkan data operasional nyata untuk memvalidasi simulasi yang dilakukan. Ini menjadikan penelitian lebih relevan secara praktis dan aplikatif dibandingkan dengan studi yang hanya bergantung pada simulasi teoretis. Relevansi industri: permasalahan pengotoran dan korosi secara langsung

memengaruhi efisiensi dan biaya operasional pembangkit listrik. Artikel ini memberikan solusi praktis yang dapat membantu operator pembangkit listrik mengurangi pemborosan energi, memperpanjang masa pakai perangkat keras, dan meningkatkan efisiensi sistem perpindahan panas. Studi ini menjembatani celah dalam penelitian sebelumnya, dengan menggabungkan pendekatan berbasis model dan instrumen dalam satu sistem yang adaptif. Selain itu, penggunaan DEKF sebagai alat deteksi pengotoran memberikan kontribusi signifikan pada pengembangan teknologi *monitoring* termal berbasis model. (Nuklir, 2019) Dengan mengurangi frekuensi peniupan jelaga yang tidak diperlukan dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas, artikel ini juga memiliki dampak positif terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, menjadikannya solusi yang lebih ramah lingkungan (Zheng dkk.,2021)

2. Metode

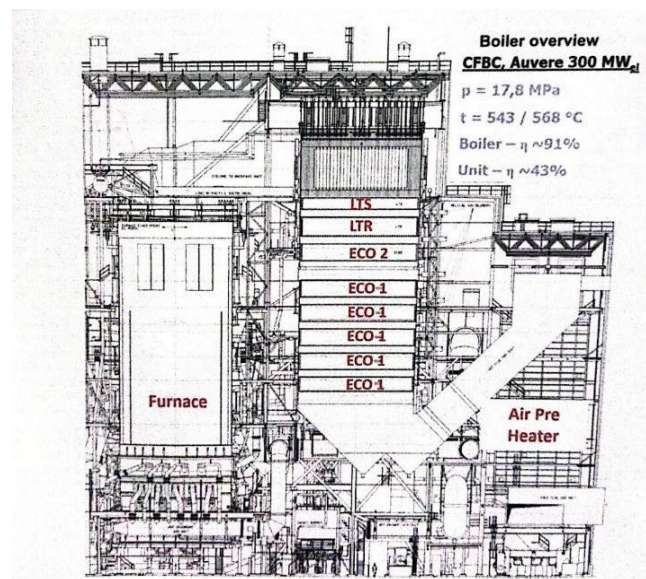
Artikel ini menggunakan studi literatur dengan desain penelitian sebelumnya yaitu deskriptif untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi pengotoran dan korosi pada sistem perpindahan panas pembangkit listrik termal. Artikel ini melihat pada Penelitian yang dilakukan beberapa unit pembangkit listrik termal yang menghadapi masalah pengotoran dan korosi dalam sistem perpindahan panas. Dengan menggabungkan eksperimen laboratorium dan observasi lapangan, artikel ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi dan pengelolaan pengotoran serta korosi, serta upaya untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Populasi penelitian terdiri dari pembangkit listrik termal yang mengalami masalah pengotoran dan korosi, dengan sampel yang mencakup beberapa pembangkit yang mewakili kondisi tersebut. Variabel yang diuji mencakup jenis material pipa, kualitas air, dan pengelolaan pemeliharaan yang diterapkan pada sistem perpindahan panas. Variabel terikat yang dianalisis adalah tingkat pengotoran dan korosi yang mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem. Pengumpulan data dilakukan melalui berbagai metode, termasuk pada penelitian sebelumnya dilakukan pengukuran langsung menggunakan alat ukur ketebalan pipa dan mikroskop, serta dokumentasi terkait perawatan sistem.

Untuk analisis data, menggunakan teknik analisis kualitatif. Analisis kuantitatif dilakukan dengan uji statistik untuk mengukur hubungan antara variabel-variabel yang mempengaruhi tingkat pengotoran dan korosi, seperti jenis material pipa dan kualitas air. Analisis kualitatif dilakukan dengan menelaah data dan dokumentasi untuk memahami faktor-faktor pengelolaan pengotoran dan korosi dalam konteks yang lebih luas. Selain itu, metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi potensi kerusakan pada sistem dan menentukan prioritas perbaikan yang paling efektif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh *Double Reheat*

Artikel ini menyoroti berbagai tantangan dan solusi yang terkait dengan pengoperasian unit pembangkit listrik berbahan bakar batubara dan serpih minyak, termasuk efisiensi termal, stabilitas parameter operasi, serta pengelolaan pengotoran dan korosi dalam sistem pemanas. Salah satu temuan utama adalah bahwa fleksibilitas dan efisiensi unit pembangkit listrik dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan teknologi pemanasan ulang ganda (*double-reheat*) dan *boiler* unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC). Teknologi CFBC terbukti lebih fleksibel dibandingkan dengan boiler terpulverisasi (PCC), terutama dalam menangani bahan bakar berkualitas rendah seperti serpih minyak dan batubara dengan kadar abu tinggi dengan gambar sebagai berikut



Gambar 2. Bagian *Boiler* CFBC

Salah satu karakteristik serpih minyak adalah kandungan klorin yang tinggi dalam bagian organik, yang dapat menyebabkan pengotoran dan korosi suhu tinggi pada komponen pemanas dengan rata – rata komposisi sebagai berikut

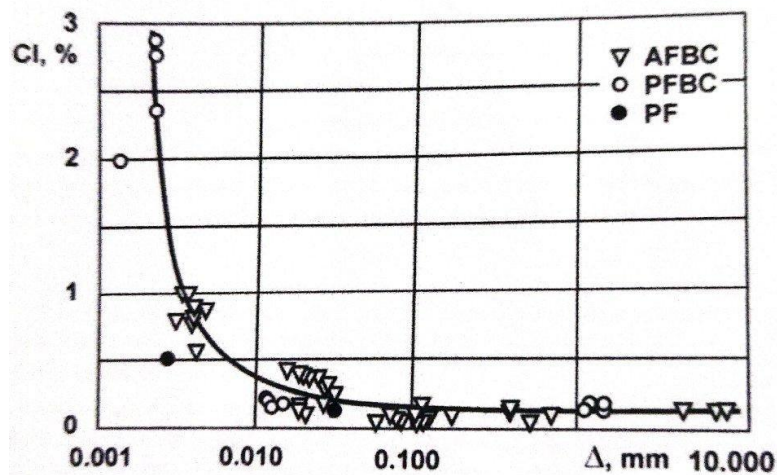
Tabel 1. Rata – Rata Komposisi Unsur Minyak

Organik	Rata %	Jangkauan	Tanah liat	Rata%	jangkauan	Karbonat	Rata%	Jangkauan
C	20,0-30,3	20,0-30,3	SiO ₂	15,2	13,5-18,6	CaO	21,3	14,4-24,,7
H	2,5-3,8	2,5-3,8	CaOAl ₂ O ₃	0,2	0,2-0,3	MgO	2,9	2,0-3,4
S	0,5-0,7	0,5-0,7	Fe ₂ O ₃	4,1	3,6-5,0	Fe ₂ O ₃	0,1	0,1
N	0,1	0,1	TiO	0,7	0,6-0,9	Co ₂	19,9	13,5-23,1
HAL	3,0	2,6-3,9	MgO	0,2	0,2			
CL	0,23	0,1-0,3	Na ₂ O	0,1	0,1			
			K ₂ O	0,2	0,2-0,3			

Dari sisi efisiensi, penelitian menunjukkan bahwa kombinasi biomassa dengan bahan bakar serpih minyak dalam boiler CFBC meningkatkan fleksibilitas bahan bakar sekaligus menurunkan emisi sulfur dioksida (SO₂). Emisi ini hampir mendekati nol berkat penangkapan sulfur oleh kalsium oksida dalam abu serpih minyak. Penelitian juga mencatat pentingnya kontrol suhu uap dalam sistem termal pemanasan ulang ganda. Penerapan skema kontrol baru berbasis model dinamis telah terbukti mengurangi fluktuasi suhu uap pemanas ulang, menurunkan tingkat konsumsi bahan bakar, serta meningkatkan efisiensi termal secara keseluruhan. (Zima, 2019) Penelitian ini memaparkan mekanisme teknis dan teoritis yang mendasari pengelolaan tantangan operasional pada pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara, terutama dengan penerapan teknologi pemanas ulang ganda (*double-reheat*) dan boiler unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC). Analisis ini mencakup aspek kandungan bahan bakar, perilaku abu, serta pengendalian suhu uap dalam sistem termal. (Oyedepo dkk., 2020)

3.2. Pengaruh Kandungan Klorin dan Alkali dalam Serpih Minyak

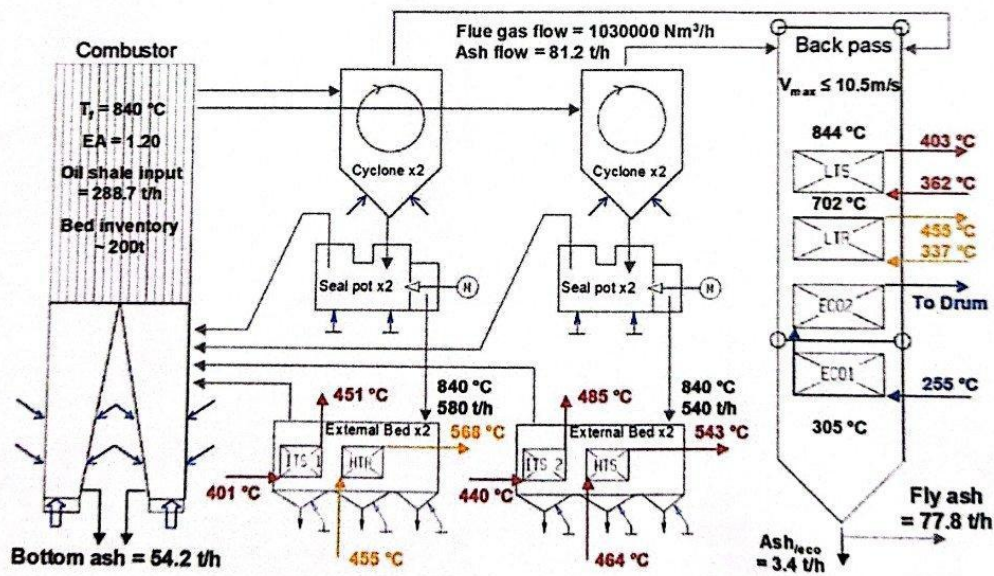
Serpih minyak sebagai bahan bakar memiliki kandungan klorin tinggi dalam bagian organik (hingga 0,75%), yang berdampak pada pembentukan endapan korosif pada permukaan pemanas. Logam alkali, seperti natrium dan kalium, bereaksi dengan klorin selama pembakaran untuk membentuk senyawa seperti kalium klorida (KCl), yang selanjutnya dapat menyebabkan korosi suhu tinggi pada tabung pemanas.



Gambar 3. Kandungan Klorin Dalam Abu Serpih Minyak Tergantung Ukuran Tertentu

3.3. Perilaku Abu dan Tantangan Operasional

Abu yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar serpih minyak menunjukkan volatilitas tinggi, yang mengakibatkan peningkatan risiko pengotoran (*slagging*) dan korosi. Dalam boiler CFBC, suhu pembakaran yang relatif rendah (di bawah 900°C) membantu menjaga stabilitas mineral abu, mengurangi *slagging*, dan memastikan abu tetap dalam bentuk aslinya tanpa pelapukan atau dekomposisi. Namun, pengelolaan abu terbang yang kaya klorin memerlukan perhatian khusus karena dapat membentuk lapisan endapan yang sulit dihilangkan seperti gambar berikut,



Gambar 4. Distribusi Aliran Abu Auvere CFBC

3.4. Optimalisasi Sistem Termal dengan Teknologi Pemanasan Ulang Ganda

Pada pembangkit listrik dengan pemanasan ulang ganda, kontrol suhu uap sangat penting untuk menjaga stabilitas parameter termal dan efisiensi operasi. Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu uap utama lebih sensitif terhadap regulasi gas buang, sementara suhu uap pemanas ulang lebih dipengaruhi oleh kontrol *damper* gas. Dengan menggunakan skema kontrol berbasis model dinamis, fluktuasi suhu dapat diminimalkan, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar rata-rata hingga 0,8–1,9 g/kWh dan menurunkan suhu logam hingga 12°C selama operasi transien.

3.5. Implikasi Mekanisme Pengotoran dan Korosi

Penempatan komponen pemanas seperti *superheater* dan *reheater* pada zona abu unggun terfluidisasi membantu mengurangi kontak dengan gas buang agresif, sehingga meminimalkan risiko pengotoran dan korosi. Penggunaan siklon yang didinginkan juga efektif dalam menjaga suhu gas buang tetap rendah saat memasuki bagian konvektif *boiler*, yang secara signifikan mengurangi pembentukan endapan abu (Oyedepo dkk.,2020)

Penelitian ini tidak hanya mengungkapkan tantangan teknis yang unik dalam pengelolaan pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara, tetapi juga menawarkan solusi inovatif yang dibandingkan dengan pendekatan dari studi sebelumnya. Perbandingan ini menunjukkan bagaimana teknologi baru memberikan efisiensi dan fleksibilitas yang lebih tinggi, sekaligus memperkuat validitas temuan dengan mengacu pada literatur terkait.

3.6. Perbandingan Efisiensi dan Pengelolaan Energi

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa *boiler* pemanasan ulang ganda memberikan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan *boiler* konvensional. Penelitian oleh Wang et al. (2022) menemukan bahwa peningkatan efisiensi termal hingga 6,23% dapat dicapai melalui optimasi sistem kontrol dalam pembangkit listrik berbahan bakar batubara dengan pemanasan ulang ganda. Temuan ini diperkuat oleh analisis dalam makalah Konist (2023), yang menyoroti bagaimana teknologi unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC) secara efektif menangani bahan bakar berkualitas rendah seperti serpih minyak dan menghasilkan emisi SO_2 yang sangat rendah (Internasional dkk.,2021)

3.7. Kontrol Suhu dan Stabilitas Operasional

Pendekatan skema kontrol baru yang disajikan dalam penelitian ini dibandingkan dengan metode tradisional yang lebih reaktif. Ray et al. (2014) menekankan pentingnya mempertimbangkan penghancuran eksergi dalam proses transien untuk meningkatkan stabilitas kontrol suhu. Sebaliknya, penelitian ini menunjukkan bahwa skema kontrol berbasis model dinamis lebih efektif dalam merespons perubahan parameter operasional, mengurangi fluktuasi suhu, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar.

3.8. Pengelolaan Risiko Operasional

Masalah pengotoran dan korosi pada *boiler* telah menjadi perhatian dalam berbagai penelitian sebelumnya. Misalnya, penelitian oleh Zhao et al. (2022) membahas bagaimana pengaturan uap ekstraksi dapat mengurangi

dampak korosi pada komponen *boiler*. Dalam penelitian ini, solusi seperti penempatan komponen pemanas pada zona abu unggun terfluidisasi dan penggunaan siklon yang didinginkan memberikan pendekatan baru yang lebih efisien untuk meminimalkan risiko pengotoran dan korosi.

Pendekatan yang diusulkan dalam penelitian ini juga memberikan panduan untuk pengembangan teknologi pembangkit listrik yang lebih fleksibel dan berkelanjutan. Penelitian sebelumnya oleh (U. Tallinn., 2022) menunjukkan bahwa kontrol perlambatan kondensat dapat meningkatkan fleksibilitas operasional pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Temuan ini relevan dengan skema kontrol yang dioptimalkan dalam penelitian ini, yang mengintegrasikan koreksi sinyal awal untuk mengurangi laju konsumsi bahan bakar dan menjaga stabilitas suhu uap selama proses transien.(Khorampoor dkk.,2024)

3.9. Implikasi Operasional

Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai dampak operasional dari penerapan teknologi unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC) dan sistem pemanasan ulang ganda (*double-reheat*) pada pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara. Implikasi operasional yang diidentifikasi mencakup aspek efisiensi, pengurangan risiko operasional, serta keberlanjutan lingkungan.

3.9.1. Fleksibilitas Bahan Bakar

Teknologi CFBC menawarkan fleksibilitas yang signifikan dalam menangani bahan bakar berkualitas rendah seperti serpih minyak, biomassa, dan batubara dengan kadar abu tinggi. Suhu pembakaran yang rendah pada CFBC memungkinkan mineral dalam abu tetap stabil, mengurangi pengotoran (*slagging*) dan pembentukan kerak. Fleksibilitas ini memungkinkan pembangkit listrik untuk memanfaatkan berbagai campuran bahan bakar, termasuk biomassa, sebagai cara untuk mengurangi emisi karbon (González dkk.,2006).

3.9.2. Pengelolaan Korosi dan Pengotoran

Penempatan *superheater* dan *reheater* pada zona abu unggun terfluidisasi di boiler CFBC mengurangi kontak dengan gas buang agresif yang kaya akan klorin dan senyawa alkali. Langkah ini secara signifikan mengurangi risiko korosi suhu tinggi dan pengotoran pada permukaan pemanas. Selain itu, penggunaan siklon yang didinginkan menjaga suhu gas buang tetap rendah sebelum memasuki bagian konvektif, yang meminimalkan pembentukan endapan abu yang sulit dihilangkan.

3.9.3. Peningkatan Efisiensi Operasional

Skema kontrol baru yang diusulkan pada penelitian ini telah menunjukkan peningkatan efisiensi operasional. Sistem ini berhasil mengurangi konsumsi bahan bakar rata-rata sebesar 0,8–1,9 g/kWh selama operasi transien dan menurunkan suhu logam hingga 12°C, yang mengurangi risiko kegagalan komponen. Selain itu, stabilitas suhu uap utama dan pemanas ulang membantu mempertahankan efisiensi termal yang optimal selama operasi pembangkit listrik.

3.9.4. Dampak terhadap Keberlanjutan Lingkungan

Teknologi CFBC, dengan kemampuan untuk menangkap sulfur dalam abu, menghasilkan emisi SO₂ yang mendekati nol tanpa memerlukan sorbent tambahan. Hal ini sejalan dengan target pengurangan emisi karbon dan peningkatan keberlanjutan energi. Selain itu, pemanfaatan bahan bakar biomassa sebagai campuran memberikan kontribusi positif terhadap pengurangan jejak karbon pembangkit listrik (C. Wang dkk.,2020).

Kesimpulan

Artikel ini memberikan wawasan penting tentang optimasi sistem pembangkit listrik berbahan bakar serpih minyak dan batubara, dengan menyoroti efisiensi dan fleksibilitas operasional yang dapat dicapai melalui penerapan teknologi unggun terfluidisasi bersirkulasi (CFBC) dan pemanasan ulang ganda. Teknologi CFBC dan pemanasan ulang ganda secara signifikan meningkatkan efisiensi termal dan stabilitas sistem, dengan penurunan konsumsi bahan bakar hingga 1,9 g/kWh selama operasi transien serta pengurangan fluktuasi suhu uap. Pendekatan ini berhasil meminimalkan pengotoran dan korosi melalui pengelolaan kandungan klorin dalam abu serpih minyak serta pengaturan suhu gas buang dan menggunakan metode perawatan (DEKF). Dengan emisi SO₂ yang mendekati nol dan fleksibilitas bahan bakar yang memungkinkan penggunaan biomassa, teknologi ini memberikan dampak positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan mendukung target pengurangan emisi karbon. Namun, keterbatasan seperti ketergantungan pada data simulasi, fokus pada teknologi tertentu, serta kurangnya analisis dampak jangka panjang dan ekonomi, menunjukkan bahwa masih ada ruang untuk pengembangan lebih lanjut.

Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lapangan dalam kondisi operasional nyata untuk memvalidasi hasil simulasi, terutama pada pembangkit listrik dengan variasi bahan bakar yang lebih luas.

2. Model kontrol yang lebih sederhana dan ekonomis perlu dikembangkan untuk mendukung penerapan luas, terutama di daerah dengan keterbatasan teknologi dan sumber daya.
3. Penelitian lebih lanjut tentang efek jangka panjang terhadap komponen sistem, seperti *superheater* dan *reheater*, diperlukan untuk memastikan durabilitas teknologi ini dalam berbagai skenario operasional.
4. Teknologi ini dapat dikembangkan lebih lanjut agar sesuai dengan jenis pembangkit listrik lainnya, seperti *boiler* terpulverisasi (PCC) atau pembangkit berbahan bakar cair dan gas.

Analisis ekonomi yang mendalam diperlukan untuk mengevaluasi biaya dan manfaat implementasi teknologi ini. Selain itu, dampak lingkungan jangka panjang, termasuk potensi pengurangan emisi karbon, harus dievaluasi untuk mendukung tujuan keberlanjutan global.).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam artikel ini, Terutama dosen pembimbing yaitu bapak Dani Rusirawan, Ph.D . Tidak lupa, kami juga mengucapkan terima kasih kepada keluarga yang selalu memberikan dukungan moral dan motivasi. Semoga hasil *review* penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan sistem perpindahan panas dalam pembangkit listrik termal dan meningkatkan efisiensi operasional di masa depan.

Daftar Pustaka

- Chantasiriwan, S. (2023). Machine Translated by Google *Kemajuan Ilmu Termal dan Teknik*. 46.
- González, M. M. P., García, F. J. F., Ramón, I. S., & Roces, H. S. (2006). Experimental thermal behavior of a power plant reheater. *Energy*, 31(5), 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.04.009>
- Internasional, J., Panas, P., Daneshazarian, R., Antoun, S., & Dworkiny, S. B. (2021). Machine Translated by Google *Jurnal Internasional Perpindahan Panas dan Massa* Machine Translated by Google. 173, 22–27.
- Khorampoor, S., Sanaye, S., & Sanaye, S. K. S. (2024). Machine Translated by Google *Laporan Energi Pembakaran gas alam yang efisien dan pengurangan NOx : Aplikasi baru dari sirkulasi udara pembakaran (OFA) dan resirkulasi gas buang (FGR) secara simultan 250 MW lawan pembakaran boiler PLTU* Machine Translat. 12, 2573–2587.
- Nuklir, T. (2019). *Teknik Nuklir dan Desain*. 341(November 2018), 368–376.
- Oyedepo, S. O., Fakeye, B. A., Mabinuori, B., Babalola, P. O., Leramo, R. O., Kilanko, O., Dirisu, J. O., Udo, M., Efemwenkiekie, U. K., & Oyebanji, J. A. (2020). Bahan bakar Analisis termodinamika dan pengoptimalan kinerja pemanasan ulang - Pembangkit listrik turbin uap regeneratif dengan pemanas air umpan. 280.
- Sivathanu, A. K., & Subramanian, S. (2018). *Praktik Teknik Kontrol*. 73(September 2017), 91–99.
- Tallinn, U. T. (2023). Machine Translated by Google *Investigasi pengotoran dan korosi pada reheater suhu rendah di Ketel CFBC Alar Konist*. 338(September 2022).
- Wang, C., Liu, Z., Mengyang, K., Yongliang, Z., Liu, M., & Yan, J. (2022). Machine Translated by Google *Teknik Termal Terapan dengan pemanasan ulang ganda dengan mengoptimalkan kontrol suhu uap : Dari*. 217, 1–17.
- Wang, C., Qiao, Y., Liu, M., & Zhao, Y. (2020). *Energi Terapan*. 260.
- Wang, X., & Zhang, K. (2023). Machine Translated by Google *Ilmu Korosi Perilaku oksidasi uap tabung baja T92 untuk pemanas ulang suhu tinggi setelah layanan jangka panjang dalam boiler ultra-superkritis*. 221(April).
- Xuan, C., Lia, X., Liua, X., Berlisensi, J., Tenaga, U., & Cina, L. (2020). *Teknik Termal Terapan*. 178.
- Yanping, Z. (2020). Machine Translated by Google *Laporan Energi Analisis kinerja skema pemanfaatan superheat ekstraksi turbin pembangkit listrik yang dibangun*. 6, 2200–2210.
- Zheng, Z. B., Zhang, J., Matahari, X., Jianwei, Z., & Dia, H. (2021). *Analisis Kegagalan Teknik*. 121(November 2020).
- Zima, W. (2019). *Energi Simulasi peningkatan cepat laju aliran massa uap pada outlet boiler daya superkritis* Machine Translated by Google. 173, 995–1005.

Optimisasi Sifat Mekanik Paduan Mg AZ91: Pengaruh Proses *Thixoforming* dan Homogenisasi terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, dan Mikrostruktur

Adi Ganda Putra¹, Afrianto Sihalo², Mohamad Vicky¹, Pawawoi², dan Sony Sukmara³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur,
Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

² Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknologi Manufaktur,
Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

³ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi dan Informatika,
Universitas Mathla ul Anwar, Banten, Indonesia

adi.ganda@lecture.unjani.ac.id, afriantosihalo@gmail.com, vickymohamad613@gmail.com,
sony_sukmana@yahoo.com, pawawoi@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Paduan Mg AZ91 merupakan material yang banyak digunakan dalam industri otomotif dan penerbangan karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Untuk aplikasi yang lebih luas, perlu dilakukan optimisasi sifat mekanik melalui berbagai proses perlakuan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh proses *thixoforming* dan homogenisasi terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan mikrostruktur paduan Mg AZ91. Pengujian dilakukan pada empat kondisi perlakuan, yaitu *as-cast*, *as-cast* dan *homogenizing*, *thixoforming*, dan *thixoforming* dan *homogenizing*. Hasil menunjukkan kondisi *thixoforming* diikuti oleh homogenisasi menghasilkan peningkatan kekerasan tertinggi (108,8 HB) dibandingkan dengan kondisi *as-cast* (65,1 HB). Kekuatan tarik mengalami peningkatan signifikan, dari 148,3 MPa pada kondisi *as-cast* menjadi 299,4 MPa pada kondisi *thixoforming* dan *homogenizing*. Selain itu, kekuatan luluh meningkat dari 82,6 MPa menjadi 277,2 MPa, sementara regangan meningkat dari 12,1% menjadi 14,475% pada kondisi yang sama. Mikrostruktur material menunjukkan perubahan dari struktur dendritik kasar pada kondisi *as-cast* menjadi struktur ekuiaxial dengan distribusi fasa α dan β yang lebih seragam setelah *thixoforming* dan homogenisasi. Porositas dan pengotor tetap terdeteksi pada kedua kondisi perlakuan, tetapi lebih terkendali setelah homogenisasi. Secara keseluruhan, *thixoforming* diikuti oleh homogenisasi memberikan optimisasi yang signifikan pada sifat mekanik dan mikrostruktur paduan Mg AZ91, menjadikannya lebih unggul untuk aplikasi teknik yang membutuhkan kekuatan tinggi dan keuletan.

Kata kunci: *homogenizing*, paduan Mg AZ91, *thixoforming*

Abstract

The Mg AZ91 alloy is commonly utilized in the automotive and aerospace sectors due to its excellent strength-to-weight ratio. However, to expand its usability, enhancements in its mechanical properties through specific treatments are required. This study investigates the impact of *thixoforming* and homogenization on the hardness, tensile strength, and microstructure of the Mg AZ91 alloy. Testing was carried out under four conditions: *as-cast*, *as-cast* with homogenization, *thixoforming*, and *thixoforming* combined with homogenization. Results revealed that the highest hardness value (108.8 HB) was achieved in the *thixoformed* and homogenized sample, compared to 65.1 HB in the *as-cast* condition. The tensile strength also increased significantly from 148.3 MPa to 299.4 MPa, with yield strength rising from 82.6 MPa to 277.2 MPa. Elongation improved slightly from 12.1% to 14.475%. Microstructural analysis showed a transition from coarse dendritic formations in the *as-cast* condition to a refined, equiaxed structure with uniform α and β phase distribution following *thixoforming* and homogenization. Although porosity and impurities were present in all samples, they were more effectively managed after homogenization. These findings indicate that combining *thixoforming* with homogenization effectively enhances the mechanical properties and microstructure of Mg AZ91 alloy, increasing its suitability for high-performance engineering applications.

Keywords: *homogenizing*, Mg AZ91 alloy, *thixoforming*

1. Pendahuluan

Info Makalah:

Dikirim : 10-09-24;
Revisi 1 : 03-14-25;
Diterima : 03-17-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-852-2164-8765
e-mail : adi.ganda@lecture.unjani.ac.id

Perkembangan material dalam beberapa tahun terakhir mengalami kemajuan yang signifikan sehingga memungkinkan untuk menemukan metode baru untuk memproduksi material berkualitas tinggi. Material ringan (*lightweight material*) seperti paduan Titanium, Aluminium dan Magnesium dapat menjadi pilihan yang menjanjikan untuk mengurangi beban pada struktur dan meningkatkan efisiensi energi (Kumar dkk., 2021). Salah satu material atau logam ringan yang ada di alam adalah Magnesium (Mg) memiliki densitas sebesar 1,7 gr/cm³ dengan rasio kekuatan terhadap berat

yang jauh lebih baik dibandingkan material baja dan Aluminium dan menjadikannya pilihan ideal untuk aplikasi di industri otomotif, dirgantara, dan elektronik (Shin dkk., 2023). Beberapa sifat lain yang dimiliki oleh Magnesium dan paduannya adalah konduktivitas termal yang baik, ketahanan terhadap korosi, kemampuan untuk dibentuk dan dilas yang baik serta kemampuan untuk menyerap getaran, yang membuatnya sangat cocok untuk berbagai aplikasi teknik (Annamalai dkk., 2019; T. Zhang dkk., 2022).

Beberapa penelitian sebelumnya paduan Magnesium memberikan informasi yang terbatas tentang perubahan mikrostruktur selama proses *thixoforming* dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik. Dengan hasil pengecoran (*as-cast*), paduan Magnesium memiliki mikrostruktur berbentuk dendrit yang akan berubah menjadi struktur globular yang halus setelah proses *thixoforming* (Chen dkk., 2014; Z. W. Huang dkk., 2013). Dengan struktur globular yang halus ini, sifat mekanik paduan Magnesium akan meningkat (Eroshenko dkk., 2022; Kubásek dkk., 2017). Kondisi semi-solid pada proses *thixoforming* menyebabkan energi antarmuka antara fasa cair dan fasa padat mengalami reduksi yang cukup signifikan sehingga dapat menjamin terjadinya transformasi fasa padat menjadi butir sferoidal yang halus (Jiang dkk., 2019). Pembentukan struktur globular pada paduan Magnesium sehingga menghasilkan butir yang globular porositas selama proses *thixoforming* belum bisa dihasilkan secara optimal sehingga masih diperlukan beberapa perlakuan yang berbeda sehingga menghadirkan peluang untuk penelitian lebih lanjut (Atay dkk., 2020).

Pada penelitian ini, paduan Magnesium AZ91 akan diproses *thixoforming* untuk memperoleh struktur butir globular yang halus. Paduan Magnesium tersebut kemudian menjalani proses perlakuan panas dengan variasi temperatur dan waktu untuk melihat perubahan ukuran dan bentuk pada struktur mikro serta kinematika dan evolusi bentuk butir akibat proses perlakuan panas ini. Hasil dari perlakuan panas ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai pengaruh parameter proses terhadap karakteristik mekanik dan sifat fisik paduan Magnesium AZ91, serta meningkatkan pemahaman tentang mekanisme pembentukan butir globular yang lebih efisien.

2. Metode

Proses penelitian ini akan menggunakan paduan Magnesium AZ91 sebagai bahan utama dengan komposisi yang terdiri dari 9% Aluminium dan 1% Seng. Kemudian paduan ini akan dilebur menggunakan tungku *Electric Resistance* pada temperatur 720 °C dengan *holding time* dan pengadukan selama 10 menit yang diikuti proses homogenisasi menggunakan *tube furnace* pada temperatur 415 °C selama 24 jam. Kemudian dilanjutkan dengan proses karakterisasi jumlah fraksi fasa cair dan padat pada temperatur *re-heating* dilakukan menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Setelah itu dilakukan proses *thixoforming* dengan memanaskan paduan pada temperatur 530 °C kemudian ditekan menggunakan gaya sebesar 100 kN dengan kecepatan injeksi 2,45 kN/s. Karakterisasi paduan Magnesium AZ91 ini meliputi uji kekerasan metode indentasi Brinell menggunakan beban 250 kg dan indentor bola baja yang berdiameter 5 mm sesuai ASTM E-10, dan uji tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM E8/E8M dan ASTM B557 untuk mengetahui sifat mekaniknya dan pengujian metalografi untuk melihat struktur mikro serta analisis ukuran butir menggunakan metode Jeffries yang mengacu kepada ASTM E112-12.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Spektrometri

Pengujian spektrometri dilakukan untuk menganalisis komposisi kimia paduan yang dihasilkan. Data yang diperoleh ditampilkan dalam Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Mg-Al-Zn

Uji ke-	Mg	Al	Zn	Cu	Mn	Fe	Si	Ni	Sn
1	86,458	11,273	1,816	0,144	0,037	>0,025	0,174	0,003	0,105
2	85,078	12,151	2,129	0,198	0,046	>0,025	0,2	0,002	0,099
3	92,564	5,399	1,559	0,127	0,025	>0,025	0,155	0,002	0,085
4	91,757	6,199	1,586	0,115	0,039	>0,025	0,142	0,002	0,08
5	83,7	13,449	2,217	0,214	0,043	>0,025	0,198	0,002	0,087
Rata-rata	87,911	9,674	1,861	0,162	0,038	>0,025	0,174	0,002	0,091

Tabel 1 menunjukkan adanya unsur-unsur lain yang terdeteksi dalam paduan AZ91 diluar unsur Magnesium (Mg), Aluminium (Al) dan Seng (Zn). Unsur-unsur tersebut seperti tembaga (Cu) dan silikon (Si) dengan komposisi yang cukup tinggi sebesar 0,16% dan 0,17%. Keberadaan unsur tembaga dan silikon dalam paduan AZ91 dapat mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan tersebut (WANG dkk., 2013). Hal ini juga berdampak pada struktur mikro serta ukuran butir yang dihasilkan (Zhao dkk., 2009). Komposisi utama paduan AZ91 seperti Magnesium, Aluminium dan Seng memiliki komposisi sebesar 87,91%, 9,67% dan 1,86%. Jika dibandingkan dengan standar JIS untuk paduan Magnesium AZ91, komposisi paduan ini tidak sesuai standar dengan persentase unsur Magnesium yang seharusnya minimal 90%.

Ketidaksesuaian ini terjadi karena unsur Magnesium memiliki titik leleh yang rendah sehingga mudah menguap selama proses peleburan (Quan dkk., 2011). Untuk mengurangi proses penguapan ini, unsur Magnesium pada proses peleburan dapat ditambahkan berlebih sehingga komposisi paduan dapat tercapai. Hal lain yang bisa dilakukan selain

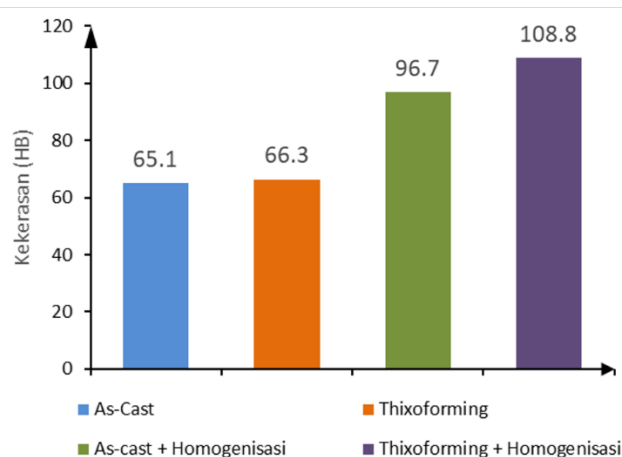
hal di atas adalah menambahkan Magnesium dalam bentuk senyawa seperti Magnesium Ferrosilikon atau Magnesium Klorida yang memiliki titik didih yang lebih tinggi sehingga dapat mengurangi kehilangan Magnesium selama proses peleburan (M. Kamal dkk., 2020). Pengendalian temperatur, waktu, dan atmosfer tungku selama proses peleburan juga memiliki pengaruh dalam mencegah penguapan Magnesium (Chalay-Amoly dkk., 2018). Walaupun demikian perlu diketahui bahwa penambahan Magnesium yang berlebih dapat menyebabkan pembentukan inklusi dan dapat menurunkan kekuatan mekanik Paduan (Zhou dkk., 2023). Penambahan Magnesium dalam bentuk senyawa juga tidak selalu efektif, karena dapat menghasilkan reaksi samping yang bisa merubah komposisi Paduan (SALVETR dkk., 2018). Hal yang paling utama dilakukan untuk mencapai komposisi yang sesuai adalah pendekatan yang lebih seimbang dan memperhatikan semua variabel proses peleburan untuk komposisi paduan AZ91 yang sesuai.

3.2 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk menentukan kemampuan paduan dalam menahan deformasi plastis dan memberikan ketahanan terhadap aus. Pada pengujian kekerasan ini dilakukan dengan menggunakan metode Brinell dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada kondisi *as-cast*, paduan Mg AZ91 menunjukkan kekerasan yang relatif rendah. Hal ini terjadi karena mikrostruktur yang terbentuk saat pengecoran umumnya terdiri dari butiran yang kasar dan distribusi fasa yang tidak merata, terutama fasa β ($Mg_{17}Al_{12}$) yang melimpah di batas butir (Shastri dkk., 2020). Struktur yang kasar ini mengurangi kekerasan dan sifat mekanik lainnya karena batas butir yang lemah dan tidak homogen (G. R. & Barik, 2021). Perlakuan homogenisasi setelah pengecoran meningkatkan kekerasan sedikit menjadi 66,3 HB. Proses ini mengurangi segregasi elemen paduan di sepanjang batas butir dan memperhalus distribusi fasa β (Ng dkk., 2022).

Meskipun ada peningkatan kekerasan, efeknya relatif kecil karena homogenisasi tidak sepenuhnya memodifikasi ukuran butir atau meningkatkan kekuatan batas butir secara signifikan (Lin dkk., 2020). Namun, struktur yang lebih homogen membuat material lebih konsisten dalam sifat-sifat mekanisnya. Pada proses *thixoforming*, terjadi perubahan signifikan dalam mikrostruktur, yang tercermin dalam peningkatan kekerasan menjadi 96,7 HB. *Thixoforming* adalah proses *semisolid* yang memungkinkan pengendalian mikrostruktur dengan butiran globular yang lebih halus serta distribusi fasa β yang lebih merata (Husain dkk., 2017).



Gambar 1. Kekerasan Paduan Mg AZ91 dengan Berbagai Proses Perlakuan

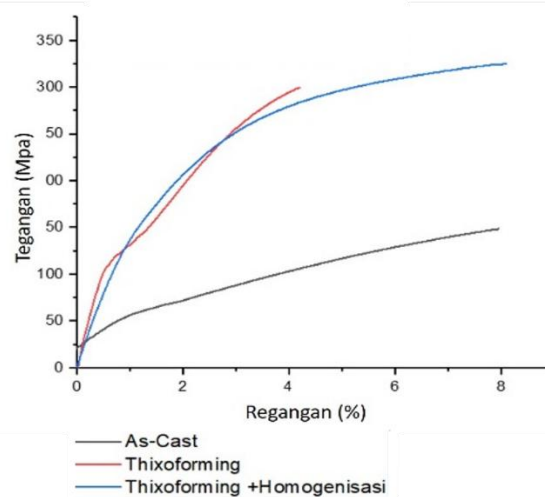
Proses ini meningkatkan kekerasan karena ukuran butir yang lebih kecil dan peningkatan kohesi di sepanjang batas butir, sehingga meningkatkan kekuatan keseluruhan material (Chokshi, 2020). Gabungan antara *thixoforming* dan homogenisasi menghasilkan kekerasan tertinggi, yaitu 108,8 HB. Ini disebabkan oleh optimalisasi mikrostruktur material: butiran menjadi lebih halus, distribusi fasa β lebih merata, dan segregasi elemen paduan berkurang secara signifikan. Proses ini juga meningkatkan stabilitas termal dan ketahanan material terhadap deformasi, menjadikan kekerasan dan sifat mekanik lainnya berada pada level yang optimal (Abdelgnei dkk., 2019).

3.3. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik memberikan gambaran penting tentang kekuatan dan keuletan suatu material, termasuk paduan Mg AZ91, melalui tiga parameter utama: kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan regangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada kondisi *as-cast*, paduan Mg AZ91 menunjukkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang relatif rendah. Hal ini disebabkan oleh mikrostruktur kasar yang terbentuk selama proses pengecoran, terutama adanya segregasi fasa β ($Mg_{17}Al_{12}$) di batas butir. Fasa β ini bersifat getas dan cenderung menurunkan kekuatan material (Sarvesha dkk., 2021). Meskipun regangan mencapai 12,1%, yang mengindikasikan material ini cukup ulet, kelemahan material di

sepanjang batas butir membatasi kekuatan mekanisnya secara keseluruhan (Qi dkk., 2021). Proses *thixoforming* paduan Mg AZ91 secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh material, masing-masing menjadi 296,3 MPa dan 165,3 MPa. Proses ini mengubah mikrostruktur material dari butiran kasar menjadi butiran yang lebih halus dan berbentuk globular. Distribusi fasa β menjadi lebih seragam di dalam matriks, sehingga meningkatkan kohesi di sepanjang batas butir dan menurunkan kecenderungan material untuk retak (Xu dkk., 2017).



Gambar 2. Kekuatan Tarik, Kekuatan Luluh dan Regangan Paduan Mg AZ91 dengan Berbagai Proses Perlakuan

Namun, regangan menurun menjadi 8,9%, yang menunjukkan peningkatan kekuatan diikuti dengan sedikit pengurangan keuletan. Ini adalah kompromi umum antara kekuatan dan keuletan saat ukuran butir berkurang dan struktur material menjadi lebih kompak (Okayasu & Fukui, 2021). Gabungan proses *thixoforming* dan homogenizing menghasilkan performa mekanik terbaik. Kekuatan tarik meningkat sedikit menjadi 299,4 MPa, sementara kekuatan luluh mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai 277,2 MPa. Peningkatan kekuatan luluh ini menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan yang jauh lebih baik dalam menahan deformasi permanen sebelum mencapai titik luluh (S. Zhang dkk., 2018). Lebih penting lagi, regangan juga meningkat menjadi 14,475%, yang berarti material ini tidak hanya kuat, tetapi juga lebih ulet dibandingkan dengan kondisi *as-cast* maupun *thixoforming* tanpa homogenisasi. Homogenisasi setelah *thixoforming* menghilangkan segregasi elemen paduan yang tersisa, memperhalus distribusi fasa β , dan meningkatkan stabilitas butir sehingga material mampu menahan deformasi lebih besar sebelum gagal (Kusharjanto dkk., 2019; Nithin dkk., 2020).

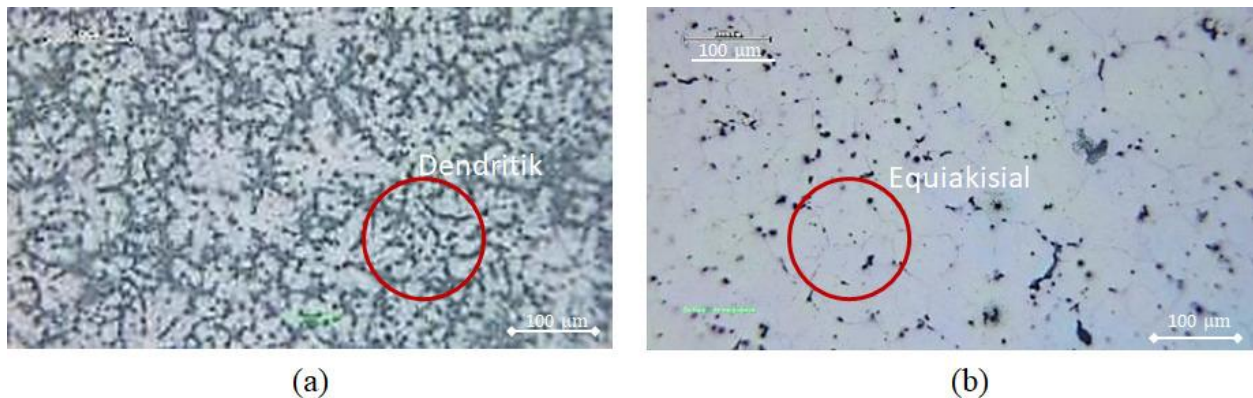
Berdasarkan hasil pengujian tarik, kombinasi antara *thixoforming* dan homogenisasi menghasilkan peningkatan signifikan dalam kekuatan dan keuletan paduan Mg AZ91 dibandingkan dengan kondisi *as-cast*. *Thixoforming* sendiri memberikan perbaikan besar dalam kekuatan mekanik dengan mikrostruktur yang lebih halus, tetapi homogenisasi selanjutnya memaksimalkan manfaatnya dengan menghilangkan sisa-sisa segregasi dan meningkatkan distribusi fasa (Campo & Zoqui, 2016). Hasilnya adalah material dengan kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang jauh lebih tinggi serta peningkatan regangan, menjadikannya lebih kuat dan lebih tahan terhadap deformasi. Secara keseluruhan, perlakuan *thixoforming* dan *homogenizing* adalah solusi yang optimal untuk meningkatkan performa paduan Mg AZ91, karena memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang terbaik.

3.4. Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro paduan Mg AZ91 memberikan informasi penting tentang mikrostruktur material setelah melalui berbagai proses perlakuan, termasuk *as-cast* dan *as-cast* and *homogenizing*. Mikrostruktur mempengaruhi sifat mekanik dan performa material secara signifikan, karena berbagai fasa dan fitur mikro seperti fasa α , fasa β , struktur butir, serta adanya porositas dan pengotor dapat mempengaruhi kekuatan, kekerasan, dan ketahanan terhadap deformasi. Hasil pengujian struktur mikro untuk paduan Mg AZ91 dengan proses *as-cast* dan homogenisasi ditunjukkan pada gambar 3. berikut ini.

Pada kondisi *as-cast*, mikrostruktur paduan Mg AZ91 umumnya ditandai oleh adanya struktur dendritik yang terbentuk selama pendinginan cepat dalam proses pengecoran. Struktur ini merupakan pola cabang seperti pohon yang terbentuk ketika fasa padat tumbuh dari fasa cair. Butiran dendritik biasanya kasar dan tidak seragam, yang bisa melemahkan material karena ketidakrataan komposisi di sepanjang butir (M. Huang dkk., 2019). Selanjutnya ada fasa α sebagai matriks (fase utama Mg) dan fasa β ($Mg_{17}Al_{12}$). Fasa α adalah fase matriks utama yang terdiri dari Magnesium *solid solution*. Pada kondisi *as-cast*, fasa α memiliki distribusi yang tidak merata dan sering dikelilingi oleh fasa β (Barbui dkk., 2022) dan fasa β terbentuk terutama di sepanjang batas butir dendritik. Fasa ini berperan

penting dalam meningkatkan kekerasan material, namun memiliki sifat yang getas. Fasa β yang berlebih atau distribusinya yang tidak optimal di sepanjang batas butir cenderung mengurangi kekuatan dan ketangguhan material (Liu dkk., 2014).



Gambar 3. Hasil Analisa Mikrostruktur Paduan Mg AZ91, (a) Struktur Dendritik pada As-Cast, dan (b) Struktur Ekuiaksial pada As-Cast + Homogenisasi

Setelah proses homogenisasi, terjadi beberapa perubahan dalam struktur mikro yang signifikan. Pertama, perubahan struktur dendritik menjadi struktur ekuiaksial, yaitu butiran yang lebih seragam dan berbentuk bulat. Struktur ekuiaksial lebih diinginkan dalam banyak aplikasi karena memberikan peningkatan kekuatan dan kekerasan melalui pengurangan ukuran butir dan distribusi yang lebih merata (Ohno dkk., 2023). Kedua, fasa α menjadi lebih homogen dan seragam, menghilangkan segregasi elemen paduan di dalam butir dan distribusi fasa β juga menjadi lebih halus dan merata, tidak lagi terkonsentrasi hanya di batas butir seperti pada kondisi *as-cast*. Pengurangan segregasi fasa β di sepanjang batas butir meningkatkan kohesi antar butir, yang secara langsung meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan Tarik (Zhuang dkk., 2020).

Perbedaan utama antara kondisi *as-cast* dan *as-cast and homogenizing* adalah perubahan struktur mikro dari dendritik menjadi ekuiaksial serta distribusi fasa yang lebih seragam. Pada kondisi *as-cast*, struktur dendritik dan fasa β yang terkonsentrasi di batas butir menciptakan kelemahan mekanik, seperti kekuatan tarik dan kekuatan luluh yang lebih rendah. Homogenisasi memperbaiki kelemahan tersebut dengan menciptakan butir yang lebih halus dan distribusi fasa yang lebih merata, yang secara signifikan meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap deformasi.

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi proses *thixoforming* dan homogenisasi secara signifikan meningkatkan sifat mekanik paduan Mg AZ91, baik dalam hal kekerasan, kekuatan tarik, kekuatan luluh, maupun regangan. Proses *thixoforming* mengubah mikrostruktur dari bentuk dendritik menjadi butiran ekuiaksial yang lebih halus, sementara homogenisasi memperbaiki distribusi fasa α dan β , mengurangi segregasi di batas butir, serta meningkatkan stabilitas mikrostruktur. Kekuatan tarik meningkat hampir dua kali lipat, sementara kekuatan luluh meningkat lebih dari tiga kali lipat dibandingkan dengan kondisi *as-cast*. Peningkatan kekerasan juga tercatat secara signifikan setelah *thixoforming* dan homogenisasi. Oleh karena itu, kombinasi perlakuan *thixoforming* dan homogenisasi menawarkan potensi besar untuk meningkatkan performa paduan Mg AZ91 dalam aplikasi industri yang memerlukan kombinasi antara kekuatan, kekerasan, dan keuletan yang tinggi.

Daftar Pustaka

- Abdelgnei, M. A., Omar, M. Z., & Ghazali, M. J. (2019). Wear Properties of Thixoformed Al-5.7Si-2Cu-0.3Mg Aluminium Alloy. *Solid State Phenomena*, 285, 63–68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.285.63>
- Annamalai, S., Periyakoundar, S., & Gunasekaran, S. (2019). Magnesium alloys: a review of applications. *Materiali in Tehnologije*, 53(6), 881–890. <https://doi.org/10.17222/mit.2019.065>
- Atay, H. Y., Aışman, D., Jirková, H., Behulova, M., & Mašek, B. (2020). Use of Thixoforming as a Manufacturing Method for Metallic Composites. *Metals and Materials International*, 26(9), 1420–1429. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00373-5>
- Barbui, M., Volya, A., Aboud, E., Ahn, S., Bishop, J., Goldberg, V. Z., Hooker, J., Hunt, C. H., Jayatissa, H., Kokalova, Tz., Koshchiy, E., Pirrie, S., Pollacco, E., Roeder, B. T., Saastamoinen, A., Upadhyayula, S., Wheldon, C., & Rogachev, G. V. (2022). α -cluster structure of $\langle \text{Ne} \rangle$. *Physical Review C*, 106(5), 054310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.054310>

- Campo, K. N., & Zoqui, E. J. (2016). Thixoforming of an ECAPed Aluminum A356 Alloy: Microstructure Evolution, Rheological Behavior, and Mechanical Properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(4), 1792–1802. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3339-4>
- Chalay-Amoly, A., Fatemi, S. M., & Zarei-Hanzaki, A. (2018). MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN AZ91 MAGNESIUM ALLOY PROCESSED THROUGH BACKWARD EXTRUSION. *Archives of Metallurgy and Materials*. <https://doi.org/10.24425/118922>
- Chen, Q., Yuan, B., Lin, J., Xia, X., Zhao, Z., & Shu, D. (2014). Comparisons of microstructure, thixoformability and mechanical properties of high performance wrought Magnesium alloys reheated from the as-cast and extruded states. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.218>
- Chokshi, A. H. (2020). Grain Boundary Processes in Strengthening, Weakening, and Superplasticity. *Advanced Engineering Materials*, 22(1). <https://doi.org/10.1002/adem.201900748>
- Eroshenko, A., Luginin, N., Legostaeva, E., Tolmachev, A., Glukhov, I., Uvarkin, P., Sharkeev, Y., & Schmidt, J. (2022). Effect of severe plastic deformation on structure and mechanical properties of Magnesium alloy Mg–Ca. 020068. <https://doi.org/10.1063/5.0085470>
- G. R., A., & Barik, D. (2021). Roughness in the periodic potential enhances transport in a driven inertial ratchet. *Physical Review E*, 104(2), 024103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.024103>
- Gupta, M., & Wong, W. L. E. (2015). An Introduction to Lightweight, Energy Saving, Environment Friendly Magnesium Based Nanocomposites: Materials of Upcoming Generation. *Advanced Materials Research*, 1125, 3–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1125.3>
- Huang, M., Zhang, G., Wang, D., Ge, Z., Lu, Y., Jiang, X., & Lou, L. (2019). Dendritic branching patterns in platforms of complex Ni-based single crystal castings. *China Foundry*, 16(2), 110–117. <https://doi.org/10.1007/s41230-019-8080-3>
- Huang, Z. W., Huang, J., Deng, T. Q., Huang, X. X., Sun, C. J., Xiao, Y. L., Zhang, R. C., Su, Z. Q., & Hua, Z. H. (2013). Globular structure generation and mechanical properties of thixoformed Magnesium alloy. *Materials Research Innovations*, 17(sup1), 156–161. <https://doi.org/10.1179/1432891713Z.000000000237>
- Husain, N. H., Ahmad, A. H., & Rashidi, M. M. (2017). An overview of thixoforming process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012053>
- Jiang, J. F., Liu, Y. Z., Xiao, G. F., & Wang, Y. (2019). Thixoforming of Semisolid Slurry with High Fraction Solid Fabricated by Partial Melting of Commercial Wrought Aluminum Alloys. *Solid State Phenomena*, 285, 210–218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.285.210>
- Kubásek, J., Vojtěch, D., & Dvorský, D. (2017). The effect of thermo-mechanical processing on the structure, static mechanical properties and fatigue behaviour of pure Mg. *Materiali in Tehnologije*, 51(2), 289–296. <https://doi.org/10.17222/mit.2016.029>
- Kumar, D., Phanden, R. K., & Thakur, L. (2021). A review on environment friendly and lightweight Magnesium-Based metal matrix composites and alloys. *Materials Today: Proceedings*, 38, 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.424>
- Kusharjanto, K., Soepriyanto, S., Korda, A. A., & Dwiwanto, S. A. (2019). Effect of ZnO Nanoparticles on Grain Refinement of Mg-Al-Zn Alloy by Thixoforming Process. *Key Engineering Materials*, 811, 170–178. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.811.170>
- Lin, Y., Zhu, J., Han, J., Ma, X., & Wang, G. (2020). Effect of strains in grain boundary modification on plasticity and plasticizing mechanism of commercial-purity nickel. *Materials Today Communications*, 24, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101177>
- Liu, H., Gao, Y., Zhu, Y. M., Wang, Y., & Nie, J. F. (2014). A simulation study of β 1 precipitation on dislocations in an Mg–rare earth alloy. *Acta Materialia*, 77, 133–150. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.04.054>
- M. Kamal, M. R., Bazilah, N. F., Idris, M. H., Salleh, M. S., & W. Ali, W. F. F. (2020). Effect of semi-solid forming temperature and heat treatment on mechanical properties and microstructure of Mg-Al-Zn Alloy (AZ91D) for automotive light application. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(4), 7319–7327. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.4.2020.01.0575>
- Ng, C. H., Bermingham, M. J., Yuan, L., & Dargusch, M. S. (2022). Towards β -fleck defect free additively manufactured titanium alloys by promoting the columnar to equiaxed transition and grain refinement. *Acta Materialia*, 224, 117511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117511>
- Nithin, A. M., Davidson, M. J., & Rao, C. S. P. (2020). Mechanical and Metallurgical Studies on Thixoextruded Al-Si Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(10), 6378–6389. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05143-8>
- Ohno, M., Kudo, M., Kim, G., Yamada, R., Shibuta, Y., & Takaki, T. (2023). Time evolution of interface shape distribution of equiaxed dendrite: A phase-field study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1274(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1274/1/012042>

- Okayasu, M., & Fukui, T. (2021). A study of the mechanical properties of a Mg-Al-Zn alloy (AZ91) produced via Thixomolding. *International Journal of Material Forming*, 14(2), 271–280. <https://doi.org/10.1007/s12289-020-01589-2>
- Qi, Y. L., Zhao, L., Sun, X., Zong, H. X., Ding, X. D., Jiang, F., Zhang, H. L., Wu, Y. K., He, L., Liu, F., Jin, S. B., Sha, G., & Sun, J. (2021). Enhanced mechanical performance of grain boundary precipitation-hardened high-entropy alloys via a phase transformation at grain boundaries. *Journal of Materials Science & Technology*, 86, 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.01.061>
- Quan, G.-Z., Kang, B.-S., Ku, T.-W., & Song, W.-J. (2011). Identification for the optimal working parameters of Al–Zn–Mg–Cu alloy with the processing maps based on DMM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(9–12), 1069–1078. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3241-6>
- SALVETR, P., ŠKOLÁKOVÁ, A., & NOVÁK, P. (2018). Effect of Magnesium addition on the structural homogeneity of NiTi alloy produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Metallic Materials*, 55(06), 379–383. https://doi.org/10.4149/km_2017_6_379
- Sarvesha, R., Chalapathi, D., Yadava, M., Jain, J., & Singh, S. S. (2021). In-situ studies on deformation and fracture characteristics of AZ91 Mg alloy. *Materialia*, 18, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101177>
- Shastri, H., Mondal, A. K., Dutta, K., Dieringa, H., & Kumar, S. (2020). Microstructural correlation with tensile and creep properties of AZ91 alloy in three casting techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 566–573. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.010>
- Shin, C.-H., Lee, H.-Y., Gyan-Barimah, C., Yu, J.-H., & Yu, J.-S. (2023). Magnesium: properties and rich chemistry for new material synthesis and energy applications. *Chemical Society Reviews*, 52(6), 2145–2192. <https://doi.org/10.1039/D2CS00810F>
- WANG, L., CHEN, T., JIANG, W., FENG, Y., DONG, W., WANG, Z., LIANG, Z., & ZHU, Y. (2013). Grain coarsening in semi-solid state and tensile mechanical properties of thixoformed AZ91D-RE. *Journal of Rare Earths*, 31(3), 319–326. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60279-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60279-8)
- Xu, Y., Jia, J., Chen, C., Liu, W., Luo, S., Yang, Y., & Hu, L. (2017). Thixoforming of semi-solid AZ91D alloy with high solid fraction prepared by the RUE-based SIMA process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9–12), 4317–4328. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0874-0>
- Zhang, S., Chen, T., Zhou, J., Xiu, D., Li, T., & Cheng, K. (2018). Mechanical Properties of Thixoforged In Situ Mg2Si/AM60B Composite at Elevated Temperatures. *Metals*, 8(2), 106. <https://doi.org/10.3390/met8020106>
- Zhang, T., Wang, W., Liu, J., Wang, L., Tang, Y., & Wang, K. (2022). A review on Magnesium alloys for biomedical applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.953344>
- Zhao, Z., Chen, Q., Kang, F., & Shu, D. (2009). Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoformed AZ91D Magnesium alloy with the addition of yttrium. *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1–2), 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.059>
- Zhou, S., Liu, T., Tang, A., Huang, Y., Peng, P., Zhang, J., Hort, N., Willumeit-Römer, R., & Pan, F. (2023). Designing Mg alloys with high strength and ductility by reducing the strength difference between the basal and non-basal slips. *Materials & Design*, 225, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111476>
- Zhuang, Y., Wang, H., Li, H., Zheng, L., Li, J., & Zhou, P. (2020). Synergistic Effect of Grain Size, β -Mg₁₇Al₁₂, and Texture on Mechanical Properties of Mg-15Al (wt.%) Magnesium Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(7), 4360–4369. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04991-8>

Pengaruh Mobilitas Masyarakat terhadap Tingkat Penambahan Jumlah Kasus COVID-19 di Surabaya

Gholiqlul Amroth Alawy¹, Achmad Wicaksono², Syaripin¹,

Adelia Nur Isna Kartikasari¹, dan Niswah Selmi Kaffa¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember, Indonesia

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

gholi.teknik@unej.ac.id, wicaksono68@ub.ac.id, syaripin.teknik@unej.ac.id, nurisnaadelia@gmail.com,

selmi.kaffa@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dampak mobilitas penduduk dan kendaraan terhadap jumlah kasus COVID-19 di Surabaya serta menentukan jeda waktu (*time lag*) optimal antara pola mobilitas dan peningkatan kasus baru. Analisis regresi linier digunakan dengan variabel dependen (Y_i) berupa jumlah harian kasus positif COVID-19 dan variabel independen (X_i) berupa data mobilitas. Data mobilitas ini dikumpulkan dari titik-titik transportasi utama di Surabaya, yaitu Stasiun Kereta Api Gubeng, Terminal Bus Purabaya, dan Gerbang Tol Waru Utama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat pola peningkatan jumlah kasus COVID-19 yang sejalan dengan perubahan tingkat mobilitas masyarakat. Pada jeda waktu (*lag*) 0 hari, korelasi antara mobilitas dan kasus COVID-19 memiliki nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,719, namun meningkat menjadi 0,753 ketika menggunakan jeda waktu 15 hari ($lag = 15$). Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi mobilitas masyarakat di Surabaya memiliki pengaruh yang lebih kuat terhadap jumlah kasus COVID-19 dalam rentang waktu 15 hari setelahnya. Model regresi linier yang dibangun melalui proses seleksi *stepwise* memperlihatkan bahwa tingkat mobilitas di Gerbang Tol Waru Utama menjadi variabel prediktor paling signifikan, menjadikannya faktor penting dalam memahami dinamika penyebaran COVID-19 di wilayah ini.

Kata kunci: COVID-19, mobilitas, pemodelan, regresi linier, *time lag*

Abstract

This study aims to examine the impact of population and vehicle mobility on the number of COVID-19 cases in Surabaya and to determine the optimal time lag between mobility patterns and the increase in new cases. Linear regression analysis was conducted, with the daily number of positive COVID-19 cases as the dependent variable (Y_i) and mobility data as the independent variable (X_i). The mobility data were collected from transportation hubs, including Gubeng Train Station, Purabaya Bus Terminal, and the Waru Utama Toll Gate. The results indicate a pattern of increased COVID-19 cases that aligns with changes in mobility patterns. At a lag of 0 days, the correlation between mobility and COVID-19 cases has a coefficient of determination (R^2) of 0.719, which increases to 0.753 with a 15-day lag ($lag = 15$). This suggests that fluctuations in community mobility in Surabaya have a stronger impact on COVID-19 case numbers within a 15-day period afterward. The linear regression model, developed through a stepwise selection process, shows that the mobility level at the Waru Utama Toll Gate is the most significant predictor variable, making it an essential factor in understanding the COVID-19 transmission dynamics in the region.

Keywords: COVID-19, mobility, modeling, linear regression, time lag

1. Pendahuluan

Terdapat penemuan penyakit *pneumonia* baru pada tahun 2019 akhir di wilayah Wuhan, China (WHO, 2019). Penyakit akibat virus itu disebut COVID-19 yang telah menyebar secara eksponensial ke seluruh negara, termasuk Indonesia di Kota Depok pada awal Maret 2020 (Djalante et al., 2020). Kota Surabaya yang merupakan satu kota besar di Indonesia, juga mengalami penambahan jumlah kasus baru yang pesat pada awal pandemi. Penambahan kasus positif COVID-19 di Kota Surabaya meningkat menjadi 2.095 orang, yang awalnya hanya separuhnya yaitu 1.255 orang pada tanggal 20 – 25 Mei 2020 (Gugus Tugas Percepatan Penanganan COVID-19, 2021).

Penyebaran epidemi di suatu daerah dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk mobilitas masyarakat, kondisi lingkungan, iklim, cuaca, serta penggunaan transportasi publik. Faktor iklim dan cuaca berupa suhu udara, kecepatan angin, dan curah hujan berperan signifikan dalam meningkatkan penyebaran virus (Hoogeveen et al., 2022). Selain

Info Makalah:

Dikirim : 10-25-24;

Revisi 1 : 03-10-25;

Diterima : 03-17-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-815-636-530-76

e-mail : gholi.teknik@unej.ac.id

itu, wilayah dengan kondisi lingkungan yang memiliki konsentrasi CO, NOX/NO, dan O₃ tinggi memiliki risiko infeksi tinggi (Tang et al., 2025). Sedangkan studi oleh Eisenmann (2021) menunjukkan penggunaan transportasi publik memberi dampak yang besar terhadap penyebaran kasus COVID-19 di Jerman.

Meskipun ada beberapa faktor yang mempengaruhi penyebaran penyakit, namun mobilitas masyarakat merupakan faktor utama penyebaran penyebaran

virus dari daerah yang terjangkit virus (Iacus et al., 2020). Pada tahap awal penyebaran COVID-19, jumlah kasus baru di luar Kota Wuhan berkorelasi tinggi dengan pergerakan orang dari Wuhan menuju kota-kota tersebut (Kraemer et al., 2020). Selain itu, strategi WHO seperti penguatan pengawasan dan respons penyakit menular, regulasi perjalanan, serta penyebaran informasi kesehatan sangat relevan dalam mengendalikan penyebaran virus yang dibawa oleh pelaku perjalanan (Gezairy, 2003).

Besarnya kasus COVID-19 pada satu hari berhubungan erat dengan besarnya perilaku mobilitas pada beberapa hari sebelumnya (Carteni et al., 2020). Kebiasaan mobilitas (*mobility habits*) adalah variabel yang paling menjelaskan jumlah infeksi COVID-19 dibandingkan dengan variabel lainnya, yaitu populasi, jumlah tes, dan temperatur di suatu wilayah. Beberapa penelitian telah dilakukan dan mendapatkan jeda waktu (*time-lag*) antara 7-21 hari (Linka et al., 2020; Pandey et al., 2020; Shirvani et al., 2020) bervariasi sesuai dengan kondisi dan perilaku perjalanan masyarakat di setiap wilayah studi. Penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa tingginya mobilitas masyarakat mencerminkan tingkat interaksi antarindividu, sehingga mobilitas secara tidak langsung berkontribusi terhadap peningkatan kasus COVID-19 di suatu daerah.

Jumlah kasus COVID-19 di Surabaya pada tahun 2020 sangat dipengaruhi oleh besarnya mobilitas masyarakat di angkutan bus, angkutan kereta api, dan di jalan tol (Alawy et al., 2021). Tingginya korelasi antara jumlah kasus COVID-19 dan tingkat mobilitas orang atau kendaraan membuka peluang untuk menganalisis hubungan serta melakukan pemodelan di antara keduanya.

Studi ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara jumlah kasus COVID-19 pada hari tertentu terhadap jumlah mobilitas masyarakat pada beberapa hari sebelumnya. Ruang lingkup dari penelitian ini adalah di Kota Surabaya yang memiliki jumlah kasus yang tinggi dan mobilitas tinggi di Jawa Timur. Penelitian ini memiliki hasil yang dapat membantu pemangku kebijakan pada tingkat pusat hingga daerah dalam menentukan kebijakan terkait transportasi pada masa pandemi atau epidemi yang serupa pada tahun-tahun berikutnya.

2. Metode

Wilayah studi dalam penelitian ini mencakup Kota Surabaya, yang berperan sebagai pusat penyebaran virus *corona* di Provinsi Jawa Timur sekaligus menjadi pusat pergerakan dan aktivitas utama di provinsi tersebut. Lingkup waktu penelitian ini adalah pada awal kebijakan Adaptasi Kebiasaan Baru (*new normal*) di Kota Surabaya dikeluarkan yaitu dimulai 9 Juni 2020 hingga 31 Desember 2020. Pada fase ini korelasi antara kedua variabel sangat erat (Alawy et al., 2021) dan merupakan fase yang akan berjalan lebih panjang dibanding fase-fase lainnya. Model yang digunakan pada studi ini adalah model regresi linear berganda. Selain itu, terdapat analisis untuk mencari berapa waktu jeda (*time-lag*) antara jumlah mobilitas dan jumlah kasus COVID-19.

2.1. Data dan Metodologi

Penelitian ini menggunakan data yang dihimpun dari instansi-instansi terkait yang menyediakan data. Data yang dikumpulkan mencakup jumlah kasus positif COVID-19 serta data mobilitas yang terjadi pada moda transportasi bus, kereta api, dan jalan tol seperti ditunjukkan pada

Tabel 1. Data dan Sumbernya

No.	Instansi/Lembaga	Data
1	PT. Jasa Marga Cabang Surabaya- Gempol	Kendaraan yang melintasi Gerbang Tol Waru Utama
2	Dinas Perhubungan (DISHUB) Kota Surabaya	Penumpang bus di Terminal Bus Purabaya Bus yang beroperasi di Terminal Bus Purabaya
3	PT. Kereta Api Indonesia (KAI) DAOP VIII Surabaya	Penumpang Stasiun Gubeng di Surabaya
4	Kementerian Kesehatan Republik Indonesia	Kasus positif COVID-19 di Kota Surabaya

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2024

a. Jumlah Kasus COVID-19

Kasus terkonfirmasi positif COVID-19 pertama di Kota Surabaya dideteksi pada tanggal 17 Maret 2020. Data jumlah kasus positif COVID-19 didapatkan dari Kementerian Kesehatan Republik Indonesia melalui Laporan Gugus Tugas Percepatan COVID-19 (Gugus Tugas Percepatan Penanganan COVID-19, 2021). Data yang digunakan adalah jumlah kasus terkonfirmasi positif COVID-19, sedangkan untuk data pasien sembuh, pasien meninggal, dan lainnya tidak digunakan dalam penelitian ini.

Persebaran COVID-19 di Kota Surabaya meningkat hingga 2 kali lipat pada awal masa pandemi, tanggal 20-25 Mei 2020. Hal ini disebabkan karena besarnya mobilitas masyarakat menjelang Hari Raya Idul Fitri 1441 H. Seiring berjalannya waktu, penambahan jumlah kasus semakin berkurang, sehingga kebijakan Pembatasan Sosial Berskala Besar (PSBB) tidak diberlakukan dan diganti kebijakan Adaptasi Kebiasaan Baru (AKB). Data harian jumlah kasus COVID-19 di Kota Surabaya pada tahun 2020 ditunjukkan pada Gambar 1(a).

b. Mobilitas Penumpang di Angkutan Bus

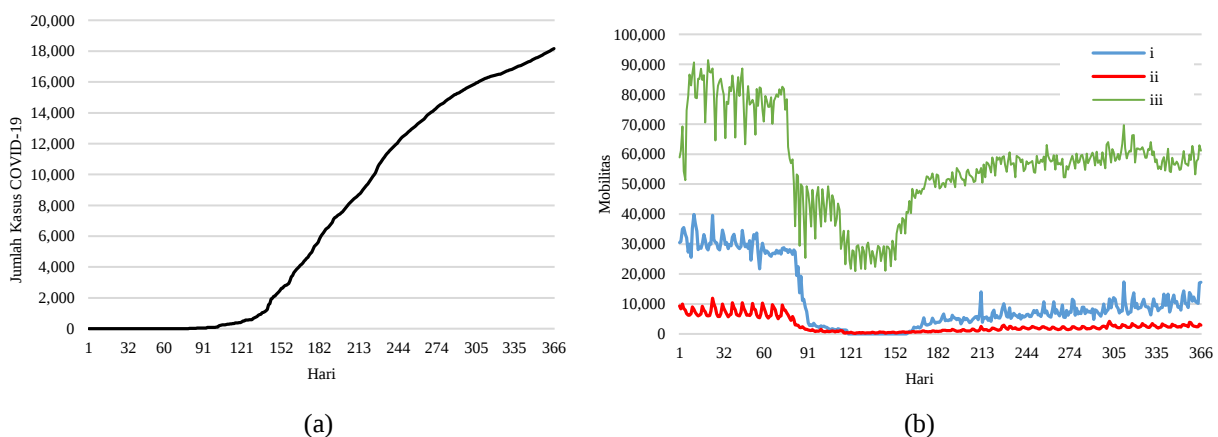
Data mobilitas angkutan bus di masa pandemi COVID-19 didapatkan dari Dinas Perhubungan Kota Surabaya (Dinas Perhubungan Kota Surabaya, 2020). Data tersebut meliputi jumlah bus dan penumpang yang datang dan berangkat tiap harinya. Pada penelitian ini, mobilitas angkutan bus di Surabaya diwakili oleh mobilitas di Terminal Purabaya. Lokasi ini dipilih karena merupakan simpul transportasi darat paling ramai di wilayah Surabaya Raya, sehingga memiliki arus lalu lintas paling padat dibanding terminal bus lainnya. Pada masa pandemi, angkutan bus sempat tidak beroperasi, yaitu pada masa PSBB tanggal 28 April – 8 Juni 2020. Pada tanggal 9 Juni 2020 kebijakan PSBB dihilangkan, sehingga angkutan bus dapat kembali beroperasi. Data harian jumlah penumpang yang berangkat dari Terminal Purabaya pada tahun 2020 ditunjukkan pada Gambar 1(b), garis i.

c. Mobilitas Penumpang di Angkutan Kereta Api

Selain data di angkutan bus, data di angkutan kereta api juga digunakan untuk mewakili mobilitas angkutan umum di Surabaya. Data mobilitas angkutan kereta api di masa pandemi COVID-19 didapatkan dari PT. KAI Daerah Operasi VIII Surabaya (PT. Kereta Api Indonesia DAOP VIII Surabaya, 2020). Data yang didapatkan jumlah penumpang yang naik tiap harinya di stasiun paling ramai di Surabaya, yaitu Stasiun Gubeng. Pada masa pandemi, angkutan kereta api selalu beroperasi, namun pada masa *lockdown* (PSBB) hanya kereta api lokal yang beroperasi. Data harian jumlah penumpang yang berangkat dari Stasiun Gubeng pada tahun 2020 ditunjukkan pada Gambar 1(b), garis ii.

d. Mobilitas Kendaraan di Pintu Tol

Mobilitas non angkutan umum atau mobilitas oleh kendaraan pribadi yang digunakan sebagai input model adalah besarnya mobilitas yang melewati jalan tol. Data mobilitas kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup jumlah kendaraan yang memasuki Kota Surabaya melalui Gerbang Tol Waru Utama yang merupakan gerbang utama untuk masuk atau keluar Kota Surabaya, serta volume lalu lintasnya tertinggi dibanding gerbang tol lainnya. Data jumlah kendaraan yang melewati tol didapatkan dari PT. Jasa Marga cabang Surabaya – Gempol (PT. Jasa Marga Cabang Surabaya Gempol, 2020). Kendaraan yang melewati tol juga mengalami penurunan akibat pandemi COVID-19, namun tidak terlalu parah dibanding pada angkutan umum. Data harian jumlah penumpang yang melewati gerbang Tol Gubeng pada tahun 2020 ditunjukkan pada gambar 4 (b), garis iii.



Gambar 1. Data Harian (a) Total Kasus COVID-19 dan Kasus Baru Harian dan
(b) Mobilitas Masyarakat di Surabaya pada Tahun 2020

Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2024

2.2. Model Regresi Linear Berganda

Regresi linear adalah salah satu model statistik yang paling umum digunakan dalam analisis prediksi pada *machine learning* (Rustam et al., 2020). Pada metode regresi linear terdapat variabel dependen dan independen. Jika regresi linear menggunakan lebih dari 1 variabel independen, maka metode ini disebut dengan metode regresi linear berganda (*multiple linear regression*) (Freedman, 2009).

Hasil dari penelitian sebelumnya, jumlah kasus COVID-19 berkorelasi tinggi terhadap mobilitas masyarakat di Surabaya (Alawy et al., 2021). yaitu:

- Mobilitas di Stasiun Kereta Api Gubeng, yaitu banyaknya penumpang yang naik di stasiun.
- Mobilitas di Gerbang Tol Waru Utama, yaitu banyaknya orang yang melewati gerbang tol
- Mobilitas di Terminal Purabaya, yaitu banyaknya penumpang yang naik bus dan banyaknya bus yang beroperasi

di terminal.

Model regresi yang dibentuk memiliki variabel terikat berupa jumlah kasus COVID-19 dan variabel bebas berupa jumlah mobilitas di Surabaya, sehingga persamaan yang digunakan:

$$Y_i = a + b_1 \cdot X1_{i-x} + b_2 \cdot X2_{i-x} + b_3 \cdot X3_{i-x} + b_4 \cdot X4_{i-x} \quad (1)$$

dengan:

- Y adalah variabel terikat yaitu jumlah kasus positif COVID-19 yang terdeteksi di wilayah pada hari ke- i ;
- $X1_{i-x}$ adalah besarnya mobilitas orang (penumpang) yang masuk ke Surabaya menggunakan angkutan Bus di Terminal Purabaya.
- $X2_{i-x}$ adalah besarnya mobilitas bus yang keluar dari Surabaya di Terminal Purabaya.
- $X3_{i-x}$ adalah besarnya mobilitas orang (penumpang) yang naik kereta api di Stasiun Kereta Api Gubeng.
- $X4_{i-x}$ adalah besarnya mobilitas orang (penumpang) yang melewati Gerbang Tol Waru Utama.

$b_1, b_2, \dots, b_n$ adalah koefisien setiap variabel bebas dan a adalah konstanta. $i-x$ pada variabel bebas menunjukkan bahwa data mobilitas yang digunakan adalah pada " x " hari sebelumnya. Variabel ini mengukur keadaan yang diselidiki dalam penelitian ini bahwa jumlah kasus positif COVID-19 dalam satu hari berhubungan langsung dengan kebiasaan mobilitas yang dilakukan " x " hari sebelumnya. Besarnya " x " ini menunjukkan *time-lag* yang terjadi antara variabel mobilitas dan jumlah kasus COVID-19. Pembuatan model diaplikasikan untuk $x = 0$ sampai 21 hari, sehingga dapat diketahui mobilitas pada berapa ke-0 sampai ke-21 hari sebelumnya yang paling mempengaruhi besarnya jumlah kasus positif COVID-19.

Proses pembuatan model dibantu dengan perangkat lunak dan menggunakan metode *stepwise selection*. Sedangkan penentuan model yang paling baik adalah dengan uji validitas menggunakan nilai koefisien determinasi R^2 nilai t , dan uji signifikansi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Mobilitas di Surabaya saat Pandemi COVID-19

Laporan dari Gugus Tugas Percepatan Penanganan COVID-19, kasus COVID-19 pertama di Indonesia ditemukan di Depok, Jawa Barat pada tanggal 3 Maret 2020. Virus *corona* terus menyebar hingga masuk ke Surabaya pada tanggal 17 Maret 2020 dan mengakibatkan pembuatan kebijakan pembatasan sosial dan transportasi. Pada 22 April 2020 pemerintah daerah Provinsi Jawa Timur mengeluarkan kebijakan PSBB untuk wilayah Surabaya, Gresik, dan Sidoarjo. Kebijakan ini membuat seluruh aktivitas masyarakat di luar dibatasi dan beberapa fasilitas umum ditutup sementara.

Adanya kebijakan PSBB dan berbagai kebijakan lanjutan setelahnya, membuat mobilitas masyarakat di luar rumah memiliki fase yang berbeda-beda. Perubahan pola perjalanan tiap fase dibagi menjadi 5 fase (Alawy et al., 2021). Pembagian dan waktu tiap fase mobilitas masyarakat di Kota Surabaya pada tahun 2020 ditunjukkan pada Tabel 2.

Pada kondisi normal yaitu ketika virus *corona* belum masuk di Surabaya, mobilitas masyarakat masih berjalan normal seperti tahun-tahun sebelumnya, Mobilitas masyarakat mengalami penurunan ketika terdapat kasus pertama di Surabaya (17 Maret 2020), kondisi ini disebut masa awal pandemi atau "Fase 1". Mobilitas masyarakat terus menurun secara drastis karena kebijakan PSBB oleh pemerintah daerah untuk pembatasan sosial dan penutupan beberapa fasilitas publik. Pada "Fase 2" ini mobilitas mencapai titik terendahnya.

Pada awal Juni tahun 2020, pemerintah melalui kebijakan transportasinya mengurangi pembatasan sosial dan menginisiasi penerapan Adaptasi Kebiasaan Baru (AKB). Transportasi umum sudah dapat beroperasi kembali serta fasilitas umum lainnya sudah mulai dibuka. Fase ini merupakan transisi antara kondisi pembatasan sosial total pada fase PSBB dan kondisi mulai dilonggarkannya pembatasan sosial fase AKB, fase ini disebut "Fase 3". Meskipun sudah mulai memiliki tren yang naik, namun mobilitas pada fase ini masih sangat rendah dibandingkan saat kondisi normal (Gambar 2), yaitu 11,8 % untuk mobilitas di bus, 11,85% untuk mobilitas di kereta api, dan 81,96% untuk mobilitas di jalan tol.

Tabel 2. Waktu Tiap Fase Mobilitas di Surabaya

No	Fase	Waktu
1	Kondisi normal (F0)	1 Januari – 16 Maret 2020
2	Awal pandemi COVID-19 (F1)	17 Maret – 21 April 2020
3	Pembatasan Sosial Berskala Besar (F2)	22 April – 5 Juni 2020
4	Transisi Adaptasi Kebiasaan Baru (F3)	9 Juni – 8 Juli 2020
5	Adaptasi Kebiasaan Baru (F4)	9 Juli – 31 Desember 2020

Sumber: Alawy, G. A. et al., 2021.

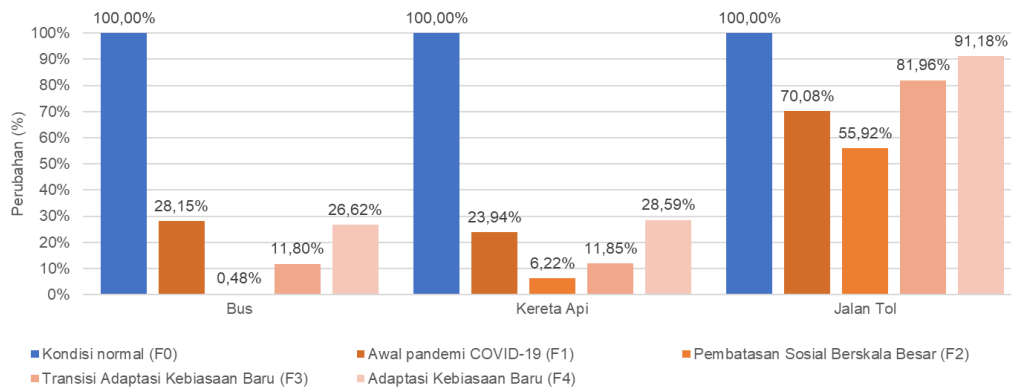
Setelah kebijakan AKB dikeluarkan, yaitu pada fase transisi AKB dan AKB jumlah kasus positif COVID-19 dan mobilitas memiliki korelasi yang sangat tinggi sesuai dengan

Tabel 3. Empat variabel bebas yang akan menjadi input pemodelan memiliki nilai koefisien korelasi (R) yang besar terhadap variabel jumlah kasus positif COVID-19 pada masa transisi AKB. Selain itu, nilai Signifikansinya juga

	Variabel	Korelasi	Sig. (2-tailed)
X1	Penumpang yang datang ke Terminal Purabaya (orang)	0.765	< 0.001
X2	Bus yang berangkat dari Terminal Purabaya (kendaraan)	0.761	< 0.001
X3	Penumpang yang naik dari Stasiun Pasar Turi (orang)	0.841	< 0.001
X4	Orang yang melewati Gerbang Tol Waru Utama (orang)	0.834	< 0.001

sangat rendah, sehingga variabel-variabel ini dapat digunakan sebagai input pemodelan.

Meskipun besarnya mobilitas pada fase ini masih cukup rendah dibandingkan saat kondisi normal (Gambar 2), namun korelasi dengan jumlah kasus positif COVID-19 sangat tinggi. Hasil dari korelasi ini dapat diimplikasikan bahwa semakin tinggi mobilitas masyarakat maka semakin tinggi juga jumlah kasus positif COVID-19 di Surabaya pada awal-awal fase AKB. Kejadian ini disebabkan karena pelonggaran aktivitas masyarakat di luar rumah oleh pemerintah, sehingga perilaku masyarakat cenderung melakukan perjalanan setelah berbulan-bulan dipaksa untuk beraktivitas di rumah saja.



Gambar 2. Persentase Mobilitas pada Setelah Pandemi Dibanding dengan Kondisi Normal

Sumber: Hasil Analisis Data, 2024

Tabel 3. Korelasi Variabel Jumlah Kasus COVID-19 dan Variabel Mobilitas

	Variabel	Korelasi	Sig. (2-tailed)
X1	Penumpang yang datang ke Terminal Purabaya (orang)	0.765	< 0.001
X2	Bus yang berangkat dari Terminal Purabaya (kendaraan)	0.761	< 0.001
X3	Penumpang yang naik dari Stasiun Pasar Turi (orang)	0.841	< 0.001
X4	Orang yang melewati Gerbang Tol Waru Utama (orang)	0.834	< 0.001

Sumber: Hasil Analisis Data, 2024

3.2. Pengaruh Mobilitas terhadap Jumlah Kasus COVID-19

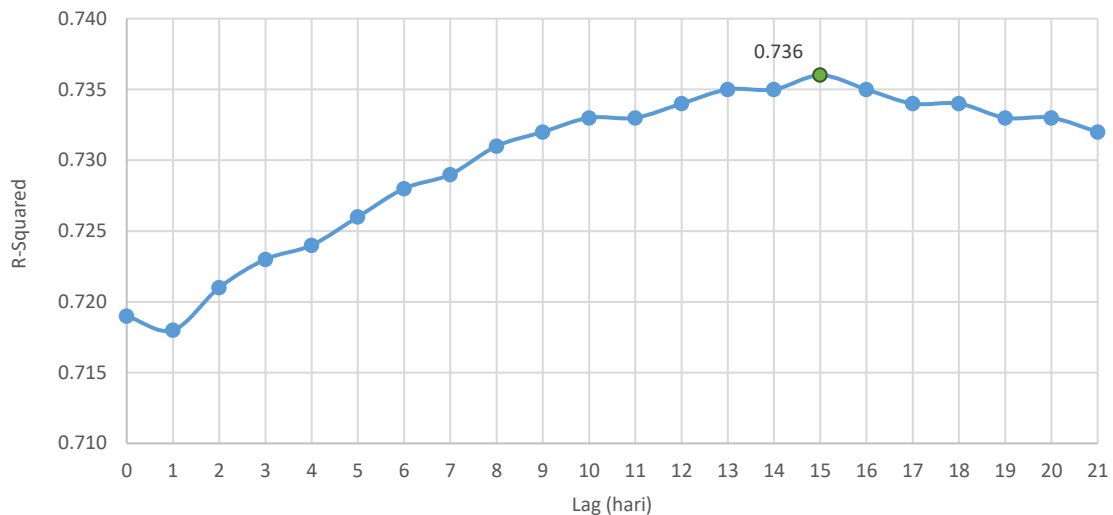
Penularan virus dari penderita COVID-19 melalui interaksi dengan individu yang belum terinfeksi memiliki jeda waktu hingga orang tersebut dinyatakan positif COVID-19. Jumlah kasus COVID-19 dipengaruhi oleh mobilitas yang terjadi beberapa hari sebelumnya. Jeda waktu ini, atau yang disebut sebagai "*lag-time*," menggambarkan bahwa seseorang yang terinfeksi selama perjalanan baru akan terdeteksi positif setelah beberapa hari. *Lag-time* juga dikenal sebagai "*positivity detection rate*" dan ditentukan dengan mencocokkan variabel kasus COVID-19 dengan variabel mobilitas yang diatur pada interval waktu berbeda (Carteni et al., 2020; Shirvani et al., 2020).

Analisis ini dilakukan dengan menghitung koefisien determinasi (R^2) antara variabel bebas dan terikat. Estimasi dibuat melalui model regresi linier berganda pada Persamaan (1), dengan menghubungkan jumlah kasus positif COVID-19 sebagai variabel terikat dengan variabel-variabel mobilitas di Surabaya sebagai variabel bebas. Pencarian nilai koefisien determinasi dilakukan untuk variasi *lag* dari 0 hingga 21 hari. Misal pada *lag* = 0, model dibentuk menggunakan data jumlah kasus COVID-19 dan data mobilitas pada tanggal yang sama, misalnya 1 Juli 2020. Sementara pada *lag* = 1, model dibentuk menggunakan data jumlah kasus pada 2 Agustus 2020 dan data mobilitas pada 1 Agustus 2020. Proses ini diulang untuk setiap *lag* hingga tren korelasi menurun, yaitu pada *lag* 21 hari. Hasil dari analisis ini menentukan jeda waktu optimal ("x" hari sebelumnya) yang memberikan model terbaik berdasarkan nilai koefisien determinasi tertinggi.

Jangka waktu yang dipertimbangkan dalam pembuatan model adalah saat kebijakan Adaptasi Kebiasaan Baru dikeluarkan, yaitu dari 9 Juni 2020 sampai 31 Desember 2020. Jangka waktu ini dipilih karena pada fase ini mobilitas

dan jumlah kasus memiliki korelasi yang tinggi, serta penambahan jumlah kasus dan mobilitas sudah stabil. Kebiasaan mobilitas (*mobility habits*) adalah variabel yang paling menjelaskan jumlah infeksi COVID-19 (Carteni et al., 2020).

Nilai R^2 model mobilisasi dengan jumlah kasus COVID-19 menggunakan regresi linear untuk setiap hari dari $x = 0$ hari sampai $x = 21$ hari ditunjukkan pada Gambar 3. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa jumlah kasus positif berhubungan lebih besar terhadap mobilisasi kendaraan pada “x” hari-hari sebelumnya dibanding dengan mobilisasi kendaraan pada hari tersebut ($x = 0$) yang ditunjukkan dengan nilai R^2 . Nilai R^2 terus naik sampai x sama dengan 15 hari, lalu berkurang setelah lebih dari 15 hari. Dari hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa jumlah kasus positif COVID-19 di Surabaya memiliki hubungan yang erat terhadap mobilisasi kendaraan pada 15 hari sebelumnya.



Gambar 3. Nilai R^2 Setiap Model pada Lag 0 Sampai 21 Hari

Sumber: Hasil Analisis Data, 2024

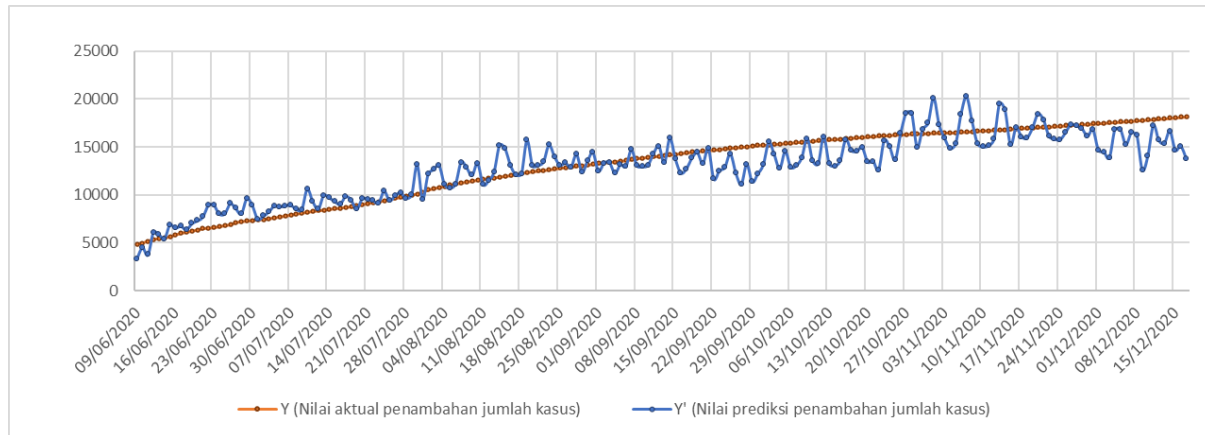
Hasil ini mengidentifikasi bahwa seseorang yang terinfeksi virus *corona* hingga melakukan pemeriksaan tes positif COVID-19 dan dinyatakan positif adalah sekitar 15 hari. Dari hasil pemodelan regresi linear dengan metode *Stepwise step*, nilai R^2 atau koefisien determinasi paling tinggi terjadi pada $lag = 15$ hari, yaitu 0,735 ($Adj R^2 = 0,732$). Hasil pemodelan jumlah kasus COVID-19 (Y_i) ditunjukkan pada Persamaan (2) sebagai berikut:

$$Y_i = 0,742 X_{1-i-15} + 0,489 X_{4-i-15} - 18.742,7-9620 Y_i = a + b_1 \cdot X_{1-i-x} + b_2 \cdot X_{2-i-x} + b_3 \cdot X_{3-i-x} \quad (2)$$

Dengan X_{1-i-15} adalah banyaknya bus yang datang ke Terminal Purabaya pada 15 hari sebelumnya dan X_{4-i-15} adalah banyaknya orang yang melewati Gerbang Tol Waru Utama pada 15 hari sebelumnya. Hasil uji validasi model tersebut menghasilkan $F = 238,994$ dan $Sig. < 0,0001$. Setiap variabel yang merupakan prediktor pada model yang telah dibentuk memiliki $Sig. < 0,05$ dan lolos uji validitas.

Variabel yang berpengaruh pada pembentukan model tersebut hanya variabel X_1 dan X_4 . Variabel yang lainnya tidak dimasukkan ke dalam prediktor atau variabel bebas karena tidak memiliki signifikansi yang tinggi dan juga tidak dianggap logis untuk bisa mempengaruhi jumlahnya kasus COVID-19 di Surabaya. Dari hasil tersebut, variabel yang paling berpengaruh adalah banyaknya orang yang melewati jalan tol (X_{4-i-15}).

Model persamaan yang diperoleh dari analisis dapat dimanfaatkan untuk memproyeksikan jumlah kasus COVID-19 dengan menggunakan data dari variabel yang tersedia. Nilai aktual dan prediksi hasil pemodelan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kasus Positif COVID-19 Aktual dan Prediksi

Sumber: Hasil Analisis Data, 2024

Penelitian serupa terkait hubungan mobilitas dan COVID-19 sudah pernah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya mengungkapkan bahwa jeda waktu penyebaran virus bervariasi tergantung pada karakteristik wilayah dan metode analisis yang dipakai. Jeda waktu penyebaran virus di beberapa negara Eropa mencapai 17 hari (Linka et al., 2020), di Italia hingga 21 hari (Carteni et al., 2020), sedangkan di Tiongkok, jeda waktu penyebaran virus kurang dari 1 minggu (Shi & Fang, 2020), sedangkan di Iran adalah 8 hari (Shirvani et al., 2020). Hasil analisis di Surabaya menunjukkan jeda waktu (*lag-time*) sebesar 15 hari, yang kemungkinan berbeda karena adanya perbedaan metode analisis serta variabel-variabel yang digunakan.

Kesimpulan

Menyebarnya virus *corona* dan penyakit COVID-19 pada awal tahun 2020 di Surabaya mempengaruhi mobilitas kendaraan dan orang di Kota Surabaya. Selain dipengaruhi oleh kekhawatiran masyarakat terjangkit penyakit COVID-19, juga ada beberapa kebijakan yang dikeluarkan oleh pemerintah untuk membatasi aktivitas di luar rumah. Kasus positif COVID-19 di Kota Surabaya pada masa Adaptasi Kebiasaan Baru (AKB) di tahun 2020 menunjukkan hubungan yang kuat dengan tingkat mobilitas orang dan kendaraan. Mobilitas di Jalan Tol menjadi faktor paling signifikan yang memengaruhi peningkatan jumlah kasus COVID-19. Selain itu, jumlah kasus tersebut juga dipengaruhi oleh tingkat mobilitas masyarakat beberapa hari sebelumnya. Dari hasil analisis didapatkan bahwa besarnya jumlah kasus positif dengan besarnya mobilitas memiliki jeda waktu 15 hari. Angka ini menunjukkan bahwa jumlah kasus positif COVID-19 di Surabaya pada suatu hari mobilitas masyarakat pada 15 hari sebelumnya. Pengembangan penelitian lebih lanjut lagi dengan menambahkan jenis variabel mobilitas orang atau kendaraan. Variabel mobilitas seperti jumlah kendaraan yang melintas di jalan raya non-tol, jumlah penumpang pesawat, dan jumlah penumpang kapal penumpang dapat ditambah agar didapatkan hasil yang lebih akurat. Selain itu, penelitian ini hanya melingkupi kondisi di satu wilayah, yaitu di Kota Surabaya. Penelitian lanjutan dapat dilakukan untuk mengetahui waktu jeda di wilayah-wilayah lain di Jawa Timur berdasarkan data mobilitas di wilayah tersebut, sehingga dapat diketahui perbedaan di tiap wilayahnya.

Daftar Pustaka

- Alawy, G. A. et al. (2021). Correlation Between Mobility and COVID-19 Cases in Surabaya City, Indonesia. 4(2), 154–162.
- Carteni, A. et al. (2020). How mobility habits influenced the spread of the COVID-19 pandemic: Results from the Italian case study. *Science of the Total Environment*, 741, 140489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140489>
- Dinas Perhubungan Kota Surabaya. (2020). Data Arus Bus dan Penumpang AKAP AKDP Unit Terminal Purabaya Tahun 2020.
- Djalante, R. et al. (2020). Review and analysis of current responses to COVID-19 in Indonesia: Period of January to March 2020. *Progress in Disaster Science*, 6, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2020.100091>
- Eisenmann, C. et al. (2021). Transport mode use during the COVID-19 lockdown period in Germany: The car became more important, public transport lost ground. *Transport Policy*, 103, 60–67. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2021.01.012>
- Freedman, D. A. (2009). *Statistical models: theory and practice*. Cambridge University Press.
- Gezairy, H. A. (2003). Travel epidemiology: WHO perspective. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 21(2), 86–88. [https://doi.org/10.1016/S0924-8579\(02\)00365-5](https://doi.org/10.1016/S0924-8579(02)00365-5)

- Gugus Tugas Percepatan Penanganan COVID-19. (2021). Laporan Kasus Harian Satgas Penanganan COVID-19.
- Hoogeveen, M. J. et al. (2022). Environmental factors and mobility predict COVID-19 seasonality in the Netherlands. *Environmental Research*, 211, 113030. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.113030>
- Iacus, S. M. et al. (2020). Human mobility and COVID-19 initial dynamics. *Nonlinear Dynamics*, 101(3), 1901–1919. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05854-6>
- Kraemer, M. U. G. et al. (2020). The effect of human mobility and control measures on the COVID-19 epidemic in China. *Science*, 368(6490), 493–497. <https://doi.org/10.1126/science.abb4218>
- Linka, K. et al. (2020). Global and local mobility as a barometer for COVID-19 dynamics. *MedRxiv : The Preprint Server for Health Sciences*, 1–26. <https://doi.org/10.1101/2020.06.13.20130658>
- Pandey, G. et al. (2020). SEIR and regression model based COVID-19 outbreak predictions in India. *ArXiv*, 1–10. <https://doi.org/10.1101/2020.04.01.20049825>
- PT. Jasa Marga Cabang Surabaya Gempol. (2020). Data Lalu Lintas Tol Surabaya Gempol Tahun 2020.
- PT. Kereta Api Indonesia DAOP VIII Surabaya. (2020). Volume Penumpang Surabaya Gubeng Tahun 2020.
- Rustam, F. et al. (2020). COVID-19 Future Forecasting Using Supervised Machine Learning Models. 8, 101489–101499. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997311>
- Shi, Z., & Fang, Y. (2020). Temporal relationship between outbound traffic from Wuhan and the 2019 coronavirus disease (COVID-19) incidence in China. 81973144, 1–16. <https://doi.org/10.1101/2020.03.15.20034199>
- Shirvani, S. et al. (2020). Correlation between Air and Urban Travelling with New Confirmed Cases of COVID-19 A Case Study. *ArXiv Preprint ArXiv:2010.01413*.
- Tang, K. C. et al. (2025). Using GeoAI to examine infectious diseases spread in a hyperdense city: A case study of the 2022 Hong Kong COVID-19 Omicron wave. *Cities*, 158, 105600. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2024.105600>
- WHO. (2019). Pneumonia of unknown cause reported to WHO China Office.

Perancangan Semi Automatic Material Handling and Feeding Machine pada Industri Pembuatan Baut

Widya Prapti Pratiwi¹, Bustami Ibrahim², dan Mohammad Haryst Daryaly¹

¹Prodi Teknik Rekayasa Perancangan Manufaktur, Jurusan Teknik Perancangan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Indonesia

²Prodi Rekayasa Perancangan Mekanik, Jurusan Teknik Perancangan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Indonesia

widyapp@de.polman-bandung.ac.id, bustami@de.polman-bandung.ac.id, harystdaryaly@gmail.com

Abstrak

Industri manufaktur dan konstruksi di Indonesia menyumbang persentase kecelakaan kerja tertinggi yaitu 63,6%. Salah satu jenis kecelakaan kerja yang umum terjadi adalah terjepit dan tergores. Kedua jenis kecelakaan tersebut berisiko terjadi pada proses *material handling* dan pemotongan benda. Upaya untuk meminimalisir risiko kecelakaan tersebut berdasarkan hirarki pengendalian risiko adalah dengan mensubstitusi mesin atau proses yang kurang aman dengan mesin atau proses yang lebih aman. Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan mesin semi otomatis untuk *material handling* dan *feeding system*, menggantikan proses manual yang digunakan saat ini di industri terkait. Rancangan mesin yang dihasilkan tidak hanya dapat meminimalisir risiko keamanan tetapi juga meningkatkan efisiensi produksi. Proses perancangan dilakukan menggunakan metode VDI 2222 meliputi tahap merencana, mengonsep, merancang, dan melakukan penyelesaian desain. Metode VDI 2225 digunakan untuk menentukan konsep rancangan terpilih yang paling optimal secara teknis dan ekonomi. Analisis kekuatan rangka mesin untuk memastikan rangka dapat menopang mesin sehingga mesin dapat beroperasi dengan aman, dilakukan menggunakan *software Solidworks*. Penelitian ini menghasilkan rancangan *semi-automatic material handling and feeding machine* menggunakan *roller conveyor*. Mesin hasil rancangan ini mampu beroperasi dengan lebih efisien yaitu sebesar 72% dibandingkan dengan proses sebelumnya. Mesin hasil rancangan juga mampu meningkatkan kapasitas produksi sebesar 29,75%.

Kata kunci: perancangan, *roller conveyor*, VDI 2222, penanganan material

Abstract

The manufacturing and construction industry in Indonesia accounts for the highest rate of work accidents for approximately 63,6%. The most common accidents that occur are being pinched and scratched. Both types occur most frequently during material handling and cutting activity. In order to minimize any risks in accordance with the risk control hierarchy, is to substitute the less safe machine or process with the safer one. The objection of this research is designing a semi-automatic machine for material handling and feeding system process, replacing the existing manual process. The designed machine is not only minimize the safety risk but also increase production efficiency. The design process is carried out using the VDI 2222 method: planning, conceptualizing, designing, and finishing the design. The VDI 2225 method is used to determine the most optimal design concept in perspective of technical and economic aspect. Strength analysis is carried out using Solidworks to ensure the frame can support the machine safely. The results of the design process is a semi-automatic material handling and feeding machine using the roller conveyor which able to operate 72% more efficiently compared to the existing process. The designed machine is also able to increase production capacity by 29,75%.

Keywords: design, roller conveyor, VDI 2222, material handling

1. Pendahuluan

Jumlah kasus kecelakaan kerja di Indonesia meningkat sebesar 5,6% dari tahun 2020 hingga tahun 2021 (Naurah, 2023). Laporan dari BPJS Ketenagakerjaan bahkan menyebutkan bahwa kasus kecelakaan kerja pada semester pertama 2024 mencapai lebih dari 160 ribu kasus (Indonesia Safety Center, 2024). Secara lebih rinci, BPJS Ketenagakerjaan melaporkan persentase terbesar, yaitu 20% merupakan kecelakaan kerja di sektor manufaktur (Indonesia Safety Center, 2024). Risiko kecelakaan yang umum terjadi adalah terjepit, tertimpa, terpotong, dan

tersengat listrik. Kecelakaan kerja tidak hanya merugikan pekerja terkait, tetapi juga perusahaan secara umum. Kerugian tersebut antara lain produktivitas kerja yang turun akibat *downtime* karena kecelakaan kerja (Khoerularifudin, 2022) dan pengeluaran biaya penanganan kecelakaan kerja (Lazuardi et al., 2022). Berdasarkan Standar ISO45001 tentang Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja, terdapat lima kegiatan pengendalian risiko sesuai dengan hirarki pengendalian risiko: eliminasi, substitusi, perencanaan, administrasi,

Info Makalah:

Dikirim : 12-05-24;
Revisi 1 : 03-11-25;
Revisi 2 : 04-14-25;
Diterima : 04-17-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -
e-mail : widyapp@de.polman-bandung.ac.id

dan alat pelindung diri (APD) (ISO T/C 298 Occupational Health and Safety Management, 2018). Salah satu kegiatan dalam hirarki tersebut adalah substitusi, yaitu mengganti alat atau proses yang kurang aman menjadi alat atau proses yang lebih aman (Aruan & Singgih, 2021).

Pada industri pembuatan baut yang menjadi objek penelitian ini, proses produksi terdiri atas 5 (lima) tahap: pemotongan, pemanasan, *forging*, *CNC machining*, dan pembuatan ulir. Tahap pemotongan terdiri dari proses penempat material dan pemotongan oleh *bandsaw*. Tahap pemotongan masih dilakukan secara manual oleh operator. Kondisi ini menimbulkan risiko kecelakaan berupa terjepit dan teriris dalam prosesnya. Oleh karena itu, langkah yang akan dilakukan untuk meminimalisir risiko kecelakaan kerja, yakni dengan substitusi proses pemindah dan penempatan material menuju mesin pemotong yang semula dikerjakan secara manual menjadi semi otomatis.

Perancangan sistem pemindah dan penanganan material semi otomatis telah dilakukan pada beberapa penelitian terdahulu. Konveyor dirancang untuk meningkatkan efisiensi pekerjaan manusia dan meningkatkan keergonomian operator saat bekerja (Al Ayyubi & Sidik, 2020). Sistem pengangkut dan penanganan material semi otomatis banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor. Pada sektor pertanian dan peternakan, penanganan material menggunakan *roller conveyor* digunakan untuk menangani hasil pertanian dan peternakan berupa jeruk (Luthdin & Wilujeng, 2023), kentang (Agil & Sunaryo, 2022), dan telur (Siahaan et al., 2022). Pada industri perkebunan, *belt conveyor* digunakan sebagai alat penanganan material berupa karet dengan kapasitas 6 ton/jam (Silaen & Chaidir, 2021). *Belt conveyor* juga digunakan pada industri perdagangan untuk menangani peti kemas dengan kapasitas 150 ton/jam (Garside et al., 2019).

Konveyor juga dimanfaatkan pada sektor industri manufaktur untuk menangani dan mengangkut material dari satu proses menuju proses manufaktur berikutnya. Penelitian yang dilakukan oleh Rohman, et.al (Rohman et al., 2021) merancang *conveyor* pada industri manufaktur kanal C untuk mengangkut kanal C yang telah dibentuk menuju mesin *auto-stacking*. Alat pengangkut tersebut digerakkan oleh motor listrik dengan kapasitas angkut 900 kg kanal C berbahan galvalume. Penelitian yang dilakukan oleh Pramono, et.al (Pramono et al., 2022) merancang alat *packing* pipa baja otomatis menggunakan *gravity roller conveyor* dan *belt conveyor* yang digerakkan oleh motor listrik.

Perkembangan perancangan konveyor sebagai alat pemindah dan penanganan material telah dilakukan oleh beberapa penelitian. Perkembangan penelitian lanjutan tersebut meliputi penambahan sistem otomasi dan optimasi desain konveyor. Ariwibowo, et.al (Ariwibowo et al., 2021) merancang konveyor semi otomatis yang dilengkapi dengan *proximity sensor* untuk keperluan pengamplasan kayu. Sementara itu, Cronin, et.al (Cronin et al., 2021) merancang konveyor yang diintegrasikan dengan *Autonomous Intelligent Vehicles* (AIV) yang dapat mendukung perkembangan Industri 4.0. Optimasi desain konveyor meliputi optimasi penggunaan material untuk *roller* (Nangare & Sonawane, 2022) dan *shaft* (Gulmire et al., 2020), serta optimasi ukuran rangka konveyor untuk menghemat biaya produksi (Boslovyak & Lagerev, 2019).

Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan mesin semi otomatis untuk proses penanganan dan pemindah *raw material* baut (*material handling and feeding machine*) menuju *bandsaw machine* untuk proses pemotongan. Mesin yang dirancang diharapkan dapat memenuhi aspek-aspek teknis seperti ketercapaian fungsi *material handling* dan *feeding system*; memiliki konstruksi yang *rigid* dan dapat menahan beban; serta memiliki proses pembuatan, perakitan, dan perawatan yang mudah. Kegiatan perancangan yang akan dilakukan meliputi perancangan sistem mekanikal dan analisis perhitungan kekuatan material. Mesin hasil rancangan tersebut diharapkan dapat meminimalisir risiko kecelakaan kerja karena adanya substitusi dari proses manual menjadi semi otomatis. Selain itu, mesin tersebut juga diharapkan dapat meningkatkan produktivitas dengan mengurangi waktu penanganan material.

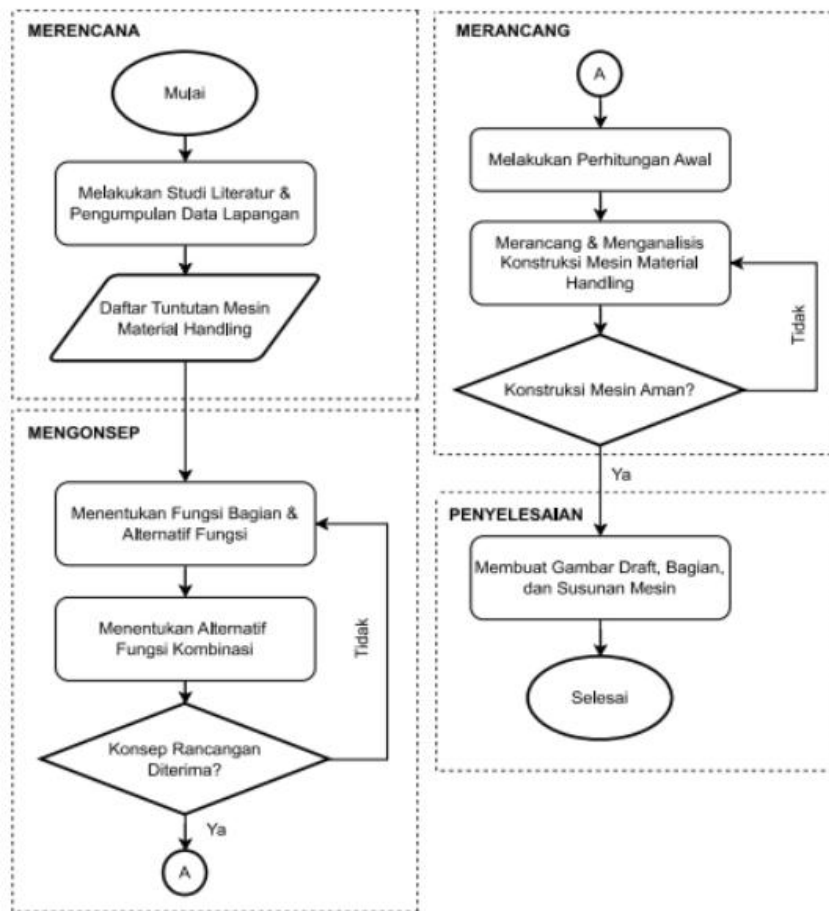
2. Metode

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode VDI 2222 untuk menentukan konsep rancangan dan VDI 2225 untuk membandingkan konsep-konsep dan memilih konsep yang paling optimal. Metode VDI 2222 terdiri dari empat tahapan utama : merencana, mengonse, merancang, dan melakukan penyelesaian desain. Masing-masing tahapan proses tersebut terdiri atas beberapa kegiatan pendukung. Secara spesifik, metode yang dilakukan pada penelitian ini ditampilkan dalam Gambar 1.

Tahapan merencana terdiri atas kegiatan studi literatur dan studi lapangan untuk menentukan daftar tuntutan (spesifikasi) mesin yang disyaratkan. Studi lapangan dilakukan pada industri pembuatan baut dengan mengamati proses yang ada saat ini, pengambilan data, dan wawancara dengan pekerja pada industri tersebut. Berdasarkan observasi lapangan tersebut, didapatkan data kapasitas produksi harian untuk proses penempatan dan pemotongan material baut yang ada saat ini yaitu 372 pcs/hari. Pengamatan juga dilakukan pada proses pemindahan *raw material* baut saat ini yang masih dilakukan secara manual dengan cara diangkat oleh operator. Hal tersebut akan menimbulkan risiko kecelakaan kerja yaitu terjepit atau tertimpa *raw material* dengan massa 23,12 kg per batang. Luaran dari tahapan merencana ini adalah daftar tuntutan untuk mesin *material handling and feeding* yang akan dirancang. Adapun daftar tuntutan disajikan pada Tabel 1.

Tahapan mengonse terdiri atas perumusan mekanisme kerja mesin dan perincian cara kerja mesin berdasarkan fungsi-fungsi bagiannya. Mesin *material handling and feeding* yang akan dirancang memiliki fungsi utama untuk menempatkan *raw material* baut berupa batang dengan diameter 25 mm dan panjang 6 m pada alat pemotong yaitu

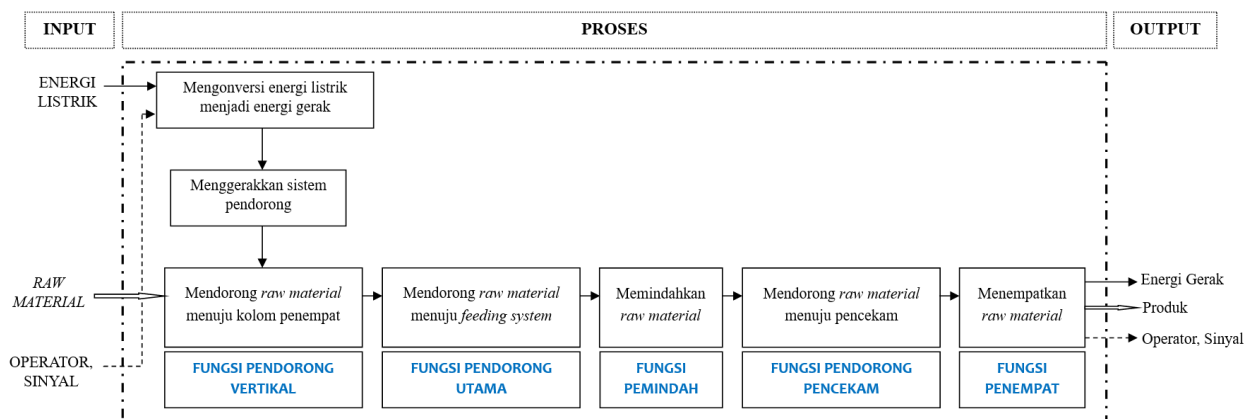
bandsaw machine. Cara kerja mesin ini adalah dengan menempatkan batang *raw material* baut pada kolom penempat kemudian mendorong dan menempatkannya pada mesin *bandsaw*. Rincian cara kerja mesin *material handling and feeding* per fungsi bagian ditampilkan dalam Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Tabel 1. Daftar Tuntutan *Material Handling and Feeding Machine* untuk Industri Pembuatan Baut

Tuntutan	Keterangan
Jenis material mentah baut (<i>raw material</i>)	SCM 435
Ukuran material mentah baut (<i>raw material</i>)	Ø 25 x 6000 mm
Panjang hasil potongan	93 mm – 165 mm
Dimensi mesin (p x l x t)	8000 x 1535 x 760 mm
Kapasitas produksi	> 372 pcs / hari



Gambar 2. Rincian Cara Kerja Mesin dan Fungsi Bagian Utama

Secara garis besar, fungsi-fungsi bagian yang terdapat pada mesin *handling material and feeding* terdiri atas dua jenis : fungsi bagian utama dan fungsi bagian pendukung. Fungsi bagian utama terdiri dari fungsi pendorong, fungsi pemindah, dan fungsi penempat. Kinerja mesin ditentukan terutama dari kinerja fungsi-fungsi bagian utama tersebut. Sementara yang tergolong dalam fungsi bagian pendukung adalah fungsi rangka. Fungsi bagian pendukung memiliki fungsi untuk menopang keseluruhan badan mesin agar mesin dapat beroperasi dengan aman dan stabil. Tahapan selanjutnya adalah mencari alternatif dari tiap fungsi bagian dengan memetakan kelebihan dan kekurangan masing-masing fungsi bagian untuk mencari komponen yang paling sesuai. Alternatif dari tiap fungsi bagian tersebut kemudian dikombinasikan hingga menjadi alternatif-alternatif variasi konsep yang utuh. Tabel alternatif fungsi bagian dan alternatif variasi konsep mesin *material handling and feeding* ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Alternatif Variasi Konsep Mesin *Material Handling and Feeding*

No.	Fungsi Bagian	Alternatif Konstruksi Fungsi Bagian		
		Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
1.	Fungsi Rangka			
2.	Fungsi Pemindah			
3.	Fungsi Pendorong Utama			
4.	Fungsi Pendorong Vertikal			
5.	Fungsi Pendorong Pencekam			
6.	Fungsi Penempat			
Alternatif Variasi Konsep		 AVK 1	 AVK 2	 AVK 3

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemilihan Alternatif Variasi Konsep

Pemilihan alternatif variasi konsep dilakukan menggunakan metode Pahl Beitz (Pahl et al., 2007), yaitu dengan melakukan penilaian terhadap aspek teknis (Tabel 3) dan aspek ekonomis (Tabel 4). Skala penilaian berada pada rentang 0 (sangat kurang) sampai dengan 4 (sangat baik). Hasil penilaian kedua aspek tersebut kemudian diberikan pembobotan dan menghasilkan penilaian akhir. Pembobotan aspek teknis lebih besar daripada aspek ekonomis karena capaian aspek teknis lebih diutamakan dalam kegiatan perancangan ini. Berdasarkan penilaian tersebut, diketahui bahwa Alternatif Variasi Konsep 1 merupakan alternatif variasi konsep yang paling optimum. Tabel penilaian akhir dan alternatif variasi konsep terpilih ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 3.

Tabel 3. Penilaian Aspek Teknis

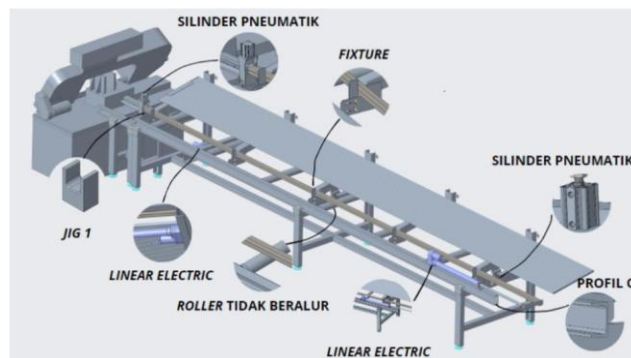
Aspek Penilaian Teknis		Bobot (%)	Alternatif Variasi Konsep						Nilai Ideal	
			Alternatif 1		Alternatif 2		Alternatif 3			
1	Ketercapaian Fungsi	25	4	100	4	100	4	100	4	100
2	Konstruksi	10	3	30	2	20	3	30	4	40
3	Perawatan	15	3	45	3	45	2	30	4	60
4	Perakitan	20	3	60	3	60	3	60	4	0
5	Pengoperasian	20	3	60	2	40	2	40	4	80
6	Pembuatan	10	3	30	2	20	3	30	4	40
Nilai Total		100	325		285		290		400	
Persentase (%)		100	81.2		71.2		72.5		100	

Tabel 4. Penilaian Aspek Ekonomis

Aspek Penilaian Teknis		Bobot (%)	Alternatif Variasi Konsep						Nilai Ideal	
			Alternatif 1		Alternatif 2		Alternatif 3			
1	Biaya Pembuatan	30	3	90	3	90	3	90	4	120
2	Biaya Perawatan	35	3	105	2	70	3	105	4	140
3	Penggunaan Komponen Standar	35	3	105	3	105	2	70	4	140
Nilai Total		100		300		265		265		400
Persentase (%)		100		75,0		66,3		66,3		100

Tabel 5. Penilaian Akhir Alternatif Variasi Konsep

Aspek yang Dinilai		Bobot (%)	Alternatif Variasi Konsep		
			Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
1	Aspek Teknis	65	81,2	71,2	72,5
2	Aspek Ekonomis	35	75,0	66,3	66,3
Persentase Akhir		100	79,0	69,5	70,3



Gambar 3. Alternatif Variasi Konsep Terpilih

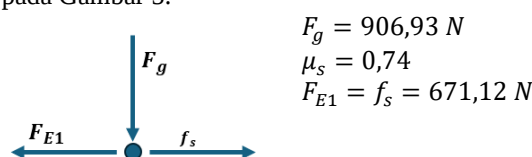
Variasi Konsep terpilih menggunakan aktuatur pneumatik sebagai penggerak vertikal untuk memindahkan *raw material* dari penampung menuju bagian pemindah pada mesin. *Linear electric actuator* sebagai penggerak mula akan memindahkan *raw material* pada *roller conveyor* menuju alat pemotong. *Raw material* kemudian akan dicekam oleh pencekam dengan penggerak pneumatik agar tidak berpindah posisi ketika melalui proses pemotongan. *Raw material* yang sedang dicekam kemudian didorong maju menuju alat potong oleh *linear electric actuator* kedua. Seluruh konstruksi mesin ditopang oleh rangka besi jenis profil C yang mampu menahan beban dengan tekanan tinggi akibat proses produksi yang berlangsung.

3.2. Perhitungan Sistem Penggerak

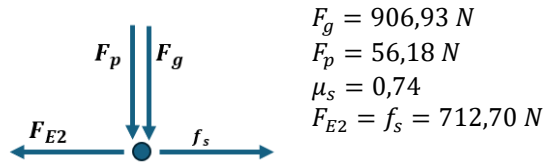
Tahapan merancang terdiri atas perhitungan awal, rancangan konstruksi, dan analisis konstruksi mesin material *handling & feeding*. Tujuan dari tahapan merancang ini adalah untuk memastikan bahwa mesin yang dirancang mampu menjalankan fungsi seperti pada daftar tuntutan serta memiliki konstruksi yang kuat dan aman untuk digunakan. Selain itu, pada tahapan merancang juga dilakukan perhitungan lanjut untuk sistem penggerak dan pendorong berupa *electric* dan *pneumatic actuator* serta perhitungan waktu penanganan material menggunakan mesin yang dirancang.

• Perhitungan Kapasitas *Electric Actuator*

Variasi konsep terpilih menggunakan dua buah *electric actuator* sebagai sistem penggerak mula dan sistem penggerak lanjut (saat *raw material* mendekati *bandsaw machine*). Pada penggerak mula, gaya dorong yang harus diberikan oleh aktuatur harus bernilai lebih besar sama dengan gaya gesek statis *raw material* dengan *roller conveyor*. Perhitungan dan diagram benda bebas sistem penggerak mula ditampilkan pada Gambar 4. Sementara pada sistem penggerak lanjut, gaya dorong yang harus diberikan harus bernilai lebih besar sama dengan gaya gesek statis *raw material* dan sistem pencekam dengan *roller conveyor*. Perhitungan dan diagram benda bebas sistem penggerak lanjut ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Diagram Benda Bebas Sistem Penggerak Mula

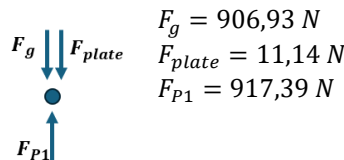


Gambar 5. Diagram Benda Bebas Sistem Penggerak Lanjut

Hasil perhitungan gaya dorong yang harus diberikan dan data panjang potongan *raw material* digunakan untuk menentukan jenis dan tipe *linear electric actuator*. Tipe aktuator yang dipilih untuk kedua sistem penggerak adalah EWELLIX CAHB 10 dengan *rated load* maksimum sebesar 1500 N, panjang *stroke* maksimum 300 mm, dan kecepatan linear maksimum 56 mm/s.

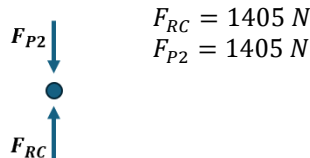
- Perhitungan Kapasitas *Pneumatic Actuator*

Variasi konsep terpilih menggunakan dua buah aktuator pneumatik yaitu sebagai penggerak vertikal dan sistem pengecam. Pada penggerak mula, gaya dorong vertikal yang diberikan oleh aktuator harus bernilai lebih besar sama dengan gaya berat *raw material* dan pelat pengangkat. Perhitungan dan diagram benda bebas sistem penggerak vertikal ditampilkan pada Gambar 6. Berdasarkan perhitungan gaya angkat yang harus diberikan oleh aktuator, maka aktuator yang dipilih adalah tipe SMC CQ2YA32-30DCMZ dengan kecepatan gerak piston 10 mm/s.



Gambar 6. Diagram Benda Bebas Sistem Penggerak Vertikal

Sementara pada sistem pengecam, gaya dorong yang diberikan harus bernilai lebih besar sama dengan gaya yang harus dilawan oleh sistem pengecam yakni gaya reaksi *raw material* terhadap gaya potong *bandsaw machine*. Perhitungan dan diagram benda bebas sistem pengecam ditampilkan pada Gambar 7. Berdasarkan perhitungan gaya angkat yang harus diberikan oleh aktuator, maka aktuator yang dipilih adalah tipe SMC CQ2YB50-30DCZ dengan kecepatan gerak piston 10 mm/s.



Gambar 7. Diagram Benda Bebas Sistem Pengecam

- Perhitungan Waktu Penanganan Material dan Produktivitas Mesin

Waktu penanganan material total adalah penjumlahan waktu penanganan material mulai dari pemindahan material dari penampungan menuju *roller conveyor*, pergerakan material dari *conveyor* menuju *bandsaw*, dan waktu pengecaman. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan bahwa waktu penanganan material per siklus (empat batang *raw material*) adalah 110,75 s. Rincian perhitungan waktu penanganan material ditampilkan dalam Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Waktu Penanganan Material

No.	Deskripsi	Waktu Penanganan (s)
1.	Waktu pendorongan <i>raw material</i> menuju pendorong utama	2,56
2.	Waktu pemindahan material pada pendorong utama	107,14
3.	Waktu proses pengecaman	37,8 – 67,2
TOTAL		147,5 – 176,19

Proses yang ada saat ini membutuhkan waktu 420 s untuk memindahkan material dan 3 s untuk tiap penempatan material. Total waktu yang diperlukan untuk penanganan material pada proses yang ada adalah 528 s (untuk panjang pemotongan 165 cm) dan 612 s (untuk panjang pemotongan 93 mm). Waktu satu kali proses pemotongan material menggunakan *existing bandsaw machine* adalah 46 s. Tidak ada perubahan waktu pemotongan karena alat potong yang digunakan masih sama dengan yang saat ini digunakan di lapangan. Data perbandingan waktu

penanganan dan kapasitas produksi antara proses yang sudah ada dan proses menggunakan mesin yang dirancang ditampilkan dalam Tabel 7

Tabel 7. Perbandingan Waktu Penanganan dan Kapasitas Produksi *Existing* dengan Mesin Rancangan

Panjang Pemotongan (mm)	Waktu Penanganan (s)		Efisiensi (%)	Kapasitas Produksi (pcs/ hari)		Peningkatan (%)
	<i>Existing</i>	Mesin Rancangan		<i>Existing</i>	Mesin Rancangan	
93	612	176,19	71	518	620	19,69
165	528	147,50	72	474	615	29,75

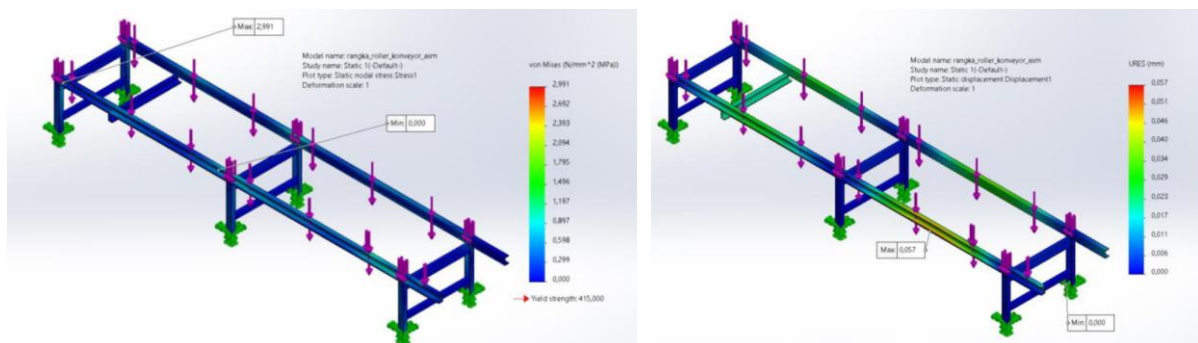
Berdasarkan data pada Tabel 7 di atas, terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara efisiensi waktu penanganan material dengan peningkatan kapasitas produksi. Perbedaan tersebut disebabkan oleh waktu pemotongan material yang masih menggunakan *existing bandsaw machine* dengan kapasitas pemotongan satu batang *raw material* dalam satu waktu. Waktu penanganan material yang ditampilkan dalam Tabel 7 tersebut hanya mencakup waktu pendorongan *raw material*, pemindahan material menuju mesin *bandsaw*, dan waktu proses pengecaman, tanpa melibatkan waktu pemotongan. Waktu pemotongan material menggunakan mesin yang dirancang akan sama dengan waktu pemotongan material pada proses yang ada, yaitu 46 s sekali potong. Kapasitas produksi dapat ditingkatkan dengan mengoptimasi konstruksi pada *bandsaw machine* sehingga dapat memotong 4 batang *raw material* sekaligus dalam satu waktu pemotongan.

3.3. Validasi Kekuatan Konstruksi

Tahapan validasi kekuatan konstruksi bertujuan untuk memastikan konstruksi rangka dapat menopang mesin dengan baik sehingga mesin aman untuk digunakan. Analisis kekuatan rangka dilakukan menggunakan *software CAE*. Analisis kekuatan dilakukan pada dua sistem rangka yaitu rangka bagian *material handling* dan *feeding system*. Material yang digunakan sebagai rangka mesin *material handling and feeding* ini adalah material AISI 1050 dengan nilai *yield strength* sebesar 355 N/mm² (335 MPa) (HILLFOOT ENGINEERING STEELS, 2024).

- Analisis Rangka Material Handling

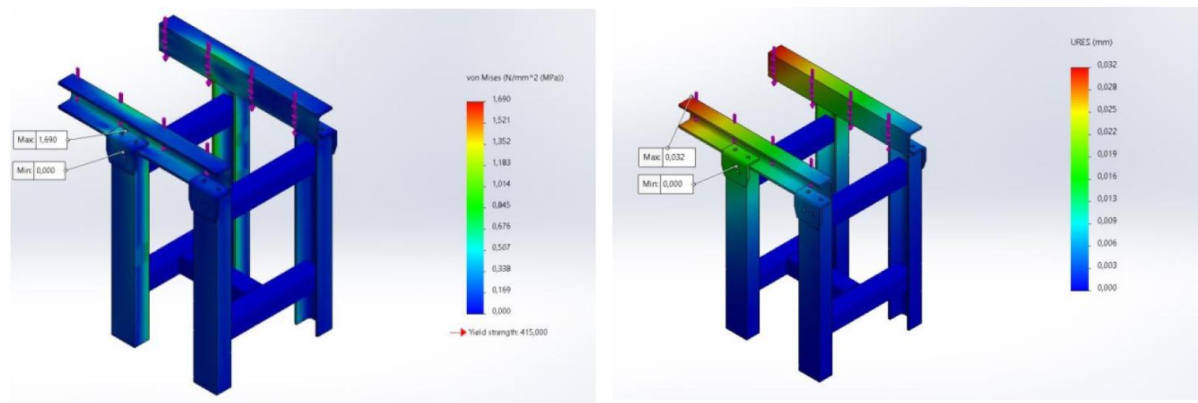
Beban yang diterima oleh rangka *material handling* antara lain *raw material*, *roller*, dan aktuator. Pembebanan dibagi menjadi enam karena rangka *material handling* memiliki enam buah kaki. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software CAE* yaitu Solidworks, didapatkan hasil tegangan Von Mises maksimum yang terjadi sebesar 2,991 Mpa dan defleksi maksimum sebesar 0,057 mm. Tegangan Von Mises dan defleksi maksimum terjadi pada titik-titik peletakan *roller conveyor* dan *mounting* aktuator. Tegangan Von Mises yang terjadi lebih kecil daripada *yield strength* material rangka sehingga rangka dapat menopang beban dengan baik dan aman. Simulasi Tegangan Von Mises dan defleksi rangka *material handling* ditampilkan dalam Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Tegangan Von Mises (kiri) dan Defleksi (kanan) pada Rangka *Material Handling*

- Analisis Rangka Feeding System

Beban yang diterima oleh rangka *feeding system* antara lain *mounting* aktuator, silinder pneumatik, dan pembebanan oleh gaya pengecam. Pembebanan dibagi menjadi dua karena gaya pada rangka *feeding system* ditahan di kedua sisi. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software CAE*, didapatkan hasil tegangan Von Mises maksimum yang terjadi sebesar 1,690 Mpa dan defleksi maksimum sebesar 0,032 mm. Tegangan Von Mises maksimum terjadi pada titik pengecam sementara defleksi maksimum terjadi pada titik pemotongan *raw material* oleh *bandsaw machine*. Tegangan Von Mises yang terjadi lebih kecil daripada *yield strength* material rangka sehingga rangka dapat menopang beban dengan baik dan aman. Simulasi Tegangan Von Mises dan defleksi rangka *material handling* ditampilkan dalam Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Tegangan Von Mises (kiri) dan Defleksi (kanan) pada Rangka *Feeding System*

3.4. Dimensi Mesin Rancangan

Mesin *material handling and feeding* memiliki dimensi $8000 \times 1535 \times 760$ mm sesuai dengan daftar tuntutan yang diberikan.

Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dirancang *material handling and feeding machine* dengan kapasitas produksi sebanyak 615 pcs/hari atau meningkat sebesar 29,75% dibandingkan kapasitas produksi sebelumnya. Mesin *material handling and feeding* mampu mengefisiensi waktu penanganan material sebesar 72%. Validasi kekuatan rangka yang dilakukan menggunakan *Solidworks* pada rangka *material handling and feeding machine* menghasilkan tegangan von mises maksimum yang terjadi sebesar 2,991 Mpa dan 1,690 Mpa serta defleksi maksimum yang terjadi adalah 0,057 mm dan 0,032 mm. Pada penelitian berikutnya dapat dihitung estimasi biaya pembuatan mesin agar lebih diproyeksikan analisis ekonomi terhadap mesin yang dirancang. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan metode optimasi desain untuk menentukan material penyusun dan sistem kendali mesin secara otomatis agar mekanisme mesin dapat berjalan dengan lebih efektif dan efisien.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Pengembangan, Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Politeknik Manufaktur Bandung (P4M Polman Bandung) atas dukungan pendanaan terhadap penelitian ini dalam skema pendanaan internal Penelitian Pembentukan Profil Lulusan Program Studi Polman Bandung. Penulis juga berterima kasih kepada pihak industri yang telah bersedia menjadi narasumber dan lokasi studi kasus pada penelitian ini.

Daftar Notasi

- F_g = gaya berat *raw material* [N]
- f_s = gaya gesek statis [N]
- F_{E1} = gaya dorong oleh *linear electric actuator* 1 [N]
- F_{E2} = gaya dorong oleh *linear electric actuator* 2 [N]
- F_p = gaya berat sistem pengecam [N]
- F_{plate} = gaya berat pelat penahan [N]
- F_{RC} = gaya reaksi akibat gaya potong [N]
- F_{P1} = gaya dorong oleh *pneumatic actuator* 1 [N]
- F_{P2} = gaya dorong oleh *pneumatic actuator* 2 [N]

Daftar Pustaka

- Agil, M., & Sunaryo. (2022). Rancang Bangun dan Perencanaan Sistem Transmisi pada Mesin Penyortir Kentang Berdasarkan Ukuran Menggunakan Sistem Roller Conveyor. *STORAGE - Jurnal Ilmiah Teknik dan Ilmu Komputer*, 1(1), 16 - 20. <https://doi.org/10.55123>
- Al Ayyubi, M., & Sidik, J. (2020). Desain Perancangan Belt Conveyor untuk Meningkatkan Keergonomian Proses Material Handling. *INOVASI : Jurnal Manajemen Industri & Manufaktur Industri*, 1(1), 28-33. <https://doi.org/https://jurnal.uniwa.ac.id/index.php/inovasi/article/view/169/143>

- Aribowo, D., Desmira, Ekawati, R., & Rahmah, N. (2021). Sistem Perancangan Conveyor Menggunakan Sensor Proximity PR18-8DN pada Wood Sanding Machine. *Edusaintek : Jurnal Pendidikan, Sains, dan Teknologi*, 8(1), 67-81. <https://doi.org/https://doi.org/10.47668/edusaintek.v8i1.146>
- Aruan, K., & Singgih, M. (2021). Pengendalian Risiko Kecelakaan HSSE pada Proses Pembuatan Pipa Baja. *JURNAL TEKNIK ITS Vol.10, No.2, 10(2)*, B52 - B57. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.62628>
- Boslovyyak, P., & Lagerev, A. (2019). Optimization of the Conveyor Transport Cost. *IFAC PapersOnline*, 52(25), 397-402. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.569>
- Cronin, C., Awasthi, A., Conway, A., O'Riordan, D., & Walsh, J. (2021). Design and Development of a Material Handling System for an Autonomous Intelligent Vehicle for Flexible Manufacturing. *30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2021)*. Athens: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.069>
- Garside, A. K., Risaldi, F., & Dewi, S. K. (2019). Perancangan Belt Conveyor sebagai Alat Material Handling pada Terminal Peti Kemas Surabaya. *Buletin Profesi Insinyur*, 2(2), 69 - 75. <https://doi.org/10.20527/bpi.v2i2.44>
- Gulmire, G., Mane, V., Patel, A., & Kodle, N. (2020). Design and Analysis of Shaft for Roller Conveyor with Different Materials. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 07(08), 4543 - 4549. <https://doi.org/https://www.irjet.net/archives/V7/i8/IRJET-V7I8780.pdf>
- HILLFOOT ENGINEERING STEELS. (2024). Material Datasheet AISI 1050. England: Hillfoot .
- Indonesia Safety Center. (2024, October 2). *Kecelakaan Kerja di Indonesia: Data, Penyebab, dan Upaya Pencegahan*. Diambil kembali dari Indonesia Safety Center: <https://indonesiasafetycenter.org/kecelakaan-kerja-di-indonesia-data-penyebab-dan-upaya-pencegahan/>
- Indonesia Safety Center. (2024, September 9). *Kemnaker Catat 160 Ribu Kecelakaan Kerja 2024, Konsultan K3: Masifkan Pelatihan di Lembaga Terpercaya*. Diambil kembali dari Indonesia Safety Center: <https://indonesiasafetycenter.org/kemnaker-catat-160-ribu-kecelakaan-kerja-2024-konsultan-k3-masifkan-pelatihan-di-lembaga-terpercaya/>
- ISO T/C 298 Occupational Health and Safety Management. (2018, March). ISO 45001:2018 Occupational Health and Safety Management Systems. Geneva, Vernier, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Khoerularifudin, I. (2022). PENGARUH PROGRAM KESELAMATAN KERJA TERHADAP PRODUKTIVITAS DAN IDENTIFIKASI PENYEBAB KECELAKAAN KERJA MENGGUNAKAN METODE FAULT TREE ANALYSIS. *DINAMIKA TEKNIK*, 15(01), 29 - 38.
- Lazuardi, M., Sukwika, T., & Kholil, K. (2022). Analisis Manajemen Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode HIRADC pada Departemen Assembly Listrik. *Journal of Applied Management Research*, 02(01), 11 - 20. <https://doi.org/http://jurnal.usahid.ac.id/index.php/jamr>
- Luthdin, N., & Wilujeng, A. (2023). Rancang Bangun Alat Pemilah Ukuran Buah Jeruk Menggunakan Sistem Roller Conveyor. *Jurnal Techno Bahari*, 10(2), 01 - 05. <https://doi.org/https://doi.org/10.52234/tb.v10i2.291>
- Nangare, V., & Sonawane, P. (2022). Design, Analysis and Weight Optimization of Roller Conveyor System by using Glass Fiber Composite Material. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 10(Vii), 1681 - 1687. <https://doi.org/https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.45569>
- Naurah, N. (2023, March 1). *Jumlah Korban Meningkat Konsisten, Ini Sektor Usaha dengan Kecelakaan Kerja Terbanyak*. Diambil kembali dari GoodStats: <https://goodstats.id/article/jumlah-korban-meningkat-konsisten-ini-sektor-usaha-dengan-kecelakaan-kerja-terbanyak-pMFHt>
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. (2007). Conceptual Design. Dalam G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, & K. Grote, *Engineering Design : A Systematic Approach* (hal. 192 - 198). Springer.
- Pramono, A., Arizal, H., & Arsana, I. (2022). Perancangan Mesin Packing Pipa Baja Otomatis di PT Steel Pipe Industry of Indonesia, Tbk. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 17(2), 78-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.36289/jtmi.v17i2.338>
- Rohman, A., Munir, M., & Indrawan, R. (2021). Perancangan Mesin Auto Stacking Kanal C dengan Kapasitas 900 kg. *Proceeding 5th Conference on Design and Manufacture Engineering and its Application*. Surabaya: Teknik Desain dan Manufaktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Diambil kembali dari <https://journal.ppns.ac.id/index.php/CDMA/article/view/1885/1228>
- Siahaan, I., Chandra, A., & Jonoadji, N. (2022). Pemanfaatan Roller dan Belt Conveyor pada Pembuatan Prototipe Mesin untuk Proses Sortasi Telur. *Jurnal Teknik Mesin*, 19(2), 40 - 44. <https://doi.org/10.9744/jtm.19.2.40-44>
- Silaen, A., & Chaidir. (2021). Perancangan Belt Conveyor Dengan Kapasitas Angkut 6 Ton/Jam pada Pabrik Karet. *Majalah Teknik SIMES*, 15(2), 41-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.32663/simes.v15i2.2069>

Implementasi Konsep *Green Building* Melalui *Value Engineering* pada Pekerjaan Arsitektur

Ni Made Sintya Rani, Kadek Adi Suryawan, I Gusti Ayu Wulan Krisna Dewi,
dan Anak Agung Ayu Asta Oktaviani Putri

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bali, Badung, Bali, Indonesia

sintyarani@pnb.ac.id, adisuryawan@pnb.ac.id, wulankrisna@pnb.ac.id, astaoktaputri@pnb.ac.id

Abstrak

Green Building Council Indonesia menyatakan terdapat 6 aspek penerapan *Green Building* berdasarkan perangkat *Green ship* untuk Bangunan Baru versi 1.2 yaitu Tepat Guna Lahan, Efisiensi dan Konservasi Energi, Konservasi Air, Sumber dan Siklus Material, Kualitas Udara Kenyamanan dan Manajemen Lingkungan Bangunan. Penerapan aspek *Green Building* dapat dilakukan salah satunya melalui metode *value engineering*. Analisis *Value Engineering* merupakan upaya pendekatan yang sistematis, rapi, terencana dalam melakukan analisis nilai (*value*) dari pokok masalah terhadap fungsi atau kegunaannya tapi tetap konsisten terhadap tampilan, kualitas/mutu dan perawatan dari proyek. Tujuan penelitian ini mengidentifikasi rekomendasi alternatif material berdasarkan konsep *Green Building*, biaya pelaksanaan paling ekonomis dan efisien pada tahap pelaksanaan pekerjaan arsitektur. Metode penelitian yang digunakan yaitu deskriptif kuantitatif dengan metode pengumpulan data primer berupa survei harga serta wawancara metode pelaksanaan. Data sekunder yang digunakan berupa RAB, AHSP dan *time schedule*. Berdasarkan hasil analisis diperoleh rekomendasi alternatif material yaitu pada Proyek Sumitra Hotel adalah dinding keramik, cat dinding *aquashield* dan lantai keramik. Sedangkan pada Proyek *Magnum Residence* yaitu bata ringan. Alternatif biaya pelaksanaan pada proyek Sumitra Hotel pada pekerjaan *finishing* dinding Rp903.671.568 dan pada pekerjaan *finishing* lantai Rp510.799.447. Pada Proyek *Magnum Residence* alternatif biaya pelaksanaan pekerjaan arsitektur pada pekerjaan *finishing* dinding yaitu Rp1.658.938.657.

Kata kunci: VE, biaya, hijau, alternatif, material

Abstract

Land use, energy efficiency and conservation, water conservation, material sources and cycles, indoor air quality, comfort, and building environmental management are the six facets of green building implementation, according to the Green Building Council Indonesia. These are based on the Green Ship tool for New Buildings version 1.2. Among other strategies, value engineering can be used to implement Green Building elements. Finding alternative material recommendations based on the Green Building concept that have the most cost-effective and efficient implementation costs during the architectural work execution phase is the aim of this study. Descriptive quantitative research methodology is employed, and pricing surveys and implementation method interviews serve as the main means of gathering data. The Budget Plan, Unit Price Analysis and timetable are secondary data that are utilized. Based on the analysis results, alternative material recommendations were obtained, namely for the Sumitra Hotel Project: ceramic walls, Aquashield wall paint, and ceramic floors. Whereas in the Magnum Residence Project, it is lightweight bricks. The alternative implementation costs for the Sumitra Hotel project for wall finishing work is Rp903,671,568 and for floor finishing work is Rp510,799,447. In the Magnum Residence Project, the alternative implementation cost for architectural work on wall finishing is Rp1,658,938,657.

Keywords: VE, cost, green, alternative, material

1. Pendahuluan

Pemanasan Global dan perubahan iklim secara global terjadi karena penggunaan teknologi yang masif, gaya hidup serta kebutuhan manusia yang serba instan (Ainurrohman & Sudarti, 2022). Perubahan iklim ini terjadi akibat peningkatan emisi gas rumah kaca dan sektor terbesar penyumbang adalah industri, transportasi dan rumah tangga (Wau et al., 2022). Berdasarkan data dari *World Green Building Council* menyatakan bahwa bangunan gedung setidaknya menyumbangkan 33% emisi CO₂, 17% konsumsi air bersih, 25% penggunaan produk kayu, 30-40% penggunaan bahan mentah dan 40-50% penggunaan energi untuk pembangunan dan operasionalnya (Munawir, 2021). Fenomena *Global warming* inilah yang mendasari pentingnya penerapan konsep *Green Building* pada sektor industri konstruksi (Ratnaningsih et al., 2019).

Info Makalah:

Dikirim : 03-19-25;
Revisi 1 : 04-30-25;
Diterima : 05-02-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -
e-mail : sintyarani@pnb.ac.id

Oleh *Green Building Council Indonesia* (GBCI) menyatakan terdapat 6 aspek penerapan *Green Building* berdasarkan perangkat *Green ship* untuk Bangunan Baru versi 1.2 yaitu tepat guna lahan, efisiensi dan konservasi energi, konservasi air, sumber dan siklus material, kualitas udara kenyamanan. dan manajemen lingkungan bangunan (Ratnaningsih et al., 2019). Penerapan aspek *Green Building* dapat dilakukan salah satunya melalui metode *value*

engineering. Metode *value engineering* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk melakukan kajian penghematan biaya (Atabay & Galipogullari, 2012).

Keunggulan dari metode *value engineering* adalah upaya pendekatan yang sistematis, rapi, terencana dalam melakukan analisis nilai (*value*) dari pokok masalah terhadap fungsi atau kegunaannya tapi tetap konsisten terhadap tampilan, kualitas/mutu dan perawatan dari proyek (Diputera et al., 2018). Penggunaan sistem teknik rekayasa nilai adalah untuk mengidentifikasi fungsi dari suatu desain sehingga dapat ditentukan alternatif fungsi sesuai dengan yang diinginkan serta pemakaian biaya yang minimal (Yusuf et al., 2021). Selain itu rekayasa nilai digunakan untuk mencari ide atau alternatif dengan biaya yang lebih baik atau lebih rendah dengan batasan fungsi dan mutu suatu pekerjaan (Pratiwi, 2014).

Beberapa penelitian tentang *value engineering* dilakukan yaitu analisis alternatif desain bangunan jembatan dengan *value engineering* yang menyimpulkan penghematan antara struktur jembatan beton konvensional dengan struktur jembatan rangka baja sebesar Rp18.668.778 atau 2,87%. Antara jembatan beton konvensional dengan jembatan beton *precast* terjadi penghematan sebesar Rp66.704.416 atau 9,54% (Hasan Busri, 2014). Penelitian *value engineering of architectural work in Navalunit Building Planning in West Papua* memperoleh hasil bobot penghematan biaya yang diperoleh berdasarkan alternatif yang direkomendasikan adalah 7,7% pada pekerjaan arsitektur dan 2,6% pada seluruh pekerjaan (Dinariana et al., 2021). Penelitian rekayasa nilai pada bangunan auditorium gedung penunjang akademik Politeknik Ilmu Pelayaran (PIP) Salodong Makassar menyimpulkan dengan mengoptimalkan elemen struktural dalam tahapan perencanaan yang memberikan potensi penghematan sampai dengan 11,05% (Karim et al., 2023). Terdapat juga penelitian analisis *value engineering* pada proyek pembangunan apartemen di Cikarang dengan hasil pengeluaran biaya pekerjaan dinding eksisting sebesar Rp10.189.035.186, setelah dilakukan proses *value engineering* dengan alternatif 1 didapatkan biaya sebesar Rp8.052.748.444 atau ada penghematan Rp2.136.286.741 (20,97%), dan dengan alternatif 2 didapatkan biaya sebesar Rp8.134.383.474 atau ada penghematan Rp2.054.651.711 (20,17%) (Kartohardjono, 2017). Selain itu penelitian *plumbing work in green market based on value engineering* menyatakan efisiensi biaya yang diperoleh pada pekerjaan instalasi air bersih dan kotor menghemat sebesar 9,8%. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan menerapkan metode *value engineering* pada suatu pekerjaan dapat menghemat biaya pekerjaan.

Kota Denpasar merupakan salah satu pusat pertumbuhan ekonomi dan perkembangan masyarakat di Bali (Suamba & Nurdiantoro, 2014). Hal ini terlihat dengan banyaknya pembangunan gedung bertingkat untuk kebutuhan sosial maupun ekonomi masyarakat di Denpasar. Pembangunan saat ini perlu memperhatikan prinsip pembangunan berkelanjutan, untuk merealisasikan hal tersebut perlu dilakukan perencanaan sehingga dapat mengurangi kerusakan lingkungan tanpa mengorbankan kebutuhan pembangunan ekonomi dan keadilan sosial (Widyawati, n.d.).

Berdasarkan latar belakang diatas maka dilakukan analisis *value engineering* dengan mencari rekomendasi alternatif lainnya dengan mempertimbangkan konsep *green buliding* sehingga diperoleh alternatif yang lebih ekonomis dan efisien. Hal yang dilakukan pada penelitian ini adalah menentukan pekerjaan yang dapat dilakukan *value engineering* pada pekerjaan arsitektur. Metode *value engineering* yang dilakukan secara bertahap mulai dari mengumpulkan data RAB proyek terakhir kemudian dilakukan analisis fungsi dengan menggunakan Metode F.A.S.T diagram yang kemudian dilanjutkan dengan tahap kreativitas untuk memunculkan rekomendasi alternatif material dan menentukan *value index* pada tiap alternatif. Setelah alternatif terbaik dipilih kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan biaya pelaksanaan paling ekonomis dan efisien.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian deskriptif kuantitatif, yang merupakan proses pemecahan masalah yang melibatkan deskripsi, penelitian, dan penjelasan tentang subjek yang dipelajari, serta penggunaan angka untuk menarik kesimpulan dari fenomena yang dapat diamati (Sulistyawati et al., 2022). Dengan memanfaatkan prinsip-prinsip teknik, konsep *value engineering* menekankan biaya produk atau jasa. Tujuan teknik ini adalah untuk mencapai kualitas minimal yang sama dengan yang direncanakan dengan biaya serendah mungkin (Nandito et al., 2020). Program *value engineering* dalam suatu proyek khususnya proyek konstruksi fisik, perlu terlebih dulu diperjelas mengenai pengertian dari *value engineering* itu sendiri untuk menghindari kesan terutama dari perancang bahwa kegiatan *value engineering* adalah kritikan untuk rancangan/desain suatu proyek tanpa melibatkan aspek-aspek teknis (Amelia & Sulistio, 2019). Metode pengumpulan data yang dilakukan adalah pengumpulan data primer yaitu wawancara kepada penanggung jawab proyek terkait metode pelaksanaan dan survei harga material saat ini di toko material. Setelah data diperoleh kemudian dilakukan identifikasi terhadap item pekerjaan dengan biaya yang tinggi dan dilanjutkan dengan analisis FAST. Akan diperoleh alternatif desain berdasarkan kriteria konsep *green building*. *Green building* mengacu pada kualitas dan karakteristik dari Arsitektur aktual yang dibuat menggunakan prinsip-prinsip dan metodologi dari konstruksi yang *sustainable* (Kibert, 2022). Selain itu, gaya arsitektur hijau juga mencakup penggunaan proses yang ramah lingkungan dan menghemat sumber daya selama kehidupan bangunan, dari desain hingga pembangunan, operasional, perawatan, renovasi, dan dekonstruksi. (Kubba, 2010). Dalam *GREEN SHIP*, yang dibentuk oleh GBCI, terdapat enam aspek penilaian bangunan hijau, dan konsep hijau dikaji dari berbagai literatur, yaitu *appropriate site development, energy efficiency and conservation, water conservation, material*

resource & recycle, indoor air health & comfort and building and environment management (GBCI, 2013). Tahap berikutnya adalah tahap pengembangan dengan membandingkan dan mengembangkan pilihan alternatif yang terbaik dan dilanjutkan tahap penyajian berupa alternatif biaya pelaksanaan terbaik. Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *value engineering*. Tahapan *value engineering* sebagai berikut :

- a. Tahap Informasi (*Information Phase*)
Dalam rencana kerja VE, tahapan pertama adalah mendapatkan informasi tentang desain awal proyek dari data umum hingga batasan proyek. Informasi ini diperoleh langsung dari kontraktor proyek. Selanjutnya, diagram pareto digunakan untuk mengidentifikasi item pekerjaan yang mahal.
- b. Tahap Analisis Fungsi (*Function analysis*)
Analisis fungsi, tahapan paling penting dalam VE, dilakukan setelah mengumpulkan informasi. Pada tahap ini, fungsi-fungsi yang diinginkan akan dianalisis dengan menggunakan F.A.S.T diagram untuk menemukan biaya yang paling rendah untuk mengetahui fungsi-fungsi utama dan fungsi-fungsi pendukung serta untuk mengidentifikasi biaya yang dapat dikurangi atau dihilangkan tanpa mempengaruhi kualitas atau mutu gedung tersebut.
- c. Tahap Kreatif (*Creative Phase*)
Alternatif-alternatif akan muncul di tahap kreatif untuk membandingkan dengan desain yang sudah ada sebelumnya. Semakin banyak ide yang muncul, semakin banyak solusi yang tersedia untuk mengurangi biaya, kualitas, dan waktu. Alternatif dapat mencakup bahan atau material alternatif, metode pelaksanaan, dan waktu pelaksanaan.
- d. Tahap Evaluasi (*Evaluation Phase*)
Pada tahap evaluasi, pilihan yang sesuai dipilih dari sejumlah pilihan yang telah disusun pada tahap kreativitas. Pilihan ini dipilih berdasarkan perhitungan yang menunjukkan alternatif yang paling mudah dilaksanakan dan biaya yang paling rendah. Metode *zero-one* digunakan untuk menyelesaikan tahap ini.
- e. Tahap Pengembangan (*Development Phase*)
Dalam tahap ini, tugas-tugas yang dilakukan termasuk membandingkan hasil penelitian dengan hasil yang dibuat sebelumnya, membuat pilihan untuk konsep yang mungkin dipertimbangkan untuk pengembangan lebih lanjut, mengelola risiko dan biaya yang sesuai, melakukan analisis biaya manfaat, dan membuat rencana tindak lanjut untuk menentukan prosedur pelaksanaan, jadwal, dan tanggung jawab untuk setiap pilihan yang dipilih. Pada titik ini, analisis teknis serta perhitungan biaya siklus hidup/biaya siklus hidup (LCC) dilakukan untuk mencapai penghematan biaya pada jenis pekerjaan yang telah dilakukan analisis VE secara menyeluruh.
- f. Tahap Penyajian (*Recommendation phase*)
Pelaporan atau penyampaian hasil analisis dilakukan pada tahap penyampaian. *Owner* atau pihak pengembang menerima penyajian yang mencakup data tentang alternatif yang dipilih dan alasan untuk memilihnya, perbedaan harga rencana awal dengan setelah dilakukan VE, keuntungan dan kerugian dari alternatif yang dipilih, dan penghematan biaya siklus hidup dari rencana awal dengan setelah dilakukan VE. Pada tahap ini, penyajian ini nantinya digunakan untuk meyakinkan pihak pengembang atau pemilik yang bertanggung jawab atas pengambilan keputusan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Tahap Informasi

Tabel 1. Rekapitulasi RAB Pekerjaan Arsitektur

No	Pekerjaan	Total Harga (Rp)
1	<i>Finishing Dinding</i>	929.920.708
2	<i>Finishing Lantai</i>	639.813.512
3	<i>Finishing Plafond</i>	246.056.249

Pada tahap ini pengumpulan informasi dilakukan guna mengetahui Rencana Anggaran Biaya (RAB), harga satuan serta data proyek yang nantinya akan dilakukan analisa *value engineering* dengan kriteria yang diambil dari peraturan GBCI (*Green building Council Indonesia*).

3.2. Pareto

Setelah dilakukan rekapitulasi pada RAB khususnya pada pekerjaan Arsitektur, kemudian dilanjutkan dengan melakukan pengukuran nilai yang dominan. Nilai dominan ini ditentukan dengan menggunakan metode Diagram Pareto. Diagram ini membantu mengelompokkan item pekerjaan yang masuk kedalam kriteria dengan biaya akumulasi sebesar 80 % dari total keseluruhan item pekerjaan. Item pekerjaan yang masuk dalam kriteria tersebut yang kemudian ditentukan material dengan biaya pelaksanaan terbesar menggunakan metode yang serupa. Hasil diagram pareto tersaji dalam tabel berikut.

Tabel 2. Persentase Nilai Pekerjaan Arsitektur Tertinggi Hingga Terendah

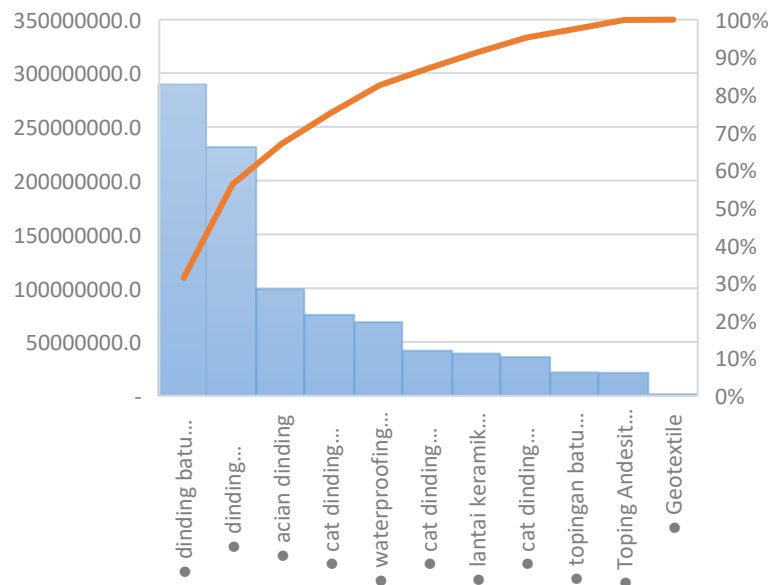
No	Pekerjaan	Total Harga (Rp)	%	Kum
1	Finishing Dinding	929.920.708	51,13 %	51,13 %
2	Finishing Lantai	639.813.512	35,29 %	86,43 %
3	Finishing Plafond	246.056.249	13,57 %	100 %

Pada pekerjaan arsitektur memperoleh item pekerjaan yang masuk dalam kriteria dengan biaya akumulasi 80 % yaitu pekerjaan *finishing* dinding dan *finishing* Lantai. Setelah ditentukan item pekerjaan tersebut kemudian dilanjutkan dengan menentukan material dengan nilai tertinggi pada masing-masing item pekerjaan. Untuk pekerjaan *finishing* dinding disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 3. Persentase Nilai Material Tertinggi Hingga Terendah pada Pekerjaan *Finishing* Dinding

No	Pekerjaan	Total Harga (Rp)	%	Kum
1	dinding batu kali <i>random slate</i>	290.007.294	31,29%	31,29%
2	dinding <i>homogenous tile</i>	231.503.543	24,98%	56,26%
3	cat dinding <i>weathershield</i>	75.456.474	8,14%	64,40%
4	<i>waterproofing coating</i>	68.430.426	7,38%	71,78%
5	acian dinding	9.317.429	10,71%	82,50%
6	cat dinding <i>external</i>	42.013.334	4,53%	87,03%
7	lantai keramik uk.30×30 cm Ex. Asia Tile	39.461.740	4,26%	91,29%
8	cat dinding internal	35.946.127	3,88%	95,17%
9	topingan batu andesit 400 × 400 × 50	21.867.326	2,36%	97,53%
10	Toping Andesit 300 mm tebal 3 mm	21.452.200	2,31%	99,84%
11	<i>Geotextile</i>	1.478.295	0,16%	100,00%

Dari hasil peringkat tersebut dapat digambarkan pada diagram pareto yang menunjukkan item pekerjaan yang masuk dalam kriteria dengan biaya akumulasi 80% seperti pada gambar 1.

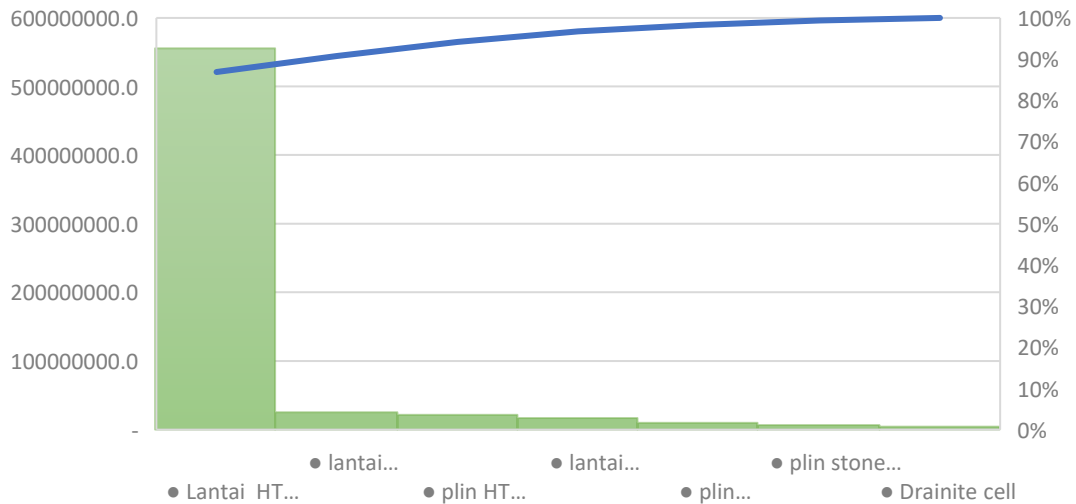


Gambar 1. Grafik Pareto Pekerjaan *Finishing* Dinding

Tabel 4. Persentase Nilai Material Tertinggi Hingga Terendah pada Pekerjaan *Finishing* Lantai

No	Pekerjaan	Total Harga (Rp)	%	Kum
1	Lantai HT uk.600×600mm Unpolish	555.344.207	86,80%	86,80%
2	lantai natural stone (Marmer TBA)	25.126.876	3,93%	90,73%
3	plin HT kayu tinggi 100 mm	21.595.200	3,38%	94,10%
4	lantai keramik homogenous 600×600mm non slip	16.641.004	2,60%	96,70%
5	plin keramik tinggi 100 mm dengan finish HT	10.035.475	1,57%	98,27%
6	plin stone tinggi 100 mm dengan finish natural	6.776.460	1,06%	99,33%
7	Drainite cell	4.294.290	0,67%	100,00%

Dari hasil peringkat tersebut dapat digambarkan pada diagram pareto yang menunjukkan item pekerjaan yang masuk dalam kriteria dengan persentase biaya akumulasi 80 % seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Grafik Pareto Pekerjaan *Finishing* Dinding

3.3. Kriteria Bangunan Hijau

Selanjutnya menentukan kriteria untuk dapat dilakukan analisis *value engineering*. Kriteria yang digunakan merujuk pada perangkat penilaian *greenship* oleh *Green Building Council* Indonesia tentang *greenship* untuk bangunan baru. Karena item pekerjaan yang ditinjau hanya pekerjaan arsitektur maka tidak keseluruhan kriteria digunakan dalam analisis *Value engineering* ini. Adapun kriteria yang digunakan seperti pada tabel 5.

Tabel 5. Kategori dan Kriteria GBCI

Kategori	Kriteria
Sumber dan siklus material	Refrigeran Fundamental
	Penggunaan Gedung dan Material Bekas
	Material ramah lingkungan
	Material Regional

3.4. Tahap Kreatifitas dan Alternatif

Berdasarkan kriteria kemudian dilakukan tahap kreatif dengan memunculkan desain alternatif yang nantinya digunakan sebagai bahan perbandingan dengan desain awal. Adapun alternatif yang dimunculkan seperti pada tabel 6.

Tabel 6. Alternatif Berdasarkan Kriteria

No	Desain Awal	Alternatif 1	Alternatif 2
1	dinding batu kali random slate	Batu Gamping	Batu Paras
2	dinding homogenus tile	Batu alam	Keramik
3	cat dinding weathershield	Cat dinding Aquashield	Cat dinding Powerflexx
4	waterproofing coating	waterproofing mortar	waterproofing membran
5	acian dinding	Sistem stick on wall	
6	Lantai homogenus tile	Batu alam	Keramik

3.5. Tahap Evaluasi dan Alternatif

Tabel 7. Perbandingan Alternatif Dinding Batu *Random Slate*

No	Kriteria pembanding	Desain awal	Alternatif 1	Alternatif 2
		batu kali <i>random slate</i>	Batu gamping	Batu Paras
Harga (Rp)		290.007.294	291.589.732	350.231.459
Penghematan (Rp)		-	- 1.582.438	- 60.224.165
1	<i>Refrigeran Fundamental</i>	3	3	3
2	Penggunaan Gedung dan Material Bekas	3	1	2
3		2	3	3
4		3	3	3
Total Nilai Bobot		11	10	11
Total Keseluruhan		12		
Persentase Pemenuhan		91,67 %	83,33 %	91,67 %

Pada tabel hasil perbandingan terlihat biaya dari alternatif 1 dan 2 masih lebih tinggi dari biaya desain awal. Selain itu pada kriteria pembandingan alternatif 2 dan desain awal memperoleh nilai total bobot terbesar yaitu 11 dengan persentase pemenuhan yaitu sebesar 91,67 % dibandingkan dengan alternatif 1. Hal ini menjadikan batu kali *random slate* masih menjadi alternatif pilihan terbaik dan termurah.

Tabel 8. Perbandingan Alternatif Dinding *Homogenous Tile*

No	Kriteria pembanding	Desain awal	Alternatif 1	Alternatif 2
		<i>homogenous tile</i>	Batu alam	Keramik
Harga (Rp)		231.503.543	301.293.443	213.185.719
Penghematan (Rp)		-	-69.789.900	18.317.824
1	<i>Refrigeran Fundamental</i>	2	3	3
2	Penggunaan Gedung dan Material Bekas	1	3	2
3	Material ramah lingkungan	1	2	3
4	Material Regional	2	3	3
Total Nilai Bobot		8	6	11
Total Keseluruhan		12		
Persentase Pemenuhan		66.67 %	50 %	91.67 %

Pada tabel hasil perbandingan terlihat biaya dari alternatif 2 merupakan biaya terendah. Selain itu pada kriteria pembandingan alternatif 2 memperoleh nilai total bobot terbesar yaitu 11 dengan persentase pemenuhan yaitu sebesar 91,67 % dibandingkan dengan alternatif 1 dan desain awal. Hal ini menjadikan keramik menjadi alternatif pilihan terbaik dan termurah.

Tabel 9. Perbandingan Alternatif Cat Dinding *Weathershield*

No	Kriteria pembanding	Desain awal	Alternatif 1	Alternatif 2
		cat dinding <i>weathershield</i>	Cat dinding <i>Aquashield</i>	Cat dinding <i>Powerflexx</i>
Harga (Rp)		75.456.474	70.511.678	72.981.035
Penghematan (Rp)		-	4.944.796	2.475.439
1	<i>Refrigeran Fundamental</i>	2	2	2
2	Penggunaan Gedung dan Material Bekas	2	2	2
3	Material ramah lingkungan	2	2	2
4	Material Regional	2	2	2
Total Nilai Bobot		8	8	8
Total Keseluruhan		12		
Persentase Pemenuhan		66.67 %	66.67 %	66.67 %

Pada tabel hasil perbandingan terlihat biaya dari alternatif 1 merupakan biaya terendah. Namun pada kriteria pembandingan seluruh alternatif memperoleh nilai total bobot terbesar yaitu 8 dengan persentase pemenuhan yaitu sebesar 66,67 %. Jika dilihat dari segi ekonomis maka cat dinding *aquashield* menjadi alternatif pilihan terbaik dan termurah.

Tabel 10. Perbandingan Alternatif *waterproofing coating*

No	Kriteria pembandingan	Desain awal waterproofing coating	Alternatif 1 waterproofing mortar	Alternatif 2 waterproofing membran
Harga (Rp)		75.456.474	68.430.426	72.315.467
Penghematan (Rp)		-	-	-3.885.041
1	Refrigeran Fundamental	3	1	1
2	Penggunaan Gedung dan Material Bekas	2	1	1
3	Material ramah lingkungan	3	2	1
4	Material Regional	1	2	1
Total Nilai Bobot		8	9	6
Total Keseluruhan		12		
Persentase Pemenuhan		75 %	50 %	33,33 %

Pada tabel hasil perbandingan terlihat biaya dari alternatif 1 dan 2 masih lebih tinggi dari biaya desain awal. Selain itu pada kriteria pembandingan desain awal memperoleh nilai total bobot terbesar yaitu 9 dengan persentase pemenuhan yaitu sebesar 75 % dibandingkan dengan alternatif 1 dan 2. Hal ini menjadikan *waterproofing coating* masih menjadi alternatif pilihan terbaik dan termurah.

Tabel 11. Perbandingan alternatif Acian dinding

No	Kriteria pembandingan	Desain awal acian dinding	Alternatif 1 <i>Stick on wall</i>
Harga (Rp)		75.456.474	99.317.429
Penghematan (Rp)		-	-
1	<i>Refrigeran Fundamental</i>	3	1
2	Penggunaan Gedung dan Material Bekas	3	3
3	Material ramah lingkungan	3	3
4	Material Regional	1	1
Total Nilai Bobot		8	10
Total Keseluruhan			
Persentase Pemenuhan		83,33 %	66,67 %

Pada tabel hasil perbandingan terlihat biaya dari alternatif 1 masih lebih tinggi dari biaya desain awal. Selain itu pada kriteria pembandingan desain awal memperoleh nilai total bobot terbesar yaitu 10 dengan persentase pemenuhan yaitu sebesar 83,33 % dibandingkan dengan alternatif 1. Hal ini menjadikan acian dinding masih menjadi alternatif pilihan terbaik dan termurah

Tabel 12. Perbandingan Alternatif Lantai *Homogenous Tile*

No	Kriteria pembandingan	Desain awal <i>homogenous tile</i>	Alternatif 1 Batu alam	Alternatif 2 Keramik
Harga (Rp)		75.456.474	555.344.207	607.384.119
Penghematan (Rp)		-	-	-52.039.912
1	<i>Refrigeran Fundamental</i>	2	2	3
2	Penggunaan Gedung dan Material Bekas	2	1	3
3	Material ramah lingkungan	2	1	2
4	Material Regional	2	2	3
Total Nilai Bobot		8	8	6
Total Keseluruhan		12		
Persentase Pemenuhan		66,67 %	50 %	91,67 %

Pada tabel hasil perbandingan terlihat biaya dari alternatif 2 merupakan biaya terendah. Selain itu pada kriteria pembandingan alternatif 2 memperoleh nilai total bobot terbesar yaitu 11 dengan persentase pemenuhan yaitu sebesar 91,67 % dibandingkan dengan alternatif 1 dan desain awal. Hal ini menjadikan keramik menjadi alternatif pilihan terbaik dan termurah

3.6. Rekomendasi Alternatif Material

Berdasarkan hasil evaluasi dan desain alternatif diperoleh rekomendasi alternatif material berdasarkan konsep *green building*. Rekomendasi alternatif Kombinasi merupakan gabungan dari desain-desain alternatif yang memiliki nilai bobot tertinggi pada tahapan evaluasi. desain-desain alternatif yang ada disandingkan dengan desain awal dengan subjek pembandingan yang *refrigeran Fundamental*, penggunaan gedung dan material bekas, material ramah lingkungan dan material regional. rekomendasi alternatif material tersaji pada tabel 13.

Tabel 13. Perbandingan Alternatif Lantai *Homogenous Tile*

No	Desain Awal	Rekomendasi alternatif
1	dinding batu kali <i>random slate</i>	dinding batu kali <i>random slate</i>
2	dinding <i>homogenous tile</i>	Dinding Keramik
3	cat dinding <i>weathershield</i>	cat dinding <i>aquashield</i>
4	<i>waterproofing coating</i>	<i>waterproofing coating</i>
5	acian dinding	acian dinding
6	Lantai <i>homogenous tile</i>	Lantai Keramik

3.7. Alternatif Biaya Pelaksanaan

Alternatif biaya pelaksanaan diperoleh dari biaya terendah berdasarkan perbandingan biaya pada masing-masing material. Biaya pelaksanaan desain awal pada pekerjaan *finishing* dinding proyek adalah sebesar Rp929.920.708 setelah dilakukan *value engineering* biaya pelaksanaan pekerjaan *finishing* dinding menjadi Rp903.671.568, terjadi penghematan sebesar Rp23.262.620 atau 2,51 %. Biaya pelaksanaan desain awal pada pekerjaan *finishing* lantai adalah sebesar Rp639.813.512 setelah dilakukan *value engineering* biaya pelaksanaan pekerjaan *finishing* lantai menjadi Rp510.799.447 terjadi penghematan sebesar Rp129.014.065 atau 20,16 %. Alternatif biaya pada masing-masing pekerjaan tersaji dalam tabel 14.

Tabel 14. Alternatif Biaya Pelaksanaan

No	Pekerjaan	Nilai awal	Nilai alternatif	% penghematan
1	<i>Finishing</i> Dinding	Rp929.920.708	Rp903.671.568	2,51 %.
2	<i>Finishing</i> Lantai	Rp639.813.512	Rp510.799.447	20,16 %.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Rekomendasi Alternatif material berdasarkan konsep *Green building* pada pekerjaan arsitektur adalah dinding keramik, cat dinding *aquashield* dan lantai keramik.
2. alternatif biaya pelaksanaan pekerjaan arsitektur pada pekerjaan *finishing* dinding yaitu Rp903.671.568 dan pada pekerjaan *finishing* lantai Rp510.799.447.

Ucapan Terima Kasih

Segala puji dan syukur kita panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan baik. Penelitian bertujuan untuk optimalisasi proyek konstruksi pada biaya, waktu, teknologi serta inovasi. Dalam penyusunan penelitian ini, penulis telah menerima banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktur Politeknik Negeri Bali, Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bali beserta seluruh rekan yang telah memberikan sumbangsih pemikiran dan Forum Ilmiah Jurusan Teknik Sipil. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua baik pelaku jasa konstruksi, jasa konsultasi maupun pemilik proyek serta bagi dunia pendidikan.

Daftar Pustaka

- Ainurrohman, S., & Sudarti, S. (2022). Analisis perubahan iklim dan global warming yang terjadi sebagai fase kritis. *Jurnal Phi Jurnal Pendidikan Fisika Dan Fisika Terapan*, 3(3), 1. <https://doi.org/10.22373/p-jpft.v3i3.13359>
- Amelia, H., & Sulistio, H. (2019). Analisis *value engineering* pada proyek perumahan djajakusumah residence. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 2(3), 209. <https://doi.org/10.24912/jmts.v2i3.5831>
- Atabay, S., & Galipogullari, N. (2012). Application of *value engineering* in construction projects. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering, October*, 17–19.
- Dinariana, D., Nurjaman, H. N., & ... (2021). *Value engineering of architectural work in navalunit building planning, in west papua. Journal of Architecture and ...*, 6(9), 37–49. <https://www.academia.edu/download/69367599/E06093749.pdf>
- Diputera, I. G. A., Agung, I. G., Putera, A., Putu, A., & Dharmayanti, C. (2018). Penerapan *value engineering* (ve) pada proyek pembangunan taman sari apartement. *Jurnal Spektran*, 6(2), 210–216. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jsn/article/view/42315>
- GBCI. (2013). *GREENSHIP RATING TOOLS GREENSHIP untuk BANGUNAN BARU Versi 1.2. April*.
- Hasan Busri, M. (2014). Analisis alternatif desain bangunan jembatan dengan *value engineering*. *Extrapolasi*, 7(1), 31–38.
- Karim, D., Nasution, A., & Ashad, H. (2023). Rekayasa nilai pada bangunan auditorium gedung penunjang akademik politeknik ilmu pelayaran (PIP) salodong makassar. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 3(3),

- 6422–6430. <https://j-innovative.org/index.php/Innovative/article/view/2862>
- Kartohardjono, A. (2017). Analisis *value engineering* pada proyek pembangunan apartement di cikarang. *Jurnal Konstruksia*, 9(1), 41–58.
- Kibert, C. . (2022). *Sustainable Construction: Green building Design and Delivery, 5th Edition*.
- Kubba, S. (2010). *Green Construction Project Management and Cost Oversight*.
- Munawir, R. (2021). Melawan dampak perubahan iklim dengan penerapan teknologi building information modelling/ BIM. *Direktorat Jenderal Bina Konstruksi*. <https://binakonstruksi.pu.go.id/publikasi/karya-tulis/melawan-dampak-perubahan-iklim-dengan-penerapan-teknologi-building-information-modelling-bim/>
- Nandito, A., Huda, M., & Siswoyo. (2020). Penerapan *value engineering* pada proyek pembangunan puskesmas rego manggarai barat ntt. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 8(3), 171–186.
- Pratiwi, N. A. (2014). Analisa *value engineering* pada proyek gedung riset dan museum energi dan mineral. *Institut Teknologi Bandung*, 2(1), 166–170.
- Ratnaningsih, A., Hasanuddin, A., & Hermansa, R. (2019). Penilaian kriteria *green building* pada pembangunan gedung IsDB project berdasarkan skala indeks menggunakan greenship versi 1 . 2 (studi Kasus : gedung engineering biotechnology universitas jember). *BERKALA SAINSTEK*, 2(VII), 59–66.
- Suamba, D. P., & Nurdiantoro, E. (2014). Pembangunan berwawasan budaya di kota denpasar. *Media Komunikasi FPIPS*, 2(1), 1–08.
- Sulistiyawati, W., Wahyudi, & Trinuryono, S. (2022). Analisis (deskriptif kuantitatif) motivasi belajar siswa dengan model blended learning di masa pandemi covid19. *Kadikma*, 13, No. 1, 68–73.
- Wau, N., Anurogo, W., Lubis, M. Z., & Ghazali, M. (2022). Dampak dan sekenario kenaikan tinggi muka air laut terhadap penutup lahan (studi kasus : kecamatan gunung kijang, pulau bintan). *Jurnal Swarnabhumi*, 7(1), 39–49.
- Widyawati, R. L. (n.d.). *Green building* dalam pembagunan berkelanjutan. *Program Studi Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Borobudur*.
- Yusuf, M., Parwati, C. ., & Nasution, A. . (2021). Analisis rekayasa nilai lampu hias dalam usaha pengembangan produk. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri Dan Informasi*, 9(2), 159–166.

A Review: Reliability Assessment of Isolated Phase Busduct Through FMEA and RCFA Methodologies

Handoko Rusiana Iskandar, Ahmad Daelami, Awang Rahmawan Prakoso, Cepi Arifin, and Miftah Farid

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Jendral Achmad Yani, Cimahi, Indonesia.

handoko.rusiana@lecture.unjani.ac.id, ahmad.daelami@lecture.unjani.ac.id, awangprakoso@gmail.com,
cepiarifin6@gmail.com, miftahfa@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mendiskusikan kehandalan *Isolated Phase Busduct* (IPB) unit pembangkit panasbumi masih perlu ditingkatkan karena gangguan-gangguan yang sama masih terjadi, dimana pada periode tahun 2018-2023 gangguan tersebut telah menyumbangkan *Loss Production Opportunity* sekitar 65 Miliar Rupiah. Oleh karena itu penelitian ini akan memberikan usulan atau saran faktor apa saja yang perlu ditingkatkan agar kehandalan IPB disetiap unit pembangkit listrik panasbumi meningkat. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Failure Mode And Effect Analysis* (FMEA) dan metode *Root Cause Failure Analysis* (RCFA), dimana FMEA membantu dalam mengidentifikasi potensi kegagalan dan menentukan prioritas mitigasi dan menentukan nilai *Risk Priority Number* (RPN), *Root Cause Failure Analysis* (RCFA) mengungkap penyebab utama kegagalan yang telah terjadi, dari kedua metode tersebut diketahui bahwa gangguan yang terjadi sebenarnya dapat diidentifikasi lebih dini sebesar 91,2% serta faktor seperti *manufacture design*, *aging equipment*, *unproper installation*, *Lack Quality Control*, dan *unproper mobilisation* harus dieliminasi dalam upaya meningkatkan kehandalan IPB dimana faktor-faktor tersebut harus diperhatikan dari mulai fase proyek sampai dengan fase operasional.

Kata kunci: *Failure Mode and Effect Analysis*, *Isolated Phase Busduct*, *Risk Priority Number*, *Risk Priority Number*

Abstract

This research discuss the reliability of the *Isolated Phase Busduct* (IPB) geothermal generating unit still needs to be improved because the same disturbances still occur, where in the 2018-2023 period these disturbances have contributed to a *Loss Production Opportunity* of around 65 billion rupiah. Therefore, this research will provide suggestions or suggestions for what factors need to be improved so that the reliability of IPB in each geothermal power plant unit increases. The methods used in this research are *failure mode and effect analysis* (FMEA) and the *Root Cause Failure Analysis* (RCFA) method, where FMEA helps in identifying potential failures and determining mitigation priorities and determining the value of the *Risk Priority Number* (RPN), *Root Cause Failure Analysis* (RCFA) reveals the main causes of failures that have occurred, from these two methods it is known that the disturbances that occur can actually be identified earlier by 91.2% as well as factors such as *manufacture design*, *aging equipment*, *improper installation*, *Lack of Quality Control*, and *inappropriate mobilization* must be eliminated in an effort to increase IPB's reliability where these factors must be considered from the project phase to the operational phase.

Keywords: *Failure Mode and Effect Analysis*, *Isolated Phase Busduct*, *Risk Priority Number*, *Root Cause Failure Analysis*

1. Pendahuluan

The dependability of electrical systems is a critical factor in industrial operations, particularly for firms within the energy industry. The *Isolated Phase Busduct* (IPB) serves as a critical component in electricity distribution, significantly contributing to the reliability and efficiency of power flow in power plants (Maletič et al., 2020). IPB is a sealed electrical conduit engineered to mitigate current leakage, improve safety, and diminish the likelihood of external disturbances (Hajiagha et al., 2016). The persistent increase in electricity consumption has rendered the reliability of IPB a major consideration for energy firms, particularly geothermal power plants. This system possesses several exceptional attributes, including robust physical insulation, wherein the conductors within the busduct are

encased in materials capable of withstanding high voltages and safeguarding against external interference (Li et al., 2024).

The employed insulation materials and construction design can mitigate the risk of corrosion and damage, hence influencing power flow quality and performance. In high-power applications, IPB is frequently utilized in systems handling currents above 1000A, establishing it as the preferred option in industrial electrical systems and power plants (Siva Sathyanarayana & Amarnath, 2012).

Info Makalah:

Dikirim : 05-03-25;

Revisi 1 : 05-07-25;

Diterima : 05-08-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : awangprakoso@gmail.com

Prior scholars have undertaken multiple investigations into the reliability of IPB, including a pertinent study that analyses the impact of IPB design on the efficiency and stability of electrical systems. The research indicated that employing superior materials and ideal design enhances the longevity of IPB against electrical and environmental disruptions (Al Marzooqi et al., 2019; Alsyoud et al., 2021). Additional research underscores the significance of predictive maintenance through sensor technologies and data analysis to identify potential damage to IPB at an early stage (Fu et al., 2024). The utilization of technology for forecasting disruptions is prevalent; yet, its effectiveness and accuracy in IPB remain contentious issues.

Consequently, additional research on the execution of a comprehensive IPB reliability enhancement approach across all power plant units remains constrained. Most prior research has concentrated on certain elements, such as design or maintenance, without synthesizing them into a cohesive framework. Furthermore, research addressing particular conditions in Indonesia, including the humid tropical environment and seismic activity, has yet to be undertaken, as it has predominantly concentrated on general specifications. This technique aims to identify the fundamental causes of the difficulties with greater precision and to deliver more effective and efficient remedies.

2. Method

2.1. Research Flowchart

The process and stages of this research are identifying IPB failures, creating an FMEA including IPB RPN, creating an IPB RCFA, and drawing conclusions and suggestions. See Figure 1 for more information of the proposed methods using research's flowchart.

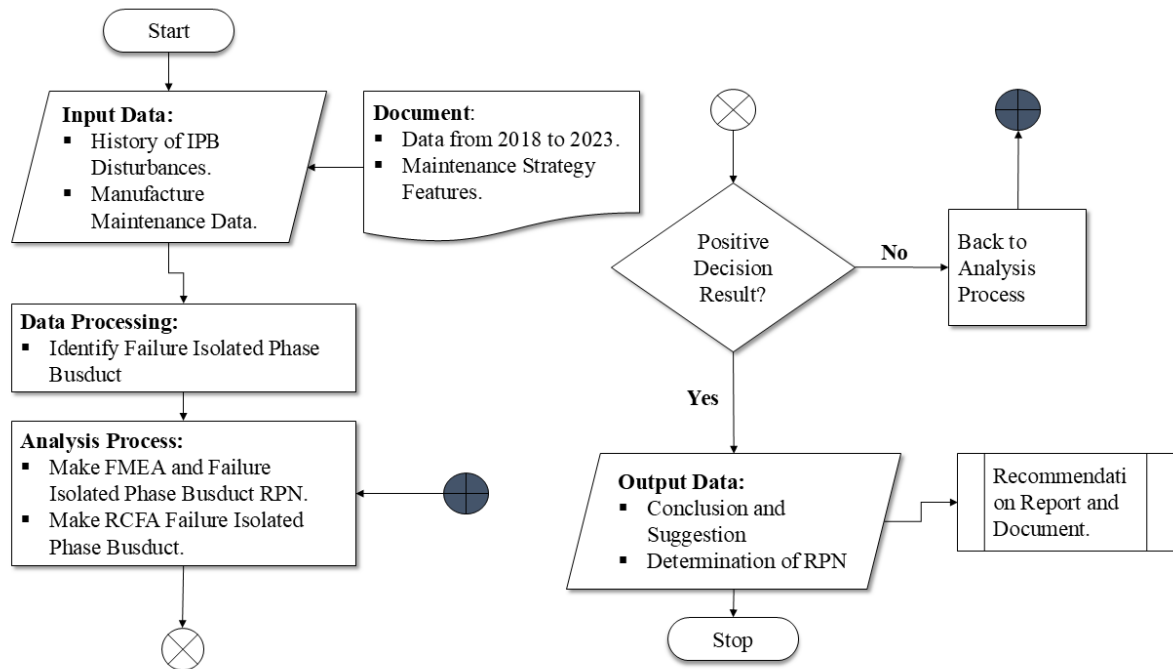


Figure 1. Research Flowchart Analysis Process

Figure 1 shows the sequence of analytical processes performed to determine the value and technical recommendations resulting from isolated phase busduct (IPB) failures, generally shown in high-voltage power grid systems, especially in large power plants and industries. Various analytical methods were considered to provide efficiency and recommendations for system damage that were deemed appropriate based on existing procedures.

In this study, FMEA is needed as an analysis process for determining the list of causes of failure, so that identification will be more focused with RCFA as a supporter in the value that will be selected at RPN. The root of the problem will probably be more reviewed from the type of Man Power, Maintenance Management, Material (eg; Aging, etc.) (Dolin, 2020). The next step is data processing based on reference/assessment guidelines analysed based on FMEA and RCFA (Kim & Zuo, 2018). The next stage is data processing. This paper describes the data examination process that is carried out as an identification step for deficiencies that may arise in IPB failures. The steps for identifying IPB weaknesses are obtained from existing data which are then analyzed for system failures. This identification also helps the assumptions underlying the system failure. Then, the examination of each failure is finalized using two powerful methodologies, namely Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and Risk Priority

Number (RPN) assessment (Eyuboglu et al., 2020). FMEA method is an instrument to identify the possibility of many failures in the IPB system and the possible impact on system performance. Each failure mode is evaluated based on how often it occurs, the severity of the impact, and the ease of investigation in calculating the RPN value. The numbers obtained will indicate the priority in management. Meanwhile, to determine the main cause of failure in this system, a Root Cause Failure Analysis (RCFA) technique cannot be separated from the activity. RCFA has the ability to examine the root cause and is a prevention strategy against further failure (Wang et al., 2021).

After the analysis procedure, evaluation is the finalization activity to be carried out. If the analysis results indicate that the problem can be handled properly, follow-up actions will be used. However, if the results of the problem are not found, then it will return to the analysis method to obtain an effective and efficient solution. This step consists of references made to changes in maintenance methods and/or a repair activity that helps reduce the likelihood of subsequent disruptions occurring. The RPN assessment of failure can be determined based on a priority scale against the level of risk posed. So, in the end, the results of the analysis and recommendations are suggested as one of the maintenance strategies that need to be considered as proposals, and steps taken in preventing a decrease in the reliability of the IPB system that will be implemented by relevant stakeholders in improving and maintaining the electrical system.

2.2. Identification of IPB Disorders

The collection of historical information data, including IPB disruption data and minutes from reliable sources must be correct and precise (Lu et al., 2021). Refer to the information in the IPB fault table to help identify the estimated fault and its root cause or problem.

2.3. Determination of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Engineering methods for identifying and minimizing potential defects. FMEA is used to prevent failures that might harm the company monetarily and reputationally (Patil et al., 2022). This aspect contributes to system failures due to IPB disturbances, since the failure to identify equipment malfunctions early precludes the establishment of an appropriate maintenance strategy, leading to unforeseen operational failures (Hatala et al., 2023). FMEA is a straightforward, rapid, and efficient instrument for evaluating success and safety; yet, it is constrained by its reliance on comprehensive data. The constraints of FMEA become evident when used to new systems lacking comprehensive risk data (Mzougui & El Felsoufi, 2019).

2.4. Determination of Risk Priority Number (RPN) Value

Subsequent to executing the stages utilizing the FMEA methodology, the following action is to compute the value of each RPN (Kamble & Rajiv, 2022), defined as the product of Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D), as articulated in Eq. (1):

$$RPN = (S) \times (O) \times (D) \quad (1)$$

Equation (1) indicates that the RPN value is derived from the multiplication of the severity value, incidence value, and detection value, which have been established according to the risk values in Table (1). Severity is an evaluation of the extent of the impact that may arise from a failure. The evaluation scale typically ranges from 1 to 10, where 1 signifies negligible and 10 denotes disastrous. Occurrence: Evaluates the frequency with which the failure cause is expected to arise. The evaluation scale generally ranges from 1 to 10, with 10 signifying a high probability of failure. Detection: Evaluates the extent to which the failure's cause may be identified. The evaluation scale generally ranges from 1 to 10, with 10 signifying a markedly low detecting capability.

2.5. Determination of Root Cause Failure Analysis (RCFA)

This is a method for determining the causes of failure in a system or process. The goal of RCFA is to avoid repeating the same failure in the future. Understanding the core reasons of failure may help companies improve efficiency, quality, and safety (Patil & Bewoor, 2021). The purpose of RCFA is to discover the root cause of an issue, rather than only addressing the obvious symptoms, guaranteeing that the selected cure prevents the recurrence of the same problem. (Sheng et al., 2023).

The first step of RCFA is gathering relevant information about the failure, including as data from incident reports, system assessments, maintenance documents, and other materials that might shed light on the system's status at the time of failure (Patil et al., 2021). Create a detailed problem definition based on the evidence obtained. This encompasses delineating the extent of the failure, its ramifications, and the circumstances and setting in which the failure transpired. Employ several analytical tools to analyze probable underlying causes, such as the five whys analysis, which requires asking "Why?" five times to identify the core reason, and the FMEA, which is used to outline future failures, their repercussions, and their recurrence rates (Petrescu et al., 2021).

3. Result and Discussion

3.1. Disturbance Identification of IPB

Table 1 explains the data taken from 2018 – 2023, where from the data it is known that several units have a history of disruption and Loss of Production Opportunity (LPO), from this further assessment and analysis are carried out and explained in the following sub-chapters. See table 1.

Table 1. Existing Disturbance Data (2018 - 2023)

No	Unit	Year	The Root Cause of Disorders	Duration (day)	LPO (billion Rp)
1	I	2022	Micro void in resin Phase S	12	23.4
		2023	Water ingress tubular sleeve Phase S	4	7.20
2	II	2022	Water ingress tubular sleeve Phase S	5	5.80
3	III	2019	Water ingress tubular sleeve Phase T	13	10.1
		2023	Water ingress tubular sleeve Phase S	7	2.60
			Micro void in resin Phase R Aux Transformer		
4	IV	2018	Micro void in resin Phase S	14	9.90
		2020	Water ingress tubular sleeve Phase S & T	3	2.20
5	V	2019	Material damage & Micro damage main sleeve phase S	5	3.80

Table 1 shows the disruptions that occurred in IPB from 2018- 2023, along with the principal reasons, duration of each disruption, and related LPO in billions of Rupiah (Rp). This table contains important information about the frequency and impact of disturbances on the IPB system used in electricity distribution. This table provides identification of all the main causes of problems that often arise during the period, and the component part of the Tubular sleeve water ingress is the most loyal of the possible failures. Furthermore, the part of Micro cavity in resin and Material damage in the main sleeve are in the next vulnerable position. The distribution shows that the tubular sleeve water ingress is the main cause in various units, including Unit I (2023), Unit II (2022), Unit III and Unit V (2019). This shows that water loss or penetration into the sleeve is the main root that has a direct impact on the performance of the IPB over this time span. Micro voids in the resin are also a common source of distress, see columns in Units I (2022), IV (2018), and V (2019). Concerns have been raised about the cause of micro void issues in insulation resins. This will result in decreased effectiveness of the insulation layer and electrical failure. Material failure & micro-damage in the main sleeve occurred in Unit V (2019), this data displays the material degradation in the main sleeve which has a direct impact on the mechanical strength and reliability of the power system.

The duration of existing faults ranges from 3 to 14 days in Unit III in 2023. This unit experienced a longer disruption of 13 days due to water infiltration into the Phase T tubular sleeve. This indicates that the disruption was caused by water infiltration, which of course results in considerable downtime, thus directly affecting operating costs. On the other hand, Unit II (2022) and Unit V (2019) experienced shorter disruptions, with 4 days and 5 days respectively. Although the failure duration decreases, the underlying reason, is the presence of micro cracks in the resin and degradation of the material, this becomes important and requires inspection activities and preventive measures to prevent further failures. The LPO in this table has a fluctuating value according to the duration of the fault and its impact on system operation.

LPO in each unit shows that Unit I (2022) experienced the largest operational loss of IDR23.4 billion, where micro voids in the Phase S resin and suspension for 12 days were the main causes. This loss emphasizes that disruptions to the insulation system can substantially affect the operation of the IPB value. Unit III (2019) experienced the second largest substantial loss of IDR10.1 billion due to water intrusion in the Phase T tubular casing, this disruption caused the system to be inoperative for 13 days. The extended period of disruption resulted in considerable losses. Unit IV (2020) and Unit V (2019) experienced reduced losses, totalling Rp 9.90 billion and Rp 3.80 billion, respectively, despite having shorter periods of inactivity. This suggests that although disruptions were rectified more swiftly, the nature of the damage, such as material damage, can affect operational expenses. On the basis of conversations with reliable sources, it would appear that the maintenance of the IPB has been based on the guidelines provided by the Original Equipment Manufacturer (OEM). There are no preventative maintenance actions that take place while the unit is in operation, as stated in the guidelines for maintenance provided by the manufacturer. IPB maintenance is considered to be free maintenance. The following is a comparative analysis of the parameters given in the table is the IPB demands no routine maintenance. This signifies that the design and components of the Isolated Phase Busduct are adequately reliable and insulated, hence obviating the need for frequent maintenance over the long term. This maintenance-free feature results in lower operational expenditures since it removes the need for scheduling or additional costs connected with routine maintenance. Nonetheless, while normal maintenance is avoided, frequent inspections are still required to detect any damage that may affect the system's efficiency and dependability. When

dust or filth accumulates on the IPB's bus bar, the manufacturer recommends cleaning it with soapy water, spirit, or alcohol. This confirms that component cleanliness is important, especially in the prevention of pollutants or debris that interfere with electrical conductivity or insulation values. The use of chemicals such as alcohol is one measure to remove small particles without affecting the insulation strength. The act of maintaining the cleanliness of electrical components will ensure optimal performance. The table explains that more maintenance is not required. It shows that IPB components are designed to work with little intervention or additional maintenance after the first installation, provided they are used appropriately and with proper technical references. This further substantiates that the IPB design is exceptionally durable and dependable, hence significantly enhancing efficiency in minimizing maintenance expenses related to component failure.

Table 2 explains the aspects of maintenance of the Isolated Phase Busduct (IPB) system based on the manufacturer's guidelines, which are regulated in several parameters covering IPB maintenance, handling if there is dust on the bus bar, and other maintenance.

Table 2. Manufacturer Maintenance Information

No	Parameter	Information
1	IPB Maintenance	Maintenance free
2	If bus bars is Heavy Coated with dust	Cleaning with soap water, spirit or alcohol
3	Other Maintenance	Not necessary

Despite the OEM IPB indicating that maintenance is complimentary, each unit's maintenance staff has devised a maintenance strategy, as illustrated in Table 3. Each unit has a different maintenance strategy for each IPB due to different manufacturers, resulting in a lack of comprehensive data and a lack of correlation between the maintenance teams of each unit. Therefore, a uniform maintenance strategy is needed that accommodates various IPB brands.

Table 3. Maintenance Strategy

Unit	Online Maintenance Strategy		Offline (for 4 Year)
	Checking activities	Duration	
I	Visual Check	once a year	Visual Inspection Electrical Testing (IR, PI, Contact Resistance)
II	- Visual Check - IR Thermography	once a year once a year	-
III	- Visual Check - IR Thermography	once a year twice a year	Visual Inspection Electrical Testing (IR, PI, Contact Resistance, tan Delta)
IV	- Visual Check - IR Thermography	4 times a year 4 times a year	Visual Inspection Electrical Testing (IR, PI, Contact Resistance, tan Delta)
V	- Visual Check - IR Thermography - PD bi-phase coupler	twice a year twice a year twice a year	Visual Inspection Electrical Testing (IR, PI, Contact Resistance, Hi-pot)

Table 3 presents a summary of the IPB maintenance plan, categorized into two primary types: online maintenance and offline maintenance, each having distinct periods for every unit. This table delineates the inspection operations conducted on each IPB unit, including the duration of the inspections and the offline maintenance actions performed every four years. This online maintenance is proposed to monitor and identify possible disturbances or possible damage without having to stop production completely. The maintenance procedure data contained in table 3 shows that Unit I is visually inspected once a year, the unit is limited to an annual visual inspection. This shows that the IPB system or its components in this unit are more preventable and require less maintenance. In Unit II, in addition to visual inspection, IR Thermography is used as a form of visual inspection to detect heat gain due to electric fields without requiring great effort. All of these Units ultimately require intense and continuous supervision. Unit III shows a more regular type of maintenance compared to other Units, with sufficient intensity, namely thermal inspection activities are carried out twice a year. This emphasizes the need for increased monitoring in this unit, thermal investigation treatment of anomalies is needed for early detection. Unit IV has the highest maintenance frequency, with thermal detection carried out every week. This has the potential that failure will be more severe if the inspection treatment is longer, which ultimately prevents preventive measures and the recovery process will be long (because failure) is not immediately prevented. This indicates that Unit IV has increased complexity or vulnerability, demanding close monitoring to detect problems early and avoid major operating interruptions. Unit V requires extremely complicated maintenance, including a bi-phase PD coupler for monitoring reasons. This suggests that Unit V may use more modern technologies or be more sensitive to subtle electrical faults, such as coupling component breakage or phase two disturbances.

3.2. FMEA Determination Result

As of now, none of the operating units possess the most recent IPB Failure Mode Effect Analysis (FMEA) based on the discussion outcomes. This aspect contributes to recurrent failures due to IPB disturbances, as the lack of re-evaluation of the FMEA since the initial incident precludes the establishment of an effective maintenance strategy, leading to unforeseen operational failures.

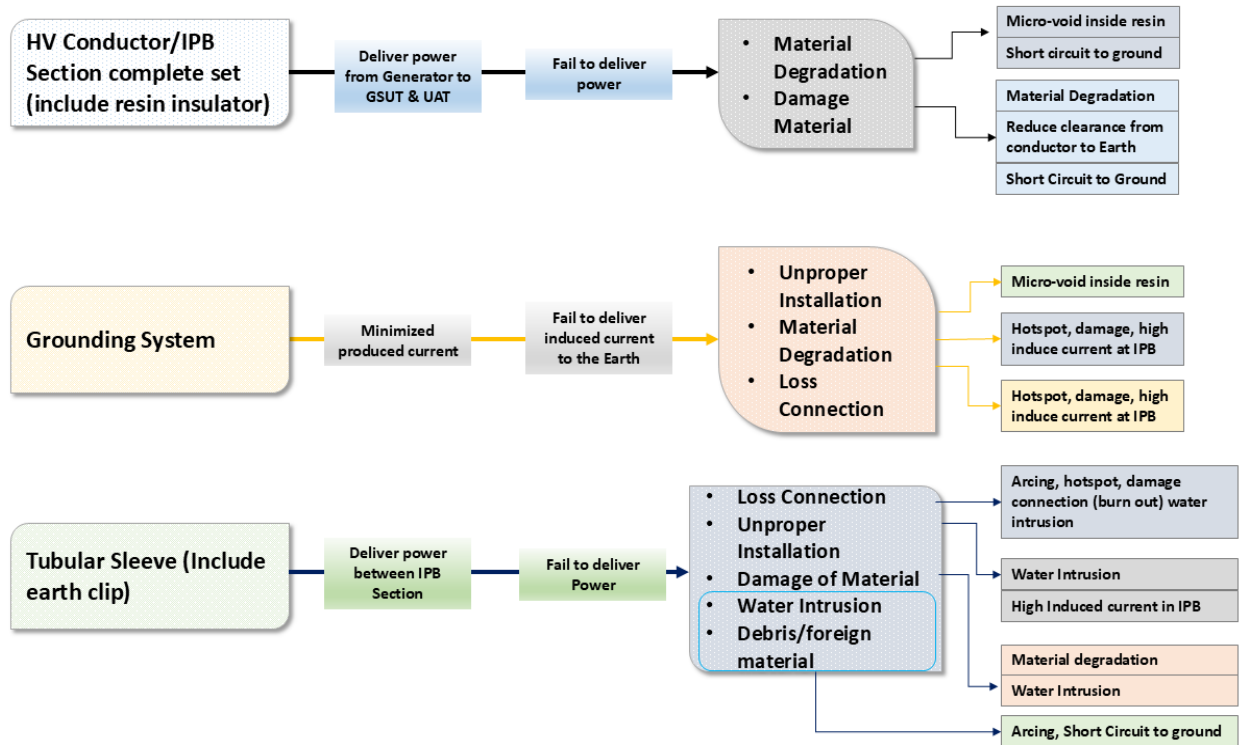


Figure 2. Isolated Phase Busduct using FMEA

The figure 2 shows the FMEA for the IPB system, focusing on potential failure modes across three major components: the HV Conductor/IPB Section (including resin insulator), Grounding, and the Tubular Sleeve (including earth clip). It illustrates the systematic approach for identifying and mitigating failure risks based on operational flow, material degradation, and installation errors. The initial element of the flowchart analyses the HV Conductor/IPB section, encompassing resin insulation, and its essential function in transmitting power from the generator to the Grounding Switch Unit (GSU) and Unit Auxiliary Transformer (UAT). The procedure commences by evaluating material degradation, which may lead to substantial failure. The existence of tiny voids inside the resin, which causes a short circuit to ground, is a major contributor to material deterioration in this context. The consequences of such deterioration may cause harm to the materials used, reducing their insulating properties and overall system performance. The following failure mechanism involves material deterioration, which is often caused by reduced clearance between conductors and the Earth, resulting in a short circuit to ground. If these mistakes are not addressed promptly, they can cause significant system instability and downtime. Effective maintenance and monitoring are critical for recognizing material degradation and preventing breakdowns from becoming more severe.

The second critical feature of the flowchart is grounding, namely its function in decreasing induced currents and permitting the safe dissipation of current to the Earth. When the device fails to send the generated power to Earth, a variety of problems might develop. Inadequate installation of grounding components can lead to material degradation, increased risk of disconnection, and improper grounding connections, resulting in inefficient power transmission. The failure modes underscore the need of proper grounding installation in ensuring the system's dependability. Potential difficulties, such as water penetration and higher induced currents in the IPB, exacerbate the damage. Correcting the placement of grounding systems can significantly lessen these hazards. The final component focuses on the tubular sleeve, which is necessary for transporting power between IPB segments. Failures in this context include disconnections and faulty installations. Inadequate installation or degraded components impair the system's integrity, cause water penetration, and allow unwanted debris to enter the system, reducing its dependability and performance

significantly. Water penetration is acknowledged as a key cause of failure, exacerbating other failure modes such as material degradation and short circuits.

Water ingress into the IPB section can damage the resin, ruin the insulation, and cause irreparable damage to the equipment if not promptly investigated and repaired.

3.3. RPN Determination Result

According to the RPN statistical data, failure modes with high RPN values, specifically resin damage and water leakage, should be addressed with preventive maintenance and early detection measures. The RPN can be minimized by improving detection capability and lowering failure frequency through design improvements, using reliable materials, and increasing inspection schedules. In addition, failure modes with low risk significance scores or infrequent occurrences (e.g., grounding failures), can be given lower priority for routine maintenance. Nevertheless, these components are important for inspection activities to prevent more serious damage.

Table 4. Nilai Risk Priority Number (RPN) Determination Result

Potential Failure Mode	Potential Cause	S	O	D	RPN	Relative (%)	History of Disorders
Material Degradation	Micro void inside resin	8	7	7	392	13.2	√
	short circuit to grounding	8	5	6	240	8.10	√
	Hotspot, Damaged part, High induced current in IPB	8	5	5	200	6.70	√
Damage Material	Material Degradation	6	4	8	192	6.40	√
	Reduce clearance from conductor to Earth	6	5	6	180	6.00	√
	short circuit to ground	7	7	7	343	11.5	√
Loss Connection	Hotspot, damaged part, High induced current in IPB	4	5	5	100	3.40	-
	Arcing, Hotspot, Connection Damage (burn out), Water Intrusion.	5	5	5	125	4.20	-
Unproper Installation	Water Intrusion	8	8	7	448	15.0	√
	High induced current in IPB	6	5	7	210	7.10	√
Water Intrusion	Arcing, short circuit to ground	8	8	8	512	17.2	√
Debris/Foreign material	Arcing, short circuit to ground	3	3	4	36	1.20	-
Total					2978	100	91,2%

Table 4 indicted the RPN calculations for various failure modes of the IPB, based on the parameters of Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D). The RPN values are obtained by multiplying these three parameters, each rated on a scale from 1 to 10. The table also includes the Relative (%) values that indicate the contribution of each failure mode to the total RPN, as well as the history of disorders associated with each failure mode. Material degradation shows relatively high RPN values, especially for micro void inside resin (392), which indicates a significant risk if degradation occurs in vital components like resin. This failure mode has high severity (8), a moderate occurrence rate (7), and is difficult to detect (7). Other causes, such as short circuit to grounding and hotspot in material, produce lower RPN values but still represent considerable risks. The history of disturbances indicates that material degradation has occurred previously, requiring preventive maintenance and repair actions to prevent further damage. The material damage exhibits a significant RPN value for short circuit to ground (343), signifying that this failure mode is extremely important and warrants prioritization. The causes are evident, including material degradation and incorrect installation; nevertheless, the severity (6) is less pronounced in comparison to material degradation. The history of disruptions reveals previous instances of material deterioration, requiring more frequent inspections and repairs to prolong the system's longevity. The loss of connection exhibits comparatively lower RPN values than other failure types; yet, it remains a potential concern. The occurrence of hotspots and damaged components can compromise system reliability, albeit infrequently. This failure mechanism requires attention, despite its lower significance compared to water intrusion. Inadequate installation demonstrates a considerable RPN value. Failures resulting from water incursion and elevated induced current in the IPB pose dangers to the system. Although the incidence rate is reduced (occurrence 5), failures resulting from installation errors may cause enduring complications in the electrical system, necessitating remedial measures. Water intrusion possesses the highest RPN value among all failure modes, signifying a substantial risk to the system. Water penetration can undermine insulation integrity and lead to short circuits or damage to essential components inside the system. The severity (8) and incidence (8) rates of this failure mode designate it as the highest priority for preventive measures and maintenance to avert significant repercussions. Debris or foreign material possesses the lowest RPN value; yet, it remains a worry, albeit less frequently. The likelihood of arcing or short circuits due to the intrusion of extraneous materials into the system is comparatively diminished. Notwithstanding the reduced RPN, it necessitates oversight to prevent possible system

interruption. Of the 100% Relative Value available, there was an 8.8% reduction due to loss connection and debris/foreign material, resulting in a total of 91.2%.

3.4. RCFA Determination Result

Based on IPB's data on disruptions, most of the causes of disruptions were water ingress (5 times) and micro voids/decreased insulation of busducts (4 times). Using 5-Why analysis, we were able to identify the root causes of busduct failures in all operating units. The table 5 illustrates the 5-Why Analysis for the Isolated Phase Busduct (IPB) system and its failure modes, particularly focusing on issues such as water ingress in the sleeve, damaged gasket, loose bolt connections, and shorts to body or ground. This method is an appropriate technique in solving problems systematically, especially to identify the root cause of failure by asking "why" in succession to identify the problem to its roots. The main source of water entering the casing was identified as the absence of a blocking cover component and resulted in the failure. The lack of the flange cover is due to the part being missing since the Engineering, Procurement, Construction, and Commissioning (EPCC). The third explanation is that the component was not installed owing to an erroneous installation during the EPCC phase. The fourth inquiry finds that the presence of inexperienced people during the EPCC exacerbated the problem, while the fifth inquiry identifies the root cause as poor-quality control during the EPCC phase. The cascade "why" analysis reveals that the failure's root cause is poor management and training during the installation phase, resulting in missing components that jeopardize the system's integrity.

The damaged gasket indicates the primary cause, which is the deterioration of aging equipment. The gasket degradation is attributable to natural wear and tear, characteristic of aging equipment. Thirdly, there is no additional inquiry into the secondary or tertiary stages of this failure cause, as the deterioration of equipment is a predictable and inevitable concern. The fourth and fifth Why indicate that no additional study is necessary, as this pertains to routine maintenance and equipment lifecycle issues. The issue of aging equipment suggests that maintenance methods must be evaluated to anticipate wear and tear, ensuring that preventive measures are implemented during both the design and operating phases.

Table 5. IPB Failure Analysis using 5th step "Why"

Why				
1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Water Ingress in Sleeve	Missing Component (flange cover)	Part was missing since EPCC	Lack QC during EPCC	-
		Unproper Installation	Unskill person during EPCC	Lack QC during EPCC
	Damaged Gasket	Aging Equipment	-	-
	Loose bolt Connection	Unproper Installation	Unskill person during EPCC	Lack QC during EPCC
		Unproper Installation	Unskill person during EPCC	Limited person from OEM
		Operating Aging	-	-
Short to Body/ Ground	Crack Micro Void / in insulation	Unproper Mobilisation	-	-
		Unproper Installation	Lack QC During EPCC	-
		Manufacture Defect	-	-
	Water Ingress in sleeve	"See Above"	-	-
Humidity	Desiccant Bag Saturated	Lifetime	-	-
	No Heater	Manufacture design	-	-

The loose bolt connection represents a failure mode associated with inadequate installation. The second reason indicates that the poor installation resulted from untrained staff during the EPCC. The third inquiry indicates that the deficiency in unskilled labour was again attributed to insufficient quality control during the Engineering, EPCC phase. The fourth inquiry reveals an additional factor of inadequate staff from the OEM, signifying that the OEM team failed to supply sufficient resources or appropriate training during the installation process. This failure pattern highlights the significance of good installation and a proficient staff, emphasizing the necessity of personnel skill levels and quality control inspections during important phases such as installation.

Short circuit to the body/ground shows the main cause: Micro-gaps in insulation, which cause short circuits, are mostly caused by insufficient mobilization during installation. The second is that inadequate mobilization resulted from substandard installation procedures, which compromised the efficacy of the insulation. The third piece of evidence is that incompetent installation personnel during the setup process is another cause. The problem was compounded by inadequate quality control during the EPCC phase and certain manufacturing defects. Micro-gaps that cause serious and urgent short circuits in the installation procedure, especially in the assurance that the insulation is installed and carried out with appropriate repair procedures.

The 5-Why analysis provides a clear working guide for understanding the various failure modes of IPB systems. The main findings lie in inadequate installation and professional staffing is an actual issue, the need for improved training and quality, during critical periods of installation and maintenance. Material deterioration, damage to gaskets and insulation, should be considered in predictive maintenance activities to reduce equipment aging. Lack of quality control during EPCC was highlighted as a root cause of failure, emphasizing the need for strict quality assurance methods throughout the engineering, procurement and construction stages. Insufficient resources or inadequate training by OEM personnel were major concerns, indicating that OEMs should take a more proactive approach to guarantee proper installation and maintenance of equipment.

3.5. Analysis Result and Recommendations for Improvement

Historically, increased frequency of online maintenance has been associated with increased system complexity and vulnerability to disruption. Units IV and V require more frequent maintenance and a wider range of inspections than other Units, as they may operate under more severe conditions or be more susceptible to failure. The four-year offline maintenance activity step indicates that, while routine inspections are performed, detailed assessments are still required to ensure the optimal condition of the IPB system at all times. This offline maintenance can reduce the likelihood of serious damage and extend the system's overall operating life. The maintenance conducted on Units IV and V indicates a system characterized by greater complexity and reliability, whereas Unit I is less complex and necessitates maintenance less frequently.

The assessment results in this paper show the importance of risk management in IPB. Concentrating on failure modes with high RPN values is expected to result in more effective handling improvements, avoid substantial damage, and save downtime and maintenance operational costs in the long term. According to the RPN calculation results, water infiltration (512) is the highest risk failure mode that requires the most attention, followed by material damage (392) and damaged material (343). Although there are many failure modes with lower RPN, such as lost connections and debris, these modes must still be addressed to minimize the risk of more severe disruptions and maintain reliable system performance. The implementation of preventive maintenance activities is suggested to be better as early inspections according to RPN values eliminate damage. The FMEA results highlight critical areas for improvement in the IPB system, in training, quality assurance, and preventive maintenance strategies. By addressing these root causes, businesses may significantly reduce the frequency of outages and increase the reliability of their electrical systems.

Conclusion

Based on the observations and research undertaken at IPB across several geothermal power facilities, the following findings were reached:

1. Each unit employs a distinct maintenance approach for each IPB based on varying manufacturers, leading to an absence of complete data and a disconnection among the maintenance teams of each unit. Consequently, a standardized maintenance plan that encompasses several IPB brands is required.
2. The FMEA approach requires revision following the initial occurrence to reassess maintenance methods and avert recurrence of similar events.
3. The correlation of data in FMEA, RPN, and RCFA indicates that 91.2% of IPB disruptions can be effectively identified by the FMEA approach, based on the findings of the RCFA methods.
4. The FMEA and RCFA analyses indicate that factors to be addressed from the initial project phase to the operational phase, as well as the primary root causes to be eradicated to enhance IPB reliability, encompass manufacturing design, aging equipment, improper installation, insufficient quality control during EPCC, limited OEM personnel, and inadequate mobilization.

Acknowledgement

The author wishes to convey his appreciation to the team engaged in the reporting activities related to the research for the capstone design in electrical power engineering at Universitas Jenderal Achmad Yani.

Reference

- Al Marzooqi, F. A., Hussain, M., & Ahmad, S. Z. (2019). Performance of physical asset management using the analytic hierarchy process. *Property Management*, 37(3), 327–345. <https://doi.org/10.1108/PM-07-2018-0039>
- Alsyouf, I., Alsuwaidi, M., Hamdan, S., & Shamsuzzaman, M. (2021). Impact of ISO 55000 on organisational performance: evidence from certified UAE firms. *Total Quality Management and Business Excellence*, 32(1–2), 134–152. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1537750>

- Dolin, A. P. (2020). Diagnostic Examination of Isolated Bus Ducts. *Power Technology and Engineering*, 54(3), 444–449. <https://doi.org/10.1007/S10749-020-01230-X/METRICS>
- Eyuboglu, O. H., Dindar, B., & Gul, O. (2020). Risk Assessment by Using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Based on Power Transformer Aging for Maintenance and Replacement Decision. *Proceedings - 2020 IEEE 2nd Global Power, Energy and Communication Conference, GPECOM 2020*, 251–255. <https://doi.org/10.1109/GPECOM49333.2020.9247887>
- Fu, J., Yang, B., Wang, X., Feng, A., Cai, F., & Zhang, H. (2024). Mechanism Analysis of Insulator Fault in Enclosed Isolated Phase Bus Caused by Vibration. *The Proceedings of 2023 4th International Symposium on Insulation and Discharge Computation for Power Equipment (IDCOMPU2023)*, 1101, 349–355. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7401-6_34
- Hajiagha, S. H. R., Hashemi, S. S., Mohammadi, Y., & Zavadskas, E. K. (2016). Fuzzy belief structure based VIKOR method: An application for ranking delay causes of Tehran metro system by FMEA criteria. *Transport*, 31(1), 108–118. <https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1133454>
- Hatala, M. H., Sukarsono, B. P., & Nukertamanda, D. (2023). Risk and Reliability Improvement Analysis of Boiler System Using the Failure Mode Effect Analysis & Critical Analysis (FMECA) Method. *Spektrum Industri*, 21(1), 8. <https://doi.org/10.12928/SI.V21I1.98>
- Kamble, S. N., & Rajiv, B. (2022). Critical Analysis of Machine Condition Monitoring by Using Risk Priority Number and Analytical Hierarchy Process. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(2), 623–632. <https://doi.org/10.1007/S11668-022-01350-8/METRICS>
- Kim, K. O., & Zuo, M. J. (2018). Optimal allocation of reliability improvement target based on the failure risk and improvement cost. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.06.024>
- Li, Y., Sun, P., Li, H., Qu, L., Gong, J., & Huang, S. (2024). Coordinated Control of Intentional Islanding and Phase Sequence Exchange for Enhancing Transient Stability of Isolated Power Grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(5), 5205–5214. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3285993>
- Lu, P., Powrie, H. E., Wood, R. J. K., Harvey, T. J., & Harris, N. R. (2021). Early wear detection and its significance for condition monitoring. *Tribology International*, 159, 106946. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106946>
- Maletič, D., Maletič, M., Al-Najjar, B., & Gomišček, B. (2020). An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance. *Sustainability 2020*, Vol. 12, Page 9097, 12(21), 9097. <https://doi.org/10.3390/SU12219097>
- Mzougui, I., & El Felsoufi, Z. (2019). Proposition of a modified FMEA to improve reliability of product. *Procedia CIRP*, 84, 1003–1009. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.315>
- Patil, S. S., & Bewoor, A. K. (2021). Reliability analysis of a steam boiler system by expert judgment method and best-fit failure model method: a new approach. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 38(1), 389–409. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2020-0023>
- Patil, S. S., Bewoor, A. K., & Patil, R. B. (2021). Availability analysis of a steam boiler in textile process industries using failure and repair data: A case study. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.1115/1.4049007>
- Patil, S. S., Bewoor, A. K., Patil, R. B., Kumar, R., Ongar, B., Sarsenbayev, Y., PraveenKumar, S., Ibrahim, A. M. M., Alsoufi, M. S., & Elsheikh, A. (2022). A New Approach for Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Using ExJ-PSI Model—A Case Study on Boiler System. *Applied Sciences 2022*, 12(22), 11419. <https://doi.org/10.3390/APP122211419>
- Petrescu, L., Petrescu, M. C., Cazacu, E., & Ionita, V. (2021). Risk Priority Number vs Action Priority in Electrical Systems. *12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2021*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425178>
- Sheng, F. L., Thin Wei, C., Teng, T. L., & Chik Hooi, L. (2023). Recovered Scan Failure Investigation and Failure Mechanism Determination. *Proceedings of the International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, IPFA, 2023-July*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IPFA58228.2023.10249095>
- Siva Sathyanarayana, M., & Amarnath, J. (2012). Modelling and Analysis of Trajectories of A Wire Like Particle in A Three Phase Common Enclosure Gas Insulated Busduct (GIB) With Image Charges. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 1(5), 2249–8958. www.ijeat.org
- Wang, H., Zhao, Z., Dai, Z., Peng, Z., & Li, S. (2021). Using Data Mining and Root Cause Analysis Method for Failure Analysis in Electronic Components. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1043(2), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1043/2/022024>