

Mohamad Daffa Rivansyah, Muhammad Fauzan, dan Heriansyah Putra

Analisis Kerentanan *Shelter* Tsunami terhadap Beban Gempa dan Tsunami
Menggunakan Metode *Time History* dan *Incremental Dynamic Analysis*

Ferry Rusgiyarto, Jimmy Chandra, Adien Sekar Apriliani, dan Nadila Silviani

Analisis Kinerja dan Koordinasi Waktu Sinyal Dua Simpang Berdekatan di
Kota Cimahi

Ni Luh Saddhwi Saraswati Adnyani, Dini Hanifa Sari, Fouri Noviyanti Rayani, dan Savira Pratidina Lubis

Analisis Faktor-Faktor yang Memengaruhi Penggunaan *Mobile Banking* pada
Pengguna Laki-laki dan Perempuan dengan Menggunakan Pendekatan
Multigroup Structural Equation Modelling

Lutfi Firmansyah, Zahrul Mufrodi, dan Maryudi

Review: Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik dan Biomassa melalui Proses Pirolisis
sebagai Solusi Energi Alternatif dan Pengelolaan Sampah

Bersama Salamuddin Ginting, dan Asep Supriatna

Analisis Implementasi Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Bangunan Gedung Berbasis
Sistem Informasi Manajemen Bangunan Gedung (SIMBG) Di Kabupaten Bogor,
Jawa Barat

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

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

Zul Fakhri, Dedi, Kusnandar, Yuda Bakti Zainal, Irvan Budiawan, dan Asep Najmurrokhman

Rancang Bangun Sistem Penyortiran dan Pemantauan Anak Ayam Sehat dan Tidak
Sehat Berdasarkan Bobot dan Suhu menggunakan *Platform Internet-of-Things*

Hendriyana, Diva Amerya Agustin, dan Akmal Rahmawan

Synthesis Epoxy Fatty Acid Methyl Ester Using Combined Acid Catalyst

Andini Hizbiyati, dan Hendriyana

*Isothermal Pyrolysis Kinetics of Various Biomass Types using Thermogravimetric
Data*

TIM REDAKSI

- Editor In Chief : • Dr. Martijanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57217586993)
- Advisory Editorial Board : • Dr. Iris Mahani, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia. Scopus ID : 57197848218)
- Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Sinta ID : 133135)
- Editors : • Andri Rahmat Kumalasian Nasution, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6718339)
- Andini Hizbiyati, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- 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. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57218863103]
[ORCHID ID: 0000-0003-1711-5413] [SINTA ID: 5984218]
 - Prof. Dr. Ir. H. R. Anwar Yamin, M.T., M.E. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57222001511 &
57208864466] [SINTA ID: 6882330]
 - Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM.
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 15128239500]
 - Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, M.S.
(Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 43461203000]
 - Prof. Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg.
(Politeknik Negeri Bali, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189864100]
 - Prof. Dr. Suhartono, S.T., M.Si. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189075734]
 - Dr. Arief Nur Pratomo, S.T., M.T.
(Universitas Pertahanan, Indonesia) [SCOPUS ID: 57216756313]
 - Dr. Asep Najmurrokhman, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55919091000]
 - Dr. Budi Marpaung, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57211503173]
 - Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M.
(Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia) [SCOPUS ID: 23975188900]
 - Dr. Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 25638780900]
 - Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T.
(Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 56688583600]

- Dr. Eng. Dwi Hantoko., B.Sc., M.Sc. *
(King Fahd University of Petroleum and Minerals, Arab Saudi) [SCOPUS ID: 57203536113]
- Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng.
(Institut Pertanian Bogor, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195301854]
- Dr. Eng. Ir. Nur Indrianti, M.T.
(UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia) [SCOPUS ID: 15071306300]
- Dr. Fitri Hadiah, S.T., M.T., IPM *
(Universitas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57194602385)
- Dr. Haruman Wiranegara, S.T., M.T.
(Balai Besar Logam dan Mesin - Kementerian Perindustrian, Indonesia) [SINTA ID: 6714161]
- Dr. Hendy Suryana, S.T., M.T., IPM.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200332569]
- Dr. Heri Rustamaji, S.T., M.Eng.
(Universitas Lampung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57612717200] [SINTA ID: 6678798]
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T.
(Universitas Sriwijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57193694034]
- Dr. Ir. 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. Timothy rey Laheba, S.T., M.T. *
(Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Indonesia) [SINTA ID: 6725639]
 - Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T.
(Universitas Sebelas Maret, Indonesia) [SCOPUS ID: 37114996900]
 - Dr. Khoiruddin, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 55584284500]
 - Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6098629]
 - Dr. Putu Teta Prihartini Aryanti, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56951380600]
[ORCHID ID: 0000-0003-0200-418X] [SINTA ID: 6001600]
 - Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56582391600]
 - Dr. Sabhan Kanata, ST., M.Eng.
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57420428900]
 - Dr. Syah Alam, S.Pd., M.T.
(Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191903622]
 - Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T.
(Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia) [SCOPUS ID: 15838524700]
 - Erwin Lim, S.T., M.S., Ph.D. *
Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 36093026700]
 - Ir. Harry Ramza, MT., P.hD.
(Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189898100]
 - P. Y. M. Wibowo Nd, S.T., M.T., Ph.D.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55983351800]
 - Putu Doddy Sutrisna, S.T., M.T., Ph.D.
(Universitas Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 6504553709]
 - Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D.
(Politeknik Negeri Semarang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194209980]
 - Aji Gumilar, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6082397]
-

- Aji Putro Prakoso, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200571585]
[ORCHID ID: 0000-0002-7290-7352] [SINTA ID: 6747587]
- Annisa Uswatun Khasanah, S.T., M.Sc.
(Universitas Islam Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195477115]
- Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T.
(University of Electro-Communications (UEC), Jepang) [SCOPUS ID: 57188573899]
- Atik Charisma, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188567470] [SINTA ID: 6082832]
- Edwar, S.T., M.T.
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215427881]
- Handoko Rusiana Iskandar, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57194219446]
- Herman Budi Harja, S.T., M.T.
(Politeknik Manufaktur Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201665196]
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPM.
(Universitas Muslim Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 57201065526]
- Ir. Ketut Tomy Suhari, M.T., IPP.
(Institut Teknologi Nasional Malang, Indonesia) [SCOPUS ID: 57196485539]
- Ir. Nana Heryana, S.T., M.T., IPM.
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 35174665300]
- Khamaludin, S.T., M.T.
(Universitas Islam Syekh Yusuf, Indonesia) [SCOPUS ID: 57223191789]
- M. Reza Hidayat, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188573208]
- Naftalin Winanti, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200994613]
- Nirmawana Simarmata, S.Pd., M.Sc.
(Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57301196400]
- Nivika Tiffany Somantri, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6764716]

- Prima Sukma Yuana, S.T., M.T. *
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 59245400500] [SINTA ID: 6717152]
- Salita Ulitia Prini, S.T., M.T.
(Pusat Riset Telekomunikasi - BRIN, Indonesia) [SCOPUS ID: 57208581701]
- Sofyan Basuki, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6686946]
- Sussi, S.Si., M.T.
(Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215071175]
- Tommi Hariyadi S.T., M.T.
(Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 53263841200]
- Wahyu Setyo Pambudi, S.T., M.T.
(ITATS Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57202921245]

*Reviewer yang terlibat pada Vol 24, No 2, Tahun 2025

DAFTAR ISI

Analisis Kerentanan <i>Shelter</i> Tsunami terhadap Beban Gempa dan Tsunami Menggunakan Metode <i>Time History</i> dan <i>Incremental Dynamic Analysis</i> Mohamad Daffa Rivansyah, Muhammad Fauzan, Heriansyah Putra	94-104
Analisis Kinerja dan Koordinasi Waktu Sinyal Dua Simpang Berdekatan di Kota Cimahi Ferry Rusgiyanto, Jimmy Chandra, Adien Sekar Apriliani, Nadila Silviani	105-114
Analisis Faktor-Faktor yang Memengaruhi Penggunaan <i>Mobile Banking</i> pada Pengguna Laki-laki dan Perempuan dengan Menggunakan Pendekatan <i>Multigroup Structural Equation Modelling</i> Ni Luh Saddhwi Saraswati Adnyani, Dini Hanifa Sari, Fouri Noviyanti Rayani, Savira Pratidina Lubis	115-125
<i>Review</i>: Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik dan Biomassa melalui Proses Pirolisis sebagai Solusi Energi Alternatif dan Pengelolaan Sampah Lutfi Firmansyah, Zahrul Mufrodi , Maryudi	126-136
Analisis Implementasi Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Bangunan Gedung Berbasis Sistem Informasi Manajemen Bangunan Gedung (SIMBG) Di Kabupaten Bogor, Jawa Barat Bersama Salamuddin Ginting, Asep Supriatna	137-145
<i>Techno-Economic Assessment of Dimethyl Ether (DME) Production through Methanol Dehydration Process</i> Yessa Julyana, Hendriyana, Een Taryana, Handoko Iskandar, Xbal Meiprastyo	146-152
Rancang Bangun Sistem Penyortiran dan Pemantauan Anak Ayam Sehat dan Tidak Sehat Berdasarkan Bobot dan Suhu menggunakan <i>Platform Internet-of-Things</i> Zul Fakhri, Dedi Dedi, Kusnandar Kusnandar, Yuda Bakti Zainal, Irvan Budiawan, Asep Najmurrokhman	153-163
<i>Synthesis Epoxy Fatty Acid Methyl Ester Using Combined Acid Catalyst</i> Ervin Dwi Saputro, Sigit Yoewono Martowibowo, dan Gagan Ganjar Tabah	164-170
<i>Isothermal Pyrolysis Kinetics of Various Biomass Types using Thermogravimetric Data</i> Andini Hizbiyati, Hendriyana	171-178

DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 24 Nomor 2, bulan November 2025. Dalam edisi ini disajikan 9 (sembilan) 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 Kerentanan *Shelter* Tsunami terhadap Beban Gempa dan Tsunami Menggunakan Metode *Time History* dan *Incremental Dynamic Analysis*, (2) Analisis Kinerja dan Koordinasi Waktu Sinyal Dua Simpang Berdekatan di Kota Cimahi, (3) Analisis Faktor-Faktor yang Memengaruhi Penggunaan *Mobile Banking* pada Pengguna Laki-laki dan Perempuan dengan Menggunakan Pendekatan *Multigroup Structural Equation Modelling*, (4) *Review*: Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik dan Biomassa melalui Proses Pirolisis sebagai Solusi Energi Alternatif dan Pengelolaan Sampah, (5) Analisis Implementasi Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Bangunan Gedung Berbasis Sistem Informasi Manajemen Bangunan Gedung (SIMBG) Di Kabupaten Bogor, Jawa Barat, (6) *Techno-Economic Assessment of Dimethyl Ether (DME) Production through Methanol Dehydration Process*, (7) Rancang Bangun Sistem Penyortiran dan Pemantauan Anak Ayam Sehat dan Tidak Sehat Berdasarkan Bobot dan Suhu menggunakan *Platform Internet-of-Things*, (8) *Synthesis Epoxy Fatty Acid Methyl Ester Using Combined Acid Catalyst*, dan (9) Isothermal Pyrolysis Kinetics of Various Biomass Types using Thermogravimetric Data.

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 24 (2) 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 ketidaksempurnaan 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, November 2025

Dewan Redaksi

Analisis Kerentanan *Shelter* Tsunami terhadap Beban Gempa dan Tsunami Menggunakan Metode *Time History* dan *Incremental Dynamic Analysis*

Mohamad Daffa Rivansyah, Muhammad Fauzan, dan Heriansyah Putra

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian,

Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

1827rivansyah@apps.ipb.ac.id, fauzan@apps.ipb.ac.id, heriansyahptr@apps.ipb.ac.id

Abstrak

Palabuhanratu merupakan lokasi dengan risiko tinggi terhadap gempa berkekuatan 8,9 M_w dan tsunami setinggi 20 meter, dengan populasi sekitar 119.347 jiwa dan hingga 1,7 juta pengunjung tahunan. Penelitian ini menganalisis kerentanan *shelter* dengan menggunakan metode non linear *time history* dan *Incremental Dynamic Analysis* terhadap tiga rekaman gempa; Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku serta beban tsunami dengan variasi inundasi 2,5–20 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur mencapai kinerja IO terhadap gempa pada skala 1,0, namun mengalami peningkatan signifikan dalam simpangan atap akibat beban tsunami, terutama pada ketinggian 15 m. Kurva fragilitas memperlihatkan probabilitas kerusakan berat mencapai 95,6% dan potensi keruntuhan 10,93% pada tsunami dengan puing, sementara pada skenario tanpa puing probabilitas kerusakan berat hampir 0%. Temuan ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan beban puing dalam desain *shelter* tsunami serta memberikan dasar empiris untuk pengembangan kurva fragilitas pada struktur *shelter* tsunami.

Kata kunci: gempa, kerentanan struktur, *shelter*, *time history*, tsunami

Abstract

Palabuhanratu is a location with an elevated risk of an 8.9 M_w earthquake and a 20-meter tsunami, with a population of approximately 119,347 and up to 1.7 million annual visitors. This research analyzes the shelter's fragility using non-linear time history and Incremental Dynamic Analysis methods under three recorded earthquakes; Chi-Chi, Iwate, and Tohoku and tsunami loads with variations of 2.5–20 m inundation. The analysis results show that the structure satisfies IO performance against earthquakes at scale 1.0 but experiences a significant increase in roof drift due to tsunami loads and exceeds LS limit, especially at 15 m inundation height. The fragility curves show that the probability of extensive damage reaches 95.6% and the collapse probability 10.93% in the tsunami with debris, whereas in the scenario without debris the probability of extensive damage is almost zero. The findings confirm the importance of considering debris loads in tsunami shelter design and provide an empirical basis for the development of fragility curves for tsunami shelter structures.

Keywords: earthquake, structure fragility, shelter, time history, tsunami

1. Pendahuluan

Letak geografis Indonesia yang berada di pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, menyebabkan negara ini rawan terhadap gempa bumi dan tsunami (Tjandra, 2018). Aktivitas tektonik, khususnya pergerakan lempeng Eurasia dan Indo-Australia, dapat menyebabkan terjadinya patahan atau sesar subduksi aktif yang tersebar di beberapa wilayah di Indonesia (Suarbawa dkk., 2021). BMKG mencatat ada sekitar 295 sesar aktif yang mengelilingi Indonesia yang menjadikannya sangat rentan terhadap bencana alam, terutama gempa bumi dangkal di lautan yang berpotensi menyebabkan tsunami ke daratan. Menurut BNPB, 90% tsunami yang terjadi di Indonesia disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut, 9% oleh gunung berapi aktif yang meletus di bawah laut, dan 1% oleh longsor bawah laut (BNPB, 2023). Data Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) 2022 juga menunjukkan bahwa banyak wilayah di Indonesia, terutama daerah pesisir pantai, memiliki risiko tinggi terhadap gempa bumi dan tsunami (BNPB, 2022). Beberapa kejadian seperti gempa Aceh 2004 yang berkekuatan 9,1 M_w dan tsunami setinggi 30 meter menewaskan 227.898 korban jiwa, serta gempa Palu 2018 yang berkekuatan 7,5 M_w dan menewaskan 3.879 jiwa, menegaskan tingginya ancaman ini (Anggraini & Mardhatillah, 2020; Mutaqin dkk., 2020).

Palabuhanratu sebagai salah satu daerah pesisir selatan Jawa, menjadi salah satu wilayah yang rentan terhadap tsunami. Widiyantoro dkk., (2020) menunjukkan bahwa wilayah pesisir selatan Jawa memiliki tingkat seismik yang lemah dengan akumulasi regangan elastis yang tinggi sehingga memungkinkan pelepasan energi tiba-tiba dan berpotensi menyebabkan gempa berkekuatan 8,9 M_w dan tsunami setinggi 12-20 meter. Wilayah ini pernah dilanda beberapa gempa besar, seperti gempa pada 17 Juli 2006 yang berkekuatan 7,8 M_w menyebabkan tsunami setinggi 5-7 meter di Pangandaran, serta gempa pada 2 September 2009 yang melanda selatan Jawa Barat dengan kekuatan 6,8 M_w (Supendi dkk., 2023).

Palabuhanratu memiliki populasi 119.347 jiwa dan luas wilayah 94,60 km^2 , serta menjadi destinasi wisata dengan rata-rata 1,7 juta pengunjung per tahun

Info Makalah:

Dikirim : 04-14-25;

Revisi 1 : 06-18-25;

Diterima : 08-01-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-822-4664-3151

e-mail : heriansyahptr@apps.ipb.ac.id

(Utami dkk.,2019). Studi terbaru menyebutkan bahwa peristiwa *megathrust* besar berpotensi terjadi di wilayah ini dengan periode ulang 500 tahun (Supendi dkk.,2023). Elevasi lokasi rata-rata kurang dari 50 meter dan waktu tempuh evakuasi yang lebih dari 30 menit tergolong sangat jauh dalam situasi darurat (Ashar dkk.,2014). Oleh karena itu, diperlukan langkah mitigasi yang tepat, seperti pembangunan *shelter* permanen yang mudah dijangkau di daerah pesisir pantai.

Metode desain *shelter* yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada standar FEMA P-646 dengan analisis *non linear time history* menggunakan data rekaman gempa yang pernah terjadi. Kurva fragilitas juga dilakukan dengan menggunakan metode IDA untuk memodelkan respons struktur seiring dengan peningkatan beban (Rahman dkk.,2022). Metode desain konvensional hanya mengevaluasi struktur pada tingkat beban tertentu tanpa menggambarkan responsnya terhadap kejadian ekstrem. Dalam konteks bencana seperti gempa dan tsunami di Palabuhanratu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif. *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) memungkinkan evaluasi performa struktur secara non linear hingga mencapai kondisi keruntuhan sehingga sangat relevan untuk menilai ketahanan aktual *shelter* tsunami yang harus tetap berdiri dan berfungsi pasca bencana. Tsunami dengan puing dapat meningkatkan dampak signifikan pada struktur karena puing-puing yang terbawa tsunami memperparah kerusakan pada bangunan (FEMA, 2019). Hantaman puing dapat menyebabkan kerusakan parah terutama pada bagian bawah bangunan yang terdampak langsung tsunami. Penelitian oleh Pradana dkk.,(2015) menunjukkan bahwa struktur dengan lantai bawah terbuka dapat mengurangi dampak hidrodinamik karena aliran tsunami dapat melewati lantai pertama. Penelitian ini bertujuan menganalisis kerentanan struktur *shelter* terhadap gempa dan tsunami dengan menggabungkan standar desain Indonesia dan FEMA P-646 untuk merancang *shelter* sebagai fasilitas evakuasi vertikal yang tahan terhadap tsunami.

2. Metode

2.1. Lokasi dan Material

Penelitian ini diawali dengan perencanaan *shelter* yang berlokasi di Kecamatan Palabuhanratu, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat pada koordinat 7°03'00 LS dan 106°27'00 BT. Lokasi tersebut berupa terminal eksisting yang akan dialih fungsikan menjadi *shelter*. Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini, antara lain laptop yang dilengkapi perangkat lunak ETABS, Origin, dan Microsoft Office. Bahan-bahan yang digunakan, di antaranya berupa Peta Sumber dan Bahaya Gempa Tahun 2017, Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa, dan data-data rekaman gempa yang tersedia di situs PEER NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center) dan NHR3 (Natural Hazards Risks and Resiliency Research Center) dari tiga wilayah; antara lain gempa Chi-Chi, gempa Iwate, dan gempa Tohoku. Beberapa standar acuan atau peraturan yang digunakan, yaitu SNI 2847:2019 untuk perencanaan struktur beton bertulang, SNI 1726:2019 untuk ketahanan terhadap gempa, SNI 1727:2020 untuk beban desain minimum, FEMA P-646 untuk desain *shelter* tsunami, dan SNI 8899:2020 untuk pemilihan dan modifikasi rekaman gerakan tanah (gempa).

2.2. Preliminary Design

Tahap *preliminary design* menentukan dimensi awal elemen struktur balok, kolom, dan pelat lantai sesuai SNI 2847:2019. Selain itu, direncanakan pula ketinggian *shelter* berdasarkan FEMA P-646 dengan ketinggian inundasi acuan 5 m dan *freeboard* sebesar 3 m + 30% dari ketinggian inundasi. Tinggi bangunan *shelter* dihitung dengan Persamaan (1).

$$T = T_i + F = T_i + (3 + 30\% T_i) \quad (1)$$

2.3. Pemodelan Struktur dan Pembebanan

Struktur dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak ETABS dengan dimensi elemen yang ditentukan pada tahap *preliminary design*. Elemen struktur yang dimodelkan, antara lain kolom, balok, pelat lantai, tangga, dan *ramp*. Beban-beban direncanakan dan dianalisis berdasarkan SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan FEMA P-646. Beban gravitasi yang digunakan, antara lain beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*superimposed dead load*), beban hidup (*live load*), dan beban hujan (*rain load*).

2.4. Analisis Gempa (Respons Spektrum dan *Time History*)

Analisis respons spektrum dilakukan dengan dimasukkannya data respons spektrum dan parameter gempa sesuai lokasi, kemudian periode struktur ditentukan berdasarkan nilai maksimum antara periode maksimum dan periode hasil analisis ragam getar untuk kedua arah-x dan arah-y dengan kontrol ragam getar minimum 90% dari massa total bangunan. Gaya geser dasar dihitung untuk statis dan dinamis, dengan gaya geser dinamik yang perlu diskalakan jika kurang dari gaya geser statis. Simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi batas izin dan perlu disesuaikan dengan Kategori Desain Seismik (KDS) bangunan. Selain itu, analisis gempa dengan metode *time history* dilakukan menggunakan data rekaman gempa Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku. Data ini dimasukkan ke ETABS dan dilakukan

pencocokan spektrum dengan respons spektrum Palabuhanratu dalam rentang $0,2 T_{lower}$ hingga $2,0 T_{upper}$ untuk analisis non linear.

2.5. Pembebanan Tsunami dan Kerentanan Struktur

Shelter memiliki kategori risiko tsunami IV dengan variasi ketinggian inundasi 2,5–20 m (peningkatan setiap ketinggian 2,5 m) dengan beban yang dimodelkan, seperti hidrostatik, hidrodinamik, apung, impuls, dan hantaman puing. Faktor keutamaan tsunami (I_{TSU}) kategori IV sebesar 1,25. Beban tsunami dimasukkan setelah analisis gempa selesai dengan mempertimbangkan faktor *cracking* dan penurunan kekakuan pada elemen struktur. Setelah itu, dibuat kurva fragilitas untuk gempa dan tsunami dengan batas kerusakan HAZUS, serta analisis *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) dengan parameter PGA (*peak ground acceleration*) dan rasio simpangan antar lantai. Analisis statistik dilakukan untuk menghitung probabilitas kerusakan pada tiap level. Kurva fragilitas dibuat berdasarkan simpangan antar lantai akibat beban gempa dan tsunami pada berbagai inundasi, dengan batas kerusakan menurut HAZUS (ringan, sedang, berat, runtuh) dengan persentase simpangan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Batas kerusakan dan persentase simpangan akibat gempa dan tsunami (FEMA, 2022)

Kerusakan	Rasio Simpangan (%)
Ringan	<0,20
Sedang	0,20 – 0,50
Berat	0,50 – 1,20
Runtuh	1,20 – 2,80

Sementara itu, kurva fragilitas struktur dihasilkan dari hasil analisis yang dibuat dengan menggunakan beberapa parameter pada Persamaan (2)–(5).

$$\nu = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\mu}{\sqrt{1 + \nu^2}} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\ln(1 + \nu^2)} \quad (4)$$

$$P = \Phi \frac{\ln\left(\frac{x}{\theta}\right)}{\beta} \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pemodelan Struktur *Shelter* dan Kapasitasnya

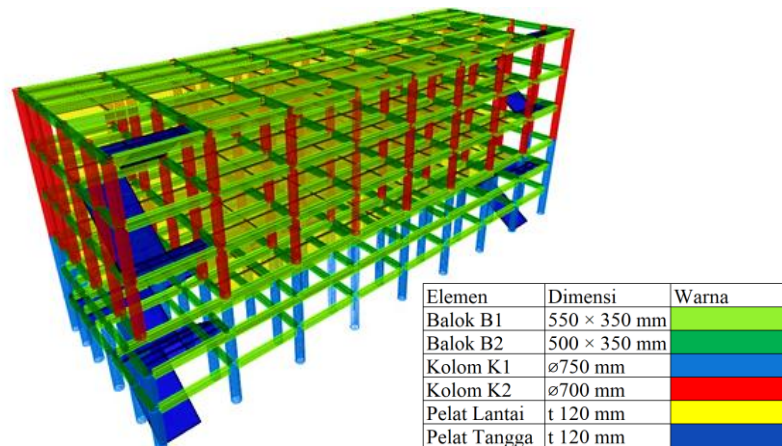
Shelter tsunami dirancang secara tipikal sesuai standar FEMA P-646 untuk evakuasi vertikal, berbentuk persegi panjang empat lantai dengan total luas 768 m² (48 m × 16 m) dan tinggi bangunan 21,5 m. Elevasi lantai pertama yang dapat ditempati ditetapkan setinggi 9,5 m berdasarkan ketinggian tsunami 5 m yang ditambah *freeboard* 3 m dan 30% dari ketinggian inundasi, sedangkan lantai dua hingga empat masing-masing setinggi 4 m. Lantai dasar *shelter* didesain terbuka dengan tujuan mengurangi tekanan hidrodinamik dari arus tsunami. Hal ini berdasarkan acuan FEMA P-646 dan penelitian Pradana dkk.,(2015), bahwa lantai dasar tanpa dinding memungkinkan aliran air melewati struktur tanpa menimbulkan tekanan dan *drag force* berlebih (FEMA, 2019). Selain itu, kolom dirancang berbentuk lingkaran sehingga mengurangi besaran bidang kontak gaya dengan gelombang tsunami (Tun dkk.,2022). Fasilitas *shelter* dilengkapi *ramp* dan tangga untuk akses evakuasi dengan detail spesifikasi elemen struktur dari hasil analisis yang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi dimensi elemen struktur

Elemen	Spesifikasi	Konfigurasi Tulangan	
		Longitudinal	Transversal
Balok B1	550 mm × 350 mm	8 D25	2D13-100/150
Balok B2	500 mm × 350 mm	4 D25	3D13-100/150
Kolom K1	D750 mm	26 D29	4D13-100/2D13-150
Kolom K2	D700 mm	26 D29	4D13-100/2D13-150

Elemen struktur, seperti kolom dan balok dimodelkan sebagai *frame* sedangkan pelat lantai dimodelkan sebagai *slab*. Momen inersia penampang beton ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 dengan reduksi efektivitas penampang terhadap sumbu pusat untuk kolom, balok, dan pelat lantai berturut-turut sebesar 0,70; 0,35; dan 0,25. Hal ini

dilakukan untuk memperhitungkan efek retakan (*cracking*), penurunan kekakuan, dan perilaku non linear beton bertulang dalam kondisi pembebanan lateral, seperti gempa dan tsunami lebih representatif (Vandecruys dkk.,2024). Hasil pemodelan struktur dapat dilihat pada Gambar 1 dan kapasitas *shelter* pada Tabel 3. **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.**



Gambar 1. Pemodelan Struktur *Shelter* dan Elemen Struktur

Tabel 3. Kapasitas Desain *Shelter* Tipikal

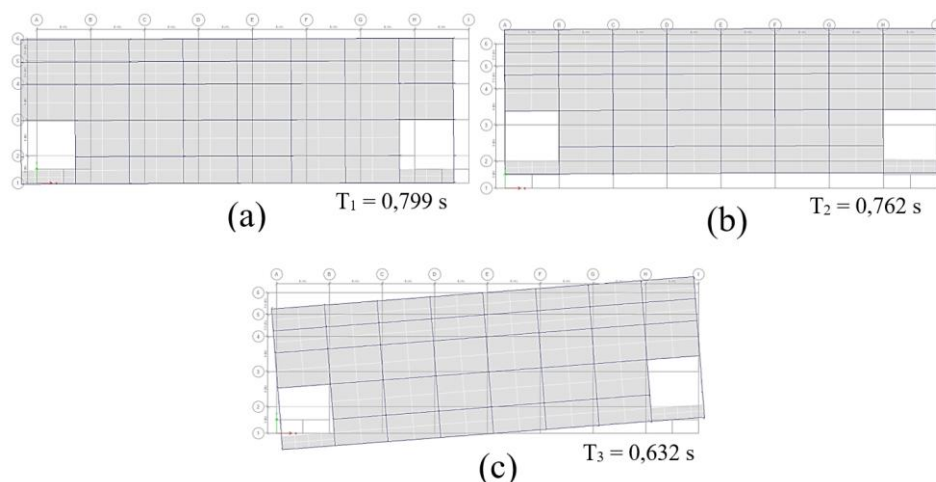
Luas lantai (m ²)	Lantai fungsional	Kapasitas (jiwa)	Penduduk terdampak* (jiwa)	Persentase tumpang (%)
768	4	3.072	47.400	6,48

*Penelitian Indira & Manessa, (2023)

Berdasarkan hasil pemodelan, *shelter* dirancang sebagai bangunan empat lantai dengan luas area mencapai 768 m². Dengan mengacu pada standar kepadatan evakuasi sebesar 1 m² per orang yang dianjurkan dalam FEMA P-646 (FEMA, 2019), kapasitas maksimal *shelter* ini adalah 3.072 jiwa. Angka ini mencerminkan jumlah maksimum pengungsi yang dapat tertampung secara aman dan efektif di dalam struktur, terutama saat terjadi tsunami dengan waktu evakuasi yang terbatas. Namun, ketika dibandingkan dengan estimasi populasi terdampak di wilayah pesisir Palabuhanratu yang mencapai sekitar 47.400 jiwa (Indira & Manessa, 2023), kapasitas *shelter* ini hanya mampu menampung sejumlah 6,48% dari total penduduk terdampak tsunami. Hal ini menunjukkan bahwa adanya *shelter* di pesisir pantai hanya berperan sebagai fasilitas pelindung sementara dan bukan solusi evakuasi massal. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi berupa pembangunan *shelter* tambahan dan peningkatan jalur evakuasi cepat ke daerah yang lebih tinggi.

3.2. Kontrol Desain Seismik Struktur

Hasil perencanaan struktur perlu dikontrol terhadap beberapa parameter, seperti pola ragam getar dan partisipasi massa, gaya geser dasar, dan simpangan antar lantai. Hal tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa struktur telah memenuhi dasar perencanaan sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Pola ragam getar struktur dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola Ragam Getar; (a) Pertama, (b) Kedua, dan (c) Ketiga

Gambar 2 menunjukkan pola ragam pertama dan kedua bergerak translasi ke arah sumbu-x dan sumbu-y dengan periode masing-masing 0,799 detik dan 0,762 detik, sedangkan pola ragam ketiga menunjukkan gerak rotasi dengan periode 0,632 detik. Hal ini menunjukkan bahwa struktur lebih kaku pada sumbu-y dibandingkan sumbu-x (Mentari, 2020). Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi periode natural struktur, seperti ketinggian bangunan, kekakuan bangunan, dan getaran gempa (Kaplan dkk.,2021). Selain pola ragam, partisipasi massa juga menjadi faktor penting yang perlu memenuhi minimal 90% dari total massa struktur untuk translasi dan rotasi. Data partisipasi massa disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Partisipasi Massa Setiap Pola Ragam Getar

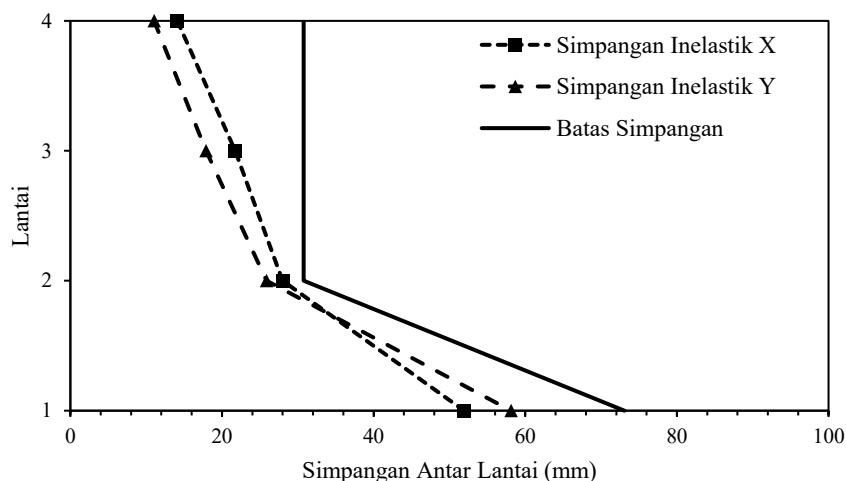
Ragam getar	Periode (detik)	Translasi		Rotasi
		Arah-x	Arah-y	Sumbu-z
1	0,799	90,85%	0,04%	0,07%
2	0,762	90,88%	93,92%	0,19%
3	0,632	90,99%	93,41%	93,07%

Tabel 4 menunjukkan partisipasi massa untuk ragam getar pertama hingga ketiga. Ragam getar pertama memenuhi syarat untuk translasi sumbu-x, ragam kedua memenuhi untuk sumbu-x dan sumbu-y, serta ragam ketiga memenuhi untuk semua derajat kebebasan. Dengan demikian, partisipasi massa struktur *shelter* terpenuhi untuk setiap arah pada ragam ketiga dengan periode 0,632 detik. Selain itu, SNI 1726:2019 juga menjelaskan bahwa besarnya gaya geser dasar dinamik perlu memenuhi setidaknya sama besar dengan gaya geser statik. Penskalaan gaya geser dasar dinamik diperlukan jika tidak memenuhi persyaratan. Hasil analisis gaya geser dasar disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Koreksi Nilai Gaya Geser Dasar

Statik (kN)	Dinamik X (kN)	Dinamik Y (kN)	Faktor Skala
4.482,62	4.103,84	4.205,15	1,10

Tabel 5 menunjukkan bahwa gaya geser dasar statik lebih besar dibandingkan dinamik untuk arah-x dan arah-y. Besarnya gaya geser dasar dinamik tidak memenuhi persyaratan sehingga diperlukan faktor skala baru, yaitu sebesar 1,10 untuk memenuhi nilai $V_{statik} \leq V_{dinamik}$. Selanjutnya, kontrol yang dilakukan berupa simpangan antar lantai. Batas izin simpangan dipengaruhi oleh kategori struktur dan kategori desain seismik (KDS) yang direduksi dengan faktor redundansi ($\rho = 1,3$) pada KDS D sehingga batas simpangan lantai pada struktur *shelter* ditetapkan sebesar 0,77% tinggi lantai. Gambar 3 menunjukkan bahwa simpangan antar lantai masih memenuhi batas izin pada arah-x dan arah-y. Nilai simpangan arah-x lebih besar daripada arah-y karena bentang arah-x yang lebih panjang sehingga inersia arah-y lebih besar (Schwarz dkk.,2020).



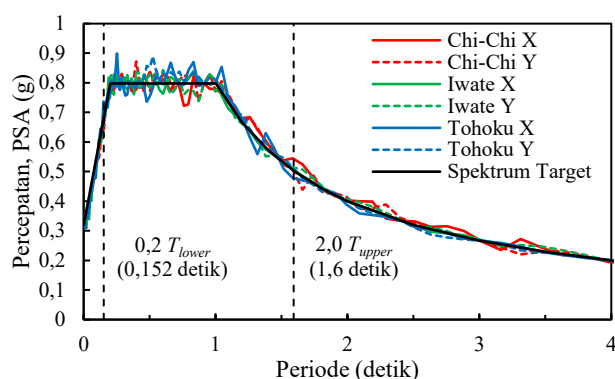
Gambar 3. Simpangan antar lantai

3.3. Analisis *Time History* dan Beban Tsunami

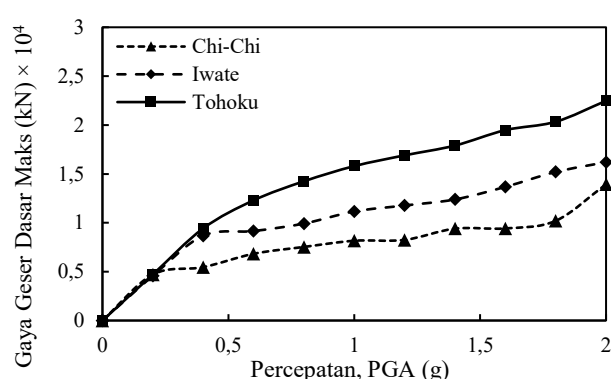
Analisis non linear *time history* dilakukan dengan menggunakan tiga data rekaman gempa dari tiga sumber, yaitu sesar dangkal, benioff, dan *megathrust*. Persyaratan pemilihan data gempa didasarkan pada Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Struktur Tahan Gempa dari parameter magnitudo (M),

jarak patahan (R_{rup}), dan cepat rambat gelombang geser rata-rata (v_{s30}). Rekaman gempa yang dipilih berdasarkan relevansi terhadap lokasi penelitian di Palabuhanratu, yaitu gempa Chi-Chi (1996) dengan magnitudo 6,2 M_w , gempa Iwate (2008) magnitudo 7,4 M_w , dan gempa Tohoku (2011) magnitudo 9,12 M_w . Ketiga spektrum gempa tersebut dilakukan penskalaan atau pencocokan spektral (*spectral matching*) sesuai dengan spektrum respons target Palabuhanratu berdasarkan SNI 8899:2020 dalam rentang periode 0,2 T_{lower} hingga 2,0 T_{upper} seperti pada Gambar 4 (BSN, 2020).

Pencocokan spektral untuk analisis non linear memiliki syarat bahwa spektrum rekaman gempa harus lebih besar daripada spektrum respons target dalam rentang periode 0,2 T_{lower} hingga 2,0 T_{upper} (0,152–1,60 detik). Gambar 4 menunjukkan spektrum respons gerakan tanah sebagai percepatan semu (*pseudo spectral acceleration*) dengan redaman 5% yang cocok dengan spektrum respons target. Penelitian Kurniawandy dkk.,(2023) dan Manfredi dkk.,(2022) juga menekankan bahwa pencocokan spektral rekaman gempa dalam analisis dinamik non linear digunakan untuk memastikan bahwa rekaman yang digunakan sesuai serta lebih efektif dibandingkan penskalaan amplitudo dalam menyesuaikan rekaman gempa dengan spektrum desain. Respons struktur untuk ketiga gempa disajikan dalam parameter gaya geser dasar dan PGA. Gaya geser dasar meningkat hampir linear pada PGA rendah (0,2 hingga 0,4 g) tetapi menjadi non linear setelahnya. Hubungan gaya geser dasar dan PGA dapat dilihat pada Gambar 5.

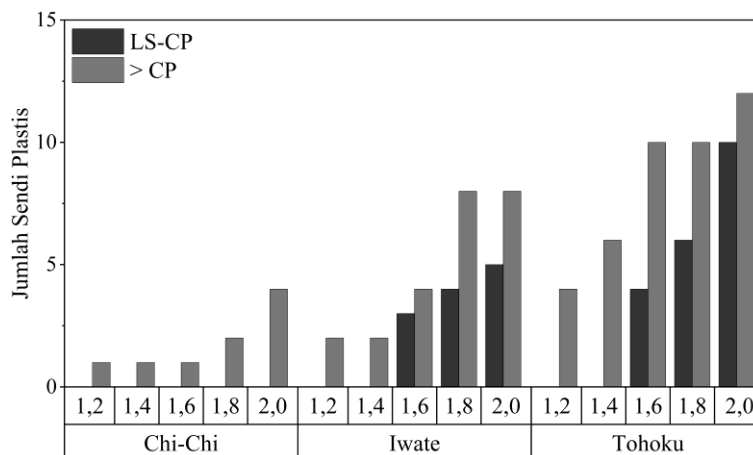


Gambar 4. Pencocokan spektrum gempa dan target



Gambar 5. Respons gaya geser dasar dan PGA

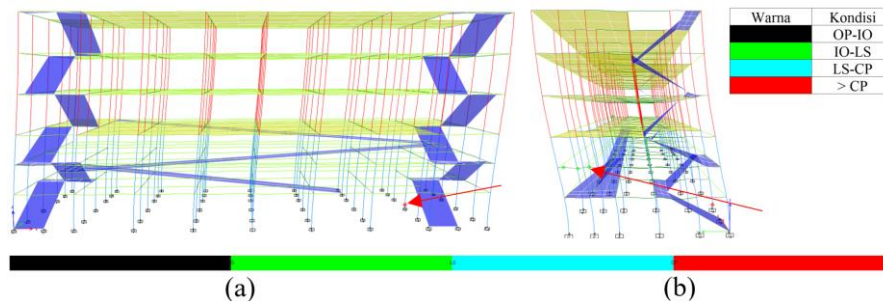
Gambar 5 menunjukkan gaya geser dasar maksimum akibat ketiga gempa pada PGA 1,0 g yang masing-masing sebesar 8.158,92 kN; 11.157,24 kN; dan 15.796,42 kN. Chi-Chi memiliki magnitudo terendah (6,2 M_w) dan durasi terpendek (80 detik) sehingga menghasilkan gaya geser dasar terendah. Peningkatan gaya geser dasar tidak selalu linear karena struktur akan mengalami fase non linear akibat deformasi plastis (Suwondo dkk.,2021). Struktur *shelter* pada skala gempa 0,2 hingga 1,0 masih berada dalam fase elastis, dengan elemen kolom dan balok belum membentuk sendi plastis sehingga aman untuk digunakan setelah gempa karena berada pada level kinerja *Immediate Occupancy* (IO). Sendi plastis mulai terbentuk pada skala 1,2 hingga 2,0 untuk level LS (*Life Safety*) dan CP (*Collapse Prevention*) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Jumlah sendi plastis yang terbentuk (skala gempa 1,2–2,0)

Gambar 6 menunjukkan jumlah sendi plastis untuk level kinerja LS (*Life Safety*) hingga CP (*Collapse Prevention*). Gempa Chi-Chi tidak menghasilkan sendi plastis pada level LS-CP, dengan sendi plastis penyebab keruntuhan (> CP) sebanyak empat buah pada skala gempa 2,0. Gempa Iwate menghasilkan terbentuknya sejumlah 8 sendi plastis

penyebab keruntuhan pada skala yang sama, sementara gempa Tohoku menghasilkan sendi plastis pada elemen struktur dengan jumlah terbanyak, yaitu 12 buah. Dengan demikian, struktur *shelter* menunjukkan kinerja terbaik terhadap gempa Chi-Chi karena jumlah sendi plastis yang terbentuk paling minimum dibandingkan dengan Iwate dan Tohoku. Ilustrasi terbentuknya sendi plastis pada elemen struktur *shelter* dapat dilihat pada Gambar 7.



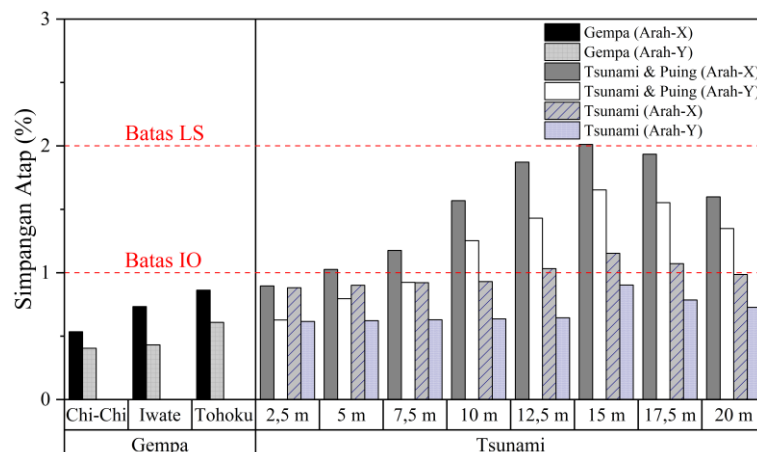
Gambar 7. Sendi plastis pada struktur *shelter*; (a) arah-x, (b) arah-y

Selanjutnya, perhitungan beban tsunami dibagi menjadi beberapa variasi ketinggian inundasi, yaitu 2,5–20 m dengan peningkatan setiap 2,5 m. Jenis beban yang diperhitungkan berupa beban hidrostatik, hidrodinamik, impuls, apung (*buoyancy*), dan hantaman puing. Besarnya beban-beban tersebut disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Besaran Beban Tsunami yang Diperhitungkan pada Struktur

Beban	Notasi	Besaran gaya untuk setiap inundasi (kN)							
		2,5 m	5 m	7,5 m	10 m	12,5 m	15 m	17,5 m	20 m
Hidrostatik	F_{hs}	6,48	84,03	249,24	502,11	842,63	1.270,82	1.786,68	2.390,19
Hidrodinamik	F_d	0,23	6,05	19,65	41,03	70,19	107,14	151,86	204,36
Impuls	F_s	0,35	9,08	29,48	61,55	105,29	160,70	227,79	306,54
Hantaman Puing	F_i	428,63	1.049,92	1.421,60	1.714,52	1.964,22	2.185,59	2.386,51	2.571,77

Beban tsunami yang berdampak signifikan pada struktur disebabkan oleh hantaman puing karena terjadi secara tiba-tiba dan sulit diprediksi. Sementara itu, beban apung dihitung untuk setiap elemen struktur, seperti kolom, balok, dan pelat lantai dengan nilai distribusi gaya yang lebih besar untuk komponen yang lebih besar atau panjang. Beban-beban tsunami tersebut berdampak pada deformasi struktur yang meningkat seiring dengan peningkatan ketinggian inundasi. Perbandingan simpangan atap akibat gempa dan tsunami dapat dilihat pada Gambar 8.



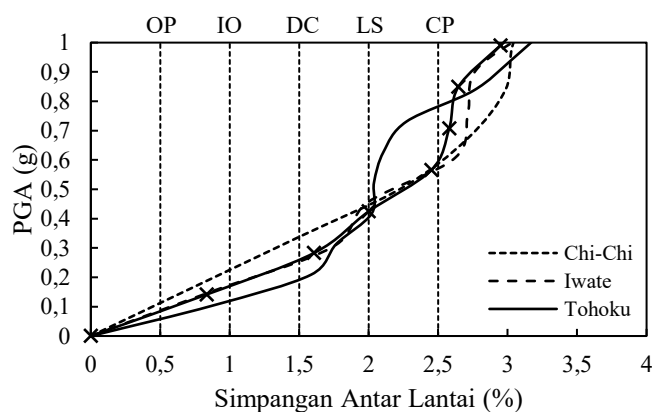
Gambar 8. Simpangan Atap Akibat Gempa dan Tsunami

Gambar 8 menunjukkan perbandingan simpangan atap akibat gempa dan tsunami. Simpangan atap akibat ketiga gempa (Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku) pada skala 1,0 masih berada di bawah batas level kinerja *Immediate Occupancy* (1%). Namun, setelah dikenai tsunami, simpangan atap meningkat signifikan. Beban tsunami dengan puing menghasilkan simpangan hingga 2,01% pada arah-x dan 1,65% pada arah-y, bahkan melebihi batas *Life Safety* (2%) pada ketinggian 15 m. Sebaliknya, tsunami tanpa puing menghasilkan simpangan maksimum sebesar 1,15% (arah-x) dan 0,90% (arah-y) pada ketinggian inundasi 15 m. Nilai simpangan arah-x lebih besar karena kekakuan arah-y yang lebih tinggi. Tren peningkatan simpangan tercatat hingga ketinggian inundasi 15 m, lalu menurun pada 20 m karena distribusi gaya lateral ke seluruh struktur. Fenomena ini didukung oleh penelitian Rossetto dkk.,(2019) dan Lahcene dkk.,(2021) yang melaporkan bahwa skenario tsunami dengan ketinggian inundasi lebih dari 8 m menghasilkan deformasi yang terkonsentrasi di bagian bawah hingga tengah dengan probabilitas kerusakan yang meningkat

signifikan saat gaya lateral mencapai tinggi tengah struktur akibat fokus pada zona kritis. Kontribusi beban tsunami terhadap deformasi sangat dominan yang dapat dilihat pada gempa yang hanya menghasilkan simpangan 0,40–0,86%, tsunami dapat meningkatkannya hingga 63%. Hal ini sejalan dengan laporan Sutarja dkk.,(2021) yang mencatat kontribusi tsunami terhadap deformasi akhir mencapai 70–80%. Tsunami mulai berdampak signifikan saat ketinggian inundasi melebihi 7,5 m yang menyebabkan deformasi melampaui batas IO. Beban tambahan dari puing memperbesar dampak yang sangat signifikan. Ketinggian inundasi tsunami 12,5 m tanpa puing menghasilkan simpangan sebesar 1,03% (arah-x) dan 0,64% (arah-y) tetapi mengalami peningkatan hingga 55% menjadi 1,87% (arah-x) dan 1,43% (arah-y) dengan adanya puing. Hal ini sejalan dengan temuan Isobe & Tanaka, (2021) serta Tun dkk.,(2022) bahwa benturan puing besar seperti kendaraan dan kontainer dapat memperparah kerusakan struktur. Penelitian Macabuag dkk.,(2018) dan Mas dkk.,(2020) juga menegaskan bahwa efek benturan dan drag akibat puing merupakan faktor utama menurunkan kinerja struktur saat tsunami.

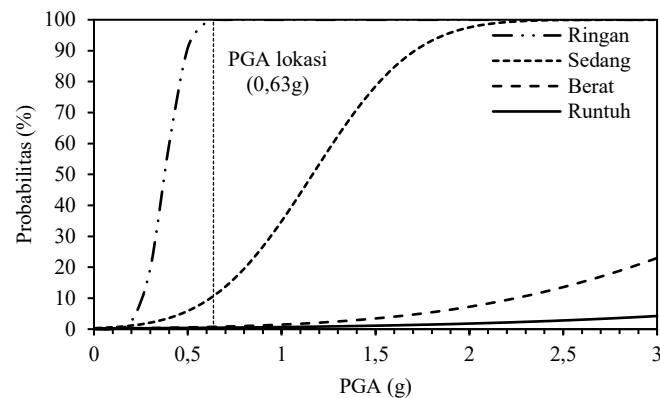
3.4. Incremental Dynamic Analysis dan Kerentanan Struktur

Analisis IDA menggunakan parameter PGA dan rasio simpangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil analisis menunjukkan karakteristik respons berbeda untuk masing-masing gempa. Gempa Chi-Chi yang berdurasi panjang dan memiliki frekuensi menengah menyebabkan deformasi signifikan pada skala tinggi dan kerusakan yang terakumulasi. Gempa Iwate menghasilkan getaran awal besar tetapi perilaku inelastik membatasi lonjakan simpangan saat intensitas meningkat. Sementara itu, gempa Tohoku dengan durasi terpanjang dan energi tinggi mempercepat kerusakan inelastik akibat pembebanan berulang setelah fase *yield* (Tjandra, 2018).

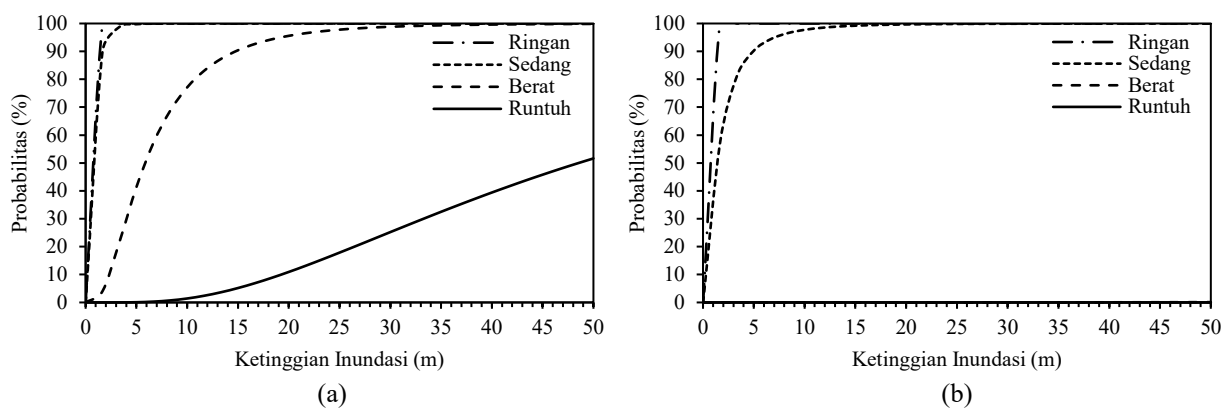


Gambar 9. Kurva *Incremental Dynamic Analysis Shelter*

Gambar 9 menunjukkan bahwa kurva terlihat linear untuk PGA rendah (0,1 hingga 0,3 g) yang dilanjutkan dengan fase *yield*. Gempa Tohoku menghasilkan simpangan terbesar karena durasi yang panjang dan frekuensi tinggi sehingga memicu struktur mengalami penurunan kekakuan dan kekuatan terhadap deformasi (Wang dkk.,2021). Analisis kerentanan struktur dilakukan dengan mengembangkan kurva IDA menjadi kurva fragilitas untuk gempa dan tsunami. Kurva fragilitas dihasilkan dari ketiga data rekaman gempa dan tsunami dari ketinggian inundasi 2,5–20 m dengan peningkatan ketinggian 2,5 m. Kurva fragilitas struktur *shelter* akibat gempa (Gambar 10) menunjukkan hasil probabilitas kerusakan struktur untuk PGA 0,63 g di Palabuhanratu. Probabilitas kerusakan yang dihasilkan pada PGA tersebut, untuk kerusakan ringan, sedang, berat, hingga runtuh berturut-turut sebesar 99,71%; 10,42%; 0,73%; dan 0,46%. Dengan demikian, struktur dinyatakan aman terhadap gempa karena hanya mengalami kerusakan ringan apabila dikenakan gempa dengan PGA 0,63 g. Sementara itu, kurva fragilitas *shelter* akibat tsunami dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Kurva Fragilitas *Shelter* Akibat Gempa



Gambar 11. Kurva Fragilitas *Shelter* Akibat Tsunami; (a) Tsunami dengan Puing, dan (b) Tsunami tanpa Puing

Kurva fragilitas tsunami dibedakan antara skenario dengan dan tanpa puing. Pada tsunami dengan puing (Gambar 11a), terjadi peningkatan signifikan terhadap kemungkinan kerusakan seiring bertambahnya tinggi gelombang. Pada ketinggian 2,5 m; probabilitas kerusakan ringan mencapai 100%; sedang 94,4%; berat 12,9%; dan keruntuhan 0%. Namun, pada ketinggian 20 m, kerusakan berat meningkat menjadi 95,6% dan runtuh mencapai 10,93%. Sebaliknya, tsunami tanpa puing (Gambar 11b) menunjukkan dampak yang jauh lebih ringan dengan probabilitas kerusakan berat hanya mencapai 0,1% dan tidak ada potensi keruntuhan bahkan hingga ketinggian inundasi 50 m. Meskipun demikian, probabilitas kerusakan ringan sudah mencapai 100% pada ketinggian inundasi 2,5 m dan kerusakan sedang memiliki probabilitas di atas 90% untuk ketinggian inundasi 5 m. Perbandingan ini menunjukkan bahwa keberadaan puing memiliki peran krusial dalam meningkatkan kerusakan struktur, sejalan dengan temuan Macabuag dkk.,(2018) dan Tun dkk.,(2022).

Perbedaan signifikan antar skenario menunjukkan bahwa *shelter* lebih rentan terhadap beban tsunami dibandingkan gempa, terlebih pada tsunami yang membawa puing berukuran besar seperti kendaraan, kayu, atau puing bangunan. Gaya hantam yang ditimbulkan puing secara signifikan meningkatkan deformasi dan potensi kegagalan struktural. Hal ini menjadi tantangan tersendiri dalam desain *shelter* tsunami terutama di wilayah pesisir dengan potensi adanya puing yang sangat tinggi. Meskipun pendekatan probabilistik melalui kurva fragilitas ini memberikan gambaran yang baik terhadap potensi kerusakan struktur tetapi masih terdapat ruang pengembangan. Studi Mas dkk.,(2020) menunjukkan bahwa kerentanan struktur dapat sangat bervariasi antar lokasi. Misalnya, tsunami 2 m di Kota Palu memicu probabilitas 70% kerusakan yang jauh lebih tinggi dibandingkan di Kota Banda Aceh yang hanya 20% pada ketinggian tsunami yang sama. Hal ini dipengaruhi oleh bentuk struktur, arah datangnya gelombang, serta kondisi lokal seperti geometri pantai dan densitas bangunan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk menyempurnakan model fragilitas, termasuk dengan pendekatan empiris, variasi bentuk puing, arah gelombang, dan evaluasi struktur pasca-gempa agar hasilnya lebih representatif dan aplikatif untuk perencanaan *shelter* tsunami.

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa *shelter* tsunami empat lantai dengan luas 768 m² dan tinggi 21,5 m menunjukkan kinerja struktural yang baik terhadap gempa. Berdasarkan analisis non linear terhadap tiga skenario gempa (Chi-Chi, Iwate, dan Tohoku), struktur berada pada level *Immediate Occupancy* pada skala 1,0 tanpa terbentuknya sendi plastis, sesuai dengan ketentuan FEMA P-646 sehingga *shelter* dapat langsung difungsikan pasca

gempa. Namun, kapasitas *shelter* yang hanya mencakup 6,48% dari estimasi populasi terdampak tsunami di Palabuhanratu membuatnya lebih berfungsi sebagai perlindungan sementara daripada solusi evakuasi massal. Beban tsunami menunjukkan dampak yang lebih signifikan terhadap deformasi struktur, terutama saat tinggi inundasi melebihi 7,5 m. Simpangan atap maksimum mencapai 2,01% dan meningkat hingga 55% jika gelombang membawa puing. Kurva fragilitas menunjukkan kerentanan struktur terhadap tsunami jauh lebih tinggi dibandingkan gempa dengan probabilitas kerusakan berat mencapai 95,6% dan runtuh 10,93% pada skenario tinggi inundasi 20 m dengan puing, sementara skenario tsunami tanpa puing menunjukkan kerusakan berat hanya 0,1%. Temuan ini menegaskan pentingnya memasukkan pengaruh puing dalam desain *shelter* tsunami. Untuk meningkatkan keandalannya, diperlukan pengembangan desain berdasarkan variasi konfigurasi struktur, pembebanan gempa-tsunami secara berurutan (*sequential loading*) serta kajian empiris lapangan guna membangun kurva fragilitas yang lebih akurat dan kontekstual terhadap risiko nyata di lapangan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas organisasi A atas dukungan finansialnya pada penelitian ini dan organisasi B atau dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada ahli C atas diskusinya yang bermanfaat.

Daftar Notasi

- T = tinggi *shelter* dari tanah [m]
 F = *freeboard* [m]
 T_i = tinggi inundasi gelombang tsunami [m]
 v = koefisien varians batas kerusakan (*damage state*)
 σ = simpangan baku batas kerusakan (*damage state*)
 μ = rata-rata (*mean*) batas kerusakan (*damage state*)
 Φ = fungsi distribusi normal standar
 P = probabilitas kerusakan [%]
 x = parameter intensitas; PGA dan ketinggian inundasi
 θ = median intensitas
 β = nilai ketidakpastian (*uncertainty*)

Daftar Pustaka

- Anggraini, A., & Mardhatillah, E. (2020). Perubahan stress statis gempa utama dan asosiasi distribusi gempa susulan: Studi kasus gempa Palu Mw 7,5 28 September 2018. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(1), 38–42.
- Ashar, F., Amaratunga, D., & Haigh, R. (2014). The analysis of tsunami vertical shelter in Padang City. *Procedia Economics and Finance*, 18, 916–923. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)01018-1](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)01018-1)
- BNPB. (2022). IRBI (Indeks Risiko Bencana Indonesia) (Vol. 1, Issue 1). Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- BNPB. (2023). RBI: Risiko Bencana Indonesia “Memahami Risiko Sistemik di Indonesia.” In BNPB. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- BSN. (2020). Tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung tahan gempa. In Badan Standarisasi Nasional 8899:2020. Badan Standardisasi Nasional.
- FEMA. (2019). Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation From Tsunamis 3rd Edition (Issue August). Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2022). Hazus Earthquake Model Technical Manual (Hazus 5.1). In The Hazus Loss Estimation Methodology (Issue July). Federal Emergency Management Agency.
- Indira, I., & Manessa, M. D. M. (2023). Generating Evacuation Route for Tsunami Evacuation Based on Megathrust Scenario Hazard Model in Palabuhanratu Village, Sukabumi, West Java. *International Journal of Disaster Management*, 6(1), 35–48. <https://doi.org/10.24815/ijdm.v6i1.31148>
- Isobe, D., & Tanaka, S. (2021). Sequential simulations of steel frame buildings under multi-phase hazardous loads during earthquake and tsunami. *Frontiers in Built Environment*, 7(May), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.669601>
- Kaplan, O., Guney, Y., & Dogangun, A. (2021). A period-height relationship for newly constructed mid-rise reinforced concrete buildings in Turkey. *Engineering Structures*, 232(January), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111807>
- Kurniawandy, A., Aminsyah, M., Cahyadi, B. U., & Djauhari, Z. (2023). Comparative study of the simulation ground motion by amplitude scale and spectral matching. *E3S Web of Conferences*, 464, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346402007>
- Lahcene, E., Ioannou, I., Suppasri, A., Pakoksung, K., Paulik, R., Syamsidik, S., Bouchette, F., & Imamura, F. (2021). Characteristics of building fragility curves for seismic and non-seismic tsunamis: Case studies of the 2018

- Sunda Strait, 2018 Sulawesi-Palu, and 2004 Indian Ocean tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(8), 2313–2344. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2313-2021>
- Macabuag, J., Rossetto, T., Ioannou, I., & Eames, I. (2018). Investigation of the effect of debris-induced damage for constructing tsunami fragility curves for buildings. *Geosciences (Switzerland)*, 8(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/geosciences8040117>
- Manfredi, V., Masi, A., Özcebe, A. G., Paolucci, R., & Smerzini, C. (2022). Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10), 4961–4987. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01393-0>
- Mas, E., Paulik, R., Pakoksung, K., Adriano, B., Moya, L., Suppasri, A., Muhari, A., Khomarudin, R., Yokoya, N., Matsuoka, M., & Koshimura, S. (2020). Characteristics of tsunami fragility functions developed using different sources of damage data from the 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 177(6), 2437–2455. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02501-4>
- Mentari, S. (2020). Respon struktur gedung bertingkat banyak dengan layout persegi panjang menggunakan dinding geser di perimeter bagian luar dan bagian dalam. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(2), 157–171. <https://doi.org/10.28932/jts.v16i2.2772>
- Mutaqin, B. W., Amri, I., & Aditya, B. (2020). Pola kejadian tsunami dan perkembangan manajemen bencana di Indonesia setelah Tsunami Samudra Hindia Tahun 2004: Sebuah tinjauan. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 11(2), 73–85.
- Pradana, A. B., Saputra, R. P., Indarto, H., & Nurhuda, I. (2015). Desain struktur Tempat Evakuasi Sementara tsunami Di Bengkulu. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 4(4), 69–84.
- Rahman, F., Idris, Y., Abdullah, A., & Asyifa, C. N. (2022). Pengembangan kurva kerapuhan berbasis Incremental Dynamic Analysis pada bangunan tipikal Puskesmas di Kota Banda Aceh terhadap bahaya gempa. *Journal of The Civil Engineering Student*, 4(3), 246–252. <https://doi.org/10.24815/journalces.v4i3.21275>
- Rossetto, T., De la Barra, C., Petrone, C., De la Llera, J. C., Vásquez, J., & Baiguera, M. (2019). Comparative assessment of nonlinear static and dynamic methods for analysing building response under sequential earthquake and tsunami. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(8), 867–887. <https://doi.org/10.1002/eqe.3167>
- Schwarz, G. M., Yang, K. P., Chou, C., & Chiu, Y. J. (2020). A classification of structural inertia: Variations in structural response. *Asia Pacific Journal of Management*, 37(1), 33–63. <https://doi.org/10.1007/s10490-018-9588-6>
- Suarbawa, K. N., Sukarasa, I. K., & Riyono, E. (2021). Identifikasi deformasi Pulau Bali berdasarkan rekaman data GPS, menggunakan software GAMIT/GLOBK 10.6. *Buletin Fisika Vol*, 22(1), 47–52.
- Supendi, P., Widiyantoro, S., Rawlinson, N., Yatimantoro, T., Muhari, A., Hanifa, N. R., Gunawan, E., Shiddiqi, H. A., Imran, I., Anugrah, S. D., Daryono, D., Prayitno, B. S., Adi, S. P., Karnawati, D., Faizal, L., & Damani, R. (2023). On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia. *Natural Hazards*, 116(1), 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05696-y>
- Sutarja, N., Pringgana, G., & Wikrama, M. A. S. (2021). The effects of earthquake and tsunami loadings on structural behavior of reinforced concrete building. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 282–291. <https://doi.org/10.5937/jaes0-25655>
- Suwondo, R., Mangindaan, D., Cunningham, L., & Alama, S. (2021). Non-linear analysis of seismic performance of low-rise concrete buildings in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/794/1/012024>
- Tjandra, K. (2018). Empat bencana geologi yang Paling Mematikan. UGM Press.
- Tun, Z. Z., Ruangrassamee, A., & Hussain, Q. (2022). Mitigation of Tsunami Debris Impact on Reinforced Concrete Buildings by Fender Structures. *Buildings*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/buildings12010066>
- Utami, S. U., Muntasib, E. H., & Samosir, D. A. M. (2019). Manajemen bahaya di kawasan wisata pantai Karang Hawu, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. *Media Konservasi*, 24(3), 322–333.
- Vandecruys, E., Hendriks, M. A. N., Velde, M. van de, Lombaert, G., & Verstrynge, E. (2024). Dynamic stiffness parameter assessment of cracked reinforced concrete beams: A numerical and experimental study. *Engineering Structures*, 318, 118758.
- Wang, S. Y., Zhuang, H. Y., Zhang, H., He, H. J., Jiang, W. P., Yao, E. L., Ruan, B., Wu, Y. X., & Miao, Y. (2021). Near-surface softening and healing in eastern Honshu associated with the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki Earthquake. *Nature Communications*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21418-7>
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>

Analisis Kinerja dan Koordinasi Waktu Sinyal Dua Simpang Berdekatan di Kota Cimahi

Ferry Rusgiarto^{1,2}, Jimmy Chandra¹, Adien Sekar Apriliani², dan Nadila Silviani²

¹Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains Teknologi dan Inovasi,
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jakarta, Indonesia

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

ferry.rusgiarto@lecture.unjani.ac.id, jimmy.chandra@atmajaya.ac.id,
adiensekara45@gmail.com, nadilsv@gmail.com

Abstrak

Kemacetan lalu lintas di kawasan perkotaan menjadi permasalahan krusial, khususnya pada simpang-simpang strategis yang tidak memiliki sistem pengaturan sinyal lalu lintas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja eksisting simpang Citeureup dan simpang Cidahu di Kota Cimahi serta mengkaji kinerja penerapan sistem koordinasi sinyal antar simpang. Metode yang digunakan meliputi survei lapangan untuk memperoleh data primer berupa volume lalu lintas, kecepatan kendaraan, dan panjang antrian, serta data sekunder dari instansi terkait. Analisis dilakukan berdasarkan pendekatan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI) 1997 dan simulasi mikroskopik menggunakan perangkat lunak *Planung Transport Verkehr – Verkehr in Städten SIMulationsmodell (PTV VISSIM)*. Hasil penelitian menunjukkan kondisi eksisting kedua simpang mengalami hambatan dengan panjang antrian (261.88 - 40.751 meter) dan tundaan (89.35 - 28.651 detik). Setelah penerapan koordinasi sinyal, terjadi peningkatan volume lalu lintas yang bisa dilewatkan hingga 24–29% serta pengurangan tundaan rata-rata sebesar 22–32%. Penggunaan simulasi mikroskopik terbukti dapat digunakan sebagai metode dalam perencanaan dan evaluasi lalu lintas elemen jalan perkotaan. Untuk pengembangan jangka panjang, integrasi sistem sinyal dengan pusat kendali lalu lintas berbasis teknologi adaptif dapat diterapkan guna meningkatkan respons terhadap dinamika lalu lintas yang terus berubah.

Kata kunci: Simpang, Berdekatan, Kinerja, Koordinasi Sinyal, *PTV VISSIM*

Abstract

Traffic congestion in urban areas has become a crucial issue, particularly at strategic intersections without a traffic signal management system. This study aims to evaluate the existing performance of the Citeureup and Cidahu intersections in Kota Cimahi and assess the performance of implementing coordinated signal systems between intersections. Methods used include field surveys to obtain primary data such as traffic volume, vehicle speed, and queue length, along with secondary data from relevant agencies. Analysis was conducted using the 1997 Indonesian Highway Capacity Manual (MKJI 1997) approach and microscopic simulation with PTV VISSIM software. The results indicate that the existing conditions at both intersections experience high saturation degrees with queue lengths (261.88 - 40.751 metres) and delays (89.35 - 28.651 seconds). After implementing signal coordination, the saturation degree decreased to 24–29%, and the average delay was reduced by 22–32%. The use of microscopic simulation has proven to be an effective method for planning and evaluating traffic elements in urban roads. For long-term development, the integration of signal systems with adaptive technology-based traffic control centers can be implemented to enhance responsiveness to constantly changing traffic dynamics.

Keywords: Intesection, Adjacent, Performance, Signal Coordination, *PTV VISSIM*

1. Pendahuluan

Dalam sistem transportasi perkotaan, keberadaan jalan dan persimpangan memainkan peran penting dalam mendukung kelancaran mobilitas barang dan jasa di wilayah perkotaan dan pemerataan ekonomi kawasan. Namun, seiring dengan meningkatnya aktivitas dan kepadatan lalu lintas di daerah perkotaan seperti Kota Cimahi, muncul tantangan berupa kemacetan dan peningkatan risiko kecelakaan, terutama di persimpangan tanpa pengaturan sinyal lalu lintas. Salah satu kawasan yang mengalami permasalahan tersebut adalah simpang Citeureup (Jl. Sangkuriang – Kolonel Masturi – Jl. Encep Kartawiria) dan simpang Cidahu (Jl. Cipageran – Kolonel Masturi), yang belum dioperasikan Alat Pemberi Isyarat Lalu Lintas (APILL) sebagai pengatur simpang. Kondisi ketiadaan lampu lalu lintas menyebabkan antrean panjang, waktu tundaan tinggi, dan potensi konflik antar kendaraan. Penelitian ini mencoba

Info Makalah:

Dikirim : 06-10-25;
Revisi 1 : 07-30-25;
Revisi 2 : 08-04-25;
Diterima : 08-13-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-877-2282-1220
e-mail : ferry.rusgiarto@lecture.unjani.ac.id

menganalisis kinerja simpang tanpa dan dengan penerapan koordinasi APILL menggunakan Manual Kapasitas Jalan Indonesia – 1997 (MKJI-1997) berdasarkan hasil simulasi lalu lintas.

Menurut Taylor (1996), koordinasi sinyal antar simpang merupakan pendekatan yang efektif dalam mengurangi tundaan dan panjang antrian, serta meningkatkan efisiensi pergerakan kendaraan. Dengan menerapkan sistem koordinasi sinyal, lalu lintas dapat diarahkan secara

sinkron sehingga kendaraan dapat melintasi beberapa simpang tanpa berhenti. Oleh karena itu, diperlukan analisis kinerja kedua simpang tersebut sebelum dan sesudah penerapan koordinasi sinyal, untuk mengetahui efektivitas intervensi terhadap peningkatan kelancaran dan keselamatan lalu lintas.

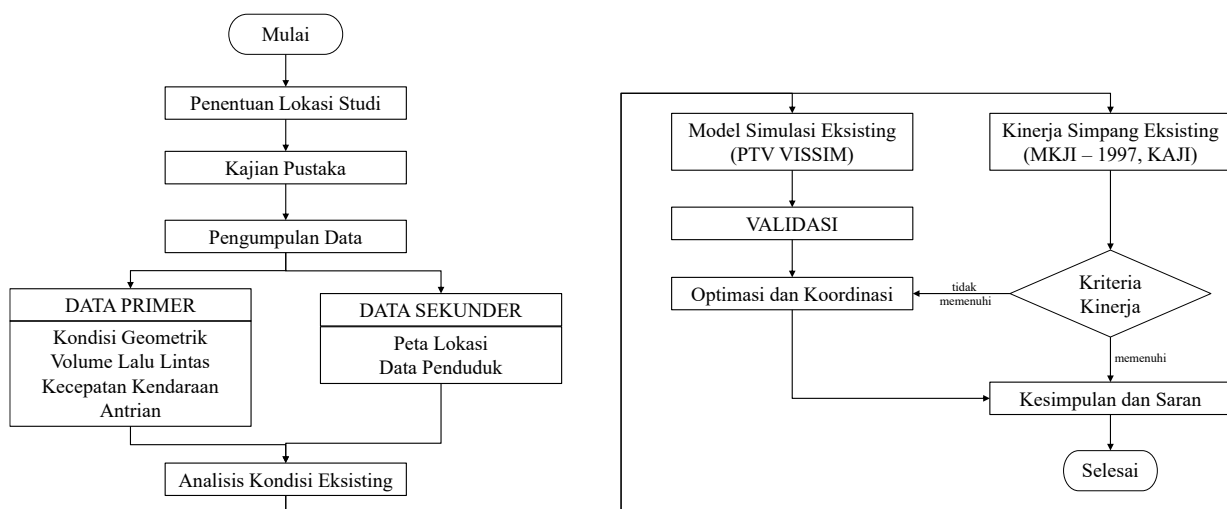
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja lalu lintas eksisting pada simpang Citeureup dan simpang Cidahu di Kota Cimahi, serta mengevaluasi dampak penerapan sistem koordinasi sinyal terhadap kinerja kedua simpang.

Menurut Rusgiyanto dkk. (2018), evaluasi kinerja simpang menggunakan simulasi mikroskopik dapat memberikan gambaran jelas mengenai kondisi lalu lintas. Taylor (1996) menjelaskan bahwa koordinasi sinyal lalu lintas membantu dalam mengelola volume lalu lintas tinggi dengan mengurangi konflik dan meningkatkan kelancaran arus kendaraan. BM (1997) menegaskan pentingnya perencanaan fase sinyal dan siklus sinyal untuk mengoptimalkan kapasitas simpang. Penelitian sebelumnya seperti Fitzpatrick dkk. (2000) dan Widodo (2018) juga menegaskan pentingnya penerapan koordinasi sinyal dalam mengatasi kemacetan lalu lintas. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa koordinasi sinyal dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan serta mengurangi emisi gas buang, berkontribusi pada kelestarian lingkungan perkotaan.

Koordinasi sinyal lalu lintas merupakan strategi penting untuk meningkatkan efisiensi pergerakan kendaraan di jaringan jalan perkotaan. Menurut FHWA (2021), koordinasi sinyal dapat mengurangi waktu perjalanan, jumlah tundaan, dan konsumsi bahan bakar, serta meningkatkan kualitas udara. NACTO (2023) juga menekankan bahwa koordinasi sinyal yang efektif dapat mengelola kecepatan progresi lalu lintas dan mengurangi konflik antar kendaraan. PTV VISSIM adalah perangkat lunak simulasi mikroskopik yang banyak digunakan untuk menganalisis dan mengoptimalkan koordinasi sinyal lalu lintas. Studi oleh Gunarathne dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan VISSIM dalam optimasi pengendali sinyal lalu lintas dapat mengurangi kemacetan, emisi CO dan NOx, serta konsumsi bahan bakar secara signifikan. Selain itu, penelitian di Denpasar oleh Sari dkk. (2023) menggunakan VISSIM untuk menyimulasikan koordinasi sinyal pada dua simpang berdekatan, yang menghasilkan penurunan panjang antrian dan waktu tundaan. Pendekatan adaptif dalam koordinasi sinyal, seperti yang dikembangkan oleh Li dkk. (2023), memanfaatkan data kendaraan terhubung untuk menyesuaikan waktu sinyal secara real-time, meningkatkan efisiensi lalu lintas di lingkungan perkotaan. Selain itu, penggunaan teknologi komunikasi cahaya tampak (VLC) dalam sistem kontrol lalu lintas multi-simpang telah diperkenalkan oleh Zhang dkk. (2023) untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan di persimpangan perkotaan. Berbagai studi kasus telah menunjukkan keberhasilan implementasi koordinasi sinyal dalam mengurangi kemacetan dan meningkatkan efisiensi lalu lintas. Misalnya, penelitian oleh Al-Nakhala dkk. (2023) di koridor arteri Palestina menunjukkan bahwa penerapan sistem sinyal terkoordinasi dapat mengurangi waktu perjalanan pengguna secara signifikan. Di sisi lain, proyek *Green Light* oleh Google menggunakan *Artificial Intelligence* (AI) untuk mengoptimalkan sinyal lalu lintas di berbagai kota, termasuk Jakarta, yang menghasilkan penurunan tundaan hingga 30% dan emisi sebesar 10%.

2. Metodologi

Metode penelitian terdiri atas survei lapangan langsung yang mencakup pengumpulan data geometrik simpang, volume kendaraan, kecepatan kendaraan, dan panjang antrian. Data sekunder dikumpulkan instansi terkait meliputi data penduduk kota Cimahi dan peta lokasi penelitian. Analisis dilakukan dengan menggunakan pendekatan MKJI 1997 dengan perangkat lunak Kapasitas dan Analisis Kinerja Jalan Indonesia (KAJI) serta simulasi mikroskopik melalui perangkat lunak *PTV VISSIM* untuk menguji skenario koordinasi sinyal dibandingkan dengan kondisi eksisting. Diagram alir dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir

2.1. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh peneliti langsung di lapangan yang meliputi data geometrik simpang, volume lalu lintas, kecepatan kendaraan dan panjang antrian yang disajikan dalam Tabel 1 – Tabel 5. Data tersebut digunakan pada proses kalibrasi dan validasi model simulasi yang kemudian gunakan sebagai masukan analisis kinerja lalu lintas.

2.1.1. Geometrik Simpang

Data geometrik simpang digunakan sebagai masukan pada perhitungan kinerja lalu lintas serta penyusunan model simulasi. Data yang dikumpulkan meliputi tipe pendekat, hambatan sampling serta dimensi pendekat simpang. Data ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data geometrik dan kondisi lingkungan simpang citeureup

Pendekat	Simpang Citeureup				Simpang Cidahu		
	Utara	Selatan	Timur	Barat	Utara	Selatan	Barat
Tipe lingkungan jalan	Komersial	Komersial	Komersial	Komersial	Komersial	Komersial	Komersial
Hambatan Sampling	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Median	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada
Lebar Pendekat Masuk	3 m	3 m	4 m	4 m	2.5 m	2.5 m	2.5 m
Lebar Pendekat Keluar	3 m	3 m	4 m	4 m	2.5 m	2.5 m	2.5 m

2.1.2. Volume Lalu Lintas

Data volume lalu lintas didapatkan dari hasil survei langsung di lapangan pada hari Rabu pukul 06.00 – 08.00 WIB dan pukul 17.00 – 19.00 WIB dan hari Minggu pukul 06.00 – 08.00 WIB dan 15.30 – 17.30 WIB pada masing-masing lengan tiap simpang. Berdasarkan hasil survei yang ditabulasi dalam periode 15 menit dilakukan analisis untuk menghitung volume tertinggi dalam kendaraan / jam pada masing-masing periode survei yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2. Data ini digunakan untuk menetapkan periode waktu yang akan digunakan untuk memvalidasi hasil model simulasi serta analisis kinerja.

Tabel 2 Volume lalu lintas tiap simpang

Lokasi	Hari	Periode Sibuk	Volume (kendaraan/jam)
Simpang Citeureup	Rabu	06.15 – 07.15	7429
	Rabu	17.15 - 18.15	6492
	Minggu	07.00 - 08.00	3413
	Minggu	16.00 - 17.00	5175
Simpang Cidahu	Rabu	06.30 - 07.30	7106
	Rabu	17.15 - 18.15	4823
	Minggu	06.45 – 07.45	2473
	Minggu	15.45 – 16.45	3005

2.1.3. Kecepatan Kendaraan

Data kecepatan kendaraan adalah data kecepatan sesaat yang disurvei pada simpang dengan menggunakan *speed gun* untuk jenis kendaraan yang dianalisis pada model simulasi. Data ini digunakan untuk mengkalibrasi distribusi kecepatan pada model simulasi. Rekapitulasi kecepatan rata-rata dari jenis kendaraan yang dianalisis pada model simulasi ditunjukkan pada Tabel 3 untuk simpang citeureup dan Tabel 4 untuk simpang Cidahu.

Tabel 3 Rekapitulasi kecepatan rata-rata kendaraan simpang Citeureup

Kecepatan (km/jam)	Golongan Kendaraan						
	Sedan	Jeep	Pick Up	Minibus	Angkot	Bus	Truk
Rata-rata	26.644	26.007	25.546	26.384	24.415	27.000	25.730
Rata-rata	26.283						

Tabel 4 Rekapitulasi kecepatan rata-rata kendaraan simpang Cidahu

Kecepatan (km/jam)	Golongan Kendaraan						
	Sedan	Jeep	Pick Up	Minibus	Angkot	Bus	Truk
Rata-rata	26.144	23.241	26.189	25.078	25.254	24.000	23.254
Rata-rata	24.776						

2.1.4. Panjang Antrian

Data panjang antrian pada saat jam puncak didapatkan dari hasil survei langsung di lapangan pada simpang Citeureup di hari Rabu pukul 06.15 – 07.15 dan simpang Cidahu di hari Rabu pukul 06.45 – 07.45 WIB, seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Rekapitulasi panjang antrian pada jam puncak

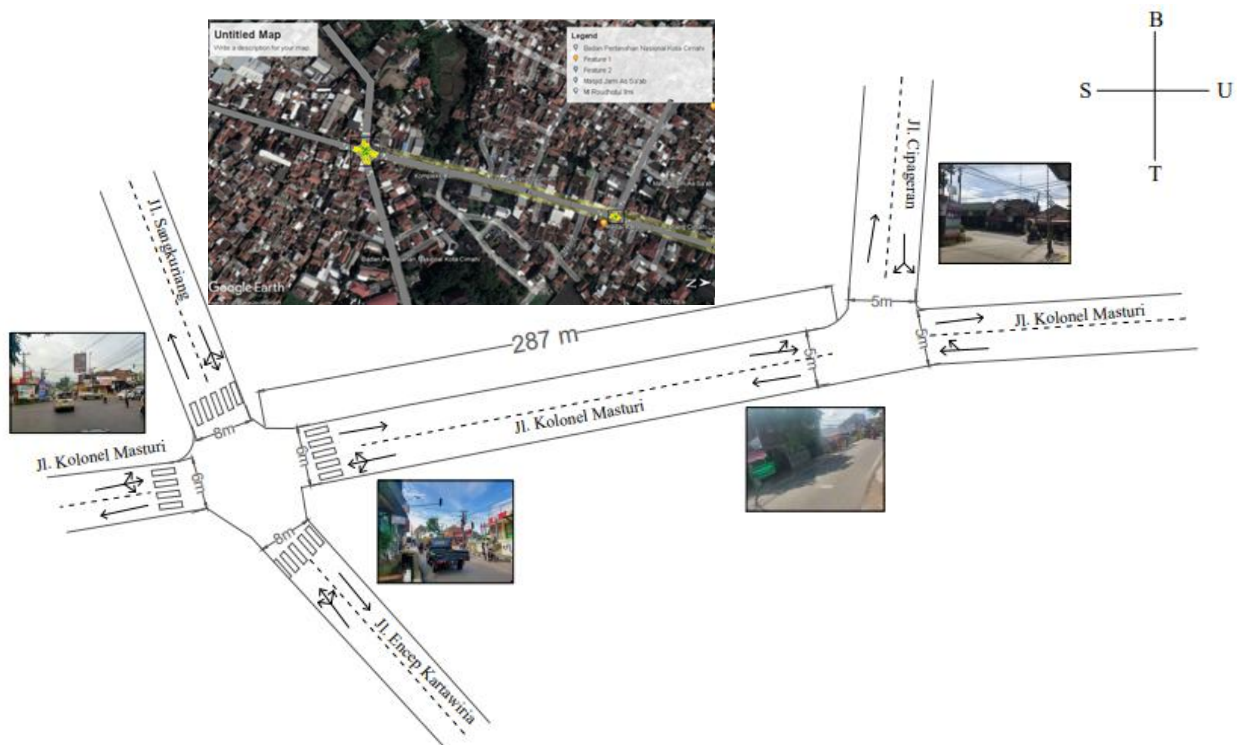
Lokasi	Hari	Periode Sibuk	Panjang Antrian (m)	
Simpang Citeureup	Rabu	06.15 - 07.15	U	104
			S	37.175
			T	43.25
			B	142
Simpang Cidahu	Rabu	06.45 - 07.45	U	19.875
			S	28.55
			B	22.15

2.2. Data sekunder

Data sekunder diperoleh dari dari instansi – instansi terkait yang meliputi data peta lokasi penelitian dan data jumlah penduduk kota Cimahi.

2.2.1. Peta lokasi penelitian

Simpang Citeureup dan Cidahu di kota Cimahi merupakan simpang yang berdekatan dengan jarak sebesar 287 meter dengan tipe lingkungan komersial. Peta lokasi dan kondisi visual simpang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi penelitian

2.2.2. Data Penduduk

Data jumlah penduduk Kota Cimahi Data jumlah penduduk diperoleh dari Badan Pusat Statistik Kota Cimahi diperlihatkan pada Tabel 6. Data ini digunakan untuk masukan analisis kinerja simpang dengan pendekatan MKJI – 1997.

Tabel 6. Jumlah Penduduk Kota Cimahi

Tahun	Jumlah Penduduk
2019	614.304 jiwa
2020	568.400 jiwa
2021	571.632 jiwa

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data Berdasarkan KAJI

Analisis kondisi eksisting berdasarkan hasil survei lapangan dilakukan untuk mengukur kinerja simpang. Pendekatan MKJI – 1997 dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak KAJI sebagai alat bantu hitung. Hasil analisis berdasarkan KAJI untuk kondisi simpang tak bersinyal ditunjukkan pada Tabel 7, sedangkan kondisi simpang bersinyal ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 7. Kinerja Simpang Tak Bersinyal Berdasarkan KAJI

SIMPANG TAK BERSINYAL	Volume		Kapasitas smp/jam	Derajat Kejenuhan
	(kendaraan/jam)	(smp/jam)		
Simpang Citeureup				
Pendekat-N2	1929	965	ERR	ERR
Pendekat-S2	1285	683	ERR	ERR
Pendekat-E2	2157	1019	ERR	ERR
Pendekat-W2	1806	873	ERR	ERR
Simpang Cidahu				
Pendekat-N2	2509	1164	ERR	ERR
Pendekat-S2	1655	841	ERR	ERR
Pendekat-W2	2622	949	ERR	ERR

Tabel 8. Kinerja Simpang Bersinyal Berdasarkan KAJI

SIMPANG BERSNYAL	Volume		Waktu Hijau (detik)	Kapasitas (smp/jam)	Derajat Kejenuhan	Antrian (meter)	Tundaan (detik)
	(kendaraan/jam)	(smp/jam)					
Simpang Citeureup							
Pendekat-N2	1929	965	28	791	1.22	95	43.51
Pendekat-S2	1285	683	28	791	0.86	64	34.81
Pendekat-E2	2157	1019	21	802	1.27	133	53.95
Pendekat-W2	1806	873	21	784	1.11	45	30.74
Simpang Cidahu							
Pendekat-N2	2509	1164	122	599	1.94	143	167.41
Pendekat-S2	1655	841	122	507	1.66	97	118.51
Pendekat-W2	2622	949	171	801	1.18	82	80.39

Hasil analisis pada Tabel 7 memperlihatkan hasil analisis menggunakan modul simpang tak bersinyal terindikasi memberikan hasil kinerja diatas kemampuan hitung KAJI. Hal ini terjadi akibat volume hasil survai di atas volume simpang tak bersinyal normal yang ditemukan pada penyusunan MKJI – 1997. Kondisi tidak normal simpang ini akibat simpang eksisting diatur oleh petugas meskipun tidak dioperasikan APILL, sehingga perilakunya mendekati kondisi simpang terkoordinasi dengan pengaturan sinyal *actuated* (menyesuaikan/responsif dengan volume lalu lintas simpang). Pada kondisi eksisting petugas mengatur operasi simpang dengan memberikan hak jalan mempertimbangkan volume dan antrian masing-masing kaki di dua simpang tersebut. Hasil analisis KAJI menggunakan sinyal sebelum optimasi diperlihatkan pada Tabel 8, dengan total volume kendaraan simpang Citeureup sebanyak 7177 kendaraan/jam dengan total panjang antrian 337 meter dan total lamanya tundaan 163.01 detik dan simpang Cidahu sebanyak 6786 kendaraan/jam dengan total panjang antrian 322 meter dan total lamanya tundaan 336 detik.

3.2. Analisis Data Berdasarkan Simulasi Lalu Lintas

3.2.1. Kalibrasi dan Validasi

Kalibrasi pada Model Simulasi adalah sebuah proses untuk membentuk nilai parameter yang dinilai semimirip mungkin dengan kondisi pengemudi yang ada di Indonesia. Proses kalibrasi ini dilakukan berdasarkan perilaku pengemudi dengan mengubah parameter pada variabel *Car Following Model*, *Lane Change* dan *Lateral Behaviour* yang disesuaikan dengan kondisi lapangan. Kondisi sebaran lalu lintas pada hasil kalibrasi pada simpang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kondisi Sebaran Lalu Lintas Hasil Kalibrasi

Validasi merupakan sebuah proses pengujian penerimaan hasil model dengan cara membandingkan antara hasil simulasi dengan hasil survei. Dalam melakukan validasi pada penelitian ini perbandingan data volume lalu survei dan volume lalu lintas luaran simulasi menggunakan nilai Geoffrey E. Havers (GEH) dengan persamaan yang ditunjukkan pada Rumus (1), dimana kriteria nilai $GEH \leq 5$ menunjukkan model bisa diterima. Validasi dilakukan pada volume arus lalu lintas simpang hasil survei dan hasil simulasi, dengan hasil validasi ditunjukkan pada Tabel 9.

$$GEH = \sqrt{\frac{(q_{\text{simulated}} - q_{\text{observed}})^2}{0,5 \times (q_{\text{simulated}} + q_{\text{observed}})}} \quad (1)$$

Tabel 9. Volume kendaraan hasil simulasi dan observasi

Nama Jalan	Data Vissim	Data Survei	GEH	Keterangan
SIMPANG CITEUREUP				
Jl. Kolonel Masturi (S) - Jl. Sangkuriang	133	140	0.60	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (S) - 5: Jl. Encep Kartawiria	238	264	1.64	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (S) - Jl. Kolonel Matsuri (U)	882	875	0.24	Diterima
Jl. Sangkuriang- Jl. Kolonel Masturi (S)	121	120	0.09	Diterima
Jl. Sangkuriang - 5: Jl. Encep Kartawiria	1647	1724	1.88	Diterima
Jl. Sangkuriang - Jl. Kolonel Masturi (U)	207	215	0.55	Diterima
Jl. Encep Kartawiria - Jl. Kolonel Masturi (S)	471	455	0.74	Diterima
Jl. Encep Kartawiria - Jl. Sangkuriang	1210	1201	0.26	Diterima
Jl. Encep Kartawiria - Jl. Kolonel Masturi (U)	515	506	0.40	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (U) - Jl. Kolonel Masturi (S)	1769	1633	3.30	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (U) - Jl. Sangkuriang	179	164	1.15	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (U) - 5: Jl. Encep Kartawiria	129	132	0.26	Diterima
SIMPANG CIDAHU				
Jl. Kolonel Masturi (S) - Jl. Cipageran	628	648	0.79	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (S) - Jl. Kolonel Masturi (U)	937	953	0.52	Diterima
Jl. Cipageran - Jl. Kolonel Masturi (S)	1105	1200	2.80	Diterima
Jl. Cipageran - Jl. Kolonel Masturi (U)	1323	1399	2.06	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (U) - Jl. Kolonel Masturi (S)	1054	1054	0	Diterima
Jl. Kolonel Masturi (U) - Jl. Cipageran	1329	1326	0.08	Diterima

3.2.2. Hasil Optimasi dan Koordinasi

Optimasi menghasilkan perubahan durasi sinyal hijau dan sinyal merah pada masing - masing lampu sinyal tiap simpang. Durasi waktu sinyal (waktu *intergreen*, waktu hijau dan waktu merah) sebelum dan sesudah optimasi kedua

simpang dapat dilihat seperti pada Tabel 10 – Tabel 13. Durasi *intergreen* yaitu waktu kuning dan merah semua adalah 4 detik. Waktu siklus pada simpang Citeureup adalah 57 detik dan pada simpang Cidahu adalah 301 detik.

Tabel 10. Sebelum Optimasi pada Simpang Citeureup

Fase 1				Fase 2			
Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)	Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)
21	3	32	1	28	3	25	1
Waktu Siklus				Waktu Siklus			
57				57			
Fase 1	21 3 1 32						
Fase 2	25 1 28						

Tabel 11. Sebelum Optimasi pada Simpang Cidahu

Fase 1				Fase 2			
Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)	Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)
122	3	175	1	171	3	126	1
Waktu Siklus				Waktu Siklus			
301				301			
Fase 1	122		3	1	175		
Fase 2	126		1	171		3	

Tabel 12. Setelah Optimasi pada simpang Citeureup

Fase 1				Fase 2			
Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)	Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)
25	3	28	1	24	3	29	1
Waktu Siklus				Waktu Siklus			
57				57			
Fase 1	25 3 1 28						
Fase 2	29 1 24 3						

Tabel 13. Setelah Optimasi pada Simpang Cidahu

Fase 1				Fase 2			
Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)	Hijau (det)	Kuning (det)	Merah (det)	Merah Semua (det)
128	3	1	169	164	3	133	1
Waktu Siklus				Waktu Siklus			
301				301			
Fase 1	128 3 1 169						
Fase 2	133 1 164 3						

3.2.3. Hasil Sebelum dan Sesudah Optimasi Koordinasi Simpang

Rekapitulasi hasil simulasi dari berbagai skenario diberikan pada Tabel 14. Hasil simulasi Kondisi eksisting simpang Citeureup dengan volume kendaraan pada kondisi eksisting (simpang tak bersinyal) sebesar 7501 kend/ jam dan panjang antrian sepanjang 206,6 meter serta tundaan selama 8,511 detik maupun simpang Cidahu, tidak digunakan sebagai pembanding langsung skenario yang lain, hanya digunakan sebagai kalibrasi dan validasi model Simulasi. Karena kondisi eksisting simpang diatur oleh petugas, sehingga perilakunya mendekati kondisi simpang terkoordinasi dengan pengaturan sinyal *actuated* (menyesuaikan/responsif dengan volume lalu lintas simpang). Pada kondisi eksisting petugas mengatur operasi simpang dengan memberikan hak jalan mempertimbangkan volume dan antrian masing-masing kaki di dua simpang tersebut. Hal ini sejalan dengan hasil analisis kinerja menggunakan KAJI modul

simpang tak bersinyal yang memberikan hasil diatas kemampuan hitung MKJI – 1997 yang ditunjukkan dengan hasil *ERR* pada Tabel 7.

Tabel 14. Volume Kendaraan Simpang Kondisi Eksisting, Sebelum dan Setelah Optimasi Koordinasi

Simpang		Citeureup			
Skenario	1	2	3	4	5
Volume (kendaraan/jam)	7501	4546	5081	5064	5886
Panjang Antrian (meter)	206.6	261.88	273.02	267.22	250.34
Tundaan (detik)	8.511	40.751	37.6	37.62	27.682
Simpang		Cidahu			
Skenario	1	2	3	4	5
Volume (kendaraan/jam)	6376	3674	3609	3777	4569
Panjang Antrian (meter)	139.41	89.35	98.32	97.8	162.9
Tundaan (detik)	9.761	28.651	29.492	28.27	22.126

Keterangan:

Skenario – 1 : Eksisting

Skenario – 2 : Sebelum Optimasi

Skenario – 3 : Setelah Optimasi dan Koordinasi (*intergreen* 4 detik)

Skenario – 4 : Setelah Optimasi dan Koordinasi (*Offset* 45 detik)

Skenario – 5 : Setelah Optimasi dan Koordinasi dengan siklus yang sama (*Offset* 45 detik)

Berdasarkan Tabel 14. Kondisi simpang Citeureup dengan simpang bersinyal (sebelum optimasi) volume kendaraannya sebesar 4546 kendaraan/jam dengan panjang antrian 261,88 meter dan lamanya tundaan sebesar 40,75 detik. Kinerja simpang tersebut menjadi lebih baik setelah dilakukan optimasi pada simpang bersinyal dibandingkan dengan sebelum di optimasi. Volume kendaraan pada simpang yang telah dilakukan optimasi sebesar 5081 kendaraan/jam dengan panjang antrian sebesar 273,03 meter dan lamanya tundaan sebesar 37,61. Volume kendaraan pada simpang yang telah di optimasi dan koordinasi dengan menggunakan *offset* 45 detik sebesar 5064 kendaraan/jam dengan panjang antrian sepanjang 267,22 meter dan lamanya tunadaan selama 37.62 detik. Volume kendaraan pada simpang yang telah di optimasi dan koordinasi dengan menggunakan siklus yang sama dan *offset* 45 detik sebesar 5886 kendaraan/jam dengan panjang antrian 250,34 meter dan tundaan selama 27 detik. Sedangkan untuk simpang Cidahu volume kendaraan pada kondisi eksisting (simpang tak bersinyal) sebesar 6376 kend/ jam dengan panjang antrian sepanjang 139,41 meter dan tundaan selama 9,76 detik. Sedangkan kondisi simpang bersinyal (sebelum optimasi) volume kendaraannya sebesar 3674 kendaraan/jam dengan panjang antrian 89,35 meter dan lamanya tundaan sebesar 28,65 detik. Seperti simpang Citeureup, Kinerja simpang Cidahu menjadi lebih baik setelah dilakukan optimasi pada simpang bersinyal dibandingkan sebelum optimasi. Volume kendaraan pada simpang yang telah dilakukan optimasi sebesar 3609 kendaraan/jam dengan panjang antrian sebesar 98,32 kendaraan/jam dan lamanya tundaan sebesar 28,27detik. Volume kendaraan pada simpang yang telah di optimasi dan koordinasi dengan menggunakan *offset* 45 detik sebesar 3777 kendaraan/jam dengan panjang antrian sepanjang 97,8 meter dan lamanya tunadaan selama 28,27 detik. Volume kendaraan pada simpang yang telah di optimasi dan koordinasi dengan menggunakan siklus yang sama dan *offset* 45 detik sebesar 4569 kendaraan/jam dengan panjang antrian 162,9 meter dan tundaan selama 22,13 detik.

Berdasarkan Tabel 14 diatas dapat dilihat perbandingan volume, panjang antrian dan lamanya tundaan dari lima kondisi. Jika dibandingkan antara kondisi eksisting dengan kondisi yang lain, kondisi yang lain tidak lebih baik karena meskipun simpang tidak bersinyal, kondisi eksisting diatur oleh petugas. Perilaku ini mendekati kondisi simpang bersinyal *actuated*.. Jika dibandingkan antara sebelum optimasi dan setelah otpimasi, setelah optimasi lebih baik dalam hal volume kendaraan, panjang antrian dan tundaan. Analisis menunjukkan kondisi awal kedua simpang mengalami permasalahan yang ditunjukkan dengan antrian dan tundaan. simpang Citeureup memiliki volume lalu lintas lebih tinggi dibanding Simpang Cidahu, meskipun keduanya mengalami masalah antrian dan tundaan. Setelah koordinasi sinyal diterapkan, terjadi peningkatan volume lalu lintas yang bisa dilewatkan simpang hingga 24–29%, dan pengurangan tundaan rata-rata sekitar 22–32%. Simulasi mikroskopik mengkonfirmasi bahwa koordinasi sinyal menciptakan aliran lalu lintas lebih stabil dengan pengaturan waktu hijau antar simpang serta perhatian terhadap *offset*. Penerapan koordinasi sinyal lalu lintas memberikan perbaikan pada kinerja kedua simpang yang ditunjukkan oleh peningkatan volume yang bisa dilewatkan simpang mencerminkan peningkatan efisiensi penggunaan simpang serta distribusi arus lalu lintas yang lebih teratur. Hasil simulasi memperkuat argumentasi bahwa pendekatan berbasis simulasi merupakan metode yang bisa diterapkan untuk mengevaluasi dan mengoptimasi sinyal lalu lintas sebelum implementasi lapangan. Studi serupa yang dilakukan oleh Hanafi dkk. (2019) pada gerbang tol menunjukkan kemampuan simulasi mikroskopik dalam analisis kinerja lalu lintas. Integrasi teknologi adaptif di masa mendatang berpotensi meningkatkan respons terhadap fluktuasi volume lalu lintas.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, koordinasi sinyal lalu lintas terbukti efektif dalam mengurangi derajat kejenuhan, panjang antrian, dan waktu tundaan di simpang Citeureup dan simpang Cidahu. Kesimpulan yang bisa diambil mencakup hal-hal sebagai berikut:

- Simpang Citeureup menunjukkan volume lalu lintas yang lebih tinggi dibanding simpang Cidahu, namun keduanya sama-sama mengalami masalah kinerja lalu lintas akibat ketiadaan sistem sinyal yang memadai. Permasalahan eksisting kedua simpang pada jam puncak pagi dan sore dengan panjang antrian 139.41 – 206.6 m.
- Penerapan koordinasi sinyal lalu lintas terbukti memberikan peningkatan kinerja pada kedua simpang, yang ditunjukkan dengan peningkatan volume yang bisa dilewatkan sebesar 24-29%, dan perbaikan waktu tundaan sebesar 22-32%.
- Penggunaan simulasi mikroskopik dapat digunakan sebagai metode dalam perencanaan dan evaluasi lalu lintas elemen jalan perkotaan. Untuk pengembangan jangka panjang, integrasi sistem sinyal dengan pusat kendali lalu lintas berbasis teknologi adaptif guna meningkatkan respons terhadap dinamika lalu lintas yang terus berubah, memiliki potensi untuk dikembangkan dan diterapkan.

Daftar Pustaka

- Aditya, R., Hanafi., Pamungkas, B., M.C., Rusgiyanto, F. (2020). Evaluasi Kinerja Simpang Tak Bersinyal Pemkot Cimahi dengan Metode Simulasi. *Journal Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-23*
- Al-Nakhala, M., Al-Sakhra, A., & Beirut, B. (2023). Effect of Signal Coordination on The Traffic Operation of Urban Corridor. *Research Gate*.
- Badan Pusat Statistik Kota Cimahi (2019-2021): Kota Cimahi dalam Angka 2019-2021. <https://cimahikota.bps.go.id/>.
- BM. (1997). *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)*, Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Desijayanti, G., Hanafi., Islami, W.S., Rusgiyanto, F. (2019). Evaluasi Kinerja Simpang Armed Kota Cimahi dengan Metode Simulasi. *Journal Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-22*.
- FHWA. (2021). *Traffic Signal Timing Manual: Chapter 6 - Federal Highway Administration Operations*. <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter6.htm>
- Fitzpatrick, K., Nowlin, L., & Carlson, P. J. (2000). *Traffic Signal Coordination: State of the Practice*. Texas Transportation Institute.
- Gunarathne, D., Amarasingha, N., & Wickramasinghe, V. (2023). Traffic Signal Controller Optimization Through VISSIM to Minimize Traffic Congestion, CO and NOx Emissions, and Fuel Consumption. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/369988862_Traffic_Signal_Controller_Optimization_Through_VISSIM_to_Minimize_Traffic_Congestion_CO_and_NOx_Emissions_and_Fuel_Consumption
- Hanafi, H., Rusgiyanto, F., & Tita, R. (2019). Analisis Kinerja Gerbang Tol Baros 1 dengan Metode Simulasi Mikroskopik. *Seminar Nasional Teknik Sipil UNJANI*. https://www.researchgate.net/publication/367525898_Effect_of_Signal_Coordination_on_The_Traffic_Operation_of_Urban_Corridor
- https://www.researchgate.net/publication/375636319_Traffic_Signal_Coordination_Based_on_Vissim_Software_Case_Study_of_Sudirman_Road_in_Denpasar_City_Indonesia
- Li, J., Peng, L., Hou, K., Tian, Y., Ma, Y., Xu, S., & Qiu, T. Z. (2023). Adaptive signal control and coordination for urban traffic control in a connected vehicle environment: A review. *Digital Transportation and Safety*, 2(2), 89–111. <https://doi.org/10.48130/DTS-2023-0008>
- Munawar, A. (2004). *Manajemen Lalu Lintas dan Rekayasa Transportasi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- NACTO. (2023). Coordinated Signal Timing, National Association of City Transportation Officials. <https://nacto.org/publication/urban-street-design-guide/intersection-design-elements/traffic-signals/coordinated-signal-timing/>
- Oglesby, C. H., & Hicks, R. G. (1982). *Highway Engineering*. New York: Wiley.
- Papacostas, C. S., & Prevedouros, P. D. (2005). *Transportation Engineering and Planning (3rd ed.)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Rusgiyanto, F., Hanafi, H., & Hadinagoro, R. (2018). Analisis Kinerja Rencana Simpang Susun Pasir Kojas Ruas Tol Soreang–Pasir Kojas. *Proceeding FSTPT-22*.
- Sari, D. A., & Putra, R. A. (2023). Traffic Signal Coordination Based on Vissim Software (Case Study of Sudirman Road in Denpasar City, Indonesia). *Research Gate*.
- Taylor, B.W. (1996). *Introduction Management Science*. Edisi kelima, Prentice Hall.
- Widodo A., Maryunani, W.P., Yuwana, D.S.A., (2018), Evaluasi Dan Pengaturan Simpang Bersinyal Terkoordinasi Dengan Metode Mkji 1997 Dan Transyt 14.1 Di Jalan Brigjen Katamso Kota Parakan, *World of Civil and Environmental Engineering* v.01, n.1, p.9-14, 2018.

Zhang, Y., Wang, L., & Liu, H. (2023). Enhancing Urban Intersection Efficiency: Utilizing Visible Light Communication in Multi-Intersection Traffic Control Systems. *MDPI Sensors*, 23(2), 31. <https://www.mdpi.com/2624-8921/6/2/31>

Analisis Faktor-Faktor yang Memengaruhi Penggunaan *Mobile Banking* pada Pengguna Laki-laki dan Perempuan dengan Menggunakan Pendekatan *Multigroup Structural Equation Modelling*

Ni Luh Saddhwi Saraswati Adnyani, Dini Hanifa Sari, Fouri Noviyanti Rayani, dan Savira Pratidina Lubis

Program Studi Teknik dan Manajemen Industri, Fakultas Teknologi Industri,

Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

saddhwi@itb.ac.id, dini.hanifasari@gmail.com, agatha.fouri@gmail.com, savirapratidinalbs@gmail.com

Abstrak

Mobile banking (*m-banking*) memungkinkan layanan keuangan diakses dengan lebih mudah. Pada beberapa penelitian ditemukan adanya perbedaan keputusan penerimaan teknologi antara laki-laki dan perempuan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi penggunaan *mobile banking* pada pengguna laki-laki dan perempuan dengan menggunakan pendekatan *multigroup structural equation modeling* (SEM). Terdapat tujuh faktor atau variabel laten yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *word of mouth* (WOM), *perceived ease of use* (PEOU), *perceived usefulness* (PU), *trust* (TR), *attitude toward using* (ATU), *intention to use* (ITU), dan *actual use* (AU). Berdasarkan pengujian yang dilakukan dengan menggunakan 440 data responden, dapat diketahui bahwa pada pengguna laki-laki dan perempuan terdapat perbedaan hubungan antara WOM dengan TR, PU, ATU, ITU; PEOU dengan PU; PU dengan ATU dan ITU; serta ITU dengan AU. Penelitian ini memberikan bukti tambahan mengenai adanya perbedaan *gender* dalam penerimaan dan penggunaan teknologi, khususnya *mobile banking*. Selain itu, pada penelitian ini ditemukan bahwa WOM cukup berpengaruh pada adopsi *mobile banking*, oleh karena itu pada penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan identifikasi faktor-faktor yang dapat mempengaruhi WOM *customer* layanan *mobile banking*.

Kata kunci: SEM, multigroup, gender, adopsi, mobile banking

Abstract

Mobile banking (*m-banking*) allows financial services to be accessed more easily. Some studies have found differences in technology acceptance decisions between men and women. This research was conducted to analyze the factors influencing the use of *m-banking* among male and female users using a *multigroup structural equation modeling* (SEM) approach. There are seven factors or latent variables used in this study, namely *word of mouth* (WOM), *perceived ease of use* (PEOU), *perceived usefulness* (PU), *trust* (TR), *attitude toward using* (ATU), *intention to use* (ITU), and *actual use* (AU). Based on the testing conducted with 440 respondents' data, it was found that for male and female users there are differences in the relationship between WOM and TR, PU, ATU, and ITU; PEOU and PU; PU with ATU and ITU; and ITU with AU. This study provides additional evidence of gender differences in the acceptance and use of technology, especially *m-banking*. Additionally, this study found that WOM has a significant impact on the adoption of *m-banking*; therefore, future research should identify the factors that can influence the WOM of *m-banking* service customers.

Keywords: SEM, multigroup, gender, adoption, mobile banking

1. Pendahuluan

M-banking merupakan layanan perbankan digital yang memungkinkan nasabah untuk mengelola transaksi keuangan secara jarak jauh, serta memberikan kontrol penuh terhadap data dan aktivitas keuangan mereka. Layanan ini mencakup berbagai fitur seperti informasi saldo dan riwayat transaksi, pembayaran tagihan secara digital, transfer dana antar pengguna, serta berbagai layanan perbankan lainnya yang disesuaikan dengan kebutuhan *pengguna* (Abu-Taieh dkk., 2022). *M-banking* memungkinkan layanan keuangan diakses dengan lebih mudah, namun banyak bank di Indonesia yang memiliki tingkat adopsi *m-banking* yang masih rendah (Sitorus dkk., 2019). Sitorus dkk. (2019) melakukan wawancara dengan beberapa pengelola bank di Indonesia dan menemukan bahwa banyak nasabah belum sepenuhnya mengadopsi layanan *m-banking*. Bank hanya dapat menikmati manfaat *m-banking* jika nasabahnya memanfaatkan layanan tersebut (Sitorus dkk., 2019). Penelitian mengenai faktor-faktor yang dapat membuat nasabah bersedia untuk memakai *m-banking* dapat membantu pihak bank merancang strategi yang efektif untuk meningkatkan penggunaannya. Beberapa contoh penelitian yang membahas mengenai faktor-faktor yang memengaruhi adopsi *m-banking* diantaranya yaitu penelitian yang dilakukan oleh Sitorus dkk. (2019), Shankar dkk. (2020), Ho dkk., (2020), Jebarajakirthy dan Shankar (2021), Sharma dkk. (2022), Abdennebi (2023), serta Badiang dan Nkwei (2024).

Cheah dkk. (2023) menyebutkan bahwa perbandingan kelompok telah dilakukan di banyak bidang penelitian baru-baru ini, khususnya di bidang bisnis.

Info Makalah:

Dikirim : 04-26-24;

Revisi 1 : 10-23-25;

Revisi 2 : 10-24-25;

Diterima : 10-24-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : saddhwi@itb.ac.id

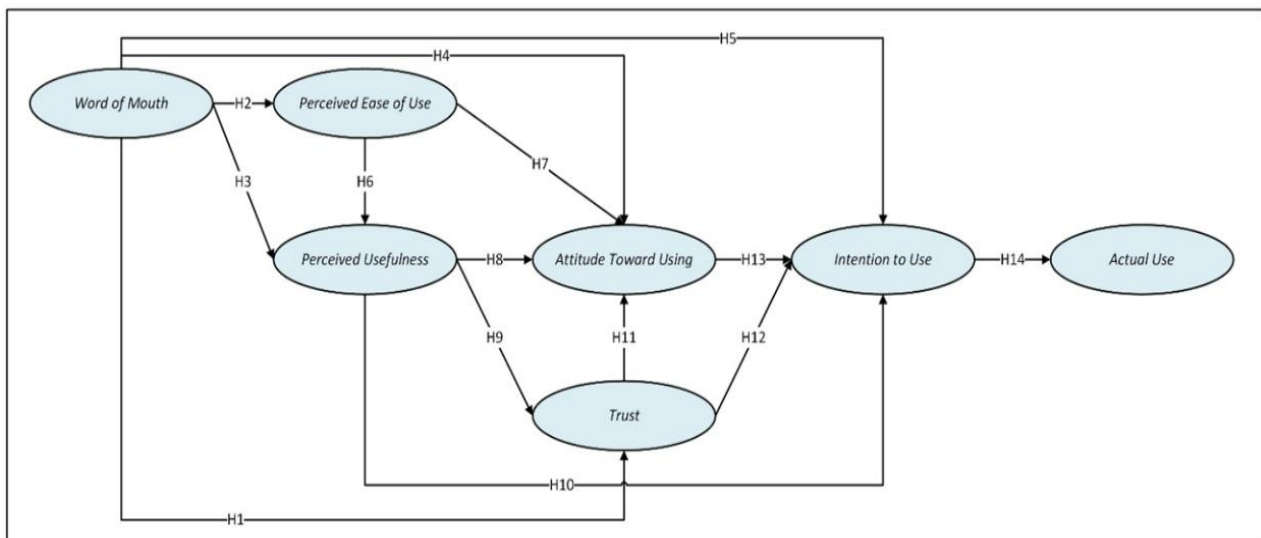
Sebagai contoh, perbandingan kelompok dapat memperdalam pemahaman mengenai perilaku konsumen, yang menjadi kunci bagi perusahaan untuk mengembangkan strategi pemasaran dan memberikan nilai yang unggul kepada pelanggan (Cheah dkk., 2023). *Multigroup analysis* (MGA) adalah pendekatan yang banyak digunakan untuk perbandingan kelompok (Cheah dkk., 2023). *Multigroup structural equation modelling* (SEM) adalah pendekatan statistik tingkat lanjut yang umum digunakan untuk menguji perbedaan antar kelompok berdasarkan variabel kategori, seperti *gender* atau negara (Hair dkk., 2024), atau variabel kontinu yang dapat dikategorikan melalui proses dikotomisasi atau analisis klaster (Hair dkk., 2019). Beberapa penelitian yang menggunakan pendekatan ini diantaranya yaitu De Canio dan Martinelli (2021) untuk menilai perilaku pembelian konsumen produk makanan organik; Sobaih dan Elshaer (2022) untuk mengkaji peran *gender* dalam hubungan antara orientasi kewirausahaan dan niat berwirausaha; Lamberti (2023) untuk menilai kepuasan dan loyalitas pegawai bank; serta Alrawad dkk. (2023) untuk menilai persepsi *customer* terhadap risiko belanja *online*.

Saat ini, masih belum banyak penelitian yang mengkaji pengaruh *gender* dalam adopsi teknologi, terutama pada *m-banking*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, Wan dkk. (2005) menemukan bahwa laki-laki lebih memiliki kecenderungan untuk mengadopsi teknologi bank daripada perempuan. Selain itu, Venkatesh dan Morris (2000) menemukan bahwa terdapat perbedaan keputusan penerimaan teknologi antara laki-laki dari perempuan.

Penelitian bertujuan untuk mengkaji dan menganalisis beberapa faktor yang mendorong penggunaan *m-banking* pada pengguna laki-laki dan perempuan dengan menggunakan pendekatan *multigroup* SEM. Berbeda dari penelitian-penelitian sebelumnya mengenai adopsi *m-banking*, pada penelitian ini pendekatan *multigroup* SEM digunakan untuk secara eksplisit mengeksplorasi perbedaan persepsi dan perilaku antara pengguna laki-laki dan perempuan dalam menggunakan layanan *m-banking*. Penelitian ini turut berkontribusi dalam memperkaya literatur terkait adopsi *m-banking*, sekaligus menghadirkan implikasi praktis bagi pengelola bank untuk merancang strategi yang lebih tersegmentasi dan responsif terhadap karakteristik pengguna berdasarkan *gender*.

1.1 Model Penelitian dan Hipotesis

Model penelitian yang diusulkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut. Terdapat tujuh faktor atau variabel laten yang dikaji dalam penelitian ini yaitu WOM, PEOU, PU, TR, ATU, ITU, dan AU.



Gambar 1. Usulan Model Penelitian.

a. *Word of Mouth* (WOM)

Ismagilova dkk. (2020) mendefinisikan WOM sebagai suatu bentuk pertukaran informasi yang bersifat aktif dan berkelanjutan yang terjadi di antara calon pelanggan, pelanggan saat ini, maupun pelanggan terdahulu terkait suatu produk atau jasa. WOM dianggap sangat penting, terutama dalam konteks lingkungan *online* yang sangat kompetitif (Li dan Liu, 2014). *Word of Mouth* (WOM) telah dikenal sebagai jenis komunikasi informal yang dapat memengaruhi proses pengambilan keputusan pembelian konsumen (Shankar dkk., 2020). Pada konteks industri perbankan, WOM mengacu pada penyebaran berita positif tentang suatu bank setelah berhasil menikmati layanannya (Manyanga dkk., 2022). Mehrad dan Mohammadi (2017) menemukan bahwa WOM memiliki pengaruh terhadap TR, PEOU, PU, ATU, dan ITU. Hal ini menunjukkan bahwa informasi atau pengalaman positif yang dibagikan antar pengguna dapat meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap layanan, membentuk persepsi bahwa layanan mudah digunakan dan bermanfaat, menciptakan sikap positif terhadap penggunaan, serta mendorong niat untuk menggunakan layanan tersebut. Penjelasan ini mengarah pada hipotesis sebagai berikut:

- H1: WOM memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap TR**
- H2: WOM memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap PEOU**
- H3: WOM memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap PU**
- H4: WOM memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ATU**
- H5: WOM memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ITU**

b. *Perceived Ease of Use (PEOU)*

Davis (1989) mendefinisikan PEOU sebagai tingkat keyakinan seseorang bahwa penggunaan suatu sistem tertentu tidak akan memerlukan banyak usaha. PEOU dalam konteks penelitian ini menunjukkan sejauh mana *m-banking* dianggap mudah untuk dipahami dan digunakan oleh pengguna (Ho dkk., 2020). PEOU terbukti memberikan pengaruh langsung yang signifikan terhadap PU (Davis, 1993). Ketika pengguna merasa bahwa belajar dan menggunakan *m-banking* itu mudah, maka persepsi positif pengguna terhadap kegunaannya akan meningkat (Abdennebi, 2023). Selain itu, PEOU juga dapat memengaruhi sikap seseorang terhadap suatu teknologi (Mehrad dan Mohammadi, 2017). Penjelasan ini mengarah pada hipotesis sebagai berikut:

- H6: PEOU memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap PU**
- H7: PEOU memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ATU**

c. *Perceive Usefulness (PU)*

PU merupakan tingkat keyakinan seseorang bahwa penggunaan suatu sistem tertentu dapat membantu meningkatkan efektivitas atau performa kerjanya (Davis, 1989). PU memiliki hubungan positif yang signifikan dengan ATU dan ITU (Shaikh dan Karjaluoto, 2015). Ho dkk. (2020) menyebutkan bahwa nasabah yang merasakan secara jelas manfaat dan kegunaan yang ditawarkan *m-banking* akan lebih cenderung membentuk sikap positif terhadap *m-banking*. Pengguna membentuk niat mereka untuk menggunakan suatu teknologi berdasarkan evaluasi kognitif mengenai seberapa baik teknologi tersebut membantu mereka mencapai tujuan mereka (Sitorus dkk., 2019). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Suh dan Han (2002), ditemukan bahwa PU memiliki pengaruh terhadap TR. Penjelasan ini mengarah pada hipotesis sebagai berikut:

- H8: PU memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ATU**
- H9: PU memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap TR**
- H10: PU memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ITU**

d. *Trust (TR)*

TR didefinisikan sebagai kesediaan untuk mengambil risiko demi memenuhi suatu kebutuhan tanpa adanya pengalaman sebelumnya dan bergantung pada sudut pandang tertentu dari individu dalam menggunakan teknologi (Abdennebi, 2023). Pengguna harus memiliki tingkat kepercayaan yang kuat terhadap teknologi *m-banking* agar teknologi tersebut dapat digunakan secara optimal (Masrek dkk., 2014). Suh dan Han (2002) juga menemukan bahwa TR memiliki pengaruh terhadap ATU. Hal ini menunjukkan bahwa TR berperan langsung dalam membentuk sikap positif terhadap penggunaan karena rasa percaya membuat pengguna merasa nyaman dan yakin terhadap sistem. Selain itu, pada penelitian sebelumnya juga ditemukan bahwa TR merupakan faktor penting yang memprediksi ITU (Suh dan Han, 2002; Saparudin dkk., 2020; Abdennebi, 2023). Kepercayaan yang tinggi terhadap keamanan dan keandalan layanan akan mendorong pengguna untuk berniat menggunakan *m-banking* tanpa keraguan. Penjelasan ini mengarah pada hipotesis sebagai berikut:

- H11: TR memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ATU**
- H12: TR memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ITU**

e. *Attitude Toward Using (ATU)*

ATU atau sikap individu terhadap penggunaan teknologi, berdasarkan TAM, merupakan anteseden utama atau mediator kunci dari efek variabel lain pada ITU (Schierz dkk., 2010). Sikap memiliki peran krusial dalam membentuk niat seseorang untuk mengadopsi atau menggunakan teknologi baru (Davis, 1989). Sikap dipandang sebagai faktor penentu yang signifikan dalam membentuk niat untuk mengadopsi teknologi baru secara umum, termasuk layanan *m-banking* secara khusus (Ho dkk., 2020). Hal ini juga didukung oleh Shaikh dan Karjaluoto (2015) yang menemukan bahwa sikap memiliki efek positif pada niat konsumen untuk terus menggunakan *m-banking*. Selain itu, menurut Yang dan Yoo (2004), sikap merupakan sesuatu yang terbentuk dalam pikiran, muncul lebih dahulu sebelum perilaku, dan berperan dalam membentuknya, sehingga dapat dijadikan sebagai prediktor atas niat seseorang. Penjelasan ini mengarah pada hipotesis sebagai berikut:

- H13: ATU memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap ITU**

f. *Intention to Use (ITU)*

Penggunaan sistem informasi atau teknologi memiliki cakupan yang cukup luas, sehingga pengukurannya dapat dilakukan dari berbagai perspektif (Hutahaeen dkk., 2024). Hutahaeen dkk. (2024) menyebutkan bahwa untuk

mengukur kesediaan seseorang dalam menggunakan suatu sistem informasi atau teknologi, biasanya digunakan istilah ITU. Wu dkk. (2007) menyebutkan bahwa ITU adalah minat seseorang untuk menggunakan suatu sistem untuk pekerjaan di masa yang akan datang. ITU didefinisikan sebagai sejauh mana kemungkinan atau kecenderungan seseorang untuk menggunakan suatu teknologi. Pada *Technology Acceptance Model* atau TAM (Davis, 1989), ditunjukkan bahwa ITU memberikan efek positif pada penggunaan. Bagozzi dkk. (1992), Szajna (1996), dan Morris dkk. (1997) juga menemukan bahwa ITU dapat mempengaruhi AU. Penjelasan ini mengarah pada hipotesis sebagai berikut:

H14: *Intention to use* memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap AU

2. Metode

2.1. Responden

Data dikumpulkan dengan menyebarkan kuesioner secara *online* selama tiga bulan menggunakan *Google Forms* dengan teknik sampling *non-probabilistic*. Objek penelitian ini yaitu pengguna *m-banking* di Indonesia. Total data responden pengguna *m-banking* yang diperoleh adalah sebanyak 440 data. Dari 440 data responden pengguna *m-banking* yang dikumpulkan, terdapat 57,5 persen responden yang berjenis kelamin laki – laki dan 42,5 persen responden yang berjenis kelamin perempuan. Ukuran sampel yang dapat digunakan untuk model CFA sederhana adalah sekitar $N = 150$ (Muthén & Muthén, 2002). Untuk pemodelan *multigroup*, *rule of thumb* yang biasa digunakan adalah 100 pengamatan per kelompok (Kline, 2005). Pada penelitian ini terdapat 24 indikator, sehingga berdasarkan pernyataan Bentler dan Chou (1987), pada penelitian ini dibutuhkan sedikitnya 120 data. Maka, berdasarkan pernyataan-pernyataan tersebut, data yang dikumpulkan telah cukup.

2.2. Alat Ukur

Kuisisioner yang digunakan menggunakan skala 6 poin (6 = sangat setuju dan 1 = sangat tidak setuju). Indikator yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada indikator-indikator yang telah dikembangkan dalam studi-studi sebelumnya. Seluruh variabel dan indikator yang digunakan dalam penelitian ini dapat diakses pada [https://bit.ly/Variabel dan Indikator](https://bit.ly/Variabel_dan_Indikator). Sebelum mengolah data, dilakukan pengujian validitas dan reliabilitas menggunakan bantuan perangkat lunak *IBM SPSS Statistics 24*. Pengumpulan data awal untuk pengujian validitas dan reliabilitas dilakukan dalam waktu satu hari dengan jumlah data yang diperoleh sebanyak 44 data. Semua item pernyataan dalam kuisisioner dikatakan valid dan *reliable* sehingga tidak perlu dilakukan modifikasi pada kuisisioner.

2.3. Multigroup SEM

Structural Equation Model (SEM) merupakan teknik analisis multivariat yang sering digunakan untuk merancang dan menguji model statistik, yang umumnya berbentuk hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel. Ada dua model dalam SEM, yaitu *structural model* dan *measurement model* (Bollen, 1989). Dalam *multigroup* SEM biasa dilakukan perbandingan kelompok dalam model *Confirmatory Factor Analysis* (CFA). Permasalahan dalam perbandingan kelompok pada CFA terletak pada apakah hubungan antara faktor-faktor dan indikator-indikatornya konsisten (invarian) di seluruh populasi yang dibandingkan, atau justru berbeda antar kelompok. Terdapat lima pengujian model *invariance* dalam pendekatan multigroup SEM, yaitu: 1) *Configural Model*, 2) *Weak/loading invariance*, 3) *Strong/scalar invariance*, 4) *Strict invariance*, dan 5) *Structural Invariance*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Measurement Model

3.1.1. Validitas dan Reliabilitas Measurement Model

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan MPlus. Sebelum analisis *multigroup* dilakukan, validitas dan reabilitas dari model pengukuran pada setiap grup diuji terlebih dahulu untuk membuktikan bahwa seluruh indikator merefleksikan masing-masing konstruk yang diukur oleh indikator tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan melihat nilai *factor loading*, *composite reliability*, dan AVE. Indikator-indikator yang memiliki *factor loading* di bawah 0,6, yaitu IT3 dan AU2, dikeluarkan dari model. Nilai *factor loading* untuk indikator IT3 pada grup laki-laki adalah 0,548 dan pada grup perempuan adalah 0,420. Nilai *factor loading* untuk indikator AU2 pada grup laki-laki adalah 0,415 dan pada grup perempuan adalah 0,267. Perhitungan nilai *composite reliability* dan AVE dilakukan setelah kedua indikator ini dikeluarkan dari model. Hasil pengujian validitas dan reabilitas *measurement model* untuk grup laki-laki dan grup perempuan dapat dilihat pada Tabel 1.

Internal consistency reliability ditunjukkan dengan nilai *composite reliability* yang lebih besar dari 0,7. Pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa seluruh konstruk pada kedua grup memiliki nilai *composite reliability* yang lebih besar dari 0,7, yang menunjukkan bahwa *internal consistency reliability* terpenuhi. *Convergent validity* ditunjukkan dengan nilai AVE yang lebih besar dari 0,5. Pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa nilai AVE seluruh konstruk pada kedua grup lebih besar dari 0,5, oleh karena itu *convergent validity* terpenuhi.

3.1.2. Measurement Model Invariance

Pengujian *measurement invariance* bertujuan untuk menjamin bahwa indikator-indikator yang digunakan dalam penelitian mengukur konstruk yang sama pada seluruh grup. *Measurement invariance* merupakan prasyarat untuk perbandingan antar grup. Jika *measurement invariance* tidak dapat dipenuhi, maka analisis mengenai ukuran yang terkait tidak akan menghasilkan hasil yang bermakna. *Measurement invariance* dari konstruk dengan beberapa indikator dapat diuji dengan menggunakan *multigroup CFA models* (Wang & Wang, 2012). Pengujian *measurement invariance* yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi *test configural invariance (pattern invariance)*, *test weak measurement invariance*, dan *test strong measurement invariance* dengan *goodness of fit* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 2. Pada penelitian ini tidak dilakukan *test strict measurement invariance*. *Test strict measurement invariance* dilakukan untuk menguji *factor loadings*, *indicator intercept*, dan *error variance invariance* pada seluruh grup. Seringkali *error variance invariance* tidak terlalu menjadi perhatian. Banyak penelitian yang tidak membutuhkan adanya *error variance invariance* sehingga pengujian ini dianggap tidak diperlukan. Pengujian *strict measurement invariance* dilakukan khususnya jika peneliti tertarik untuk melihat apakah reabilitas alat ukur sama pada seluruh grup (Wang & Wang, 2012).

Tabel 1. Validitas dan Reabilitas *Measurement Model*.

Konstruk	Indikator	Factor Loading		Composite Reability		AVE	
		L	P	L	P	L	P
TR	TR1	0,877	0,750				
	TR2	0,768	0,800	0,880	0,876	0,711	0,705
	TR3	0,880	0,955				
PEOU	PE1	0,775	0,776				
	PE2	0,706	0,794	0,787	0,825	0,552	0,612
	PE3	0,746	0,776				
PU	PU1	0,824	0,860				
	PU2	0,868	0,916	0,883	0,886	0,654	0,663
	PU3	0,811	0,798				
WOM	PU4	0,726	0,660				
	WO1	0,785	0,830				
	WO2	0,723	0,842	0,829	0,888	0,619	0,726
ATU	WO3	0,848	0,883				
	ATU1	0,857	0,786				
	ATU2	0,748	0,719	0,855	0,855	0,598	0,597
ITU	ATU3	0,718	0,751				
	ATU4	0,762	0,831				
	IT1	0,901	0,935				
AU	IT2	0,906	0,886	0,910	0,871	0,771	0,697
	IT4	0,824	0,658				
	AU1	0,809	0,806	0,877	0,820	0,782	0,695
	AU3	0,954	0,861				

Tabel 2. Test Measurement Model Invariance.

	Baseline Model Laki-laki	Baseline Model Perempuan	Test Configural Invariance (Pattern Invariance)	Test Weak Measurement Invariance	Test Strong Measurement Invariance
RMSEA	0,057	0,060	0,058	0,056	0,060
90% CI	(0,045, 0,068)	(0,046, 0,072)	(0,049, 0,067)	(0,048, 0,065)	(0,052, 0,068)
Close fit test p-value	0,161	0,110	0,061	0,115	0,026
CFI	0,960	0,953	0,957	0,958	0,950
TLI	0,951	0,942	0,947	0,950	0,944
SRMR	0,047	0,046	0,046	0,053	0,063
χ^2	307,644	293,490	601,133	610,083	674,303
DoF	188	186	374	389	411

Berdasarkan Tabel 2, *baseline model* untuk grup Laki-laki, *baseline model* untuk grup Perempuan, *configural model*, *weak measurement model*, dan *strong measurement model* memiliki nilai RMSEA yang masuk dalam rentang 0,05–0,08 sehingga dapat disebut *fair fit*. Selain itu, batas atas dari 90% CI masih berada di dalam batas (*i. e.*, < 0,08) dan *close fit test* menunjukkan diterimanya hipotesis nol *close fit* (*i. e.*, ≤ 0,05). CFI dan TLI yang bernilai > 0,9 menunjukkan *good fit*. SRMR yang bernilai < 0,08 juga menunjukkan *good fit*.

3.2. Stuctural Model

Analisis *multigroup SEM model* dimulai dengan membuat *baseline model* grup laki-laki dan grup perempuan secara terpisah. Hal ini dilakukan agar model struktural yang terbentuk untuk masing-masing grup merupakan model yang *fit*. Setelah *baseline model* untuk kedua grup dibuat, selanjutnya dibuat *multigroup SEM model* dengan menggunakan data grup laki-laki dan grup perempuan secara simultan. *Goodness-of-fit* yang dihasilkan untuk kedua *baseline model* dan *multigroup SEM model* ditunjukkan pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3, *baseline (structural) model* untuk grup laki-laki dan grup perempuan serta *multigroup SEM model* memiliki nilai RMSEA yang masuk dalam rentang 0,05–0,08 sehingga dapat disebut *fair fit*. Selain itu, batas atas dari 90% CI masih berada di dalam batas (*i. e.*, $< 0,08$) dan *close fit test* menunjukkan diterimanya hipotesis nol *close fit* (*i. e.*, $\leq 0,05$). CFI dan TLI yang bernilai $> 0,9$ menunjukkan *good fit*. SRMR yang bernilai $< 0,08$ juga menunjukkan *good fit*.

Tabel 3. *Goodness of Fit Baseline (Structural) Model* Grup Laki-laki dan Grup Perempuan.

	<i>Baseline Model Laki-laki</i>	<i>Baseline Model Perempuan</i>	<i>Multigroup SEM model</i>
RMSEA	0,058	0,060	0,060
90% CI	(0,047, 0,069)	(0,047, 0,073)	(0,051, 0,067)
<i>Close fit test p-value</i>	0,121	0,098	0,028
CFI	0,957	0,951	0,950
TLI	0,949	0,941	0,944
SRMR	0,050	0,052	0,061

Penerimaan atau penolakan hipotesis 1-14 untuk grup laki-laki dan grup perempuan secara berurutan disajikan dalam Tabel 4 dan Tabel 5. Signifikansi hubungan antar konstruk dapat diketahui berdasarkan nilai *p-value* dari hubungan tersebut. Suatu konstruk dinyatakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap konstruk lainnya jika memiliki nilai *p-value* $< 0,001$ (***), nilai *p-value* $< 0,05$ (**), atau nilai *p-value* $< 0,1$ (*). Tanda bintang sudah sejak lama digunakan pada angka-angka dalam tabel dan grafik untuk menunjukkan tingkat signifikansi statistik: satu bintang biasanya merujuk pada estimasi yang signifikan secara statistik pada tingkat 10 persen; dua bintang pada tingkat 5 persen; dan tiga bintang menunjukkan tingkat 1 persen (Imbens, 2021). Suatu konstruk dinyatakan memiliki pengaruh positif terhadap konstruk lainnya jika memiliki *path coefficient estimate* yang bernilai positif.

Perbedaan hubungan antara suatu konstruk (faktor) dengan konstruk lainnya pada grup laki-laki dan grup perempuan akan ditentukan dengan melihat perbedaan signifikansi hubungan berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5. Berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5, dapat diketahui bahwa pada grup laki-laki dan grup perempuan terdapat perbedaan hubungan antara WOM dengan PU, WOM dengan ITU, dan PU dengan ITU.

Selain berdasarkan perbedaan signifikansi hubungan pada Tabel 4 dan Tabel 5, adanya perbedaan hubungan antara suatu konstruk dengan konstruk lainnya pada grup laki-laki dan grup perempuan juga dilihat berdasarkan perbedaan dari *structural path coefficient* pada kedua grup. Pada penelitian ini dilakukan pengujian *invariance of structural path coefficient across groups* dengan membandingkan *restricted model* dan *unrestricted model* yang hanya dilakukan pada konstruk-konstruk yang memiliki hubungan yang signifikan pada kedua grup. Hasil pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 4. *Path Coefficient Estimate* Grup Laki-laki.

No.	<i>Parameter</i>	<i>Path Coefficient Estimate</i>	<i>S. E.</i>	<i>P-Value</i>	Terima (Y)/ Tolak Hipotesis (N)
1	WOM → TR	0,498	0,082	0,000***	Y
2	WOM → PEOU	0,688	0,058	0,000***	Y
3	WOM → PU	0,079	0,104	0,447	N
4	WOM → ATU	0,525	0,088	0,000***	Y
5	WOM → ITU	0,114	0,121	0,349	N
6	PEOU → PU	0,728	0,095	0,000***	Y
7	PEOU → ATU	0,222	0,125	0,075*	Y
8	PU → ATU	0,189	0,100	0,060*	Y
9	PU → TR	0,298	0,083	0,000***	Y
10	PU → ITU	0,268	0,076	0,000***	Y
11	TR → ATU	0,085	0,081	0,292	N
12	TR → ITU	0,107	0,071	0,135	N
13	ATU → ITU	0,493	0,141	0,000***	Y
14	ITU → AU	0,712	0,043	0,000***	Y

Tabel 5. *Path Coefficient Estimate* Grup Perempuan.

No.	Parameter	Path Coefficient Estimate	S. E.	P-Value	Terima (Y)/ Tolak Hipotesis (N)
1	WOM → TR	0,296	0,084	0,000***	Y
2	WOM → PEOU	0,650	0,060	0,000***	Y
3	WOM → PU	0,191	0,106	0,071*	Y
4	WOM → ATU	0,208	0,093	0,025**	Y
5	WOM → ITU	0,401	0,086	0,000***	Y
6	PEOU → PU	0,426	0,105	0,000***	Y
7	PEOU → ATU	0,388	0,101	0,000***	Y
8	PU → ATU	0,388	0,078	0,000***	Y
9	PU → TR	0,373	0,079	0,000***	Y
10	PU → ITU	0,142	0,089	0,111	N
11	TR → ATU	-0,054	0,079	0,491	N
12	TR → ITU	0,087	0,075	0,247	N
13	ATU → ITU	0,468	0,101	0,000***	Y
14	ITU → AU	0,528	0,070	0,000***	Y

Tabel 6. *Test Invariance of Structural Path Coefficient*.

No.	Restricted Path	Chi-Square Test for Difference Testing	DOF	P-Value	Ada (Y)/ Tidak Ada Perbedaan Hubungan (N)
1	WOM → TR	4,919	1	0,0266**	Y
2	WOM → PEOU	0,399	1	0,5274	N
3	WOM → PU	-	-	-	Y
4	WOM → ATU	7,491	1	0,0062**	Y
5	WOM → ITU	-	-	-	Y
6	PEOU → PU	6,095	1	0,0136**	Y
7	PEOU → ATU	1,792	1	0,1806	N
8	PU → ATU	3,734	1	0,0533*	Y
9	PU → TR	0,586	1	0,4440	N
10	PU → ITU	-	-	-	Y
11	TR → ATU	-	-	-	N
12	TR → ITU	-	-	-	N
13	ATU → ITU	0,388	1	0,5336	N
14	ITU → AU	5,506	1	0,0190**	Y

Berdasarkan Tabel 6, pada grup laki-laki dan perempuan terdapat perbedaan hubungan antara WOM dengan TR, PU, ATU, dan ITU; PEOU dengan PU; PU dengan ITU; serta ITU dengan AU.

WOM merupakan alat komunikasi yang dianggap kuat, dampak WOM pada perilaku konsumen dapat lebih besar dari pengaruh iklan atau promosi (Mehrad & Mohammadi, 2017). Birkmeyer dkk. (2021) menyebutkan bahwa WOM secara luas dianggap sebagai salah satu faktor penting yang memengaruhi perilaku konsumen dan menjadi salah satu sumber informasi terpenting dalam pengambilan keputusan konsumen. Pada penelitian ini ditemukan bahwa pada grup laki-laki WOM memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap PEOU, ATU, dan TR. Pada grup laki-laki, WOM positif mengenai *m-banking* dapat meningkatkan persepsi mereka terhadap kemudahan penggunaan *m-banking*, meningkatkan penilaian mereka (ATU) terhadap *m-banking*, dan juga dapat meningkatkan kepercayaan (TR) mereka terhadap *m-banking*. Pada grup perempuan, WOM memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap PEOU, PU, ATU, ITU dan TR. Pada grup perempuan, WOM positif mengenai *m-banking* dapat meningkatkan persepsi mereka terhadap kemudahan penggunaan *m-banking*, meningkatkan persepsi mereka mengenai kegunaan *m-banking* (bahwa *m-banking* dapat memudahkan dan meningkatkan kinerja dalam kegiatan transaksi perbankan yang mereka lakukan), meningkatkan penilaian (ATU) mereka terhadap *m-banking*, dan juga dapat meningkatkan niat mereka untuk menggunakan *m-banking* (ITU). Pada grup laki-laki, WOM tidak berdampak langsung secara signifikan terhadap PU. WOM positif mengenai *m-banking* tidak akan secara langsung meningkatkan persepsi *customer* laki-laki bahwa *m-banking* dapat memudahkan dan meningkatkan kinerja dalam kegiatan perbankan yang mereka lakukan. *Customer* laki-laki terlebih dahulu harus merasakan kemudahan penggunaan *m-banking* yang nantinya akan mempengaruhi tingkat PU dari *customer* laki-laki tersebut. Pada grup laki-laki, WOM juga tidak memiliki hubungan langsung yang signifikan terhadap ITU. *Customer* laki-laki tidak akan langsung memiliki niat untuk menggunakan *m-banking* hanya dengan mendengar hal-hal positif atau WOM positif mengenai *m-banking*.

Bastari dkk. (2020) mendefinisikan PEOU sebagai pemahaman individu bahwa mereka tidak perlu mengeluarkan upaya besar untuk mengoperasikan teknologi sistem informasi tertentu. Pada penelitian ini ditemukan bahwa pada grup laki-laki maupun grup perempuan PEOU memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap PU dan ATU. Hal ini menunjukkan bahwa semakin *customer* merasa bahwa penggunaan *m-banking* mudah (mudah dipelajari penggunaannya, mudah untuk digunakan), maka *customer* tersebut akan semakin merasa bahwa *m-banking*

memudahkan dan meningkatkan kinerja dalam kegiatan perbankan yang mereka lakukan dan sikap mereka terhadap *m-banking* (ATU) akan semakin positif. Sejumlah penelitian mengungkapkan bahwa PEOU memiliki hubungan yang signifikan dengan PU dalam konteks adopsi teknologi, semakin mudah penggunaan teknologi tersebut, manfaat yang diharapkan dalam hal peningkatan kinerja meningkat (Mehrad & Mohammadi, 2017). Jika aplikasi *m-banking* memiliki *user friendly interfaces*, maka *customer* akan cenderung menganggap hal tersebut sebagai kemudahan untuk digunakan, dan persepsi ini akan mengembangkan sikap (ATU) positif dari *customer*.

PU adalah persepsi individu mengenai sejauh mana suatu teknologi tertentu dapat meningkatkan tugas atau peran individu tersebut dalam hal efisiensi dan efektivitas (Bolodeoku dkk., 2022). Penggunaan layanan *m-banking* memberi peluang kepada pengguna untuk melakukan operasi perbankan di mana saja dan kapan saja. Setelah *customer* merasa bahwa layanan tersebut secara langsung menguntungkan bagi kehidupan mereka, mereka akan secara positif dipengaruhi untuk tetap menggunakan layanan tersebut (Lin, 2011). Pada penelitian ini ditemukan bahwa pada grup laki-laki PU memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap ATU, TR, dan ITU. Hal ini menunjukkan bahwa pada grup laki-laki, semakin mereka merasa bahwa *m-banking* dapat memudahkan dan meningkatkan kinerja dalam kegiatan perbankan yang mereka lakukan, maka sikap atau penilaian mereka terhadap *m-banking* akan meningkat, mereka akan semakin percaya untuk menggunakan *m-banking*, dan niat untuk menggunakan *m-banking* pun juga akan semakin tinggi. Selain itu, ditemukan juga bahwa pada grup perempuan PU memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap ATU dan TR. Hal ini menunjukkan bahwa pada grup perempuan, semakin mereka merasa bahwa *m-banking* dapat memudahkan dan meningkatkan kinerja dalam kegiatan perbankan yang mereka lakukan, maka penilaian mereka terhadap *m-banking* (ATU) akan semakin positif atau meningkat dan mereka akan semakin percaya untuk menggunakan *m-banking*. Hal ini sejalan dengan pernyataan Mehrad dan Mohammadi (2017) bahwa seseorang berpotensi menunjukkan sikap yang lebih positif terhadap adopsi dan penggunaan *m-banking* ketika mereka memahami berbagai manfaat yang ditawarkan oleh *m-banking* tersebut. Berbeda dengan grup laki-laki, pada grup perempuan semakin tingginya PU tidak langsung dapat meningkatkan niat mereka untuk menggunakan *m-banking*.

TR menggambarkan keinginan seseorang untuk mengambil risiko untuk memenuhi kebutuhan tanpa pengalaman sebelumnya, atau informasi yang kredibel dan bermakna (Kim dan Prabhakar, 2004). Pada penelitian ini ditemukan bahwa pada grup laki-laki maupun grup perempuan TR tidak memiliki hubungan yang signifikan terhadap ATU dan juga ITU. Temuan ini konsisten dengan temuan Koenig-Lewis dkk. (2010) yang menyimpulkan bahwa tidak ada hubungan langsung antara TR dan *intention* untuk menggunakan *m-banking* (ITU). Mazhar dkk. (2014) mengatakan bahwa keraguan terhadap perlindungan privasi dan kerahasiaan data menjadi salah satu alasan utama di balik enggan seseorang untuk mengadopsi *m-banking*. Kim dkk. (2009) membuktikan bahwa *m-banking* dianggap terkait dengan risiko yang lebih tinggi dibandingkan dengan perbankan biasa. Berdasarkan hasil penelitian ini, walaupun *customer* percaya terhadap *m-banking*, hal ini tidak berdampak pada penilaian ataupun niat untuk mengadopsi *m-banking*.

Attitude, secara umum, didefinisikan sebagai evaluasi afektif (positif atau negatif) terhadap objek atau perilaku tertentu (Kroesen dkk., 2017). ATU menjelaskan sejauh mana penggunaan teknologi bernilai positif atau negatif bagi seorang individu. Pada penelitian ini ditemukan bahwa pada grup laki-laki maupun grup perempuan ATU memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap ITU. Semakin *customer* merasa bahwa penggunaan *m-banking* bernilai positif (misalnya, penggunaan *m-banking* sesuai dengan kehidupannya dan menguntungkan), maka niat *customer* tersebut untuk menggunakan *m-banking* akan semakin tinggi. Temuan ini mendukung hasil penelitian Davis dkk. (1989) yang menegaskan bahwa ATU atau sikap individu terhadap penggunaan teknologi merupakan mediator kunci dari pengaruh variabel lain terhadap ITU.

Suh dan Han (2002) menemukan bahwa ITU dapat mempengaruhi AU. Pada penelitian ini ditemukan bahwa pada grup laki-laki maupun grup perempuan ITU memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap AU. Semakin tinggi niat *customer* untuk menggunakan *m-banking* maka penggunaan aktual *m-banking* oleh *customer* tersebut juga akan meningkat.

Hasil penelitian ini dapat memberikan wawasan praktis bagi pihak bank dalam merumuskan strategi peningkatan adopsi *m-banking*. Karena terdapat perbedaan hubungan antar konstruk antara laki-laki dan perempuan, maka pendekatan yang bersifat *gender-sensitive* perlu dipertimbangkan. Bagi pengguna perempuan, WOM terbukti secara statistik memberikan dampak langsung yang signifikan terhadap PU maupun ITU. Artinya, perempuan cenderung lebih dipengaruhi oleh informasi yang mereka peroleh dari orang lain dalam menilai manfaat dan keinginan untuk menggunakan *m-banking*. Oleh karena itu, strategi promosi yang menekankan kekuatan WOM, seperti testimoni pengguna, kampanye berbasis komunitas, kolaborasi dengan *influencer*, atau program referensi dari sesama pengguna, dapat menjadi pendekatan yang efektif untuk mendorong adopsi *m-banking* di kalangan perempuan.

Sebaliknya, pada pengguna laki-laki, hasil penelitian mengungkapkan bahwa PU secara langsung dan signifikan memengaruhi ITU, sementara pengaruh langsung WOM terhadap ITU tidak signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pengguna laki-laki cenderung mempertimbangkan sejauh mana layanan *m-banking* memberikan manfaat nyata dan mendukung aktivitas perbankan mereka sebelum memutuskan untuk menggunakannya. Abdennebi (2023) menyebutkan bahwa PU dari *m-banking* dapat ditingkatkan melalui fitur transaksi (seperti pembayaran *online*, pengiriman *e-statement* bulanan, dan sebagainya) yang meningkatkan efisiensi, menghemat waktu, dan memperbaiki

kinerja layanan. Oleh karena itu, bank perlu memfokuskan upaya pada peningkatan *user experience*, khususnya bagi pengguna laki-laki, misalnya dengan menghadirkan fitur-fitur unggulan yang mendukung pengelolaan keuangan secara cepat, mudah, dan andal. Dengan memastikan bahwa pengguna benar-benar merasakan manfaat nyata dari *m-banking*, PU dapat ditingkatkan dan pada akhirnya mendorong niat untuk terus menggunakan layanan tersebut.

Kesimpulan

Pada penelitian ini dilakukan identifikasi dan analisis beberapa faktor yang mempengaruhi penggunaan *m-banking* pada pengguna laki-laki dan perempuan dengan menggunakan pendekatan *multigroup SEM*. Berdasarkan signifikansi hubungan antar faktor dan *structural path coefficient*, dapat diketahui bahwa pada grup laki-laki dan perempuan terdapat perbedaan hubungan antara WOM dengan TR, PU, ATU, dan ITU; PEOU dengan PU; PU dengan ATU dan ITU; serta ITU dengan AU. Penelitian ini memberikan bukti tambahan mengenai adanya perbedaan *gender* dalam penerimaan dan penggunaan teknologi, khususnya *m-banking*.

Penelitian ini menunjukkan bahwa jika *customer* mempelajari layanan dan manfaat dari *m-banking*, memahami bahwa bekerja dengan teknologi baru ini berguna dan mudah, dan mendengar WOM positif mengenai layanan *m-banking*, maka *customer* akan memiliki *intention* atau niat untuk menggunakan *m-banking* (ITU) dan akan secara aktual menggunakan layanan *m-banking* (AU). Berdasarkan hasil penelitian ini, tingkat kepercayaan *customer* terhadap *m-banking* tidak berpengaruh pada penilaian ataupun niat untuk mengadopsi *m-banking*. Bank dan lembaga keuangan harus menyadari bahwa jika *customer* memiliki sikap positif terhadap *m-banking*, maka *customer* akan menggunakan *m-banking*.

Penelitian ini memiliki keterbatasan, salah satunya yaitu penelitian ini bersifat *cross-sectional*, yang mengukur persepsi dan niat konsumen pada satu waktu. Pada penelitian selanjutnya, survei *longitudinal* dapat dilakukan karena individu akan mendapatkan pengalaman lebih seiring dengan berjalannya waktu. Pada penelitian ini, ditemukan bahwa WOM memiliki dampak positif yang signifikan terhadap beberapa faktor lainnya, sebagai contoh pada grup perempuan, WOM memiliki hubungan positif yang signifikan terhadap PEOU, PU, ATU, ITU, dan TR. Karena WOM cukup berpengaruh pada adopsi *m-banking*, pada penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan identifikasi faktor-faktor yang dapat mempengaruhi WOM *customer* layanan *m-banking*.

Daftar Pustaka

- Abdennebi, H. B. (2023). *M-banking adoption from the Developing Countries Perspective: A mediated model*. *Digital Business*, 3(2), 100065.
- Abu-Taieh, E. M., AlHadid, I., Abu-Tayeh, S., Masa'deh, R., Alkhaldeh, R. S., Khwaldeh, S., & Alrowwad, A. (2022). Continued intention to use of *M-banking* in Jordan by Integrating Utaut, tpb, Tam and service quality with ML. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(3), 120.
- Alrawad, M., Lutfi, A., Alyatama, S., Al Khattab, A., Alsoboa, S. S., Almaiah, M. A., Ramadan, M. H., Arafa, H. M., Ahmed, N. A., Alsyouf, A., & Al-Khasawneh, A. L. (2023). Assessing customers perception of online shopping risks: A structural equation modeling-based multigroup analysis. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 71, 103188.
- Badiang, A. M., & Nkwei, E. S. (2024). Mobile banking adoption its antecedents and post-adoption effects: The role of consumers status orientation in an African context. *Cogent Business & Management*, 11(1).
- Bagozzi, R. P. (1992). The self-regulation of attitudes, intentions, and behavior. *Social Psychology Quarterly*, 55(2), 178-204.
- Bentler, P. M., & Chou, C. (1987). Practical issues in structural modeling. *Sociological Methods & Research*, 16(1), 78-117.
- Bastari, A., Eliyana, A., Syabarrudin, A., Arief, Z., & Emur, A. P. (2020). Digitalization in banking sector: The role of Intrinsic Motivation. *Heliyon*, 6(12).
- Birkmeyer, S., Wirtz, B. W., & Langer, P. F. (2021). Determinants of mhealth success: An empirical investigation of the user perspective. *International Journal of Information Management*, 59, 102351.
- Bollen, K. A. (1989). *Structural Equations with Latent Variables*. New York Departement of Sociology: John Wiley & Sons.
- Bolodeoku, P. B., Igbino, E., Salau, P. O., Chukwudi, C. K., & Idia, S. E. (2022). Perceived usefulness of technology and multiple salient outcomes: The improbable case of oil and Gas Workers. *Heliyon*, 8(4).
- Cheah, J.-H., Amaro, S., & Roldán, J. L. (2023). Multigroup analysis of more than two groups in PLS-SEM: A review, illustration, and recommendations. *Journal of Business Research*, 156, 113539.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319-340.
- Davis, F. D. (1993). User acceptance of information technology: System characteristics, user perceptions and behavioral impacts. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38(3), 475-487.

- De Canio, F., & Martinelli, E. (2021). EU Quality label vs organic food products: A multigroup structural equation modeling to assess consumers' intention to buy in light of sustainable motives. *Food Research International*, 139, 109846.
- Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2–24.
- Hair, J. F., Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Gudergan, S. P. (2024). *Advanced issues in partial least squares structural equation modeling*. Sage Publications, Inc.
- Ho, J. C., Wu, C.-G., Lee, C.-S., & Pham, T.-T. T. (2020). Factors affecting the behavioral intention to adopt Mobile Banking: An international comparison. *Technology in Society*, 63, 101360.
- Hutahaean, H. A., Ruwaida, A., Adnyani, N. L. S. S., Govindaraju, R., & Sudirman, I. (2024). Incorporating functional quality into usability model of E-Commerce Application. *TEM Journal*, 13(3), 1889–1904.
- Imbens, G. W. (2021). Statistical Significance, *p*-Values, and the Reporting of Uncertainty. *Journal of Economic Perspectives*, 35(3), 157–174.
- Ismagilova, E., Slade, E. L., Rana, N. P., & Dwivedi, Y. K. (2019). The effect of electronic word of mouth communications on intention to buy: a meta-analysis. *Information Systems Frontiers*, 22(5), 1203–1226.
- Jebarajakirthy, C., & Shankar, A. (2021). Impact of online convenience on mobile banking adoption intention: A moderated mediation approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 58, 102323.
- Kim, G., Shin, B., & Lee, H.G. (2009). Understanding dynamics between initial trust and usage intentions of mobile banking. *Information System Journal*, 19(3), 283–311.
- Kim, K. K., & Prabhakar, B. (2004). Initial trust and the adoption of B2C e-commerce: the case of internet banking. *ACM SIGMIS Database*, 35(2), 50–64.
- Kline, R. B. (2005). *Methodology in the social sciences. Principles and practice of structural equation modeling (2nd ed.)*. New York, NY, US: Guilford Press.
- Koenig-Lewis, N., Palmer, A., & Moll, A. (2010). Predicting young consumers' take up of mobile banking services. *International Journal of Bank Marketing*, 28(5), 410–432.
- Kroesen, M., Handy, S., & Chorus, C. (2017). Do attitudes cause behavior or vice versa? an alternative conceptualization of the attitude-behavior relationship in travel behavior modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 101, 190–202.
- Lamberti, G. (2021). Hybrid multigroup partial least squares structural equation modelling: An application to bank employee satisfaction and Loyalty. *Quality & Quantity*, 57(S4), 683–705.
- Li, H., & Liu, Y. (2014). Understanding post-adoption behaviors of e-service users in the context of online travel services. *Information and Management*, 51(8), 1043–1052.
- Lin, H. (2011). An empirical investigation of mobile banking adoption: The effect of innovation attributes and knowledge-based trust. *International Journal of Information Management*, 31(3), 252–260.
- Manyanga, W., Makanyeza, C., & Muranda, Z. (2022). The effect of customer experience, customer satisfaction and word of mouth intention on customer loyalty: The moderating role of Consumer Demographics. *Cogent Business & Management*, 9(1).
- Masrek, M. N., Mohamed, I. S., Daud, N. M., & Omar, N. (2014). Technology Trust and mobile banking satisfaction: A case of Malaysian consumers. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 129, 53–58.
- Mazhar, F., Rizwan, M., Fiaz, U., Ishrat, S., Razzaq, M.S., & Khan, T.N. (2014). An investigation of factors affecting usage and adoption of internet & mobile banking in Pakistan. *Int. J. Account. Fin. Report*, 4(2), 478.
- Mehrad, D., & Mohammadi, S. (2017). Word of mouth impact on the adoption of mobile banking in Iran. *Telematics and Informatics*, 34(7), 1351–1363.
- Morris, M. G., & Dillon, A. (1997). How user perceptions influence software use. *IEEE Software*, 14(4), 58–65.
- Muthén, L. K., & Muthén, B. O. (2002). How to use a Monte Carlo study to decide on sample size and determine power. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 9(4), 599–620.
- Saparudin, M., Rahayu, A., Hurriyati, R., & Sultan, Mokh. A. (2020). Exploring the role of trust in Mobile-banking use by Indonesian customer using unified theory of acceptance and Usage Technology. *International Journal of Financial Research*, 11(2), 51.
- Schierz, P. G., Schilke, O., & Wirtz, B. W. (2010). Understanding consumer acceptance of mobile payment services: An empirical analysis. *Electronic Commerce Research and Applications*, 9(3), 209–216.
- Shaikh, A., & Karjaluoto, H. (2015). Mobile banking adoption: A literature review. *Telematics and Informatics*, 32(1), 129–142.
- Shankar, A., Jebarajakirthy, C., & Ashaduzzaman, M. (2020). How do electronic word of mouth practices contribute to mobile banking adoption? *Journal of Retailing and Consumer Services*, 52, 101920.
- Sharma, M., Banerjee, S., & Paul, J. (2022). Role of social media on mobile banking adoption among consumers. *Technological Forecasting and Social Change*, 180, 121720.

- Sitorus, H. M., Govindaraju, R., Wiratmadja, I., & Sudirman, I. (2019). Examining the role of usability, compatibility and social influence in Mobile banking adoption in Indonesia. *International Journal of Technology*, 10(2), 351.
- Sobaih, A. E., & Elshaer, I. A. (2022). Structural equation modeling-based multi-group analysis: Examining the role of gender in the link between entrepreneurship orientation and entrepreneurial intention. *Mathematics*, 10(20), 3719.
- Suh, B., & Han, I. (2002). Effect of trust on customer acceptance of Internet banking. *Electronic Commerce Research and Applications*, 1(3-4), 247-263.
- Szajna, B. (1996). Empirical evaluation of the revised technology acceptance model. *Management Science*, 42(1), 85-92.
- Venkatesh, V., & Morris, M. G. (2000). Why don't men ever stop to ask for directions? Gender, social influence, and their role in technology acceptance and usage behavior. *MIS Quarterly*, 24(1), 115-139.
- Wan, W. W., Luk, C., & Chow, C. W. (2005). Customers adoption of banking channels in Hong Kong. *International Journal of Bank Marketing*, 23(3), 255-272.
- Wang, J., & Wang, X. (2012). *Structural equation modeling: Applications using Mplus*. Chichester: Wiley.
- Wu, J., Shen, W., Lin, L., Greenes, R. A., & Bates, D. W. (2007). Testing the technology acceptance model for evaluating healthcare professional's intention to use an adverse event reporting system. *International Journal for Quality in Health Care*, 20(2), 123-129.
- Yang, H., & Yoo, Y. (2004). It's all about attitude: Revisiting the technology acceptance model. *Decision Support Systems*, 38(1), 19-31.

Review: Potensi Pemanfaatan Sampah Plastik dan Biomassa melalui Proses Pirolisis sebagai Solusi Energi Alternatif dan Pengelolaan Sampah

Lutfi Firmansyah^{1,2}, Zahrul Mufrodi¹, dan Maryudi¹

¹ Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

² Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

lutfi.firmansyah04@gmail.com, zahrul.mufrodi@gmail.com, maryudi@cbe.uad.ac.id

Abstrak

Ketergantungan terhadap penggunaan bahan bakar fosil memberikan dampak permasalahan diberbagai aspek seperti peningkatan emisi gas rumah kaca dan berkurangnya sumber energi tak terbarukan. Disisi lain isu timbulnya limbah/sampah khususnya limbah plastik dan biomassa menjadi tantangan global. Artikel ini membahas potensi konversi campuran limbah plastik dan biomassa menjadi bahan bakar alternatif menggunakan proses pirolisis. Proses pirolisis menjadi solusi ganda yaitu mengurangi akumulasi produksi limbah sekaligus menghasilkan energi alternatif yang bernilai ekonomis yakni *bio-oil*, *bio-char* dan *syngas*. Dalam implementasi proses pirolisis terdapat beberapa faktor seperti suhu operasi, jenis katalis, teknologi reaktor memiliki pengaruh terhadap hasil pirolisis. Diharapkan dengan pemahaman mendalam terhadap parameter dapat memberikan khasanah pengetahuan dan pengembangan proses pirolisis. Sehingga dengan pemilihan teknologi yang tepat, pirolisis dapat menjadi solusi dalam mengatasi krisis energi dan isu lingkungan global.

Kata Kunci : Pirolisis, Sampah, Biomassa, Plastik

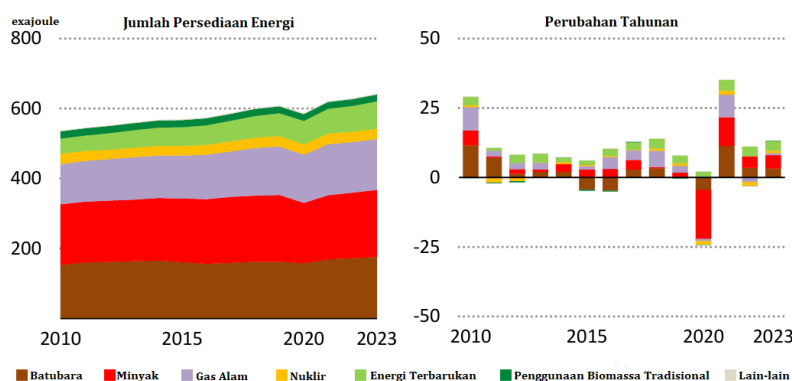
Abstract

Dependence on the use of fossil fuels has caused problems in various aspects, such as increasing greenhouse gas emissions and the depletion of non-renewable energy sources. On the other hand, the issue of waste, particularly plastic and biomass waste, has become a global challenge. This article discusses the potential of converting mixed plastic and biomass waste into alternative fuel through the pyrolysis process. Pyrolysis provides a dual solution: reducing waste accumulation while simultaneously producing economically valuable alternative energy such as bio-oil, biochar, and syngas. In implementing the pyrolysis process, several factors, such as operating temperature, type of catalyst, and reactor technology, significantly influence the pyrolysis outcomes. It is expected that a deep understanding of the parameters will enrich knowledge and support the development of the pyrolysis process. By selecting the appropriate technology, pyrolysis can be a viable solution to address the energy crisis and global environmental issues.

Keywords: Pyrolysis, Waste, Biomass, Plastic

1. Pendahuluan

Ketergantungan energi fosil masih menjadi permasalahan dalam kehidupan. Ketergantungan pada bahan bakar fosil masih sangat dirasakan baik di Negara maju maupun berkembang (Institute for Essential Service Reform, 2023). Peningkatan konsumsi energi berbahan bakar fosil di Dunia meningkat baik dari jenis Batubara, Minyak Bumi, Gas alam, digambarkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Grafik Peningkatan Konsumsi Energi (Wright, 2024)

Dengan meningkatnya penggunaan bahan bakar fosil maka akan mengakibatkan pengurangan sumber energi fosil (energi tidak terbarukan). Selain berkurangnya sumber energi fosil (energi tidak terbarukan), dampak

Info Makalah:

Dikirim : 02-01-25;

Revisi 1 : 10-16-25;

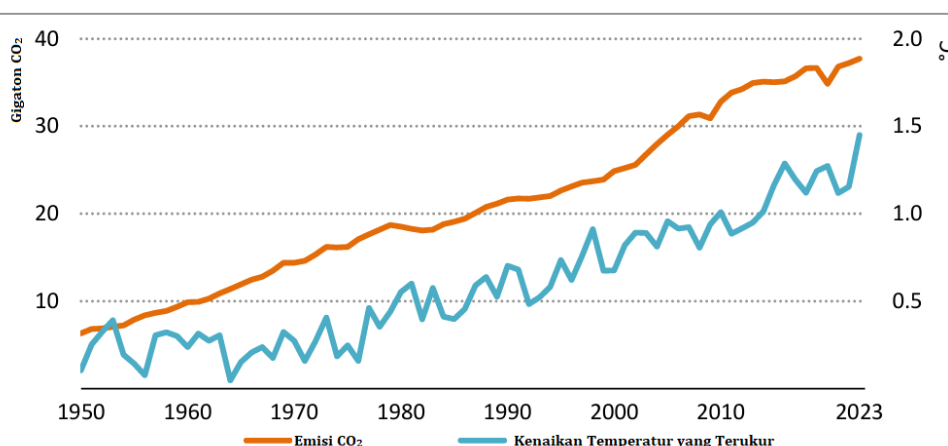
Diterima : 10-16-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-822-1828-8095

e-mail : lutfi.firmansyah04@gmail.com

lain dari peningkatan penggunaan energi fosil adalah efek rumah kaca. Hal ini dikarenakan produksi gas karbondioksida (CO₂) dari bahan bakar fosil mengalami peningkatan yang ditampilkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Kenaikan Emisi Karbondioksida dan Kenaikan Temperatur Lingkungan (Wright, 2024)

Selain permasalahan energi, salah satu permasalahan yang dihadapi dan menyangkut isu lingkungan adalah mengenai sampah. Pengelolaan sampah salah satu masalah global yang menjadikan permasalahan masyarakat di seluruh dunia karena keterbatasan teknologi yang berkembang relatif lambat. Hal ini dikarenakan pengolahan sampah tidak berkelanjutan dan mahal dalam hal biaya lingkungan dengan dampak bau serta produk samping yang berbahaya bagi lingkungan dan berdampak pada kesehatan manusia (King, 2015). Peningkatan penggunaan sampah padat atau organik dapat memberikan sumber daya yang berharga yang berasal dari barang tidak berharga. Dimana keberadaannya yang kurang dimanfaatkan namun dapat diubah menjadi energi alternatif untuk membantu mengatasi masalah kebutuhan energi. Sehingga menjadi solusi dalam siklus pembuangan dan pengelolaan limbah (Burra et al, 2018a).

Salah satu jenis sampah yang menjadi permasalahan adalah sampah plastik. Sampah plastik merupakan salah satu produk berbahan baku minyak bumi dan diolah di industri yang sudah tidak dipergunakan kembali. Pembuangan sampah plastik ke lingkungan menimbulkan masalah lingkungan yang serius. Saat ini, produk plastik merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari masyarakat dan digunakan dalam berbagai industri, seperti konstruksi, perawatan kesehatan, komponen elektronik, pertanian, otomotif, dan pengemasan (Zhang et al., 2021). Karena itu, untuk menanggulangi permasalahan kebutuhan energi dan sampah plastik yaitu dengan memanfaatkan sampah plastik menjadi energi. Beberapa metode konversi dapat dilakukan baik secara mekanik (*pellet* atau briket) maupun secara termal (pembakaran langsung, gasifikasi, pirolisis). Teknik pirolisis sering digunakan lebih dari 50 tahun dan memberikan hasil berkualitas tinggi dengan harga produksi lebih rendah dibandingkan dengan teknik lain (Yang et al., 2016).

Selain pemanfaatan sampah plastik, limbah biomassa juga berpotensi digunakan sebagai sumber biofuel. Energi terbarukan dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, pengembangan teknologi untuk memproduksi energi terbarukan perlu terus didorong di seluruh dunia. Namun tantangan dari energi terbarukan tidak cukup untuk memenuhi permintaan di masa mendatang dalam menggantikan bahan bakar fosil. (Moriarty et al, 2012).

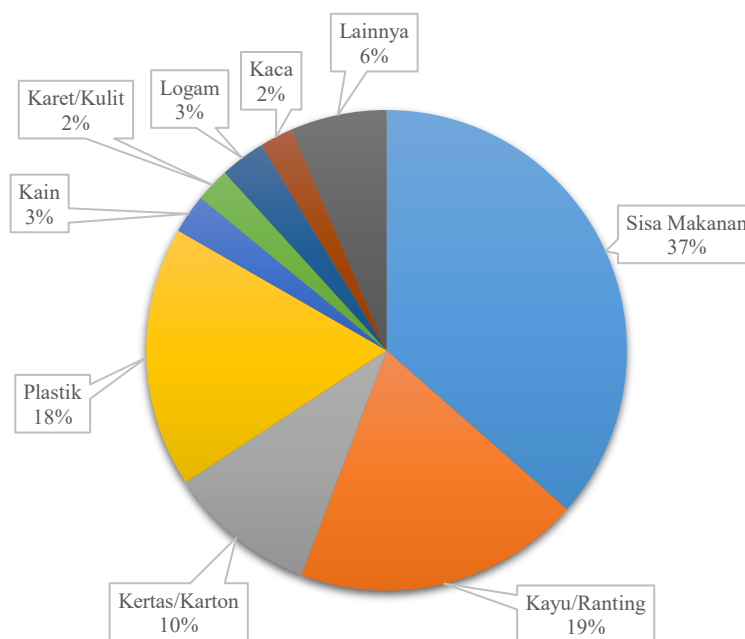
Terdapat potensi keuntungan dalam proses pirolisis campuran antara sampah biomassa dan sampah plastik, di mana proses ini terbukti lebih efektif dibandingkan dengan pirolisis biomassa tunggal. Selain itu, dibandingkan dengan metode konversi termal lainnya seperti pembakaran (*combustion*), gasifikasi, torrefaksi, dan karbonisasi, pirolisis memiliki keunggulan utama, yaitu mampu menghasilkan produk bernilai tinggi seperti bio-oil, gas sintesis, dan biochar secara bersamaan dengan efisiensi energi yang lebih tinggi serta emisi polutan yang lebih rendah. Hal ini menjadikan pirolisis sebagai metode konversi termal yang lebih unggul untuk pengolahan campuran limbah biomassa dan plastik. (Uzoejinwa et al., 2018). Sehingga dengan banyaknya referensi yang diperoleh, pembahasan tentang tantangan dan peluang dari pirolisis campuran plastik dan biomassa dirangkum dalam kesimpulan. Hasilnya mengungkapkan pentingnya penelitian *Co-pyrolysis* dan menyediakan jalur untuk penelitian serta mendukung pengolahan sampah yang berkelanjutan dan sinergis

2. Sampah

Pengelolaan sampah pada saat ini menjadi kebutuhan dasar manusia, hingga dianggap sebagai “hak asasi manusia”. Hal tersebut dikarenakan apabila pengelolaan sampah tidak memadai maka akan mengancam kesehatan bagi manusia. Untuk menjamin kualitas dari kesehatan manusia, sanitasi yang baik dan pengelolaan sampah padat harus sejalan dengan penyediaan air minum, tempat tinggal, makanan, energi, transportasi, dan komunikasi. Meskipun

demikian, pandangan masyarakat terhadap pengelolaan sampah seringkali lebih rendah dibandingkan layanan utilitas lainnya. Untuk mengatasi tentang ketertiban pengolahan sampah maka perlu adanya peraturan tentang sampah dan penerapan serta penegakannya yang ketat (Wilson et al., 2022).

Potensi sampah menjadi bahan baku energi alternatif sangatlah besar. Hal ini dapat menanggulangi permasalahan sampah yang menjadi isu lingkungan. Berdasarkan produksi sampah, klasifikasi jenis sampah yang terbesar adalah sampah organik sebagai peringkat pertama kemudian sampah plastik sebagai peringkat kedua. Persentase jenis sampah di Indonesia berdasarkan data yang dipublikasi oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan berupa komposisi dan jenisnya ditampilkan pada grafik yang ditampilkan pada Gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Persentase Jenis Sampah di Indonesia pada Tahun 2023
(Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2023)

Dengan gabungan persentase antara sampah organik (kayu, kertas) dan plastik mencapai 51,03% maka berpotensi sebagai bahan baku untuk pembuatan *bio fuel* menggunakan proses pirolisis yang akan menghasilkan *syngas*, *bio char* dan *bio oil*.

3. Karakteristik Bahan Baku

3.1. Sampah Plastik

Terdapat beberapa jenis plastik pada jenis sampah. Tergantung dari kegunaan dan karakteristik jenis plastik yang digunakan. Sebagai contoh jenis plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) digunakan sebagai kemasan makanan dikarenakan memiliki karakteristik seperti tidak beracun, tahan terhadap suhu ekstrem, dan ringan. Selain itu titik leleh HDPE berada pada suhu 120°C – 130°C, dimana pada suhu tersebut plastik HDPE berubah menjadi *volatile* dan menjadi *biofuel* berupa *bio oli* dan *syngas*. Sementara sisa plastik yang tidak tergedradasi saat proses pirolisis akan mencari *bio char*. Komposisi *syngas* dan *bio oil* yang terbentuk tergantung dari rantai panjang/rumus molekul yang dimiliki oleh jenis plastik. Untuk jenis-jenis plastik yang umumnya ditemukan ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Jenis dan Sifat Plastik

Jenis Plastik	Rumus Molekul	Sifat	Titik Leleh	Contoh Aplikasi	Referensi
<i>Polyethylene terephthalate</i> (PET)	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	Tahan benturan, transparan, ringan, tahan terhadap kelembaban.	220-230°C	Industri kemasan, Botol minuman, wadah makanan, serat poliester untuk pakaian, komponen listrik	(Nisticò, 2020)
<i>High-density polyethylene</i> (HDPE)	(C ₂ H ₄) _n	Kuat, fleksibel, tahan terhadap bahan kimia, tidak mudah pecah.	120-130°C	Botol bersifat keras, pipa, mainan, penutup jendela, bahan dekorasi.	(Salakhov et al., 2021)
<i>Polyvinyl chloride</i> (PVC)	(C ₂ H ₃ Cl) _n	Bersifat termoplastik, kaku (bisa dibuat fleksibel dengan penambahan plastisizer), tahan terhadap bahan kimia	255-260°C	Pipa air, isolator kabel listrik, rangka jendela, Eksterior Bangunan	(Mnyango & Hlangothi, 2024)
<i>Low-density polyethylene</i> (LDPE)	(C ₂ H ₄) _n	Lembut, fleksibel, transparan, tahan terhadap kelembaban.	100-115°C	Wadah makanan, Botol minum bersifat lunak, peralatan laboratorium.	(Salakhov et al., 2021)
<i>Polypropylene</i> (PP)	(C ₃ H ₆) _n	Bersifat termoplastik, Kuat, ringan, tahan terhadap panas, tahan terhadap bahan kimia.	160-166°C	Komponen kendaraan, bahan dasar <i>furniture</i> , Botol minum, tutup kemasan botol, sedotan, wadah makanan.	(Hisham A. Maddah, 2016)
<i>Polystyrene</i> (PS)	(C ₈ H ₈) _n	Kaku (bisa dibuat berbusa), transparan, ringan	>270°C	Komponen kendaraan (<i>head rest, sun visor</i>), bungkus makanan, kemasan, barang medis (<i>medical cups</i>)	(Lynwood, 2019)
<i>Polycarbonate</i> (PC)	[(CH ₃) ₂ C(C ₆ H ₄ OH) ₂] _n	Transparan, tahan benturan, keras, tahan terhadap panas	250-300°C	Komponen elektronik; bahan konstruksi seperti jendela dan lampu lalu lintas; penyimpanan data seperti cakram padat, DVD.	(Kausar, 2018)
<i>Polyurethanes</i> (PU)	(C ₁₇ H ₁₆ N ₂ O ₄) _n	Tersedia dalam berbagai bentuk, termasuk fleksibel, kaku, dan berbusa, tahan terhadap aus, abrasi, dan bahan kimia, Bersifat termoset	200-250°C	Berbagai busa, dinding/lembaran plastik pada sebagian besar lemari es dan <i>freezer</i> , sepatu, panel bangunan, dll.	(Engels et al., 2013)
<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (ABS)	(C ₈ H ₈) _x •(C ₄ H ₆) _y •(C ₃ H ₃ N) _z	Kuat, ringan, tahan terhadap benturan.	200-250°C	Suku cadang otomotif, peralatan elektronik, peralatan rumah tangga, bahan bangunan, perpipaan, dll.	(Olivera et al., 2016)

Nilai karbon dan hidrogen dari komposisi plastik menjadi faktor dalam nilai *heating value* yang dihasilkan dari bahan bakar. Selain itu nilai karbon dan hidrogen juga dapat memperkirakan hasil keseluruhan *olefin* dan *aromatic*, hasil *bio-char* dan laju penonaktifan katalis (Zhang et al., 2011). Untuk mencari perbandingan komposisi hidrogen dalam suatu bahan baku dapat dicari menggunakan rasio (H/C)_{eff} (Chen et al., 1988) dengan asumsi seluruh komponen bereaksi menjadi H₂O, NH₃, dan H₂S (Zhang et al., 2015). Rasio (H/C)_{eff} pada bahan bakar merupakan parameter termokimia yang digunakan untuk menilai kualitas energi dan karakteristik pembakaran. Nilai (H/C)_{eff} yang tinggi menunjukkan proporsi hidrogen yang lebih besar terhadap karbon, yang berimplikasi pada peningkatan nilai kalor, efisiensi konversi energi, serta reduksi pembentukan jelaga dan emisi karbon dioksida. Dengan demikian, peningkatan rasio (H/C)_{eff} mencerminkan potensi bahan bakar yang lebih bersih dan berkualitas tinggi dalam proses konversi termal. Persamaan rasio (H/C)_{eff} ditampilkan pada persamaan 1 berikut ini.

$$\left(\frac{H}{C}\right)_{eff} = \frac{H - 2O - 3N - 2S}{C} \quad (1)$$

Dimana nilai H, O, N, S dan C pada persamaan 1 di atas adalah persentase mol dalam suatu komponen. Hasil analisa *proximate*, *ultimate*, serta rasio (H/C)_{eff} ditampilkan pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil Analisa *Proximate* dan *Ultimate* dari Berbagai Jenis Plastik

Jenis Plastik	<i>Proximate Analysis</i> (%berat)					<i>Ultimate Analysis</i> (%berat)					(H/C) _{eff}	Referensi
	V	FC	A	M	C	H	N	O	S	Cl		
PET	62	13,11	0	0,06	62	4	34	0	0	0	-0,048	(Olam & Karaca, 2022)
HDPE	16,64	72,10	11,16	0,2	67,57	4,13	0,51	0,79	1,07	0	0,694	(Kasar & Ahmaruzzaman, 2021)
PVC	75,56	0	24,30	0,11	38,69	4,70	0,03	32,11	0	0	0,211	(Othman et al., 2008)
LDPE	95,59	2,82	0,83	0,76	85,86	14,20	0,05	0,02	0	0,05	1,983	(Adoga et al., 2022)
PP	94,73	1,93	3,34	0	84,32	14,19	0,67	0,15	0,06	0,61	2,008	(Adoga et al., 2022)
PS	100	0	0	0	85,41	13,63	0	0	0,319	0	1,912	(Selvaganapathy et al., 2019)
PC	79,73	20,10	0,17	0,67	69,56	5,33	0,08	24,86	0	0	0,819	(Othman et al., 2008)
PU	82,01	9,51	5,78	2,71	63,90	6,45	6,74	16,96	0	0	0,678	(Stančin et al., 2021)
ABS	97,88	1,12	1,01	0,89	76,82	7,45	6,13	34,23	0	0	0,392	(Othman et al., 2008)

Keterangan:

Proximate Analysis : V = Volatile ; FC = Fix Carbon ; A = Ash ; M = Moisture

Ultimate Analysis : C = Carbon ; H = Hydrogen ; N = Nitrogen ; O = Oxygen ; S = Sulfur ; Cl = Chlor

3.2. Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik berupa produk maupun buangan. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, dan limbah hutan. Selain digunakan untuk tujuan primer serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan, dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar) (Williams et al., 2012). Umum yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya. Rangkuman hasil analisa komposisi *Proximate*, *Ultimate* dari beberapa jenis contoh biomassa dijelaskan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Contoh Hasil Analisa dari Beberapa Biomassa

Biomassa	<i>Proximate Analysis</i> (%berat)					<i>Ultimate Analysis</i> (%berat)					H/C _{eff}	Referensi
	V	FC	A	M	C	H	N	O	S			
Janggel Jagung	69,58	15,40	2,58	12,44	47,5	6,1	0,8	45,6	-	0,28		(Muneeer et al., 2019)
Serbuk Kayu	80,87	12,68	3,38	3,07	46,09	7,02	0,50	46,39	-	0,51		(Varma et al., 2019)
Sekam Padi	63,94	15,66	20,40	7,53	35,52	5,10	0,35	38,61	0,02	0,08		(Nayak & Datta, 2022)
Jerami	66,2	8,2	15,1	10,5	52,3	7,3	1,3	38,5	0,1	0,51		(Pinto et al., 2016)
Cangkang Kernel	71,15	18,76	4,75	5,34	48,35	6,50	1,25	34,15	0,08	0,52		(Kaniapan et al., 2021)
Tempurung Kelapa	71,1	17,6	0,8	10,5	48,6	5,97	0,62	43,8	1,09	0,89		(Hazman et al., 2024)
Bambu	72,34	1,31	18,35	8	45,47	6,63	-	47,44	0,46	0,18		(Pattanayak et al., 2020)
Kertas	72,8	9,5	11,2	6,5	39,78	5,50	0,10	54,62	-	-0,41		(Chen et al., 2016)
Ampas Tebu	71,79	11,13	5,97	10,91	42,07	5,60	0,26	52,01	0,06	-0,27		(Hassan et al., 2019)

Keterangan:

Proximate Analysis : V = Volatile ; FC = Fix Carbon ; A = Ash ; M = Moisture

Ultimate Analysis : C = Carbon ; H = Hydrogen ; N = Nitrogen ; O = Oxygen ; S = Sulfur

4. Pirolisis

Pirolisis adalah salah satu metode konversi bahan organik ataupun plastik menjadi *biofuel* secara termokimia dengan kondisi tanpa kehadiran oksigen. Terdapat beberapa jenis pirolisis yang berdasarkan temperatur kondisi operasi dan waktu tinggal umpan yang diberikan. Ringkasan dari jenis-jenis pirolisis ditampilkan pada Tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Jenis-Jenis Pirolisis (Adams et al., 2017)

Jenis Pirolisis	Kondisi Operasi		
	Tekanan	Temperatur	Waktu Tinggal
<i>Slow Pyrolysis</i>	1 atm	350-750°C	< 10 detik
<i>Intermediate Pyrolysis</i>	1 atm	< 500°C	4-10 detik
<i>Fast Pyrolysis</i>	1 atm	400-550°C	0,5-4 detik
<i>Flash Pyrolysis</i>	1 atm	400-1000°C	<0,5 detik
<i>Vacuum Pyrolysis</i>	<50 kPa (dibawah atmosfer)	300-500°C	-

Selain jenis-jenis pirolisis, jenis teknologi operasi harus menjadi pertimbangan dalam merancang sebuah proses pirolisis. Ringkasan jenis teknologi pirolisis ditampilkan pada Tabel 5. Dikarenakan pemilihan jenis teknologi pirolisis menentukan biaya operasi, kesulitan dan kemudahan dalam pengoperasian, biaya modal, kapasitas serta faktor lainnya yang menjadi keuntungan maupun tantangan.

Tabel 5. Jenis Jenis Reaktor Pirolisis

Jenis reaktor	Mekanisme	Keuntungan	Tantangan	Sumber
Reaktor <i>Batch</i>	Proses berlangsung secara siklus <i>Batch</i> . Sehingga umpan dimasukkan, diproses dan menghasilkan produk dalam satu siklus.	Desain reaktor sederhana Cocok untuk produksi skala kecil	Proses memerlukan waktu untuk memanaskan ulang saat awal masuk umpan. Tidak efisien untuk produksi besar	(Berrueco et al., 2005)
Reaktor Kontinyu	Umpan dapat dimasukkan secara terus menerus dan menghasilkan produk secara kontinyu	Memasukkan umpan tidak perlu menghentikan proses pirolisis Efisiensi untuk produksi skala besar	Desain lebih rumit dibandingkan reaktor <i>batch</i> . Pengoperasian lebih kompleks untuk menjaga kondisi operasi agar tunak	(Qureshi et al., 2018)
Reaktor <i>Fix Bed</i>	Umpan di dalam reaktor dengan ditumpuk, kemudian panas di hantarkan ke tumpukkan umpan.	Desain sederhana	Pemanasan tidak merata Potensi bahan yang tidak terpirolisis sangat besar (terutama di bagian yang jauh dari sumber panas)	(Quan et al., 2016)
Reaktor <i>Fluidized Bed</i>	Umpan dicampur/dihembuskan menggunakan gas <i>inert</i> /uap panas sehingga menghasilkan peristiwa fluidisasi	Pemanasan merata Efisiensi tinggi	Memerlukan pengendalian gas yang kompleks dalam pengaturannya	(Prabhakara et al., 2021)
Reaktor <i>Moving Bed</i>	Umpan bergerak perlahan melalui area pemanasan secara perlahan	Panas yang diterima umpan menjadi merata	Tidak cocok untuk bahan yang bersifat lengket	(Aylón et al., 2008)
Reaktor <i>Microwave</i>	Pemanasan dilakukan menggunakan gelombang mikro yang dipancarkan langsung ke umpan	Pemanasan berlangsung cepat Efisiensi energi tinggi	Memerlukan tempat yang luas Biaya investasi sangat tinggi. Pengontrolan panas yang diberikan lebih sulit dibanding pemanasan secara konvensional	(Motasemi & Afzal, 2013)
Reaktor <i>Thermal Solar</i>	Panas menggunakan energi matahari untuk memanaskan umpan	Ramah Lingkungan Tidak menimbulkan emisi dalam proses produksi	Bergantung dengan keberadaan sinar matahari Proses <i>start up</i> membutuhkan waktu yang sangat lama	(Lameh et al., 2021)
Reaktor <i>Rotary Kiln</i>	Umpan dimasukkan ke dalam reaktor berbentuk tabung dan kemudian diputar selama proses	Bahan akan teraduk sehingga meratakan panas yang diberikan ke umpan	Memerlukan energi tambahan untuk memutar reaktor	(Fu et al., 2018)
Reaktor <i>Screw Rotary</i> (Auger)	Umpan dipindahkan ke dalam reaktor menggunakan <i>screw rotary</i>	Pemindahan material konsisten (kontinyu) Dapat mengontrol banyaknya umpan dengan menyesuaikan kecepatan rotasi	Dimensi bahan harus kecil dan tidak bersifat lengket untuk menghindari penyumbatan	(Mathew & Muruganandam, 2017)
Reaktor Vakum	Pengoperasian proses pirolisis dilakukan pada tekanan rendah (dibawah tekanan lingkungan)	Volatil mudah terlepas sehingga proses dapat berlangsung pada temperatur lebih rendah Bahan baku mudah terirolisis	Memerlukan sistem vakum. Kebocoran kecil dapat mengganggu hasil vakum	(Mašek et al., 2013)

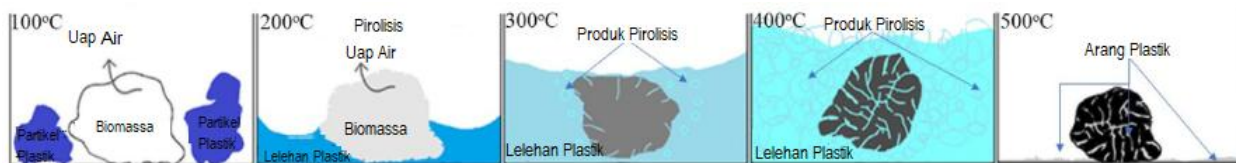
5. Pengaruh Jenis Bahan Terhadap Hasil *Biofuel*.

Untuk memberikan gambaran atas hasil pirolisis dengan perbedaan bahan diambil dari penelitian yang ditampilkan di Tabel 6 (Abadi et al., 2021). Dimana bahan baku menggunakan campuran sampah plastik dengan sampah biomassa berupa kayu Oak. Variasi dilakukan dengan membedakan bahan baku sampah plastik yang terdiri dari *polyethylene Terephthalate* (PET), *polypropylene* (PP) dan *polystyrene* (PS). Jenis reaktor yang digunakan berjenis *fix bed*, dengan katalis HZSM-5 pada kondisi operasi 450°C dibantu gas pembawa berupa Nitrogen murni dengan laju 300 ml/menit.

Tabel 6. Hasil Percobaan Pirolisis Campuran Sampah Biomassa dan Plastik (Abadi et al., 2021)

Sampel	Bio Oil (%w/w)	Syngas (%w/w)	Bio Char (%w/w)	Kandungan Air (%w/w)	Hydrocarbon (%w/w)	Oxygenated (%w/w)
Oak	25	26	30	19	14	86
PET	85	12	3	0	100	0
PP	81	17	2	0	100	0
PS	92	7	1	0	100	0
PET:Oak (1:1)	53	21	16	10	78	22
PP : Oak (1:1)	51	24	14	11	75	25
PS : Oak (1:1)	60	16	13	11	75	25

Dari tabel 6 didapatkan bahwa dengan komposisi yang sama antara sampah biomassa dengan plastik terdapat perbedaan di masing-masing variasi. Untuk melakukan pendekatan pada proses pirolisis campuran sampah biomassa dan plastik digambarkan proses tahapan pirolisis pada Gambar 4.



Gambar 4. Gambar Proses Tahapan Pirolisis Campuran Sampah Biomassa dengan Plastik (Abadi et al., 2021)

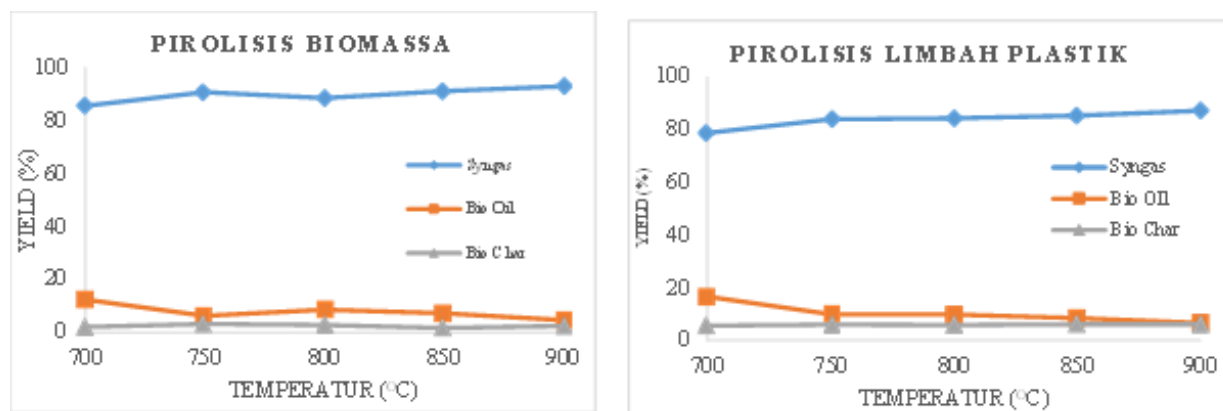
Berdasarkan gambar 4 dapat dilihat semakin meningkatnya temperatur operasi pirolisis, maka plastik akan meleleh dan menjadi volatile. *Volatile* yang terbentuk dapat menghasilkan *bio oil* maupun *syngas*. Namun dengan adanya lelehan plastik, akan mengakibatkan lelehan menempel sehingga menyelimuti partikel biomassa. Hal ini menyebabkan perubahan stabilitas termal dan laju degradasi partikel kayu.

Selain itu berdasarkan tabel 3 dimana hasil uji proximate analisis bahwa PS menghasilkan *volatile matter* lebih besar dari PP, dan PP lebih besar *volatile matter* yang dihasilkan dari PET. Sehingga hipotesa komposisi bio char yang terbentuk yang tertinggi adalah campuran OAK dengan PET. Dikarenakan PET lebih sulit untuk tergedradasi menjadi *volatile* dibandingkan PP dan PS. Sehingga sisa partikel PET yang tidak berubah menjadi *volatile* melapisi lebih banyak biomassa dan menghasilkan persentase *bio-char* lebih banyak.

6. Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Terhadap Hasil Biofuel

Untuk memberikan gambaran akan pengaruh temperatur dan jumlah katalis diambil data hasil percobaan yang telah dilakukan oleh (Suhaj et al., 2020). Data perubahan temperatur ditampilkan berbentuk grafik pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, semakin tinggi kenaikan suhu, perolehan komposisi *syngas* yang terbentuk cenderung semakin meningkat, baik pada umpan biomassa maupun plastik. Hal ini terlihat dari kenaikan grafik pada Gambar 5 dimana perolehan *syngas* dengan umpan biomassa pada temperatur 700 °C sebesar 85,6%w/w meningkat hingga 93%w/w pada temperatur 900°C.. Begitu pula dengan plastik, hasil *syngas* meningkat dari 78,7%w/w pada suhu 700°C menjadi 87,2%w/w pada temperatur 900°C.

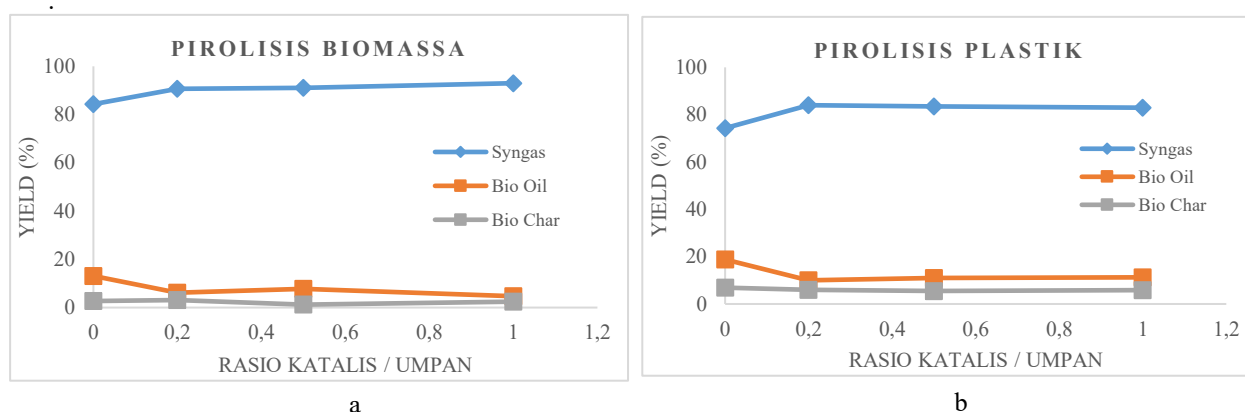
Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang menegaskan bahwa peningkatan temperatur mampu mempercepat proses devolatilisasi sehingga memperbanyak pembentukan gas ringan seperti H₂, CO, dan CH₄ yang merupakan komponen utama bio-syngas (Suhartono et al., 2022). Selain itu, pada temperatur tinggi, reaksi reforming dan cracking hidrokarbon berat menjadi lebih dominan, menghasilkan efisiensi konversi yang lebih baik terhadap biofuel cair maupun gas (Suhartono et al., 2023). Dengan demikian, peningkatan suhu reaksi tidak hanya berpengaruh terhadap kuantitas syngas, tetapi juga kualitas energi yang dihasilkan, menjadikannya langkah penting dalam optimasi produksi biofuel dari campuran biomassa dan plastik.



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Terhadap Hasil Pirolisis (a) Biomassa (b) Plastik

Hal tersebut berbanding terbalik dengan perolehan *bio-oil*. Dimana semakin tinggi suhu operasi maka perolehan *bio-oil* cenderung menurun. Hal ini dapat dilihat dari grafik pada Gambar 5 dimana perolehan *bio-oil* dengan umpan biomassa pada temperatur 700 °C sebesar 12,4% cenderung turun hingga pada temperatur 900°C menjadi 4,6%. Begitupun dengan umpan plastik, pada suhu 700°C hasil *bio-oil* sebesar 16,6% cenderung turun hingga pada temperatur 900°C sebesar 6,7% . Pengaruh kenaikan temperatur tidak terlalu berpengaruh terhadap perolehan *bio-char*, dimana perolehan dengan kenaikan suhu cenderung stabil perolehannya.

Untuk pengaruh penggunaan katalis yang dilakukan pada percobaan (Suhaj et al., 2020) dengan jenis katalis arang hasil pirolisis limbah ban. Dimana hasil yang didapat dengan penambahan katalis akan cenderung menghasilkan *syngas* yang lebih besar baik umpan berupa biomassa maupun plastik seperti yang ditampilkan pada Gambar 6. Hal ini berbanding terbalik dengan perolehan *bio-oil* yang cenderung menurun baik umpan berupa biomassa maupun plastik. Untuk perolehan *bio-char* tidak berpengaruh terhadap penambahan katalis dimana hasil dari percobaan perolehannya cenderung stabil



Gambar 6. Pengaruh Penambahan Katalis Terhadap Hasil Pirolisis (a) Biomassa (b) Plastik

Kesimpulan

Dengan memanfaatkan sampah menjadi bahan bakar alternatif diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan tersebut. Salah satu metode konversi yang dapat dilakukan adalah pirolisis. Namun dalam perancangan pirolisis harus dapat menentukan teknologi, kondisi operasi yang ideal. Mayoritas dari hasil pirolisis yang sering dimanfaatkan berupa *bio oil*. Untuk menentukan hasil optimum *bio-oil* yang terbentuk harus menentukan kondisi operasi dan penggunaan katalis yang ideal untuk hasil yang diinginkan.

Dikarenakan dengan komposisi campuran bahan baku sampah plastik dan biomassa yang sama, namun berbeda jenis plastik yang digunakan akan menyebabkan perbedaan hasil komposisi *bio oil* yang diperoleh. Begitu pula dengan kondisi operasi dan penggunaan katalis. Dengan merubah kondisi operasi dan rasio katalis akan mempengaruhi perolehan *bio oil*. Oleh karena itu, dengan pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh bahan baku, suhu, jenis katalis dan teknologi pirolisis yang digunakan dapat dilakukan untuk produk yang diinginkan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang terlibat dalam proses penyusunan artikel ini. Secara khusus kami mengucapkan terima kasih kepada Program Magister Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri

Universitas Ahmad Dahlan dan Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani atas fasilitas, dukungan akademis serta bimbingan yang diberikan.

Daftar Pustaka

- Abadi, M. S. A., Van Geem, K. M., Fathi, M., Bazgir, H., & Ghadiri, M. (2021). The pyrolysis of oak with polyethylene, polypropylene and polystyrene using fixed bed and stirred reactors and TGA instrument. *Energy*, 232, 121085. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121085>
- Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A., & Watson, I. (2017). Biomass Conversion Technologies. In *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2>
- Adoga, S., Igbum, O. G., Okopi, G., Ikyenge, B. A., Ochi, O. I., & Ode, P. (2022). Catalytic pyrolysis of low density polyethylene and polypropylene wastes to fuel oils by N-clay. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 33(1), 50–55. <https://doi.org/10.2478/auoc-2022-0007>
- Aylón, E., Fernández-Colino, A., Navarro, M. V., Murillor, R., García, T., & Mastral, A. M. (2008). Waste tire pyrolysis: Comparison between fixed bed reactor and moving bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(12), 4029–4033. <https://doi.org/10.1021/ie071573o>
- Berruoco, Esperanza, E., Mastral, F. J., Ceamanos, J., & García-Bacaicoa, P. (2005). Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74(1–2), 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.007>
- Burra, K. G., & Gupta, A. K. (2018). Kinetics of synergistic effects in co-pyrolysis of biomass with plastic wastes. *Applied Energy*, 220(February), 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.117>
- Chen, W., Shi, S., Zhang, J., Chen, M., & Zhou, X. (2016). Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene: Synergistic effect and oil characterization. *Energy Conversion and Management*, 112, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.005>
- Chen, Walsh, D. E., & Koenig, L. R. (1988). Fluidized-bed upgrading of wood pyrolysis liquids and related compounds. *ACS Symposium Series*, 376, 277–289. <https://doi.org/10.1021/bk-1988-0376.ch024>
- Engels, H. W., Pirkel, H. G., Albers, R., Albach, R. W., Krause, J., Hoffmann, A., Casselmann, H., & Dormish, J. (2013). Polyurethanes: Versatile materials and sustainable problem solvers for today's challenges. *Angewandte Chemie - International Edition*, 52(36), 9422–9441. <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>
- Fu, P., Bai, X., Li, Z., Yi, W., Li, Y., & Zhang, Y. (2018). Fast pyrolysis of corn stovers with ceramic ball heat carriers in a novel dual concentric rotary cylinder reactor. *Bioresource Technology*, 263(May), 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.033>
- Hassan, H., Lim, J. K., & Hameed, B. H. (2019). Catalytic co-pyrolysis of sugarcane bagasse and waste high-density polyethylene over faujasite-type zeolite. *Bioresource Technology*, 284(March), 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.137>
- Hazman, N., Mat Isa, N., Nasir, N. F., Hussein, M., & D.S., A. (2024). The Proximate and Ultimate Composition of Pulverised Coconut Shell. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(2), 270–277. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.02.028>
- Hisham A. Maddah. (2016). Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- Institute for Essential Service Reform. (2023). *No Title*. <https://iesr.or.id/agenda-iesr/peluncuran-studi-transisi-berkeadilan-di-daerah-penghasil-batu-bara-di-indonesia-studi-kasus-kab-muara-enim-dan-kab-paser/>
- Kaniapan, S., Suhaimi, H., Hamdan, Y., & Pasupuleti, J. (2021). Experiment analysis on the characteristic of empty fruit bunch, palm kernel shell, coconut shell, and rice husk for biomass boiler fuel. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(3), 8300–8309. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.3.2021.08.0652>
- Kasar, P., & Ahmaruzzaman, M. (2021). Correlative HHV prediction from proximate and ultimate analysis of char obtained from co-cracking of residual fuel oil with plastics. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(7), 1370–1380. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0790-8>
- Kausar, A. (2018). A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 34(1), 60–97. <https://doi.org/10.1177/8756087917691088>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2023). *Komposisi Sampah Nasional 2023*. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- King, S. B. (2015). Lessons from China. *JACC: Cardiovascular Interventions*, 8(14), 1911–1912. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2015.09.007>
- Lameh, M., Abbas, A., Azizi, F., & Zeaiter, J. (2021). A simulation-based analysis for the performance of thermal solar energy for pyrolysis applications. *International Journal of Energy Research*, 45(10), 15022–15035. <https://doi.org/10.1002/er.6781>
- Lynwood, C. (2019). Chemistry Research and Application Polystyrene: Synthetic, characteristic and Application. In C. Lynwood (Ed.), *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). Nova Science Publishers, Inc.

- http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_M_ELESTARI
- Mašek, O., Brownsort, P., Cross, A., & Sohi, S. (2013). Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel*, 103, 151–155. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.044>
- Mathew, M., & Muruganandam, L. (2017). Pyrolysis of Agricultural Biomass using an Auger Reactor: A Parametric Optimization. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 15(3). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2016-0133>
- Mnyango, J. I., & Hlangothi, S. P. (2024). Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 0(May), 1–59. <https://doi.org/10.1177/14777606241308652>
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.151>
- Motasemi, F., & Afzal, M. T. (2013). A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 317–330. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008>
- Muneer, B., Zeeshan, M., Qaisar, S., Razzaq, M., & Iftikhar, H. (2019). Influence of in-situ and ex-situ HZSM-5 catalyst on co-pyrolysis of corn stalk and polystyrene with a focus on liquid yield and quality. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117762>
- Nayak, P. ., & Datta, A. . (2022). *An entropy-based TOPSIS approach for selecting best suitable.pdf*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13399-022-02824-3>
- Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90(April). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>
- Olam, M., & Karaca, H. (2022). Characterization of products obtained of waste polyethylene terephthalate by pyrolysis. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 41(4). <https://doi.org/10.1002/ep.13835>
- Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K., & Vivek, C. S. (2016). Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review. *Journal of Materials Science*, 51(8), 3657–3674. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9668-7>
- Othman, Basri, N., & Yunus, M. (2008). Determination of Physical and Chemical Characteristics of Electronic Plastic Waste (Ep-Waste) Resin Using Proximate and Ultimate Analysis Method. *Iccbt*, 16, 169–180.
- Pattanayak, S., Hauchhum, L., Loha, C., & Sailo, L. (2020). Selection criteria of appropriate bamboo based biomass for thermochemical conversion process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(2), 401–407. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00421-5>
- Pinto, F., Miranda, M., & Costa, P. (2016). Production of liquid hydrocarbons from rice crop wastes mixtures by co-pyrolysis and co-hydropyrolysis. *Fuel*, 174, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.075>
- Prabhakara, M., Bramer, E. A., & Brem, G. (2021). Role of dolomite as an in-situ CO₂ sorbent and deoxygenation catalyst in fast pyrolysis of beechwood in a bench scale fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 224(September), 107029. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107029>
- Quan, C., Gao, N., & Song, Q. (2016). Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 121, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.005>
- Qureshi, K. M., Kay Lup, A. N., Khan, S., Abnisa, F., & Wan Daud, W. M. A. (2018). A technical review on semi-continuous and continuous pyrolysis process of biomass to bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 131, 52–75. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.010>
- Salakhov, I. I., Shaidullin, N. M., Chalykh, A. E., Matsko, M. A., Shapagin, A. V., Batyrshin, A. Z., Shandryuk, G. A., & Nifant'ev, I. E. (2021). Low-temperature mechanical properties of high-density and low-density polyethylene and their blends. *Polymers*, 13(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/polym13111821>
- Selvaganapathy, Muthuvelayudham, R., & Jayakumar, M. (2019). Process parameter optimization study on thermolytic polystyrene liquid fuel using response surface methodology (RSM). *Materials Today: Proceedings*, 26(xxxx), 2729–2739. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.572>
- Stančin, H., Mikulčić, H., Manić, N., Stojiljković, D., Vujanović, M., Wang, X., & Duić, N. (2021). Thermogravimetric and kinetic analysis of biomass and polyurethane foam mixtures Co-Pyrolysis. *Energy*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121592>
- Suhaj, P., Husár, J., & Haydary, J. (2020). Gasification of RDF and its components with tire pyrolysis char as tar-cracking catalyst. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/su12166647>
- Suhartono, Harsanti, M., Septiyanti, W., Suharto, & Achmad, F. (2022). Zeolite catalytic pyrolysis of waste tire into fuel in gasoline hydrocarbon range. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 969(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/969/1/012030>

- Suhartono, Romli, A., Prabowo, B. H., Kusumo, P., & Suharto. (2023). Converting Styrofoam Waste into Fuel Using a Sequential Pyrolysis Reactor and Natural Zeolite Catalytic Reformer. *International Journal of Technology*, 14(1), 185–194. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i1.4907>
- Uzoejinwa, B. B., He, X., Wang, S., El-Fatah Abomohra, A., Hu, Y., & Wang, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Conversion and Management*, 163(January), 468–492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
- Varma, A. K., Thakur, L. S., Shankar, R., & Mondal, P. (2019). Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. *Waste Management*, 89, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.016>
- Williams, A., Jones, J. M., Ma, L., & Pourkashanian, M. (2012). Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 113–137. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.10.001>
- Wilson, D., Rodic, L., Modak, P., Soss, R., Rogero, A., Velis, C., Iyer, M., & Simonett, O. (2022). *Global waste management outlook*.
- Wright, V. P. (2024). World Energy Outlook. In *World Energy Outlook*. International Energy Agency.
- Yang, Li, R., Cui, C., Liu, S., Qiu, Q., Ding, Y., Wu, Y., & Zhang, B. (2016). Catalytic hydroprocessing of microalgae-derived biofuels: A review. *Green Chemistry*, 18(13), 3684–3699. <https://doi.org/10.1039/c6gc01239f>
- Zhang, B., Zhong, Z., Min, M., Ding, K., Xie, Q., & Ruan, R. (2015). Catalytic fast co-pyrolysis of biomass and food waste to produce aromatics: Analytical Py-GC/MS study. *Bioresource Technology*, 189, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.092>
- Zhang, Cheng, Y. T., Vispute, T. P., Xiao, R., & Huber, G. W. (2011). Catalytic conversion of biomass-derived feedstocks into olefins and aromatics with ZSM-5: The hydrogen to carbon effective ratio. *Energy and Environmental Science*, 4(6), 2297–2307. <https://doi.org/10.1039/c1ee01230d>
- Zhang, Zhao, Y., Wang, D., Yan, M., Zhang, J., Zhang, P., Ding, T., Chen, L., & Chen, C. (2021). Current technologies for plastic waste treatment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124523>

Analisis Implementasi Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Bangunan Gedung Berbasis Sistem Informasi Manajemen Bangunan Gedung (SIMBG) Di Kabupaten Bogor, Jawa Barat

Bersama Salamuddin Ginting, dan Asep Supriatna

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

bsginting@gmail.com, sekredbmpr202@gmail.com

Abstrak

Regulasi nasional mengamankan bangunan yang andal dan aman melalui Sertifikat Laik Fungsi (SLF), namun implementasinya di Kabupaten Bogor menghadapi berbagai tantangan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja implementasi SLF berbasis aplikasi Sistem Informasi Manajemen Bangunan Gedung (SIMBG), mengidentifikasi faktor yang memengaruhinya, dan merumuskan strategi perbaikan. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan campuran (*mixed-method*) yaitu menggabungkan analisis kuantitatif terhadap 2.440 data Persetujuan Bangunan Gedung (PBG) dan 197 permohonan SLF dari basis data SIMBG dengan analisis kualitatif melalui studi kasus, wawancara, dan analisis dokumen. Hasil penelitian menunjukkan kinerja implementasi belum optimal, ditandai oleh kesenjangan kepatuhan sebesar 24,6% untuk bangunan skala signifikan dan kegagalan fungsi jalur cepat (*fast track*) 3 hari. Faktor utama penyebab rendahnya kepatuhan adalah kurangnya sosialisasi dan kesadaran pemilik bangunan, serta kendala prosedural dalam SIMBG. Sementara itu, keterlambatan pada proses jalur standar (*standard track*) 28 hari disebabkan oleh ketidaklengkapan dokumen pemohon dan kapasitas teknis internal pemerintah daerah yang terbatas. Meskipun demikian, analisis SWOT menempatkan implementasi SLF pada kuadran pertumbuhan agresif, mengindikasikan potensi perbaikan yang sangat besar. Rekomendasi strategis difokuskan pada sosialisasi terstruktur, penguatan regulasi daerah melalui Peraturan Bupati, peningkatan efisiensi, pengembangan ekosistem jasa konstruksi lokal, dan advokasi kebijakan di tingkat nasional.

Kata kunci: Sertifikat Laik Fungsi, Persetujuan Bangunan Gedung (PBG), SIMBG, Bangunan Gedung.

Abstract

National regulations mandate reliable and safe buildings through the Certificate of Occupancy Worthiness (Sertifikat Laik Fungsi—SLF), yet its implementation in Bogor Regency faces significant challenges. This study examines the performance of SLF implementation via the Sistem Informasi Manajemen Bangunan Gedung (SIMBG), identifies influencing factors, and proposes improvement strategies. A mixed-method approach was applied, combining quantitative analysis of 2,440 Building Approvals (PBG) and 197 SLF applications from the SIMBG database with qualitative case studies, interviews, and document analysis. Findings indicate suboptimal performance, marked by a 24.6% compliance gap for significant-scale buildings and the failure of the mandated 3-day fast track. Low compliance stems mainly from limited outreach and awareness among building owners, as well as procedural constraints in SIMBG. Delays in the 28-day standard track are attributed to incomplete applicant documents and the local government's limited technical capacity. Nevertheless, SWOT analysis positions SLF implementation in the aggressive growth quadrant, reflecting strong potential for improvement. Recommended strategies include structured outreach, strengthening local regulations through a Regent Regulation, enhancing efficiency, fostering the local construction ecosystem, and advocating policies at the national level.

Keywords: Certificate of Occupancy Worthiness, Persetujuan Bangunan Gedung (PBG), SIMBG, Buildings.

1. Pendahuluan

Penyelenggaraan bangunan gedung di Indonesia diatur secara komprehensif untuk menjamin terpenuhinya standar kelaikan yang mencakup aspek keselamatan, kesehatan, kenyamanan, dan kemudahan bagi pengguna. Instrumen hukum utama dalam memastikan hal tersebut adalah Sertifikat Laik Fungsi (SLF), sebuah dokumen yang diterbitkan oleh Pemerintah Daerah sebagai pernyataan resmi bahwa suatu bangunan telah layak untuk dimanfaatkan sesuai fungsinya, yang tidak hanya menjamin kelaikan teknis, tetapi juga terbukti berdampak pada nilai dan kinerja aset properti (Nasution dkk., 2024). Kewajiban kepemilikan SLF ini diamanatkan oleh Undang - Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung (UUBG) dan dipertegas dalam peraturan pelaksanaannya, yaitu Peraturan Pemerintah

Info Makalah:

Dikirim : 07-22-25;

Revisi 1 : 09-26-25;

Diterima : 11-21-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-818-730-018

e-mail : bsginting@gmail.com

Nomor 16 Tahun 2021 (PP 16/2021), yang tata cara dan panduan praktisnya telah banyak diulas oleh berbagai kalangan (Wahyuni, 2022; Rekanusa, 2024; Schinder Law Firm, 2024).

Dalam rangka menyederhanakan proses perizinan dan mendorong kemudahan berusaha, pemerintah melalui Undang - Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Cipta Kerja memperkenalkan reformasi birokrasi yang signifikan. Salah satu manifestasi utamanya adalah peluncuran Sistem Informasi Manajemen Bangunan

Gedung (SIMBG), sebuah platform digital terintegrasi yang dirancang untuk memfasilitasi seluruh proses perizinan bangunan, mulai dari Persetujuan Bangunan Gedung (PBG) hingga penerbitan SLF, secara daring, transparan, dan efisien (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, n.d.).

Meskipun kerangka regulasi dan infrastruktur digital telah tersedia, implementasi di tingkat daerah masih menghadapi tantangan kompleks. Kabupaten Bogor, sebagai wilayah aglomerasi sekaligus penyangga Jakarta dengan laju urbanisasi dan pertumbuhan penduduk tertinggi di Indonesia, menjadi studi kasus yang relevan. Pesatnya pembangunan fisik di wilayah ini sering kali tidak diimbangi dengan tingkat kepatuhan terhadap regulasi teknis. Banyak pemilik bangunan menunda atau bahkan tidak mengurus SLF karena berbagai faktor, seperti kurangnya pemahaman, persepsi biaya yang mahal, dan kendala prosedural. Kondisi ini menciptakan risiko laten terhadap keselamatan publik dan berpotensi mengganggu ketertiban tata bangunan.

Telah banyak studi yang memetakan masalah umum implementasi SLF, terdapat celah penelitian (*research gap*) yang signifikan. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada analisis kualitatif atau dilakukan sebelum implementasi aplikasi SIMBG sebagai produk dari UU Cipta Kerja. Juga belum ada penelitian yang melakukan analisis mendalam dengan metode campuran (*mixed methods*) untuk mengevaluasi kinerja implementasi SLF secara kuantitatif di wilayah dengan karakteristik hiper-urbanisasi seperti Kabupaten Bogor. Untuk menekankan kebaruan (*novelty*) penelitian ini, tabel berikut menyajikan perbandingan dengan studi-studi terdahulu.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Peneliti (Tahun)	Lokasi/Konteks	Metode	Fokus/Temuan Utama	Celah yang Diisi oleh Penelitian Ini
Wiharti dkk., (2023)	Studi Komparatif (Indonesia, Malaysia, India)	Studi Komparatif	Perbedaan di penegakan sanksi yang lebih tegas	Indonesia dapat belajar dari Malaysia dan India melalui penegakan sanksi yang lebih tegas
Aziza (2021)	Kota Bandung	Kualitatif	Kesiapan regulasi dan pemangku kepentingan belum optimal.	Analisis kuantitatif kinerja pasca-UU Cipta Kerja dan penggunaan data SIMBG.
Andhyni (2022); Iskandar dkk., (2013); Harisun (2013)	Umum/Kota Semarang	Kualitatif/Evaluatif	Kurangnya sosialisasi, keterbatasan SDM di pemerintah daerah, dan lemahnya sanksi	Integrasi analisis kuantitatif (<i>compliance gap</i>) dengan data <i>real-time</i> dari platform digital (SIMBG).
Heriyusman (2021)	Umum	Gap Analysis	Lemahnya sanksi, rendahnya kesadaran pemilik bangunan, dan prosedur penerbitan yang tidak seragam	Menggunakan pendekatan <i>mixed-method</i> untuk validasi temuan dan merumuskan strategi spesifik berbasis SWOT.
Octafialdo & Hartono (2021); Mahmudi dkk., (2019)	Kabupaten Sidoarjo Kawasan Industri Semarang	Kualitatif	Komunikasi dan sosialisasi kebijakan kepada pelaku usaha masih lemah.	Fokus pada wilayah hiper-urban (Kab. Bogor) dengan dinamika pembangunan yang lebih kompleks dan beragam fungsi bangunan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengintegrasikan analisis data kinerja dari SIMBG dengan studi kasus kualitatif untuk memahami akar permasalahan secara kontekstual dan merumuskan strategi perbaikan yang spesifik dan terukur.

Berdasarkan latar belakang dan tinjauan pustaka, teridentifikasi beberapa permasalahan utama dalam implementasi SLF di Kabupaten Bogor. Permasalahan pertama adalah adanya kesenjangan kepatuhan (*compliance gap*), di mana terdapat selisih signifikan antara jumlah PBG yang terbit dengan permohonan SLF yang masuk, mengindikasikan rendahnya kepatuhan pemilik bangunan. Selain itu, terjadi inefisiensi proses karena prosedur "jalur cepat" 3 hari yang diamanatkan regulasi tidak berfungsi efektif, sehingga permohonan menumpuk pada "jalur standar" yang lebih lama. Dan masalah ini diperparah oleh rendahnya pemahaman pemangku kepentingan mengenai urgensi dan prosedur SLF akibat minimnya sosialisasi, serta adanya kendala teknis dan administratif seperti ketidaklengkapan dokumen pemohon dan keterbatasan kapasitas teknis pemerintah daerah.

Berdasarkan identifikasi tersebut, maka rumusan masalah utama dalam penelitian ini adalah: "Bagaimana mewujudkan implementasi SLF yang efektif di Kabupaten Bogor dengan meminimalkan hambatan yang ada, seraya tetap menjamin terpenuhinya standar keselamatan bangunan sesuai kerangka regulasi terkini?"

Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis efektivitas pelaksanaan penerbitan SLF di Kabupaten Bogor berdasarkan data kuantitatif kepatuhan dan durasi pelayanan.
2. Mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang menjadi penghambat dalam proses penerbitan SLF dari perspektif pemerintah daerah dan pemilik bangunan.

3. Mengevaluasi efektivitas penerapan SIMBG sebagai platform digital dalam menyederhanakan proses perizinan SLF.
4. Menyusun rekomendasi kebijakan dan strategi perbaikan yang adaptif, terukur, dan selaras dengan prinsip kemudahan berusaha.

Agar penelitian lebih terfokus, ruang lingkup kajian dibatasi pada:

- **Subjek:** Implementasi Sertifikat Laik Fungsi (SLF) untuk bangunan gedung hunian dan non-hunian. Penelitian ini tidak mencakup Bangunan Gedung Fungsi Khusus (BGFK) yang menjadi kewenangan Pemerintah Pusat.
- **Lokasi:** Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat.
- **Periode Data:** Analisis kuantitatif menggunakan dua set data utama. Pertama, untuk menganalisis kesenjangan kepatuhan, digunakan pangkalan data PBG yang terbit dari 1 Januari 2022 hingga 30 April 2024, dengan data ajuan SLF yang dipantau hingga 6 Mei 2025. Rentang waktu ini memberikan jeda minimal satu tahun bagi pemilik bangunan untuk menyelesaikan konstruksi dan mengajukan SLF. Kedua, untuk menganalisis durasi pelayanan, digunakan pangkalan data permohonan SLF yang diproses sejak 1 Januari 2025 hingga 6 Mei 2025. Periode ini dipilih karena dianggap representatif dan relevan dengan kondisi terkini, yaitu sejalan dengan penggunaan efektif aplikasi SIMBG versi 3.2 yang dimulai pada awal Januari 2025.

Hasil yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebuah model strategi perbaikan implementasi SLF yang komprehensif, yang didasarkan pada analisis SWOT. Rekomendasi yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi masukan praktis bagi Pemerintah Kabupaten Bogor untuk meningkatkan kepatuhan dan efisiensi pelayanan, serta memberikan kontribusi akademis dalam studi implementasi kebijakan publik di era digital.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode campuran (*mixed methods*) dengan desain eksplanatoris sekuensial. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk pertama-tama mengidentifikasi tren dan pola kinerja implementasi SLF secara kuantitatif, kemudian menindaklanjutinya dengan eksplorasi kualitatif untuk menjelaskan secara mendalam faktor-faktor penyebab di balik tren tersebut. Justifikasi model ini terletak pada kemampuannya memberikan pemahaman yang lebih kaya dan komprehensif dibandingkan hanya menggunakan satu metode.

Landasan teori penelitian ini bersandar pada dua pilar utama. Pertama, teori implementasi kebijakan publik, yang menekankan bahwa keberhasilan suatu kebijakan tidak hanya ditentukan oleh kualitas regulasi (*top-down*), tetapi juga oleh kapasitas institusi pelaksana, karakteristik kelompok sasaran, dan faktor lingkungan (*bottom-up*). Kedua, kerangka analisis SWOT (Rangkuti, 1999) digunakan sebagai model analisis strategis untuk memetakan faktor internal (kekuatan dan kelemahan) dan eksternal (peluang dan ancaman) guna merumuskan strategi perbaikan yang sistematis. Seluruh satuan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Standar Internasional (SI).

Proses penelitian dilaksanakan melalui algoritma berikut:

1. Tahap Kuantitatif:

- **Pengumpulan Data:** Data sekunder berupa jumlah PBG terbit dalam kurun waktu satu tahun sebelum 3 Mei 2025 (N=2.440) dan data permohonan SLF sampai 3 Mei 2025 (N=197) diekstraksi dari pangkalan data SIMBG dan Dinas Perumahan, Kawasan Pemukiman dan Pertanahan (DPKPP) Kabupaten Bogor.
- **Analisis Data:** Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk mengukur dua metrik utama: (a) Kesenjangan kepatuhan (*compliance gap*) antara PBG terbit dan ajuan SLF, dan (b) Durasi pemrosesan SLF untuk jalur cepat dan standar.

Perlu dicatat bahwa analisis data kuantitatif dalam penelitian ini bersifat deskriptif, bertujuan untuk memetakan tren kinerja dan mengidentifikasi masalah utama sebagai dasar untuk eksplorasi kualitatif. Untuk penelitian lebih lanjut, analisis inferensial seperti uji korelasi atau *chi-square* dapat diterapkan untuk menguji hubungan antar variabel (misalnya, antara fungsi bangunan dan tingkat kepatuhan) secara statistik dan memperkuat generalisasi temuan.

2. Tahap Kualitatif:

- **Pemilihan Informan dan Kasus:** Berdasarkan temuan kuantitatif, informan wawancara dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* untuk mendapatkan pemahaman mendalam. Kriteria pemilihan informan adalah sebagai berikut:
 - 1) Pemilik bangunan atau perwakilannya, dipilih berdasarkan representasi tiga fungsi bangunan dengan tingkat ketidakpatuhan tertinggi (industri, toko, dan gudang) untuk memahami kendala dari sisi pemohon; dan
 - 2) Aparatur pemerintah dari DPKPP Kabupaten Bogor, mencakup perwakilan dari tim verifikator dan tim teknis yang terlibat langsung dalam proses penerbitan SLF untuk menggali tantangan dari sisi internal. Total informan yang diwawancarai secara mendalam adalah 8 orang, yang terdiri dari 3 perwakilan pemilik bangunan dan 5 aparatur DPKPP, untuk memastikan saturasi data.
- **Pengumpulan Data:** Data primer dikumpulkan melalui wawancara mendalam semi-terstruktur, observasi lapangan pada proses verifikasi, dan studi dokumen permohonan SLF.

- **Analisis Data:** Data kualitatif dianalisis menggunakan analisis tematik untuk mengidentifikasi tema-tema kunci terkait hambatan dan pendorong implementasi.

Validitas instrumen wawancara dipastikan melalui triangulasi sumber, yaitu dengan membandingkan hasil wawancara dari berbagai informan (pemilik bangunan, tim teknis pemerintah), serta triangulasi metode dengan membandingkan data wawancara dengan hasil observasi lapangan dan analisis dokumen permohonan SLF yang relevan. Hal ini dilakukan untuk menjamin keabsahan dan kekayaan data kualitatif yang diperoleh.

3. Tahap Integrasi dan Formulasi Strategi:

Pada tahap akhir, temuan kuantitatif dan kualitatif diintegrasikan menggunakan kerangka analisis SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) untuk merumuskan strategi perbaikan yang sistematis. Proses ini diawali dengan identifikasi faktor-faktor internal (Kekuatan dan Kelemahan) serta eksternal (Peluang dan Ancaman) yang memengaruhi implementasi SLF. Selanjutnya, dilakukan diskusi terfokus dengan tim teknis DPKPP untuk melakukan pembobotan dan pemberian peringkat (*rating*) pada setiap faktor. Setiap faktor diberikan bobot (antara 0,0 hingga 1,0) berdasarkan tingkat kepentingannya, di mana total bobot untuk setiap kelompok (S, W, O, T) adalah 1,0. Kemudian, setiap faktor diberi peringkat (umumnya skala 1 hingga 5) untuk menunjukkan respons institusi terhadap faktor tersebut.

Skor untuk setiap faktor dihitung dengan mengalikan bobot dengan peringkatnya. Skor akhir untuk sumbu internal (sumbu X) diperoleh dari selisih total skor Kekuatan (S) dengan total skor Kelemahan (W), sedangkan skor akhir untuk sumbu eksternal (sumbu Y) adalah selisih total skor Peluang (O) dengan total skor Ancaman (T). Posisi titik koordinat (X, Y) inilah yang menentukan kuadran strategis pada diagram SWOT, yang menjadi dasar perumusan strategi perbaikan melalui kombinasi faktor-faktor SWOT (Strategi SO, WO, ST, dan WT) (Rangkuti, 1999).

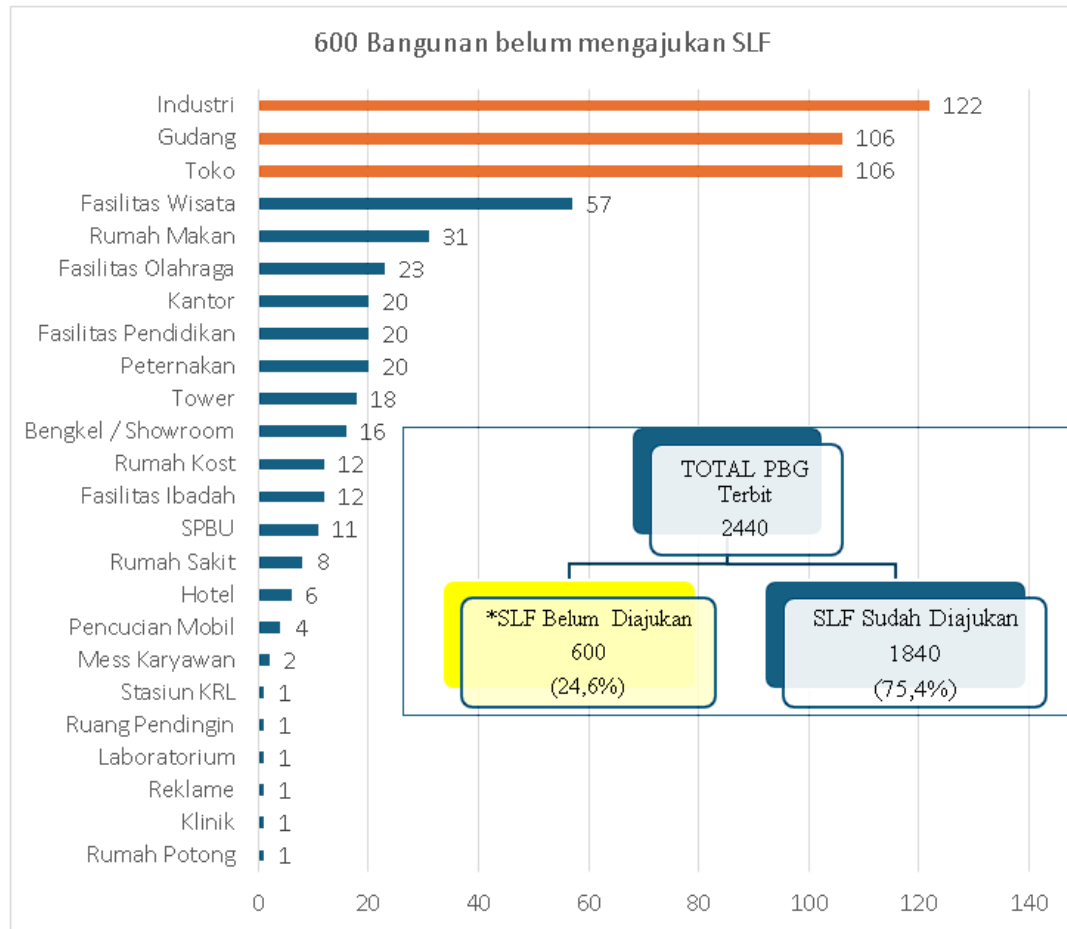
3. Hasil dan Pembahasan

Analisis kuantitatif menunjukkan dua masalah fundamental. Pertama, terdapat kesenjangan kepatuhan (*compliance gap*) yang signifikan. Dari total 2.440 bangunan skala signifikan yang PBG-nya telah terbit lebih dari setahun, sebanyak 600 bangunan (24,6%) belum melanjutkan ke proses permohonan SLF. Sebagaimana disajikan pada Gambar 1, ketidakpatuhan tertinggi ditemukan pada bangunan fungsi industri, toko, dan gudang.

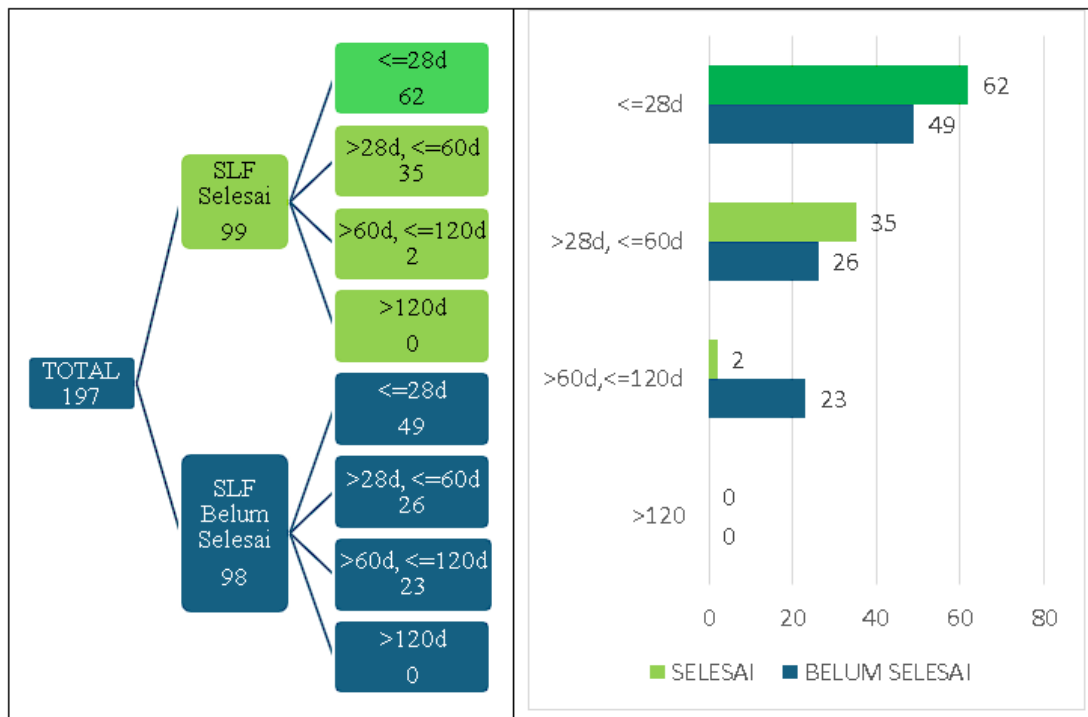
Kedua, jalur cepat 3 hari kerja yang diamanatkan regulasi dapat dikatakan gagal berfungsi. Selama periode studi, hanya tercatat segelintir permohonan yang menggunakan jalur ini. Akibatnya, hampir seluruh permohonan (197 ajuan) menumpuk pada jalur standar 28 hari. Meskipun rata-rata durasi penyelesaian pada jalur ini adalah 25 hari, sebanyak 37% dari SLF yang telah terbit ternyata melampaui batas waktu layanan (SLA) yang ditetapkan. Gambar 2 merupakan distribusi durasi SLF dari yang SLF sudah terbit dan belum terbit.

Hasil analisis kualitatif menjelaskan penyebab di balik temuan kuantitatif. Rendahnya kepatuhan bukan disebabkan oleh penolakan aktif, melainkan oleh minimnya pengetahuan dan sosialisasi. Wawancara dengan pemilik bangunan industri mengungkapkan bahwa mereka tidak mengetahui kewajiban SLF atau bahkan menerima informasi yang keliru dari konsultan perencana. Sementara itu, pengembang besar menghadapi kendala prosedural pada SIMBG terkait kewajiban penentuan fungsi ruko/rukan di awal, yang tidak sesuai dengan model bisnis mereka.

Dari sisi internal DPKPP, keterlambatan proses pada jalur standar terutama disebabkan oleh ketidaklengkapan dokumen pemohon. Faktor ini menyebabkan proses verifikasi harus berulang (*rollback*), yang membebani tim verifikator yang jumlahnya terbatas. Lebih lanjut, observasi dan wawancara mengungkapkan adanya keterbatasan kapasitas teknis pada tim internal, khususnya di bidang Mekanikal, Elektrikal, dan Plambing (MEP). Keterbatasan ini, meskipun tidak secara langsung memperlambat proses, berisiko mengompromikan kedalaman dan kualitas verifikasi teknis, sehingga esensi SLF sebagai jaminan kelayakan fungsi menjadi kurang optimal.



Gambar 1. Distribusi Kesenjangan Pengajuan SLF Berdasarkan Fungsi Bangunan



Gambar 2. Distribusi Durasi Pelayanan SLF Jalur Standar (Jan-Mei 2025)

Analisis SWOT dilakukan untuk merumuskan strategi penguatan implementasi SLF di Kabupaten Bogor. Proses ini dilakukan dalam tiga tahap:

1. Identifikasi dan penjelasan faktor-faktor SWOT;
2. Pembobotan dan skoring berdasarkan diskusi dengan tim teknis DPKPP;
3. Perumusan strategi dari matriks SWOT.

Dari proses nomor 1 dan 2 didapatkan tabel IFAS (*Internal Factors Analysis Summary*) dan EFAS (*External Factors Analysis Summary*) dengan bobot, *rating* dan *skoring* sebagaimana di Tabel 1 dan Tabel 2.

Kemudian proses nomor 3 menghasilkan posisi implementasi SLF di Kabupaten Bogor pada Kuadran I (Pertumbuhan Agresif), dengan skor IFAS (Internal) +0.78 dan EFAS (Eksternal) +0.22 (Gambar 3). Posisi ini sangat menguntungkan, artinya kekuatan internal (seperti dasar hukum yang kuat dan sistem SIMBG) dan peluang eksternal (seperti meningkatnya kesadaran publik) jauh lebih dominan dibandingkan kelemahan dan ancaman. Arah strategi yang direkomendasikan adalah Strategi SO (*Strengths-Opportunities*), yaitu secara agresif memanfaatkan kekuatan yang ada untuk merebut peluang, terutama melalui sosialisasi digital yang masif dan pengembangan ekosistem jasa konstruksi lokal.

Tabel 2. IFAS - *Internal Factors*

A. Strengths (S)

No	Faktor	Bobot	Rating	Skor	Keterangan Penilaian
S1	Dasar hukum kuat (UUBG/PP16-2021/UU-Cipta Kerja)	0,20	4	0,8	Kekuatan hukum tinggi
S2	Sistem daring SIMBG	0,15	3	0,45	Efisien, transparan
S3	SLF tanpa biaya/retribusi	0,10	5	0,5	Nilai plus untuk publik
S4	Verifikasi independen pihak ketiga	0,10	3	0,3	Menambah objektivitas
S5	Prosedur standar SLF jelas	0,15	4	0,6	Proses lebih jelas
S6	Tim internal DPKPP yang komit dan solid	0,30	4	1,2	faktor Utama
Total Strength (S)		1		3,85	

B. Weaknesses (W)

No	Faktor	Bobot	Rating	Skor	Keterangan Penilaian
W1	Keterbatasan SDM teknis di DPKPP	0,18	3	0,54	Memperlambat proses
W2	Persyaratan administrasi dan teknis dianggap rumit	0,17	3	0,51	Jadi hambatan umum
W3	Ketidaktahuan masyarakat tentang kewajiban SLF	0,20	4	0,8	Pengajuan jadi rendah
W4	Rendahnya pemahaman tentang manfaat SLF	0,14	3	0,42	Kepatuhan rendah
W5	Ketidaksesuaian dokumen teknis dengan kondisi lapangan	0,11	3	0,33	Jadi penyebab keterlambatan
W6	Persepsi biaya tinggi untuk konsultan teknis/lembaga pemberi rekomendasi	0,07	2	0,14	Persepsi negatif
W7	Belum ada sanksi tegas untuk pelanggaran SLF	0,07	3	0,21	Kepatuhan lemah
W8	Potensi konflik kepentingan dari pihak ketiga	0,06	2	0,12	Mengurangi kredibilitas dan tidak berjalan efektifnya karena belum ada sanksi ke pihak ketiga
Total Weakness (W)		1		3,07	
Selisih Internal (S – W) = 3,85 – 3,07 = 0,78					

Tabel 3. EFAS - *External Factors*

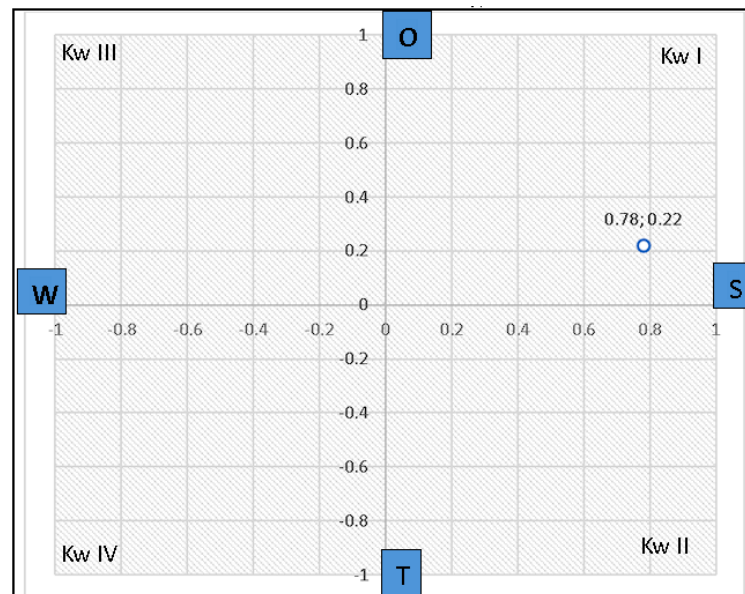
C. Opportunities (O)

No	Faktor	Bobot	Rating	Skor	Keterangan Penilaian
O1	Peningkatan kesadaran keselamatan bangunan	0,13	3	0,39	Perlu sosialisasi
O2	Dukungan teknologi & SIMBG versi terbaru	0,11	4	0,44	Efisiensi tinggi
O3	Digitalisasi perizinan	0,10	4	0,40	Mendukung transparansi
O4	Pembelajaran dari negara lain	0,09	2	0,18	Bisa diterapkan di lokal
O5	Komitmen pemerintah pusat melalui UU Cipta Kerja	0,08	3	0,24	Payung regulasi kuat
O6	Peluang usaha pengusaha/insinyur lokal	0,13	3	0,39	Dorong pertumbuhan sektor konstruksi lokal
O7	Potensi peningkatan pajak daerah jika konsultan/pengusaha lokal diberdayakan	0,15	3	0,45	Menambah penerimaan daerah Kab. Bogor
O8	Membuka lapangan kerja baru	0,11	3	0,33	Mengurangi pengangguran
O9	Kerja sama dengan asosiasi profesi	0,10	2	0,20	Mempermudah pembinaan dan koordinasi
Total Opportunity (O)		1		3,02	

D. Threats (T)

No	Faktor	Bobot	Rating	Skor	Keterangan Penilaian
T1	Resistensi pemilik terhadap prosedur tambahan	0,20	3	0,6	Umum terjadi di lapangan
T2	Ketidakseragaman penerapan regulasi antar daerah	0,20	2	0,4	Bisa sebabkan perdebatan pemohon dengan tim Dinas
T3	Keterbatasan anggaran daerah	0,30	3	0,9	Hambat penguatan pelaksanaan
T4	Lemahnya penegakan hukum SLF	0,30	3	0,9	Tanpa sanksi, pemilik bangunan cenderung abai SLF
Total Threat (T)		1		2,8	

Selisih Eksternal (O - T) = 3.02 - 2.8 = 0.22



Gambar 3. Hasil Plotting SWOT di koordinat X-Y

3.1. Keterkaitan Hasil SWOT dengan Teori Implementasi Kebijakan

Temuan analisis SWOT yang menempatkan implementasi SLF pada kuadran pertumbuhan agresif ini sejalan dengan teori implementasi kebijakan publik yang menjadi landasan penelitian. Teori ini menekankan bahwa keberhasilan kebijakan merupakan perpaduan antara faktor *top-down* (kualitas regulasi) dan *bottom-up* (kapasitas pelaksana, karakteristik target, dan lingkungan). Hasil SWOT secara gamblang memetakan faktor-faktor ini dalam konteks Kabupaten Bogor. Dari sisi *top-down*, adanya "Dasar hukum yang kuat" (S1) dan "Sistem daring SIMBG" (S2) menjadi kekuatan utama yang mendorong implementasi dari tingkat pusat. Namun, dari sisi *bottom-up*, tantangan signifikan muncul dari "karakteristik kelompok sasaran", yang tercermin dari "Ketidaktahuan masyarakat tentang kewajiban SLF" (W3) dan "Rendahnya pemahaman tentang manfaat SLF" (W4). Selain itu, "kapasitas institusi pelaksana" diuji oleh adanya "Keterbatasan SDM teknis di DPKPP" (W1), meskipun diimbangi oleh "Tim internal DPKPP yang komit dan solid" (S6). Dengan demikian, posisi di Kuadran I (Agresif) dapat diinterpretasikan sebagai kondisi di mana kerangka *top-down* sudah sangat kuat, namun keberhasilannya sangat bergantung pada kemampuan untuk mengatasi kelemahan dan ancaman pada level *bottom-up* melalui pemanfaatan peluang yang ada.

3.2. Implikasi Praktis bagi Pemerintah Daerah Lain

Meskipun studi kasus ini berlokasi di Kabupaten Bogor, temuan dan strategi yang dihasilkan memiliki implikasi praktis yang luas bagi pemerintah daerah lain di Indonesia, terutama bagi wilayah dengan karakteristik urbanisasi yang pesat. Permasalahan seperti kesenjangan kepatuhan (*compliance gap*), rendahnya kesadaran publik, dan keterbatasan kapasitas teknis internal bukanlah isu yang unik untuk Bogor, melainkan tantangan umum yang dihadapi banyak daerah. Oleh karena itu, model strategi yang direkomendasikan dalam penelitian ini dapat diadopsi dan diadaptasi. Pertama, penguatan regulasi lokal melalui Peraturan Kepala Daerah (Perbup/Perwali) menjadi langkah fundamental untuk memberikan kepastian hukum dan dasar penegakan sanksi. Kedua, pendekatan sosialisasi yang terstruktur dan masif dengan memanfaatkan media digital dapat direplikasi untuk meningkatkan kesadaran publik secara efisien. Ketiga, inisiatif untuk mengembangkan ekosistem jasa konstruksi lokal tidak hanya menyelesaikan masalah keterjangkauan dan ketersediaan konsultan, tetapi juga menciptakan dampak ekonomi positif di daerah. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan kerangka kerja bagi daerah lain untuk tidak hanya mengidentifikasi masalah serupa tetapi juga merancang solusi strategis yang terintegrasi untuk meningkatkan efektivitas implementasi SLF.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa kinerja implementasi SLF di Kabupaten Bogor belum optimal, ditandai oleh kesenjangan kepatuhan yang signifikan dan kegagalan fungsi prosedur ideal "jalur cepat". Faktor utama penyebabnya adalah minimnya sosialisasi dan kesadaran pemilik bangunan, serta kendala prosedural dan teknis baik dari sisi pemohon maupun pemerintah daerah. Meskipun demikian, posisi strategis implementasi SLF sangat prospektif untuk perbaikan.

Berikut rekomendasi untuk peningkatan kepatuhan dan efektivitas proses penerbitan SLF untuk dilakukan DPKPP dan Pemerintah Kabupaten Bogor:

1. **Penguatan Regulasi dan Penegakan Hukum:** Mempercepat penerbitan Peraturan Bupati (Perbup) tentang PBG dan SLF sebagai landasan hukum untuk menyusun SOP yang detail dan mekanisme sanksi administratif yang tegas bagi pelanggar. Ini akan menciptakan kepastian hukum dan efek jera dari sisi internal pemerintah.
2. **Intensifikasi Sosialisasi yang Terstruktur dan Tepat Sasaran:** Merancang program sosialisasi yang proaktif dan masif, dengan fokus utama pada pengenalan manfaat "jalur cepat". Sosialisasi ini perlu menekankan bahwa kewajiban menggunakan konsultan pengawas sejak awal justru menghasilkan proses yang lebih efisien dari sisi biaya dan kualitas dibandingkan skema bangunan eksisting yang durasi SLFnya 28 hari. Pemanfaatan media digital harus dioptimalkan untuk menjangkau masyarakat yang lebih luas dan beragam.
3. **Peningkatan Efisiensi dan Kapasitas Internal:** Mengadakan program pembinaan "*First Time Right*" (FTR) bagi para konsultan dan pemohon untuk menekan angka *rollback* dokumen. Secara paralel, DPKPP perlu meningkatkan kapasitas teknis tim internal (TPT), terutama di bidang MEP, melalui pelatihan dan kerja sama dengan asosiasi profesi. Selain itu, evaluasi kinerja durasi layanan secara rutin (misalnya, bulanan) harus dilakukan untuk mengidentifikasi *bottleneck* secara sistematis.
4. **Pengembangan Ekosistem Jasa Konstruksi Lokal:** Untuk mendukung keberhasilan dan keterjangkauan skema jalur cepat, DPKPP perlu secara aktif memfasilitasi dan membina pertumbuhan konsultan teknis lokal untuk mengisi peluang usaha yang tercipta dari kewajiban SLF. Strategi ini akan membuka lapangan kerja baru, meningkatkan PAD, dan memudahkan koordinasi kebijakan di masa depan.
5. **Mendorong Advokasi Kebijakan Terpusat di Tingkat Nasional:** Mengingat beberapa kendala bersifat sistemik dan nasional, direkomendasikan agar DPKPP Kabupaten Bogor menyusun dan menyampaikan usulan kebijakan kepada Kementerian PUPR untuk ditindaklanjuti di tingkat pusat. Advokasi ini pada tiga area:
 - **Fleksibilitas Sistem SIMBG:** Mengusulkan kembali kepada pengelola SIMBG di Kementerian Pekerjaan Umum untuk mengkaji penggabungan kategori fungsi Ruko dan Rukan menjadi satu kategori yang lebih fleksibel. Langkah ini akan mengatasi kendala prosedural yang dihadapi pengembang/pemilik bangunan dan sejalan dengan prinsip penyederhanaan perizinan.
 - **Integrasi SLF dengan Sektor Perbankan:** Mengusulkan agar Kementerian PUPR memfasilitasi koordinasi dengan Otoritas Jasa Keuangan (OJK) dan Bank Indonesia (BI) untuk menjadikan SLF sebagai salah satu dokumen wajib dalam proses pengajuan kredit, setara dengan perlakuan terhadap IMB/PBG. Langkah ini akan menciptakan mekanisme penegakan berbasis pasar (*market-driven enforcement*) yang berlaku secara nasional dan seragam.
 - **Penambahan Notifikasi Sosialisasi Layanan SLF pada SIMBG:** Melakukan penyempurnaan pada sistem SIMBG untuk mengintegrasikan fitur notifikasi otomatis (via SMS/WhatsApp). Notifikasi ini dikirimkan secara proaktif kepada pemohon sesaat setelah dokumen permohonan PBG mereka dinyatakan lengkap dan terverifikasi. Pesan ini berfungsi ganda:
 - i. sebagai sosialisasi dini yang mengingatkan tentang keuntungan skema SLF jalur cepat 3 hari, dan

- ii. sebagai imbauan untuk segera mempersiapkan dokumen jadwal konstruksi yang menjadi syarat untuk diunggah ke SIMBG setelah PBG terbit. Langkah ini memanfaatkan momentum pengurusan izin untuk mendorong pemohon masuk ke dalam alur yang benar sejak awal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Jenderal Achmad Yani atas dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dinas Perumahan, Kawasan Pemukiman, dan Pertanahan (DPKPP) Kabupaten Bogor serta seluruh informan yang telah bersedia memberikan data dan waktunya selama proses penelitian.

Daftar Pustaka

- Andhyani, K. (2022). Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kecepatan Perolehan Sertifikat Laik Fungsi (Tesis Magister Teknik Sipil). Universitas Gajah Mada
- Aziza, M. I. (2021). Tantangan Implementasi Sertifikat Laik Fungsi (SLF) pada Penyelenggaraan Bangunan Gedung di Kota Bandung (Tesis Magister Teknik Sipil). Institut Teknologi Bandung.
- Harisun, E. (2013). Kajian sistem sertifikasi laik fungsi bangunan gedung di Kota Ternate, Provinsi Maluku Utara. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 3(1), 14–22.
- Heriyusman, D. (2021). Pemetaan Faktor-Faktor Pengaruh Implementasi Sertifikat Laik Fungsi Bangunan Gedung: Pendekatan Gap Analysis. *Jurnal Sains dan Teknologi UTP*, 15(2), Agustus 2021. pISSN 2356-0878, eISSN 2714-6758.
- Iskandar, B., Dini, S. N. E., Hatmoko, J. U. D., & Kistiani, F. (2013). Evaluasi Pelaksanaan Sertifikasi Laik Fungsi untuk Gedung Pemerintah di Kota Semarang. *Jurnal Karya Teknik Sipil Undip*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (n.d.). Tutorial SIMBG Dinas: Buku Panduan Pengguna. Diakses dari <https://simbg.pu.go.id/info/Tutorial-SIMBG-Dinas.pdf>.
- Mahmudi, M., Noviyanto, M. R., Rahmawati, D., & Anggraini, L. (2019). Analisis Pelaksanaan Sertifikat Laik Bangunan di Kawasan Industri Wijayakusuma Semarang. *Prosiding Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS)*, 2019.
- Nasution, R. A., Barus, M. A. A. G., & Arif, M. (2024). Analisis dampak penerbitan Sertifikat Laik Fungsi (SLF) terhadap nilai dan kinerja pada perusahaan DPD REI Sumatera Utara. *Profit: Jurnal Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 3(1), 37-45. <https://doi.org/10.58192/profit.v3i1.1628>
- Octafialdo, S., & Hartono, S. (2021). Implementasi kebijakan Peraturan Bupati Sidoarjo Nomor 72 Tahun 2017 tentang Tata Cara Pemberian dan Perpanjangan Sertifikat Laik Fungsi: Studi di Dinas Perumahan Permukiman Cipta Karya dan Tata Ruang Bidang Tata Bangunan Kabupaten Sidoarjo. *PRAJA Observer: Jurnal Penelitian Administrasi Publik*, 1(1), 158-162.
- Rangkuti, F. (1999). Analisis SWOT: Teknik Membedah Kasus Bisnis. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Rekanusa. (2024). Sertifikat Laik Fungsi (SLF): Legalitas, Manfaat, dan Tantangannya. Diakses dari <https://rekanusa.co.id>.
- Republik Indonesia. (2002). Undang-Undang No. 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah No. 16 Tahun 2021 tentang Perubahan atas PP No. 36 Tahun 1999 tentang Pelaksanaan UU No. 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Republik Indonesia. (2021). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pendataan Bangunan Gedung. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah No. 5 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Republik Indonesia. (2023). Undang-Undang No. 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang. Jakarta: Sekretariat Negara.
- Republik Indonesia. (2024). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2024 tentang Surat Bukti Kepemilikan Bangunan Gedung. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Schinder Law Firm. (2024). Indonesian Building Compliance Guide: The Importance and Legal Requirements of the SLF Certificate. Diakses dari <https://schinderlawfirm.com>.
- Wahyuni, W. (2022). Tata Cara Pengurusan Sertifikat Laik Fungsi Bangunan. *HukumOnline*. Diakses dari <https://www.hukumonline.com/berita/a/tata-cara-pengurusan-sertifikat-laik-fungsi-bangunan-lt6260a9ef6ef41>
- Wiharti, W., As'ad, S., & Handayani, F. S. (2023). Studi Perbandingan Kebijakan Sertifikat Laik Fungsi Bangunan Gedung (Studi kasus: Kebijakan Sertifikasi Bangunan Gedung di Indonesia, Malaysia, dan India). *Seminar Nasional 2023: Sinergitas Era Digital 5.0 dalam Pembangunan Teknologi Hijau Berkelanjutan*. ITN Malang, 9 Desember 2023.

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

Yessa Julyana¹, Hendriyana¹, Een Taryana², Handoko Iskandar², and Xbal Meiprastyo³

¹Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Jenderal Ahmad Yani, Cimahi, Indonesia

²Electrical Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Jenderal Ahmad Yani, Cimahi, Indonesia

³Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Jenderal Ahmad Yani, Cimahi, Indonesia

yessajulyv@gmail.com, hendriyana@lecture.unjani.ac.id, centaryana@lecture.unjani.ac.id,

handoko.rusiana@lecture.unjani.ac.id, xbal.meiprastyo@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Dimethyl Ether (DME) merupakan gas tidak berwarna dan ramah lingkungan yang berpotensi menjadi pengganti Liquefied Petroleum Gas (LPG). Penelitian ini menyajikan kajian teknis dan ekonomi secara komprehensif terhadap produksi DME melalui proses dehidrasi metanol dengan kapasitas pabrik sebesar 20.000 ton per tahun. Proses ini menggunakan katalis alumina-silikat dalam reaktor multitube dengan kondisi operasi 300–350°C dan tekanan 30 bar. Hasil simulasi menunjukkan konversi metanol sebesar 85% per lintasan, dengan kemurnian produk DME mencapai lebih dari 99,5%. Total investasi modal (CAPEX) diperkirakan sebesar USD 12,8 juta, dan biaya operasi tahunan (OPEX) sekitar USD 13 juta. Hasil evaluasi ekonomi menunjukkan nilai Net Present Value (NPV) sebesar USD 5,2 juta, Internal Rate of Return (IRR) sebesar 14,5%, Return on Investment (ROI) antara 15–17%, dan periode pengembalian modal selama enam tahun. Titik impas (BEP) tercapai pada 60–65% kapasitas desain. Berdasarkan hasil tersebut, proses produksi DME dinyatakan layak secara teknis dan ekonomis untuk diterapkan di industri, serta mendukung transisi energi bersih dan pengurangan ketergantungan terhadap impor LPG di Indonesia.

Kata kunci: Dimethyl Ether, Metanol, Analisis Tekno-Ekonomi

Abstract

Dimethyl Ether (DME) is a clean, colorless gas that serves as a potential alternative to liquefied petroleum gas (LPG). This study presents a comprehensive techno-economic assessment of DME production via methanol dehydration with a plant capacity of 20,000 tons per year. The process utilizes an alumina-silicate catalyst in a multitube fixed-bed reactor operating at 300–350°C and 30 bar. Simulation results show a methanol conversion of 85% per pass, achieving a final DME purity exceeding 99.5%. The total capital investment (CAPEX) is estimated at USD 12.8 million, with annual operating costs (OPEX) of approximately USD 13 million. Economic indicators reveal a Net Present Value (NPV) of USD 5.2 million, an Internal Rate of Return (IRR) of 14.5%, a Return on Investment (ROI) between 15–17%, and a payback period of six years. The break-even point (BEP) is reached at 60–65% of design capacity. The findings indicate that the DME production process is technically feasible and economically attractive for industrial implementation, supporting Indonesia's clean energy transition and reduction of LPG imports.

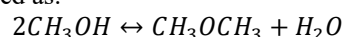
Keywords: Dimethyl Ether, Methanol, Techno-Economic Analysis

1. Introduction

The decline of fossil energy resources and the growing awareness of environmental issues have driven the transition toward cleaner and more sustainable fuels. One promising alternative is Dimethyl Ether (DME), a colorless and non-toxic gas with combustion characteristics similar to Liquefied Petroleum Gas (LPG) and diesel fuel (Yaws, 1999). Unlike conventional fuels, DME burns cleanly—producing no soot and containing neither sulphur nor aromatic compounds—making it highly attractive for lowering emissions and improving air quality.

In Indonesia, the increasing dependence on imported LPG has become a serious challenge for national energy security. Domestic LPG demand continues to rise while local production remains insufficient (Ministry of Energy and Mineral Resources, 2022). This condition underscores the importance of developing domestic DME production as a strategy to strengthen energy resilience and support the government's commitment to achieving Net Zero Emissions by 2060 (Kompas.com, 2025).

DME can be synthesized through two main routes: direct synthesis from syngas and indirect synthesis via methanol dehydration. The methanol dehydration pathway is particularly suitable for medium-scale industries due to its moderate operating conditions (250–350°C, 1–2 MPa) and the widespread availability of methanol derived from natural gas, coal, or biomass (Fogler, 2004; Turton et al., 2012). The reaction is reversible and exothermic, expressed as:



with acidic catalysts such as $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and zeolites providing high selectivity toward DME formation (Perry & Green, 2019). Methanol

Info Makalah:

Dikirim : 11-05-25;

Revisi 1 : 11-20-25;

Diterima : 12-08-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-815-7326-7759

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

adsorption onto acidic sites forms methoxy intermediates that subsequently convert into DME and water (Smith & Van Ness, 1993).

Recent techno-economic studies have provided stronger insight into DME's competitiveness. Dieterich et al. (2024) reported that renewable DME produced from green hydrogen and captured CO₂ can be cost-effective under low-cost renewable electricity. Muazzam et al. (2022) highlighted that despite hydrogen cost barriers, advanced electrolysis—particularly solid-oxide electrolysis—significantly improves overall process economics. Meanwhile, Kofler et al. (2024) demonstrated the techno-economic potential of producing DME from biomass-derived syngas using off-grid renewable electricity, while Ramadhan and Muthia (2025) emphasized that intensified distillation technologies can substantially lower energy demand and operating costs. In Indonesia, evaluations by Pamungkas et al. (2023) and Supriyadi et al. (2025) show that coal-based DME can serve as a viable LPG substitute, although its feasibility remains sensitive to coal prices, carbon regulations, and policy incentives.

Considering these developments, assessing the techno-economic feasibility of DME production through methanol dehydration is essential for determining its industrial relevance and economic viability in Indonesia. This study evaluates the technical and economic performance of a 20,000-ton-per-year DME plant, including process configuration, mass and energy balances, and key economic indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period (PBP) (Aries & Newton, 1955; Branan, 2005). The results are intended to provide insights into the potential role of DME as a sustainable alternative fuel in Indonesia's ongoing energy transition.

2. Methods

This section describes the processes modelling and simulation and the tools used for the calculation of the stream properties. The environmental, economic and thermodynamic performance indicators, suitable for carrying out the incremental comparative analysis, are also defined. Lastly, the optimization method, used to minimize the energy requirements, while maximizing the waste heat recovery, is also discussed.

2.1. Process Modelling and Simulation

The DME production process was modelled and simulated using a steady-state process simulator. Figure 1 presents the process flowsheet, which includes the key units such as the methanol preheating system, the fixed-bed reactor, separation columns, heat exchangers, and utility integrations.

Thermophysical properties for methanol, DME, and water were calculated using the software's property database and supported by values reported in standard literature. The methanol dehydration reaction was implemented as a reversible gas-phase reaction based on literature kinetics and equilibrium data. All unit operations were modeled under industrially relevant operating conditions, and mass–energy balances were generated to evaluate process performance. The simulation results served as the basis for subsequent environmental, thermodynamic, and economic assessments presented in the following sections.

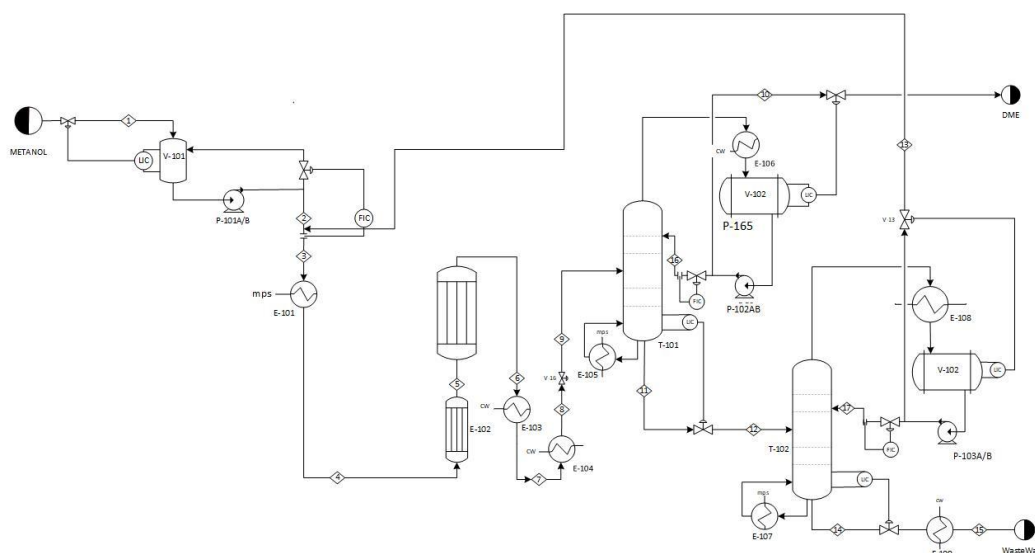


Figure 1. Process Flow Diagram for The DME Production Process Through Methanol Dehydration

2.1.1 Methanol Conditioning and Preheating Unit

The methanol feed is pumped, pressurized, and preheated to reach the vapor-phase conditions required for the catalytic dehydration reaction. Heat integration with hot process streams is applied to minimize external steam demand and stabilize the inlet temperature. This treatment ensures proper vapor–solid interaction in the reactor and supports efficient catalyst performance (Turton et al., 2012).

All thermophysical properties, including vaporization enthalpy and heat capacity, were sourced from validated literature databases (Perry & Green, 2019). The resulting conditioned feed reflects industrially relevant operating conditions and serves as the baseline for the reactor model.

2.1.2 Methanol Dehydration Reactor Unit

The conversion of methanol to DME follows the reversible reaction $2\text{CH}_3\text{OH} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, simulated within a fixed-bed catalytic reactor modelled as a plug-flow system. Literature-based kinetic parameters for $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalysts were incorporated to represent realistic conversion behaviour and capture temperature rise due to the exothermic reaction (Fogler, 2004). This modelling approach provides accurate reactor performance predictions.

The simulation generates detailed profiles of temperature, conversion, and product distribution across the reactor length. The resulting effluent composition provides the basis for downstream separation, determining cooling needs and the capacity of purification units.

2.1.3 Product Separation and Purification Units

The hot reactor effluent is cooled through heat exchangers to condense water and unreacted methanol, followed by vapor–liquid separation. The condensed methanol is recovered for potential recycle, while the vapor stream—rich in DME—enters the purification section. This systematic treatment reduces the separation load and optimizes the use of process energy.

Purification is completed using a sequence of distillation steps. The first removes bulk water, while the second provides final DME purification to achieve the target product purity of ~99.5%. Vapor–liquid equilibrium models derived from standard literature (Perry & Green, 2019) ensure accuracy in representing column behaviour and energy requirements.

2.1.4 Dimethyl Ether Production

The DME production stage integrates the reactor and separation units to generate a high-purity DME stream. The dehydration reaction produces a mixture of DME, water, and residual methanol, which is subsequently treated through the multistage separation system. The combination of reactor conversion and distillation efficiency determines the final DME yield and process throughput.

Final product handling includes drying, vapor compression, and storage-conditioning to maintain product quality and pressure stability during transfer. These treatments simulate real industrial conditions commonly used in DME production facilities and ensure that the modelled process reflects practical operational behaviour (Peters & Timmerhaus, 1991).

2.1.5 Process Resources and Utility Units

Utilities such as steam, cooling water, electricity, and instrument air are included in the simulation to estimate total energy requirements. Steam is primarily used for preheating and distillation reboilers, while cooling water is used in condensers and heat exchangers. These utility demands are calculated based on heat duties from the simulation output and reflect typical industrial utility consumption patterns (Coulson et al., 1983).

Electrical power is required for pumps, compressors, and control systems, and is estimated using equipment efficiency and mechanical load data. The inclusion of utility units ensures a comprehensive energy profile for the process, enabling subsequent techno-economic and environmental evaluations.

2.2. Energi And Mass Balance

Material and energy balances were automatically generated from the process simulation. The energy balance was based on the first law of thermodynamics:

$$Q = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

where Q is the heat transfer rate (kW), $\dot{m}$ is the mass flow rate (kg/s), and $h_{out} - h_{in}$ is the enthalpy difference between outlet and inlet streams (Reklaitis, 1983). Energy integration was implemented to reduce steam and utility usage. The hot stream (reactor effluent) was used to preheat the cold feed stream (methanol vapor), thus minimizing the external heating requirement (Kern, 1965).

Mass balance was carried out to determine methanol conversion and product yield, calculated using the following relations (Fogler, 2004):

$$X_{MeOH} = \frac{F_{in,MeOH} - F_{out,MeOH}}{F_{in,MeOH}} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_{DME} = \frac{F_{out,DME}}{F_{in,MeOH}} \times 100\% \quad (3)$$

where X_{MeOH} is methanol conversion, and Y_{DME} is the yield of DME based on the methanol feed.

2.3 Economic Evaluation

Economic assessment was carried out using the factorial cost estimation method (Aries & Newton, 1955; Peters & Timmerhaus, 1991). The total fixed capital investment (TFCI) was estimated by summing the cost of purchased equipment multiplied by the installation factor:

$$TFCI = \sum(C_{eq} \times f_{inst}) \quad (4)$$

The total capital investment (TCI) includes working capital and start-up costs:

$$TCI = TFCI + WC + SC \quad (5)$$

Operating cost (OPEX) covers raw materials, utilities, labor, maintenance, and administrative expenses. The profitability indicators used are Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PBP), Break-Even Point (BEP), and Return on Investment (ROI), calculated as follows:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} (i_2 - i_1) \quad (7)$$

$$PBP = \frac{I_0}{\text{Annual Net Cash In Flow}} \quad (8)$$

$$BEP = \frac{FC}{SP - VC} \quad (9)$$

$$ROI = \frac{\text{Annual Net Profit}}{TCI} \times 100\% \quad (10)$$

These equations were used to evaluate the economic feasibility of DME production at a design capacity of 20,000 tons per year (Branan, 2005; Turton et al., 2012).

3. Results and discussion

3.1. Process Simulation Results

The simulation of Dimethyl Ether (DME) production through methanol dehydration was successfully carried out using Aspen Plus. The process operates at 300–350°C and 10–30 bar pressure in a multitubular fixed-bed reactor with $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ catalyst. The simulation results show that the methanol conversion reached 85% per pass and over 90% after recycle, with a DME product purity of 99.5%.

The overall process was divided into four main sections: feed preparation, reaction, condensation, and purification. A summary of the main process parameters obtained from the simulation is shown in Table 1.

Table 1. Main Operating Conditions of DME Process

Unit Operation	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Description
Preheater (E-101)	180	5	Methanol Preheating
Reactor (R-101)	250-300	10 → 15	Methanol Dehydration
Condenser (E-104)	40	10	Product Cooling
DME Column (T-101)	140	7.4	DME Purification
MeOH-H ₂ O Column (T-102)	126	15.5	Methanol Recovery

These conditions ensure that the process runs under optimal conversion and thermal stability while maintaining energy efficiency.

3.2. Material and Energy Balance

The overall mass and energy balance obtained from the process simulation is summarized in Table 2. The total methanol feed rate required to achieve 20,000 tons/year DME production is approximately 2,650 kg/h.

Table 2. Summary of Material Balance

Steam	Main Components	Flow Rate (kg/h)	Temperature (°C)	Pressure (bar)
1-Feed	Methanol	2,650	25	1
2-Reactor	DME+H ₂ O+CH ₃ OH	2,700	250	14,7
3-Product	DME (99.5%)	1,200	25	7,4

The process achieved 85% conversion per pass, increasing to over 90% after recycle. The presence of heat integration between the reactor effluent and feed preheater reduced the steam requirement by 15%. The energy consumption and utility needs are presented in Table 3.

Table 3. Utility Requirements

Utility	Consumption	Main Use
Steam	1,800 kg.h	Feed Vaporization & Distillation
Cooling Water	55 m ³ /h	Condensation & Temperature Control
Electricity	450 kW	Pumps, Instrumentation, and control

The results confirm that the process is energy efficient, with a low external heating load due to heat recovery between hot and cold streams.

3.3 Economic Performance

The economic assessment of DME production with a capacity of 20,000 tons per year was conducted to evaluate investment feasibility. The analysis used the factorial cost estimation method (Aries & Newton, 1955; Peters & Timmerhaus, 1991) based on data from the process simulation and equipment design.

The study assumed a plant lifetime of 20 years, discount rate of 10%, and operating time of 8,000 hours per year. The DME selling price was set at USD 800 per ton, while the methanol feedstock cost was USD 450 per ton. Other costs, including utilities, labor, and maintenance, were estimated according to industry standards.

The total capital investment (TCI) was estimated at USD 12.8 million, with the detailed cost distribution presented in Table 4. As shown in Table 4, equipment purchase represents the largest portion at 35%, followed by installation and piping at 25%. Civil and structural works contribute 10%, while indirect costs and contingency account for 15%. The remaining 6% corresponds to working capital requirements. This cost structure is typical for medium-scale chemical process plants and reflects the investment profile commonly reported in similar techno economic assessments.

Table 4. Summary of Capital and Operating Costs

Category	Value (USD million)	Percentage (%)
Equipment Purchase	4.50	35
Installation & piping	3.20	25
Civil & Structural Works	1.30	10
Indirect & Contingency	1.90	15
Working Capital	0.80	6
Total Capital Investment	12.80	100

Operating Cost Component	VAnnual Cost (USD million)	Contribution (%)
Methanol Feedstock	6.50	50
Utilities (Steam, Water, Power)	3.10	24
Labor & Maintenance	2.40	18
Overhead & Administration	1.00	8
Total Operating Cost (OPEX)	13.00	100

The economic evaluation of the DME production process was conducted to analyze its financial viability under the defined design parameters and market assumptions. This assessment included capital investment, operating expenses, revenue projections, and key financial indicators to determine the overall profitability of the proposed plant. The results of the economic indicators are summarized in Table 5, which provides a detailed overview of the project's performance metrics.

As shown in Table 5, the process is economically feasible, as the financial indicators exhibit favorable outcomes consistent with accepted industrial standards. The project demonstrates a positive Net Present Value (NPV), an Internal Rate of Return (IRR) that exceeds the discount rate, and a moderate payback period, all of which indicate a financially attractive investment. These results confirm that the DME plant can achieve sustainable profitability under the assumed market and cost conditions (Turton et al., 2012).

Table 5. Summary of Economic Evaluation Results

Indicator	Result	Unit	Description
Net Present Value (NPV)	5.2	Million USD	Represents the total project value over its lifetime
Internal Rate of Return (IRR)	14.5	%	Exceeds discount rate, indicating profitable investment
Payback Period (PBP)	6	Years	Duration required to recover initial capital
Break-Even Point (BEP)	62	% Capacity	Minimum operating rate for zero-profit condition
Return on Investment (ROI)	16	%	Annual return relative to total capital invested

The overall results confirm that the proposed DME plant can operate profitably with moderate investment levels. The incorporation of heat-recovery units and methanol recycle streams significantly reduces utility consumption, thereby improving both energy efficiency and operating economics. This finding aligns with recent techno-economic studies showing that process integration and energy optimization contribute to meaningful reductions in total operating cost for methanol-to-DME systems (Ramadhan and Muthia, 2025). Similar conclusions are reported in studies examining optimized DME production pathways, which show that financially viable performance can be achieved when heat management and feedstock availability are well-controlled (Dieterich et al., 2024).

Further evidence supporting the economic feasibility of DME production is provided by analyses demonstrating that DME plants can achieve competitive cost structures across various production scales when efficient separation and utility systems are applied (Kofler et al., 2024). These findings strengthen the conclusion that the proposed DME plant possesses strong economic potential under the assumed design and market conditions. Beyond financial viability, developing domestic DME production also provides strategic advantages, such as reducing dependence on imported LPG and supporting Indonesia's long-term clean-energy transition (Kompas.com, 2025).

Conclusions

The techno-economic analysis of DME production through methanol dehydration with a capacity of 20,000 tons per year shows that the process is technically and economically feasible. Simulation results confirm high methanol conversion and DME purity under moderate operating conditions using a γ -Al₂O₃-SiO₂ catalyst. Integration of heat recovery and methanol recycle reduces utility demand, improving overall energy efficiency. The economic evaluation indicates positive results with feasible investment returns, where NPV, IRR, and ROI values reflect profitable operation and a reasonable Payback Period.

The economic evaluation also demonstrates strong performance, with favorable NPV, IRR, ROI, and a reasonable Payback Period, indicating that the required investment can be recovered within an acceptable timeframe. Overall, the process design is robust, cost-effective, and competitive for medium-scale production. Therefore, DME production via methanol dehydration presents a viable alternative to LPG while supporting Indonesia's clean energy transition and long-term fuel diversification objectives.

References

- Aries, R., & Newton, R. (1955). *Chemical Engineering Cost Estimation*. McGraw-Hill.
- Branan, C. R. (2005). *Rules of Thumb for Chemical Engineers* (4th ed.). Elsevier.
- Coulson, J. M., Richardson, J. F., Backhurst, J. R., & Harker, J. H. (1983). *Chemical Engineering: Volume 6 – Design*. Pergamon.
- Dieterich, V., Neumann, K., Niederdränk, A., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2024). Techno-economic assessment of renewable dimethyl ether production pathways. *Energy*, 301, 131688.
- Fogler, H. S. (2004). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (4th ed.). Prentice Hall.
- Kirk-Othmer. (1998). *Encyclopedia of Chemical Technology* (Vol. 8). Wiley.
- Kofler, R., Campion, N., Hillestad, M., Meesenburg, W., & Clausen, L. R. (2024). Techno-economic analysis of dimethyl ether production from biomass and off-grid renewable electricity. *Energy & Fuels*, 38(10), 8777–8803.
- Kompas.com. (2025). Pemerintah targetkan Net Zero Emission 2060.
- Ministry of Energy and Mineral Resources. (2022). *Statistik Energi Indonesia*.
- Muazzam, Y., Yousaf, M., Zaman, M., Elkamel, A., Mahmood, A., Rizwan, M., & Adnan, M. (2022). Thermo-economic analysis of integrated hydrogen-methanol-DME production. *Resources*, 11(10), 85.
- Pamungkas, W. A., Setyawati, R. B., Rifai, A. F., Setiawan, C. P., Budiman, A. W., & Inayati, I. (2023). Techno-economic study on DME as an LPG substitute.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Ramadhan, M. F., & Muthia, R. (2025). Advanced distillation technologies for DME production. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 42, 505–527.
- Smith, J. M., & Van Ness, H. C. (1993). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (5th ed.). McGraw-Hill.

- Supriyadi, F., Putra, I. A., Abriyant, R. Y., Sismartono, D., Wibowo, C. S., & Priyono, B. (2025). Techno-economic analysis of DME in Indonesia's household energy sector. *Scientific Contributions Oil and Gas*, 48(2), 259–277.
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2012). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (4th ed.). Prentice Hall.
- Yaws, C. L. (1999). *Chemical Properties Handbook*. McGraw-Hill.

Rancang Bangun Sistem Penyortiran dan Pemantauan Anak Ayam Sehat dan Tidak Sehat Berdasarkan Bobot dan Suhu menggunakan Platform *Internet-of-Things*

Zul Fakhri¹, Dedi², Kusnandar¹, Yuda Bakti Zainal¹, Irvan Budiawan¹, dan Asep Najmurrokhman¹

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

²PT. Jaya Kencana, Jl. Singosari, Perumahan Parmindo Blok F No. 37, Bandung, Indonesia

zulfakhri18@gmail.com, dediteckwel1910@gmail.com, kusnandar@lecture.unjani.ac.id, zainalyuda01@gmail.com, irvan.budiawan@lecture.unjani.ac.id, asep.najmurrokhman@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Kondisi kesehatan anak ayam pada fase awal pemeliharaan berperan penting terhadap produktivitas serta efisiensi usaha peternakan unggas. Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan sistem otomatis untuk penyortiran serta pemantauan kesehatan anak ayam berdasarkan bobot badan dan suhu tubuh dengan memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT). Sistem dirancang menggunakan sensor *load cell* sebagai pengukur bobot, sensor suhu MLX90614, serta mikrokontroler ESP32 sebagai unit pengolah data, dengan indikator keluaran berupa *buzzer*, LED, dan LCD. Data hasil pengukuran dikirim secara *real-time* ke platform *ThingSpeak* untuk keperluan visualisasi dan analisis. Proses klasifikasi dilakukan dengan membandingkan nilai bobot dan suhu terhadap ambang batas standar kesehatan ayam broiler. Anak ayam dikategorikan sehat apabila memiliki bobot 36–40 gram dan suhu tubuh 37–40 °C, sedangkan nilai di luar rentang tersebut menunjukkan kondisi tidak sehat. Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi anak ayam secara tepat dengan tingkat akurasi mencapai 100% serta menyediakan informasi yang dapat diakses melalui perangkat seluler maupun komputer. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemantauan kesehatan ayam dan mengurangi ketergantungan pada metode manual. Ke depan, pengembangan dapat dilakukan dengan menambahkan algoritma kecerdasan buatan untuk meningkatkan ketelitian klasifikasi.

Kata kunci: Anak Ayam, Bobot, *Internet-of-Things*, Penyortiran, Pemantauan Suhu

Abstract

The health status of chicks in the early rearing stage is a key factor affecting productivity and operational efficiency in poultry production. This research presents the development of an automated system for monitoring and sorting chick health using body weight and temperature parameters through an Internet of Things (IoT) approach. The system integrates a load cell for weight measurement, an MLX90614 sensor for temperature detection, and an ESP32 microcontroller for data processing, supported by output devices such as a buzzer, LEDs, and an LCD. Collected data are transmitted in real time to the ThingSpeak platform for visualization and analysis. Health classification is conducted by evaluating the measured parameters against predefined thresholds in accordance with broiler health standards. Chicks weighing 36–40 g with body temperatures between 37 and 40 °C are identified as healthy, while those outside these limits are categorized as unhealthy. Experimental evaluation confirms that the system achieves 100% classification accuracy and delivers health information accessible via mobile phones or computers. This system is expected to enhance the efficiency of continuous health monitoring while minimizing reliance on manual inspection. Future developments may incorporate artificial intelligence techniques to improve classification performance using additional health indicators.

Keywords: Chicks, Internet-of-Things, Monitoring Temperature, Sorting, Weight

1. Pendahuluan

Ayam *broiler* merupakan salah satu komoditas unggas yang banyak dibudidayakan di Indonesia karena memiliki prospek yang sangat baik untuk dikembangkan dalam skala besar maupun skala kecil (Nugroho & Astuti, 2021; Priyambodo dkk., 2020; Suganda dkk., 2024). Jenis ayam ini banyak memberikan kontribusi dalam memenuhi kebutuhan protein hewani terutama untuk masyarakat Indonesia yang mayoritas menyukai makanan dari olahan ayam karena daging ayam mudah didapat dan harganya relatif murah (Oktavia dkk., 2021). Selain itu, ayam *broiler* banyak

Info Makalah:

Dikirim : 06-16-25;

Revisi 1 : 08-13-25;

Revisi 2 : 12-15-25;

Diterima : 12-17-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-813-2181-5649

e-mail : asep.najmurrokhman@lecture.unjani.ac.id

dipilih untuk dibudidayakan oleh peternak karena waktu pemeliharaannya relatif cepat, yaitu tiga sampai empat minggu ayam sudah dapat dipanen (Maryanti dkk., 2023; Nuryati, 2019). Walaupun waktu pemeliharaannya relatif cepat, peternak harus memberikan perhatian dalam perawatan dan pemeliharaannya (Wilcox dkk., 2024). Dalam merawat dan memelihara ayam *broiler*, ada beberapa fase yang harus diperhatikan agar peternak tidak mengalami kerugian. Secara umum, fase yang menjadi

penentu keberhasilan dalam pemeliharaan unggas adalah fase *brooding* (Seto, 2020; Sheir dkk., 2025; Ye dkk., 2019). Fase *brooding* merupakan periode umur ayam yang masih membutuhkan perhatian lebih intensif sehingga kebutuhan anak ayam bisa terpenuhi dapat menghasilkan keuntungan lebih banyak saat dipanen (Fatmaningsih dkk., 2016; Hidayat dkk., 2023; Qaid dkk., 2023).

Sebelum ayam memasuki kandang *brooding* biasanya ada beberapa hal yang harus diperhatikan oleh peternak, salah satunya pengecekan kualitas anak ayam. Saat kendaraan yang membawa anak ayam telah tiba dikandang dan sudah diletakkan pada kandang *brooding*, peternak bisa melakukan seleksi dengan panduan standar kualitas anak ayam, dimana dalam panduan tersebut tertulis pengecekan dimulai dari pemeriksaan respons, mata, pusar, kaki, paruh, keseragaman atau bobot anak ayam, dan suhu tubuh anak ayam. Meskipun peternak sudah memahami kualitas anak ayam yang baik sesuai dengan standarnya, dalam praktiknya, peternak masih melakukan proses pemantauan kesehatan anak ayam secara manual, yang tidak efisien, memakan waktu, serta berpotensi besar mengalami *human error*. Seiring dengan perkembangan teknologi, khususnya *Internet-of-Things* (IoT), telah muncul peluang untuk melakukan otomatisasi sistem pemantauan dan penyortiran anak ayam berdasarkan parameter fisik tertentu. Sistem ini dapat memberikan data *real-time* yang akurat, serta membantu pengambilan keputusan yang lebih cepat dalam manajemen kesehatan ternak (Hendrikus dkk., 2022; Idofitraramdhan dkk., 2023).

Permasalahan yang dihadapi oleh peternak antara lain sulitnya melakukan pemantauan individu anak ayam secara akurat dan cepat, kurangnya sistem otomatis yang dapat mengintegrasikan data suhu dan bobot dalam proses klasifikasi kesehatan ayam, serta minimnya implementasi teknologi IoT secara langsung dalam proses penyortiran anak ayam berdasarkan indikator kesehatan. Berdasarkan identifikasi tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang dan membangun sistem yang mampu memantau suhu dan bobot anak ayam secara *real-time* menggunakan teknologi IoT serta bagaimana sistem tersebut dapat digunakan untuk menyortir anak ayam sehat dan tidak sehat secara otomatis.

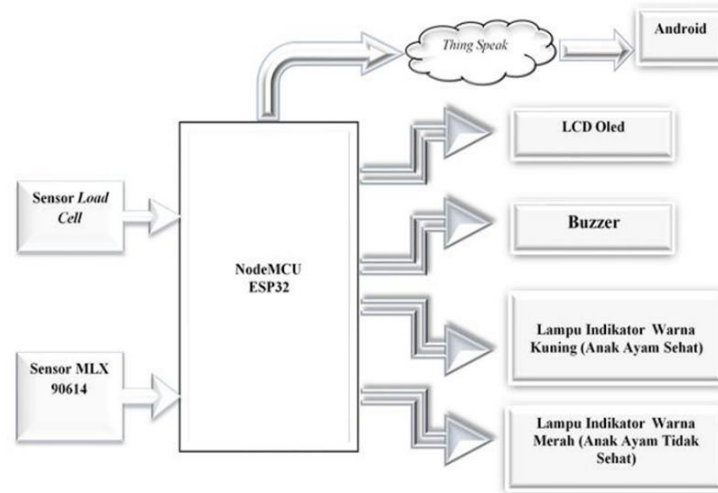
Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan IoT dalam bidang peternakan dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan peternakan (Imam & Abdillah, 2024; Saputra & Siswanto, 2020; Wicaksono & Kamal, 2020). Imam & Abdillah (2024) membangun prototipe kandang ayam yang dipantau kondisi suhu dan kelembapannya menggunakan platform IoT, sedangkan Saputra & Siswanto (2020) menggunakan platform IoT *Blynk* dalam memantau kondisi suhu dan kelembapan kandang ayam broiler di suatu perusahaan ternak agar dapat dipantau secara *real time*. Sementara itu, Wicaksono & Kamal (2020) mengembangkan sistem pemantau iklim mikro dalam kandang ayam berbasis IoT dengan menggunakan MQTT *cloud server*. Penelitian lainnya mengembangkan prototipe pemantauan dan pengendalian faktor produktivitas ayam ras petelur berbasis platform IoT dengan menggunakan Firebase (Athiyah dkk., 2024) atau Blynk (Ramdan dkk., 2024). Namun demikian, penelitian terkait dengan pemantauan dua parameter utama anak ayam, yaitu suhu dan bobot kemudian klasifikasi status kesehatannya berdasarkan parameter tersebut secara otomatis masih terbatas. Dengan demikian, penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan membangun sistem berbasis IoT yang mampu menyortir dan memantau anak ayam sehat dan tidak sehat secara simultan dan *real-time*. Dengan sistem tersebut, kondisi anak ayam dalam sebuah peternakan dapat diketahui setiap saat oleh peternak tanpa harus datang ke tempat peternakannya, karena prototipe dilengkapi dengan sensor bobot dan suhu serta platform IoT dalam menyajikan data hasil penyortirannya.

2. Metode

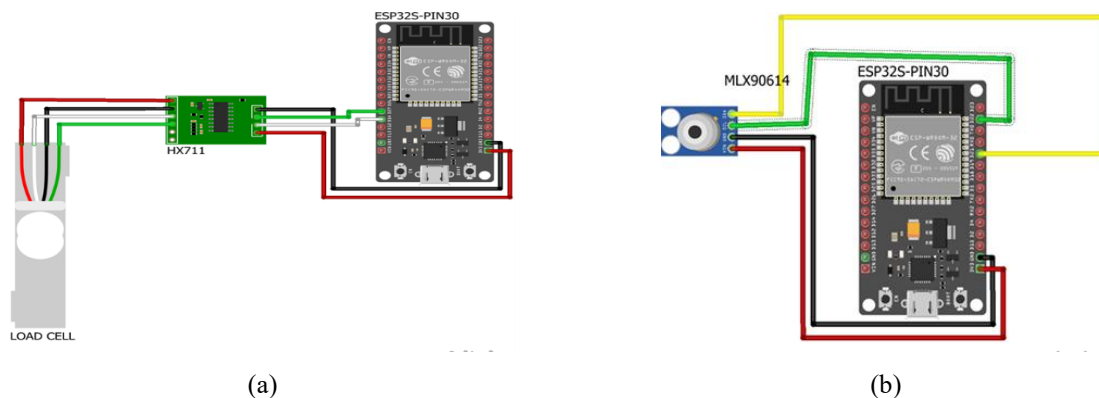
Sistem yang dirancang diberikan dalam diagram skematik pada Gambar 1. Sistem ini menggunakan dua input yaitu sensor *load cell* untuk mendeteksi bobot anak ayam dan sensor MLX90614 untuk mendeteksi suhu anak ayam. Data dari sensor akan diproses oleh mikrokontroler NodeMCU ESP32 sebagai pengendali utama sistem. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari input, klasifikasi status anak ayam berdasarkan bobot dan suhu anak ayam tersebut. Sementara itu, ada dua *output* yang digunakan dalam sistem yaitu *buzzer* dan lampu LED. *Buzzer* berfungsi memberikan tanda bahwa kedua sensor sudah bekerja mendeteksi anak ayam, sedangkan lampu LED memberikan status ayam sehat atau tidak sehat. Lampu LED warna kuning sebagai penanda anak ayam sehat dan lampu LED warna merah berfungsi sebagai penanda anak ayam tidak sehat. Selanjutnya, data status ayam dikirimkan melalui platform IoT ThingsSpeak yang diinstalasi dalam telepon seluler berbasis sistem operasi Android dari peternak, sehingga peternak dapat memantau setiap saat kondisi anak ayam di peternakannya.

Sensor *load cell* mengubah gaya tekanan menjadi sinyal listrik, melalui perubahan resistansi yang terjadi pada *strain gauge* dengan sebuah tekanan dalam bentuk deformasi (regangan). Kekurangan dari sensor *load cell* ini tidak mampu menyimpan hasil kalibrasi yang sudah dilakukan dan bisa mengakibatkan pembacaan data selanjutnya menjadi *error*. Untuk mengatasi hal tersebut, sensor *load cell* disambungkan dengan module HX711 dimana modul ini berfungsi menyimpan hasil kalibrasi yang sudah dilakukan agar ketika pembacaan data selanjutnya tidak lakukan pengkalibrasian lagi dan mencegah terjadinya *error* dalam pembacaan data selanjutnya. Gambar 2(a) memperlihatkan koneksi antara sensor *load cell* dengan mikrokontroler NodeMCU ESP32 melalui perantara modul HX711. Pin DT pada modul HX711 dikoneksikan dengan pin D27 pada NodeMCU ESP32. Sementara itu, pin SCK pada modul HX711 dikoneksikan dengan pin D14 NodeMCU ESP32, sedangkan pin VCC dan pin GND dikoneksikan dengan pin VCC dan GND pada NodeMCU ESP32. Sementara itu, sensor MLX90614 digunakan untuk mendeteksi suhu anak

ayam. Sensor tersebut bekerja dengan prinsip mendeteksi intensitas radiasi inframerah yang dipancarkan oleh objek. Gambar 3 menunjukkan interkoneksi antara sensor MLX90614 dengan mikrokontroler NodeMCU ESP32. Pin SDA sensor dikoneksikan dengan pin D21 mikrokontroler, sedangkan pin SCL sensor dikoneksikan dengan pin D22 mikrokontroler. Selain itu, pin VCC dan GND dari sensor dikoneksikan dengan pin VCC dan GND pada mikrokontroler NodeMCU ESP32.



Gambar 1. Diagram Skematik Sistem Penyortir dan Pemantau Anak Ayam

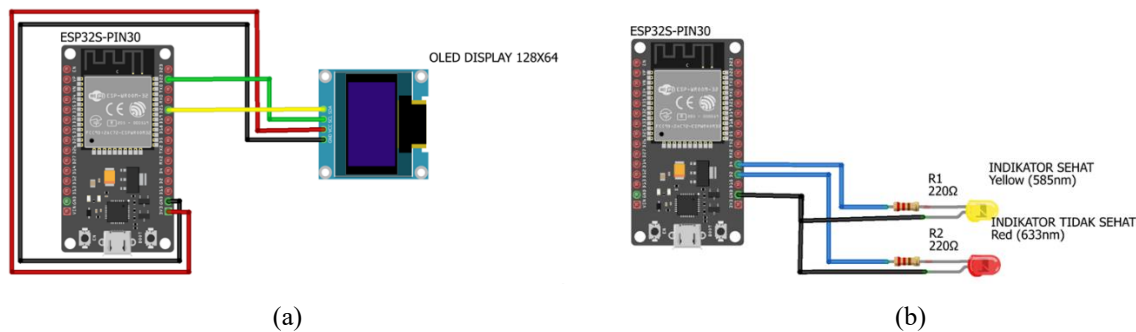


Gambar 2. Interkoneksi antara Sensor *Load Cell*
(a) dan Sensor Suhu MLX90614. (b) dengan Mikrokontroler NodeMCU ESP32

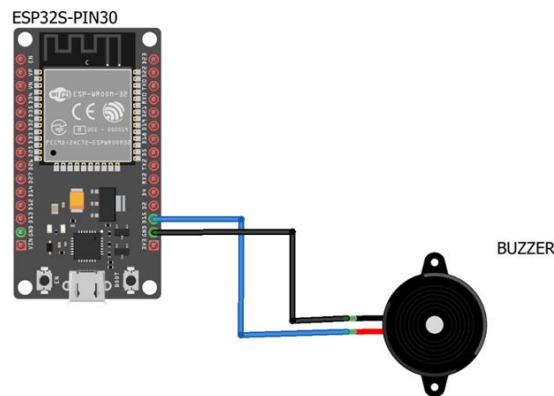
Data yang diperoleh dari sensor dan diproses oleh mikrokontroler kemudian ditampilkan dalam penampil LCD dan LED. LCD bertipe Oled menggunakan tipe 0,91 I2C yang memiliki kelebihan dalam menampilkan informasi yaitu memiliki tampilan yang luas, fleksibel, dan dapat berguna sebagai keperluan berbagai tampilan layar. Koneksi dari mikrokontroler NodeMCU ESP32 ke LCD dilakukan melalui pin D22 dengan pin SCL kemudian pin SDA pada LCD Oled disambungkan dengan NodeMCU ESP32 melalui pin D21. Untuk pin VCC pada LCD Oled dikoneksikan dengan NodeMCU ESP32 pada sumber keluaran 3V, sedangkan GND dikoneksikan dengan GND pada NodeMCU ESP32. Sementara itu, lampu LED berfungsi sebagai indikator atau penanda respon *output* terhadap perintah yang diberikan oleh mikrokontroler yang diperoleh dari hasil pembacaan input. Pada perancangan lampu LED ditambahkan resistor 220Ω yang dipasang pada kaki positif lampu LED. Dalam prototipe ini, ada dua buah lampu LED, yaitu lampu LED berwarna kuning sebagai penanda bahwa anak ayam sehat dan lampu LED warna merah sebagai penanda bahwa anak ayam tidak sehat. Kaki positif lampu LED warna kuning yang sudah disambungkan dengan resistor dikoneksikan pada pin D4 mikrokontroler, sedangkan kaki positif lampu LED warna merah yang sudah disambungkan dengan resistor dikoneksikan pada pin D2 mikrokontroler. Sementara itu, kaki negatif lampu LED dikoneksikan pada pin GND mikrokontroler. Interkoneksi antara LCD dan LED dengan mikrokontroler diperlihatkan dalam Gambar 3.

Selanjutnya, sebuah *buzzer* yang mengubah sinyal listrik menjadi getaran suara ditambahkan dalam sistem untuk memberi tanda saat sensor *load cell* dan sensor MLX 90614 telah mendeteksi objek berupa anak ayam. Gambar 4

memperlihatkan koneksi mikrokontroler NodeMCU ESP32 dengan *buzzer* dengan kaki positif *buzzer* dikoneksikan dengan pin D15 mikrokontroler sedangkan untuk kaki negatif *buzzer* dikoneksikan pada pin GND.



Gambar 3. Koneksi antara Mikrokontroler NodeMCU ESP32 dengan (a) LCD dan (b) LED

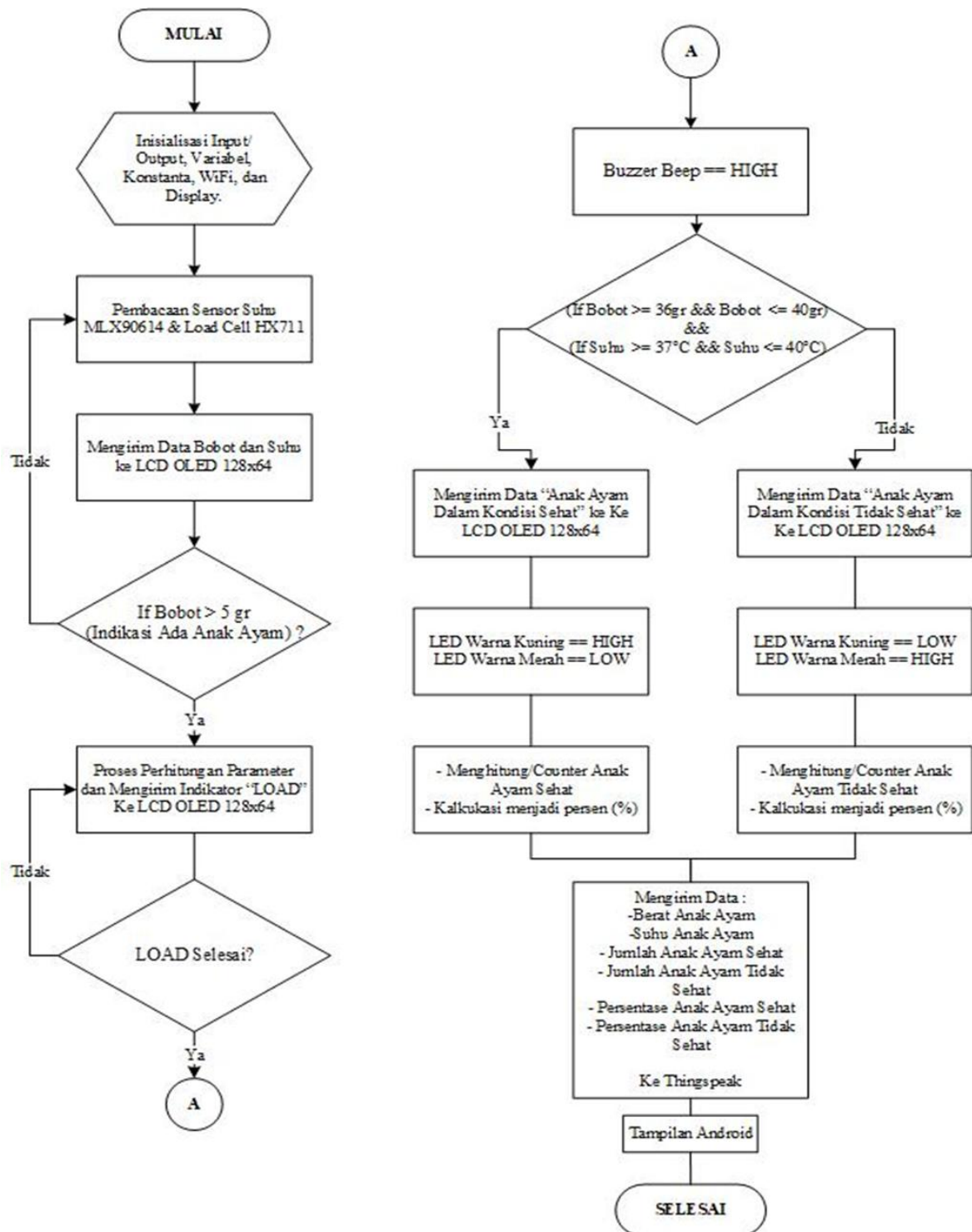


Gambar 4. Koneksi antara Mikrokontroler NodeMCU ESP32 dengan *Buzzer*

Secara teknis, sistem yang dirancang bekerja mengikuti diagram alir yang diberikan dalam Gambar 5. Proses dimulai melalui inisialisasi input dan *output* serta penentuan parameter dalam sistem yang mencakup variabel, konstanta, Wifi, dan display. Proses berikutnya berupa pembacaan sensor *load cell* untuk mendeteksi bobot anak ayam dan sensor MLX90614 untuk mendeteksi suhu dari anak ayam. Informasi atau data berupa nilai akan ditampilkan pada LCD Oled 128×64 I2C. Jika bobot yang terdeteksi tidak lebih dari 5 gram, maka sistem akan mengindikasikan bahwa tidak ada anak ayam dan sensor akan mendeteksi ulang atau anak ayam bisa dinyatakan tidak sehat. Pemilihan batas bawah bobot ini berdasarkan sintesis dari hasil penelitian yang diperoleh Harmono dkk. (2023) dan Wali dkk. (2025). Jika sensor *load cell* mendeteksi bobot anak ayam lebih dari 5 gram, maka proses berikutnya mengirimkan indikator ‘LOAD’ ke LCD Oled 128×64 I2C. Jika nilai yang didapat tidak sesuai dengan perhitungan parameter maka *buzzer* tidak akan berbunyi yang menandakan bahwa nilai yang dideteksi oleh kedua sensor bukan nilai anak ayam. Sebaliknya, jika nilai yang didapat sesuai dengan perhitungan parameter maka *buzzer* akan berbunyi yang menandakan bahwa kedua sensor mendeteksi nilai anak ayam. Selanjutnya nilai dari kedua sensor akan diklasifikasikan untuk memisahkan anak ayam sehat dan tidak sehat berdasarkan bobot dan suhu. Jika bobot anak ayam bernilai antara 36 dan 40 gram dan suhunya berada antara 37°C dan 40°C maka data akan ditampilkan pada LCD Oled 128×64 I2C dengan keterangan “Ayam Dalam Kondisi Sehat” kemudian lampu LED warna kuning akan menyala. Selanjutnya, data anak ayam yang sehat akan dijumlahkan dan akan dihitung persentasenya. Jika bobot dan suhu anak ayam di luar rentang nilai bobot dan suhu yang telah ditentukan, maka data akan ditampilkan pada LCD Oled 128×64 I2C dengan keterangan “Ayam Dalam Kondisi Tidak Sehat” kemudian lampu LED warna merah akan menyala. Jumlah anak ayam dalam kondisi tidak sehat dihitung jumlahnya dan persentasenya. Selanjutnya, data dan kondisi anak ayam yang dipantau akan dikirim ke jaringan komunikasi dan dapat diperoleh informasinya melalui platform IoT *ThingSpeak*. Data yang diperoleh berupa bobot anak ayam, suhu anak ayam, jumlah anak ayam sehat, jumlah anak ayam tidak sehat, persentase anak ayam sehat, dan persentase anak ayam tidak sehat. Data tersebut bisa ditampilkan melalui aplikasi yang diinstalasi dalam telepon seluler dengan Sistem Operasi Android.

Dalam prototipe sistem yang dikembangkan, platform IoT yang digunakan adalah ThingSpeak. Platform ini memiliki kemampuan dalam memisahkan, memvisualisasikan, dan menganalisis aliran data dalam *cloud* (Komarudin dkk., 2021). Untuk mengimplementasikan platform IoT *ThingSpeak* pada Arduino, sebuah program dibuat dengan pemanggilan ESP32 sebagai *client* dari *local host cloud* internet sehingga alat dapat terkoneksi ke jaringan internet dengan sintaksis program yaitu `#include <WiFi.h>`. Ketika alat sudah terkoneksi di *cloud* internet dan mendapatkan

Internet Protokol (IP) *address* yang diberikan oleh IP lokal, selanjutnya IP tersebut nantinya dijadikan media komunikasi data yang kemudian akan dipastikan oleh ESP32 dan *ThingSpeak* dengan perintah program `#include <ThingSpeak.h>` dimana pada komunikasi tersebut ESP32 berfungsi sebagai *client*. Setelah itu, perintah tersebut akan diproses untuk menghubungkan *Thingspeak* yang merupakan *platform* IoT. Pada tahap selanjutnya setelah proses sudah dipastikan, maka selanjutnya membuka API key di web *ThingSpeak* untuk mendapatkan *channel ID*, *my write API key* dan *my read API key*. Setelah mendapatkan kode tersebut nantinya akan dimasukkan ke program Arduino IDE dengan menggunakan perintah `unsigned long myChannelNumber = 1639178`, `const char*myWriteAPIKey = "K8RV2GF0NHAR5L4P"`. Kode program untuk mengakses data *cloud* menggunakan platform *ThingSpeak* diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Diagram Alir Sistem Penyortiran Anak Ayam Sehat dan Tidak Sehat

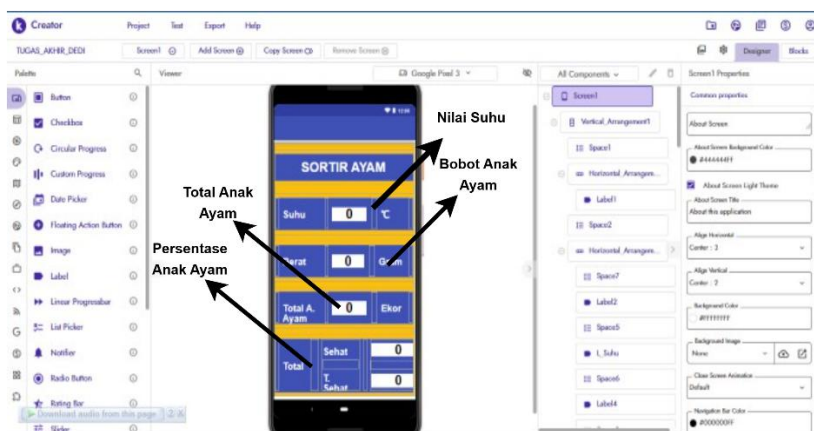
```

10 #include <Adafruit_SSD1306.h>
11 #include <Adafruit_MLX90614.h>
12 #include <elapsedMillis.h>
13 #include "HX711.h"
14 #include <WiFi.h>
15 #include "ThingSpeak.h" // always include thingspeak header file after other
16 #define DOUT 27 //PIN D12
17 #define CLK 14 //PIN D13
18 #define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
19 #define SCREEN_HEIGHT 32 // OLED display height, in pixels
20 #define OLED_RESET 5 // Reset pin # (or -1 if sharing Arduino reset pin)
21
22 //Timer ElapsedMillis
23 elapsedMillis timer;
24
25 //WiFi Connection
26 const char* ssid = "Mandala Teckwel & Kusjak"; // your network SSID (name)
27 const char* password = "nantidulu"; // your network password
28 WiFiClient client;
29
30 //To Thingspeak
31 unsigned long myChannelNumber = 1639178;
32 const char * myWriteAPIKey = "K8RV2GF0NHAR5L4P";
33 unsigned long lastTime = 0;
34 unsigned long timerDelay = 10000;
35

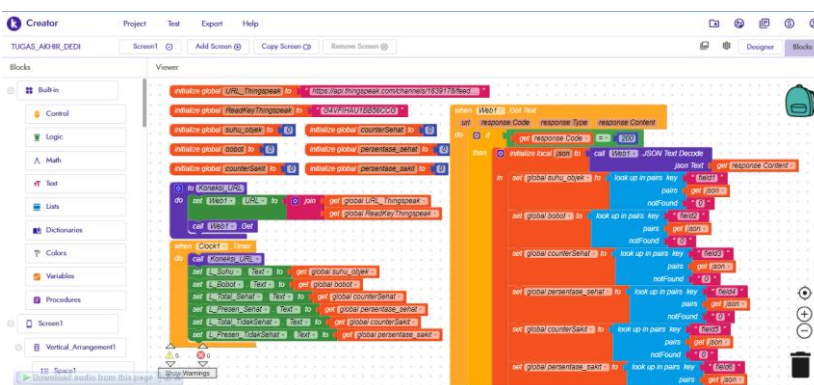
```

Gambar 6. Kode Program untuk Mengakses Data Cloud Menggunakan Platform *ThingSpeak*

Perancangan aplikasi berbasis Android digunakan dalam sistem penyortiran anak ayam sehat dan tidak sehat menggunakan Kodular yang berbasis visual *block programming*. Desain HMI (*human machine interface*) dan program aplikasi menggunakan Kodular divisualisasikan pada Gambar 7 dan 8. Seperti terlihat dalam Gambar 7, aplikasi yang dibangun mempunyai satu tampilan yang berisikan informasi berupa nilai dari sensor *load cell* yaitu untuk bobot anak ayam dan sensor MLX90614 untuk suhu anak ayam serta informasi lainnya berupa total anak ayam yang terdeteksi, jumlah total dan persentase anak ayam sehat, dan jumlah total dan persentase anak ayam tidak sehat. Sementara itu, Gambar 8 memvisualisasikan blok-blok yang dikompilasi menjadi aplikasi dalam sistem berbasis Android.

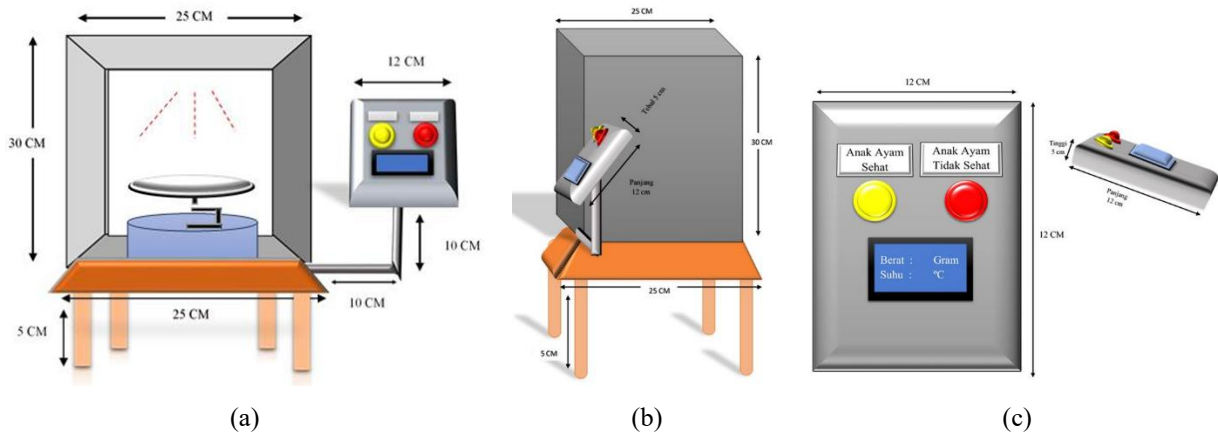


Gambar 7. Desain HMI pada Aplikasi Berbasis Android



Gambar 8. Program Aplikasi pada Kodular

Prototipe sistem yang dibuat berbentuk kotak dimana sensor bobot *load cell* diletakkan di bagian bawah dalam kotak tersebut, sedangkan untuk sensor suhu MLX90614 diletakkan di bagian atas dalam kotak dengan jarak 6 cm dari sensor *load cell*. Pada bagian *output* terdapat dua lampu indikator LED yang berwarna kuning dan merah sebagai penanda anak ayam sehat dan tidak sehat, *output* selanjutnya *buzzer* yang berfungsi sebagai penanda bahwa kedua sensor sudah mendeteksi anak ayam, informasi yang sudah didapat dari input dan *output* akan ditampilkan pada LCD Oled I2C. Untuk lampu indikator LED, *buzzer* dan LCD diletakkan di bagian samping kotak prototipe. Gambar 9 memperlihatkan tampak depan, tampak samping, dan bagian yang berisi lampu indikator LED, buzzer, dan LCD dari prototipe yang dibuat.



Gambar 9. Desain penyortiran anak ayam (a) tampak depan, (b) tampak samping, dan (c) bagian yang berisi lampu indikator LED, buzzer, dan LCD.

3. Hasil dan Pembahasan

Prototipe direalisasikan menggunakan bahan dasar kayu tripleks yang berukuran 25×25×30 cm dan ketebalan bahan 1 mm. Komponen yang digunakan dan disusun seperti pada Gambar 10. Sensor *load cell* diletakkan di bagian bawah, sedangkan sensor MLX90614 diletakkan di bagian atas. Jarak antara sensor *load cell* dengan sensor MLX90614 sebesar 5 cm. Pada bagian luar prototipe terdapat monitor seperti Gambar 11 dimana monitor ini berfungsi sebagai pemberi informasi dari hasil penyortiran. Pada monitor tampak dari luar terdapat beberapa komponen yaitu dua buah lampu yang berwarna kuning dan merah. Lampu warna kuning menunjukkan kondisi anak ayam sehat, sedangkan lampu warna merah sebagai indikator anak ayam tidak sehat. Selain itu, terdapat *buzzer* sebagai penanda ketika sensor *load cell* dan sensor MLX 90614 sudah mendeteksi anak ayam. LCD berfungsi menampilkan hasil baca dari sensor dan menampilkan informasi anak ayam sehat atau tidak sehat. Bagian dalam monitor terdapat beberapa komponen yaitu NodeMCU ESP32 sebagai mikrokontroler dan dua buah resistor sebesar 220 ohm dimana resistor disambungkan pada jalur lampu yaitu pada pin D4 dan D2.



Gambar 10. Realisasi Prototipe Sistem



Gambar 11. Monitor yang Menunjukkan Hasil Pemantauan

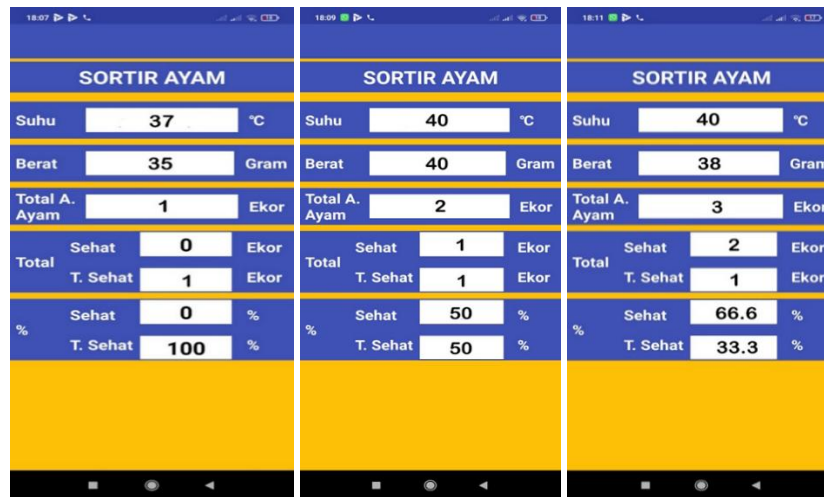
Proses pengujian prototipe dilakukan dengan menempatkan anak ayam pada wadah tertentu seperti diperlihatkan dalam Gambar 12. Dengan mengambil sampel tiga anak ayam, hasil pengujiannya ditampilkan dalam Tabel 1. Pengujian sistem penyortiran menggunakan nilai tertentu untuk mengklasifikasikan anak ayam sehat atau tidak sehat, yaitu bobot anak ayam 35, 40, dan 38 gram, sedangkan untuk suhu yaitu 37°C dan 40°C. Ketika sampel anak ayam pertama diletakkan dalam wadah tertentu, sensor *load cell* mendeteksi bobot 35 gram dan sensor suhu MLX90614 mendeteksi 37°C. *Buzzer* menyala yang mengindikasikan proses pembacaan kedua sensor berhasil. Karena hasil deteksi sensor menunjukkan nilai bobot anak ayam di bawah bobot ambangnya, anak ayam terdeteksi tidak sehat sehingga lampu LED warna merah menyala. Data tersebut kemudian disimpan dalam *cloud* bersamaan dengan informasi jumlah anak ayam sehat dan tidak sehat berikut persentasenya. Pengujian anak ayam kedua menghasilkan data bobot 40 gram dan suhu 40°C sehingga anak ayam masuk dalam kategori sehat yang ditandai dengan nyala lampu LED warna kuning. Karena eksperimen yang dilakukan memodelkan pengujian keseluruhan anak ayam yang ada dalam kandang, jumlah anak ayam sehat dan tidak sehat serta persentasenya yang ditampilkan dalam kolom ke-7 sampai 10 dari Tabel 1 dihitung secara akumulatif dari keseluruhan anak ayam yang dipantau. Pengujian berikutnya untuk sampel ketiga menghasilkan data seperti ditunjukkan dalam Tabel 1. Selanjutnya, seluruh data tersebut tersimpan dalam *cloud* dan dapat diakses melalui telepon genggam berbasis sistem operasi Android yang diinstalasi HMI yang dirancang mengikuti Gambar 7. Tampilan data pemantauan anak ayam melalui aplikasi yang diinstalasi dalam telepon genggam berbasis sistem operasi Android diperlihatkan dalam Gambar 13. Dalam tampilan tersebut, kondisi suhu dan bobot setiap anak ayam yang ditimbang dapat dibaca secara jelas. Selain itu, jumlah akumulasi anak ayam yang ditimbang beserta klasifikasi sehat dan tidak sehatnya juga ditampilkan sehingga memudahkan peternak untuk mengetahui kondisi anak ayam yang ada di peternakannya. Data yang ditampilkan dalam aplikasi ini sama dengan yang terlihat dalam LCD pada bagian monitor prototipe pada Gambar 11. Sementara itu, *snapshot* tampilan dalam *dashboard* platform IoT *ThingSpeak* terkait data suhu dan bobot anak ayam yang dipantau secara *real time* diberikan dalam Gambar 14. Dalam *dashboard* tersebut, peternak dapat mengamati aktivitas penimbangan anak ayam setiap saat berdasarkan informasi waktu yang tertera dalam sumbu horizontal. Setiap titik yang muncul dalam grafik pada Gambar 14 berkorelasi dengan nilai parameter suhu atau bobot anak ayam yang sedang ditimbang.



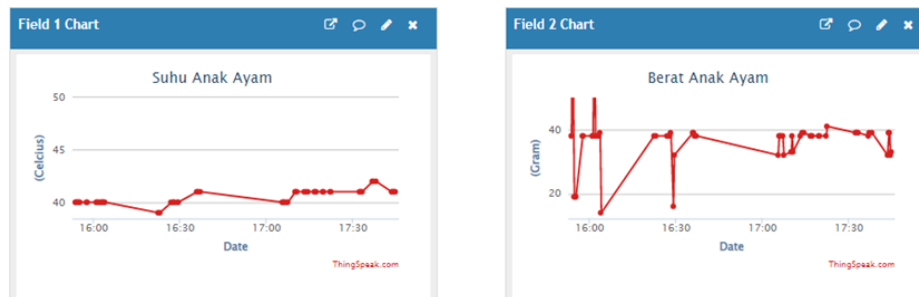
Gambar 12. Penempatan Anak Ayam yang Diperiksa Status Kesehatannya

Tabel 1. Hasil Pengujian Sampel Anak Ayam

Anak ayam ke-	Load Cell (gram)	Suhu MLX90614 (°C)	Buzzer	LED kuning	LED merah	Total anak ayam sehat	Total anak ayam tidak sehat	Persentase anak ayam sehat (%)	Persentase anak ayam sehat (%)
1	35	37	HIGH	LOW	HIGH	0	1	0	100
2	40	40	HIGH	HIGH	LOW	1	1	50,0	50,0
3	38	40	HIGH	HIGH	LOW	2	1	66,6	33,3



Gambar 13. Tampilan Data Pemantauan Anak Ayam Melalui Aplikasi yang Diinstalasi dalam Telepon Genggam Berbasis Sistem Operasi Android.



Gambar 14. Tampilan dalam *Dashboard* Platform IoT *ThingSpeak* Terkait dengan Kondisi Bobot dan Suhu Anak Ayam yang Dipantau Secara *Real Time*

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun sistem penyortiran dan pemantauan anak ayam berdasarkan parameter bobot dan suhu tubuh menggunakan platform *Internet-of-Things* (IoT). Sistem yang dikembangkan mampu mengukur bobot dan suhu tubuh anak ayam secara *real-time*, mengirimkan data ke platform *ThingSpeak*, serta menyortir anak ayam ke dalam kategori sehat dan tidak sehat berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan, yaitu bobot antara 36 gram dan 40 gram serta suhunya berada antara 37°C dan 40°C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang baik dalam klasifikasi sehingga akurasinya 100% dan memberikan tampilan data yang informatif melalui antarmuka visual. Penerapan sistem ini dapat membantu peternak dalam meningkatkan efisiensi proses pemantauan kesehatan ternak, mengurangi beban kerja manual, dan meningkatkan respons terhadap kondisi anak ayam yang tidak sehat. Kedepannya, sistem dapat ditingkatkan dengan penambahan fitur kecerdasan buatan untuk klasifikasi berbasis *machine learning* serta pengembangan integrasi dengan sistem manajemen peternakan secara menyeluruh.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendanai sebagian penelitian melalui skema Hibah Penelitian Unjani Tahun Anggaran 2024.

Daftar Pustaka

- Athiyah, Sugiarto, R. E., Afriyandi, R., Ariv, J. E. P., & Perdanasari, L. (2024). Sistem Cerdas Berbasis IoT untuk Pemantauan dan Pengendalian Faktor Produktivitas Ayam Ras Petelur. *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*, 8(6), 11825–11831.
- Fatmaningsih, R., Riyanti, R., & Nova, K. (2016). Performa Ayam Pedaging Pada Sistem Brooding Konvensional Dan Thermos. *Jurnal Ilmiah Peternakan Terpadu*, 4(3), 222–229.
- Harmono, Sunariyo, & Wadjdi, F. (2023). Proporsi Kelompok Bobot Ayam Perent Stock Broiler Berdasarkan Hasil Grading. *Jurnal Dinamika Rekayasa*, 6(1), 132–135.
- Hendrikus, Setyaningsih, F. A., & Suhardi. (2022). Sistem Pengontrolan dan Monitoring pada Kandang Ayam Broiler Berbasis Internet-of-Things (IoT). *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Perangkat Lunak*, 3(1), 117–128. <https://doi.org/10.33365/jatika.v3i1.1922>
- Hidayat, F., Sumiati, S., Afnan, R., & Fadilah, R. (2023). Pengaturan Suhu Brooding pada Performa Ayam Broiler Pelanggan PT New Hope Indonesia. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, 28(4), 599–606. <https://doi.org/10.18343/jipi.28.4.599>
- Idofitrarmdhan, Bustami, M. I., & Riyadi, W. (2023). Perancangan Smart System Ternak Ayam berbasis IoT menggunakan Arduino UNO. *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Komputer (JAKAKOM)*, 3(1), 511–521.
- Imam, & Abdillah, N. (2024). Sistem Pemantau Suhu dan Kelembaban pada Kandang Anak Ayam Berbasis Internet-of-Things. *Jurnal Rekayasa Sistem Informasi Dan Teknologi*, 2(1), 509–517.
- Komarudin, U., Subarli, H., Kusnandar, & Najmurokhman, A. (2021). Design and Implementation of A Low-Cost Air Quality Measurement Instrumentation Using Internet-of-Things Platform and Cloud-based Messaging Service. *2021 1st International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System, (ICE3IS)*, 170–175. <https://doi.org/10.1109/ICE3IS54102.2021.9649658>
- Maryanti, E. V., Haryono, D., & Endaryanto, T. (2023). Strategi Pengembangan Usaha Ternak Ayam Broiler Di Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Ilmiah Peternakan Terpadu*, 11(3), 159–175. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23960/jipt.v11i3.p159-175>
- Nugroho, M., & Astuti, F. Y. (2021). Analisis Kelayakan Usaha Peternakan Ayam Pedaging (Broiler). *DAYA SAING: Jurnal Ekonomi Manajemen Sumber Daya*, 23(1), 59–72. <https://doi.org/10.23917/dayasaing.v23i1.14065>
- Nuryati, T. (2019). Analisis Performans Ayam Broiler Pada Kandang Tertutup Dan Kandang Terbuka. *Jurnal Peternakan Nusantara*, 5(2), 77–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.30997/jpnu.v5i2.1931>
- Oktavia, H., Rochmi, S. E., Suprayogi, T. W., & Legowo, D. (2021). Pertambahan Berat Badan dan Konversi Pakan Ayam Broiler Ditinjau dari Suhu dan Kelembaban Kandang. *Journal of Applied Veterinary Science and Technology* 02, 02, 5–9. <https://doi.org/10.20473/javest.V2.I1.2021.5-9>
- Priyambodo, D., Dewi, I., & Ayuningtyas, G. (2020). Preferensi Konsumen Terhadap Daging Ayam Broiler di Era New Normal. *Jurnal Sains Terapan*, 10(2), 83–97. <https://doi.org/10.29244/jstsv.10.2.83>
- Qaid, M. M., Albatshan, H. A., Al-Garadi, M. A., & Hussein, E. O. S. (2023). Effect of two brooding systems and four stocking densities on immune response and stress indicators of broiler chicks during the brooding period. *Italian Journal of Animal Science*, 22(1), 615–625. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2224808>
- Ramdan, Hamidi, E. A. Z., & Effendi, M. R. (2024). Prototipe Smart Chicken Farm Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Blynk. *Jurnal FUSE – Teknik Elektro*, 4(1), 51–60.
- Saputra, J. S., & Siswanto. (2020). Prototipe Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban pada Kandang Ayam Broiler Berbasis Internet-of-Things. *PROSISKO*, 7(1), 72–83.
- Seto, R. (2020). Brooding: Faktor Penentu Keberhasilan Pemeliharaan. *Infovet : Majalah Peternakan Dan Kesehatan Hewan*. <https://www.majalahinfovet.com/2020/11/brooding-faktor-penentu-keberhasilan.html>
- Sheir, A. H., Ahmad, F., Yousaf, M., & Abbas, R. Z. (2025). Effect of different led light colors and intensities on growth performance and economic outcomes for layers kept in environment-controlled house during brooding phase. *International Journal of Science and Engineering Science Research*, 1(1), 75–95.
- Suganda, A., Mujahidin, I., Baba, S., & Salman, D. (2024). Fluctuations and Disparity in Broiler and Carcass Price before, during, and after Covid-19 Pandemic in Indonesia. *Heliyon*, 10(8), e29073. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29073>
- Wali, N.A.J., Rahadi, S., Badaruddin, R., & Nafiu, L.O. (2025). Estimasi Heritabilitas Bobot Badan Ayam Kampung Fase Starter pada Pemeliharaan Intensif. *JIPHO (Jurnal Ilmiah Peternakan Halu Oleo)*, 7(2), 226–231.
- Wicaksono, D., & Kamal, T. (2020). Sistem pemantau iklim mikro pada kandang ayam pedaging tertutup berbasis internet of things. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Komputer*, 8(2), 100–105. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.8.2.2020.100-105>
- Wilcox, C. H., Sandilands, V., Mayasari, N., Asmara, I. Y., & Anang, A. (2024). A literature review of broiler chicken welfare, husbandry, and assessment. *World's Poultry Science Journal*, 80(1), 3–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00439339.2023.2264824>

Ye, P., Ge, K., Li, M., Yang, L., Jin, S., Zhang, C., Chen, X., & Geng, Z. (2019). Egg-laying and brooding stage-specific hormonal response and transcriptional regulation in pituitary of Muscovy duck (*Cairina moschata*). *Poultry Science*, 98(11), 5287–5296. <https://doi.org/10.3382/ps/pez433>

Synthesis Epoxy Fatty Acid Methyl Ester Using Combined Acid Catalyst

Hendriyana, Diva Amerya Agustin, and Akmal Rahmawan

Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Jenderal Ahmad Yani, Cimahi, Indonesia

hendriyana@lecture.unjani.ac.id, divagtn123@gmail.com, akmalrahmawan213@gmail.com

Abstrak

Senyawa epoksi untuk plasticizer dapat disintesis dari metil ester asam lemak. Proses sintesis telah dilakukan dalam reaktor batch pada suhu operasi 60°C. Sumber oksigen yang digunakan dalam proses epoksidasi adalah hidrogen peroksida. Katalis yang digunakan adalah senyawa berbasis asam, yaitu asam format, asam asetat dan kombinasi keduanya. Parameter yang digunakan untuk menilai kinerja proses reaksi adalah nilai bilangan iod dan konversi ikatan rangkap atom C, dan didukung oleh sifat fisik seperti viskositas, densitas dan titik nyala. Kinerja asam format menunjukkan bahwa konversi maksimum yang dapat dicapai adalah 87,47% dengan bilangan iod 5,84 g-I₂/100g pada konsentrasi katalis 10%-wt. Penggunaan katalis asam asetat memberikan konversi maksimum 68,96% dengan bilangan iod 14,57g-I₂/100g pada konsentrasi katalis 20%-wt. Untuk katalis kombinasi, konversi maksimum yang diperoleh adalah 79,30% dengan bilangan iod 9,64 g-I₂/100g pada konsentrasi katalis 15%-wt dengan rasio FA:AA=30:70. Katalis terbaik adalah asam format, karena memiliki kinerja konversi tertinggi dan penggunaan konsentrasi minimal. Hasil analisis produk diperoleh senyawa metil 9,10 epoksioktadekanoat epoksida dengan konsentrasi 12,30%-berat.

Kata kunci: FAME, Asam Format, Asam Asetat, Epoksidasi, EFAME

Abstract

Epoxy plasticizer compounds can be produced from fatty acid methyl esters through an epoxidation reaction. In this study, synthesis was conducted in a batch reactor at 60 °C using hydrogen peroxide as the oxygen donor. Acidic catalysts, including formic acid, acetic acid, and their combination, were applied to evaluate reaction performance. Performance was assessed based on iodine value and carbon-carbon double bond conversion, supported by physical properties such as viscosity, density, and flash point. The use of formic acid resulted in the highest conversion of 87.47% with an iodine value of 5.84 g I₂/100 g at a catalyst concentration of 10 wt%. Acetic acid achieved a maximum conversion of 68.96% with an iodine value of 14.57 g I₂/100 g at 20 wt%. For the mixed catalyst system, the highest conversion reached 79.30% with an iodine value of 9.64 g I₂/100 g at a total catalyst concentration of 15 wt% and a formic acid to acetic acid ratio of 30:70. Overall, formic acid was identified as the most effective catalyst due to its superior conversion efficiency at lower concentrations. Product analysis confirmed the formation of methyl 9,10-epoxyoctadecanoate with a yield of 12.30 wt%.

Keywords: FAME, Formic Acid, Acetic Acid, Epoxidation, EFAME

1. Introduction

Fatty Acid Methyl Ester (FAME) is an methyl-ester compound derived from vegetable oils such as crude palm oil through an esterification process using an acid-based catalyst such as H₂SO₄ and/or a trans-esterification process using a base-based catalyst such as NaOH (Hendriyana and Andini, 2024). Most FAME is currently used as fuel for diesel engines with a mixture content of 5%-v, 20%-v and 30%-v with terms known in the market or in the community as B5, B20 and B30. For example, B30 is a diesel fuel whose content consists of 30%-v FAME and 70%-v petroleum-based diesel oil (Soni et al, 2024; Fardilah et al, 2023).

In addition to being a fuel, FAME has also been developed into several chemical products. These products include lubricating oil, solvents and plasticizers. The synthesis of lubricants from FAME has been developed by Shohibulloh et al (2022) and reviewed by Godfred et al (2021). The use of FAME as a solvent is considered environmentally friendly because it is able to degrade easily, has a low level of toxicity and is not flammable (Medina et al, 2007). A plasticizer are materials used to increase the flowability and moulding of polymer materials, such as PVC. Di(2-ethylhexyl) phthalate (DOP) is the most commonly used plasticizer in the industry, however that the products of DOP are able to act as potential carcinogenic agents (Galli et al, 2014; Rodrigo et al, 2010). Phthalate-based plasticizers as mentioned can be replaced by epoxidized fatty acid methyl ester (EFAME) which is renewable and environmentally friendly (Pravin et al, 2024).

Several researchers have developed FAME into epoxy with various raw material sources and catalysts. Pamela et al (2020) developed microalgae as a source of FAME which was then converted into epoxy using hydrogen peroxide as a reagent and formic acid as a catalyst. Junyang et al (2017) used soybean oil as the raw material for epoxidized FAME with formic acid as a catalyst and hydrogen peroxide as a reagent. Meanwhile, Guodong et al (2019) synthesized epoxidized fame from used cooking oil using formic

Info Makalah:

Dikirim : 06-13-25;

Revisi 1 : 11-04-25;

Diterima : 12-17-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-815-7326-7759

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

acid and H_2SO_4 as catalysts combined. A combination of heterogeneous and homogeneous catalysts has also been developed by Andri et al (2023) in the conversion of used cooking oil into epoxy, the catalysts are acetic acid and amberlite IR-120. Heterogeneous catalysts have advantages in the separation process between the catalyst and the product mixture, but homogeneous catalysts can still be applied because of their high performance. Dekai Liu et al used a mixture of phosphoric acid and acetic acid as catalysts (Dekai et al, 2020). Hong et al (2024) used acetic acid and sulfuric acid combined catalyst for epoxidation.

The combination of catalysts allows for increased performance of the FAME epoxidation process. Catalysts that can be combined are acetic acid and formic acid. Srikanta et al et al (2008) studied these two catalysts and compared them independently. The acetic acid catalyst has advantages in reaction selectivity towards oxirane formation, but its conversion is low. While formic acid has advantages in increasing $\text{C}=\text{C}$ conversion, but its selectivity is lower. Therefore, the objective of this work was to study the combination of the two catalysts at various concentrations of the mixture.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The main raw materials used in this study were FAME obtained from the market place. Hydrogen peroxide (30%), acetic acid (AA) at 99% and Formic acid (85%) were obtained from a chemical store. Furthermore, to analyze the iodine number in the sample using Wijs solution, 99.5% cyclohexane, 98.5% sodium thiosulfate, 99.995% potassium iodide and amylum indicator.

2.2. Experimental

The epoxidation reaction process experiment was carried out in a 500 mL glass reactor. The reactor was equipped with a magnetic stirrer for stirring the material so that it was homogeneous and mass transfer occurred quickly. The heating process and stirring control used a hot plate. An alcohol thermometer was used to measure the operating temperature. Other supporting tools used in this study were analytical scales, separating funnels, vacuum pumps, beakers, erlenmeyers, micro burettes and volume pipettes.

2.3. Epoxidation Process

One hundred grams of FAME was weighed and added into the reactor placed on a hotplate. Then a magnetic stirrer was inserted into the reactor, and the reactor was sealed using aluminium foil. To measure the reaction temperature, a thermometer is placed, which is held by a stative. Hydrogen peroxide, formic acid and acetic acid are mixed in a separating funnel, which is then placed on the top of the reactor. Where the bottom of the separating funnel is inserted into the reactor through an aluminium foil cover.

The reaction is started by heating FAME to an operating temperature of 60°C with stirring at 500 rpm. A mixture of hydrogen peroxide, formic acid, and acetic acid was added drop-wisely into the reactor about 1 hour after reaching the reaction temperature. The reaction time is 6 hours after all the mixture in the separating funnel has been fed. The reaction is exothermic, during the reaction, the reaction temperature is always controlled and controlled to maintain it at the set reaction temperature.

The epoxy product obtained is then washed with warm water at a temperature of 50°C until the washing water has a pH of 7. Product drying was carried out under vacuum conditions and stopped when it no longer formed water vapour bubbles in the epoxy.

2.4. Product Characterization

Epoxidized FAME products were characterized using several methods, including iodine number, density, viscosity, flash point and gas chromatography mass spectrophotometry (GCMS). The Wijs method is used to measure the iodine number, where iodine reacts selectively with carbon-carbon double bonds (Edy et al, 2025). The conversion of double bonds of FAME ($\text{XC}=\text{C}$) calculated from the iodine value follows the following equation (Lei et al, 2020):

$$X_{\text{C}=\text{C}}(\%) = \left(\frac{IV_0 - IV_f}{IV_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

While IVF is the iodine number in the epoxy product (the remaining unreacted C double bond) at the end of the reaction. For density, measurements were made using a 25 mL pycnometer. The mass of a 25 mL sample was recorded at 25°C and then calculated using equation (2).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

The ASTM D-445 standard method is used to measure the kinematic viscosity of raw materials and products using a Cannon-Fenske viscometer. To maintain temperature uniformity during measurement, the Viscometer is immersed in a thermostatically controlled water bath.

The GC-MS QP2010 Ultra Shimadzu was used to analyze the composition of the EFAME. Identification of the products was achieved by comparing the observed mass spectra to those in the mass spectral library.

3. Results and Discussion

3.1. Properties of FAME

Properties of FAME related to epoxy synthesis include iodine number, density, kinematic viscosity and flash point. The properties of the methyl ester were used presented in Table 1. The iodine number is estimated to have a value of 46.6 g-I₂/100g. The density at 25°C is 0.871 g/mL. The kinematic viscosity and flash point are 4.96 cSt and 185°C, respectively.

Table 1. Properties of FAME

Parameter	Value
Iodine value (g-I ₂ /100g)	46.6
Density at 25°C (g/mL)	0.871
Viscosity Kinematic at 25°C (cSt)	4.96
Flash Point (°C)	185

3.2. Effect of Formic Acid Catalyst Concentration

The concentration of formic acid catalyst varied 10%-wt, 15%-wt and 20%-wt of the FAME oil mass. In Table 2, the iodine number value of the product is smaller than that of the feed. This indicates that the number of double bonds in the feed is released reacting with oxygen to form epoxide bonds. The reaction mechanism follows the equation as shown below (Yuchen et al, 2020):

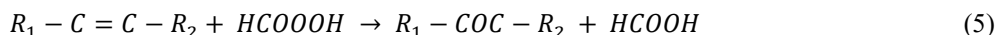
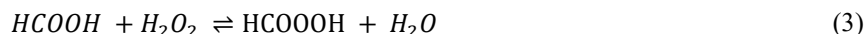
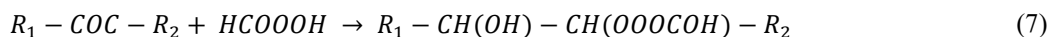
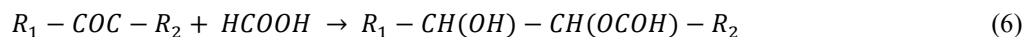


Table 2. Effect of Formic Acid Catalyst Concentration

Formic acid Conc. (%wt)	Iodine Value	X _{C=C} (%)	Viscosity at 25°C, cSt	Density at 25°C, g/cm ³	Flash Point (°C)
FAME	46.60		4.96	0.871	185
10	5.84	87.47	6.06	0.890	198
15	7.36	84.21	8.68	0.887	195
20	8.38	82.03	9.07	0.891	182

From the Table 2 the iodine number value increased after the concentration of formic acid catalyst was increased from 10%-wt to 15%-wt and 20%-wt. This is certainly not in line with the C=C conversion. Where the conversion decreases with the addition of formic acid concentration. This can be caused by excess formic acid reacting with the epoxy chain as presented in equation (4) to form a 1,2-diol compound (two -OH groups on adjacent carbons), where one of the -OH groups has reacted to form an ester with formic acid (HCOOH). In addition, the performic acid compound formed in reaction equation (3) also reacts with epoxide to form an unstable compound as written in equation (7) (Edy et al, 2020; Yuchen et al, 2020):



The viscosity of the product at 25°C increases with increasing concentration of formic acid. This is due to the formation of saturated compounds as a result of the reduction of C=C bonds. The addition of oxygen atoms to the double C chain causes the density and flash point of the product to be higher than the feed.

3.3 Effect of Acetic Acid Catalyst Concentration

To study the effect of acetic acid catalyst concentration on iodine number, C=C conversion and physical properties of EFAME, the catalyst concentration was varied from 10%-wt, 15%-wt and 20%-wt. The reactions that occur during the epoxidation process follow the equations as presented in equations (8) to (11) (Srikanta et al, 2008).

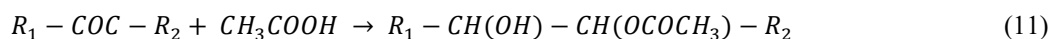
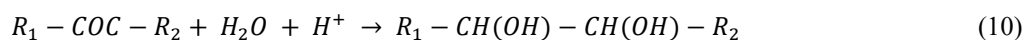
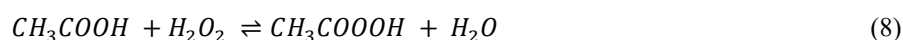


Table 3. Effect of Acetic Acid Catalyst Concentration

Acetic acid Conc. (%wt)	Iodine Value (g-I ₂ /100g)	X _{C=C} (%)	Viscosity at 25°C cSt	Density at 25°C g/cm ³	Flash Point (°C)
FAME	46.60		4.96	0.871	185
10	14.97	67.87	5.39	0.868	190
15	15.48	66.78	5.17	0.856	194
20	14.47	68.96	5.78	0.874	196

The results of the experiment are presented in Table 3. The iodine number increased from 14.97 g-I₂/100g to 15.48 g-I₂/100g or the C=C conversion decreased from 67.87% to 66.78% when the acetic acid concentration was increased from 10%-wt to 15%-wt. This is in line with the research of Srikanta et al (2008), where the higher acetate concentration causes the stability of the oxirane ring to be very low and can react with acetate to form by-products such as α-glycol. Then the changes in viscosity and density of the product to the feed conditions are relatively small.

3.4. Effect of Combined Catalyst Concentration

Acetic acid and formic acid catalysts were combined in the FAME epoxidation process with a total catalyst concentration of 10%-wt, 15%-wt and 20%-wt. While the ratio of acetic acid to formic acid was varied at 30:70, 50:50 and 70:30. Where the experimental results are presented in Table 4.

Table 4. Effect of Combined Catalyst Concentration

Catalyst Conc. (%wt)	Catalyst Ratio FA:AA	Iodine Value	X _{C=C} (%)	Viscosity at 25°C, cSt	Density at 25°C, g/cm ³	Flash Point (°C)
FAME		46.60		4.96	0.871	185
10	70:30	13.20	71.68	6.17	0.885	196
	50:50	14.21	69.50	6.53	0.883	190
	30:70	15.23	67.32	6.60	0.881	198
15	70:30	11.17	76.04	8.56	0.885	182
	50:50	10.91	76.58	7.80	0.890	183
	30:70	9.64	79.30	7.00	0.893	180
20	70:30	12.44	73.31	8.50	0.899	188
	50:50	11.17	76.04	7.06	0.901	183
	30:70	11.67	74.95	8.50	0.900	184

Increasing the catalyst concentration from 10%-wt to 15%-wt at various catalyst ratios, the C=C conversion increased. However, when the catalyst concentration was added to 20%-wt, the conversion decreased. This is in line with the use of a single catalyst above. Most likely the catalyst reacts with epoxide compounds and others to produce by-products.

3.5. Gas Chromatography and Mass Spectroscopic of Epoxidized Products

The samples analyzed to determine the content of EFAME were under formic acid catalyst conditions with a concentration of 10%-wt. The main composition of EFAME products from GC-MS analysis is shown in Figure 1 and Table 5. In the analyzed product there were large amounts of saturated chain-methyl ester components such as hexadecanoic acid-methyl ester (RT 19.109 min), octadecanoic acid-methyl ester (RT 21.180 min) and 17-Octadecynoic acid-methyl ester (RT 22.539 min). In the product there is also an unsaturated compound 9-octadecenoic acid-methyl ester (RT 21.003 min) with a fairly high concentration of 26.59%-mass.

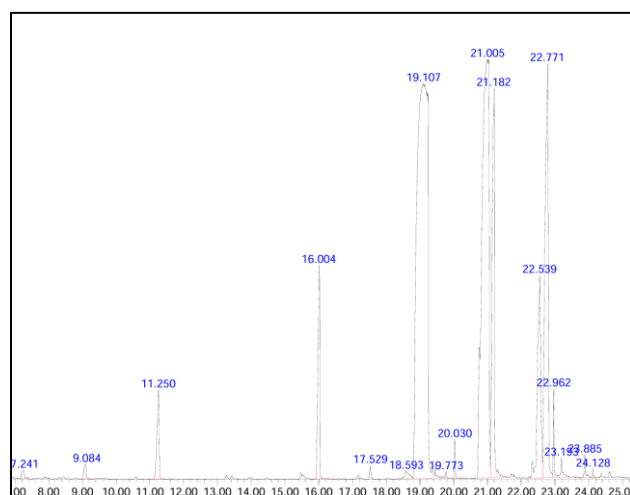


Figure 1. Chromatograms of Epoxidized Fatty Acid Methyl Esters

Table 5. Main Compositions of EFAME by GC-MS Analysis

No.	Retention time (min)	Chemical structural formula	Area (%)
1	9.086		0.32
2	11.251		1.81
3	16.004		3.23
4	18.592		0.32
5	19.109		39.0
6	20.033		0.32
7	21.003		26.59
8	21.180		8.30
9	22.539		5.92
10	22.768		12.30
11	22.962		0.69
12	23.191		0.35
13	23.886		0.27

Epoxy compound was found at a retention time of 22.962 min with a concentration of 12.30%-wt. The epoxy compound formed from this process is methyl 9,10 epoxyoctadecanoate. The chemical compounds formed in this process are in line with the research results of Guodong et al (2019).

Conclusions

Synthesis of epoxide compounds from FAME has been carried out at a temperature of 60oC using formic acid, acetic acid and a combination of both catalysts. Formic acid catalysts provide better performance with a conversion that can be achieved 87.47% at the lowest concentration. The addition of concentration to various types of catalysts can actually reduce the performance of the reaction process, this is due to the side reaction between the catalyst and

the epoxide compound. The results of GCMS analysis of the best sample showed the presence of methyl 9,10 epoxystadecanoate epoxide compounds with a concentration of 12.30%-wt.

List of Notations

IV_0 = the amount of iodine at the beginning of the reaction (FAME raw material)

ρ = density of epoxy

m = mass of epoxy [g]

V = volume of epoxy [mL].

References

- Andri S, Pani S, Fitria P, Muh WS, Mertza FA, Wisnu P. Synthesis of epoxy oil from waste cooking oil (WCO) using acetic acid and amberlite resin IR-120 as catalyst. *Engineering and Applied Science Research*. 2023. 50(4):335-342
- Dekai L, Yirui S, Phyu TW, Haryono A, Pingbo Z, Pingping J, Zhixin N, Guoqiang J, Huihang Z, Minzhong Z. Anefficient plasticizer based on waste cooking oil: Structure and application. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. 138(13):50128
- Edy P, Jericho SB, Matthew MI, Aloisiyus YW, Puguh S. The kinetics of the epoxidation reaction of sunflower oil utilizing peroxyformic acid generated in situ. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025. Volume 11: 101175
- Fardilah VA, Puspazirizita Y M, Tauviqirrahman M, Bayuseno AP. An overview of biodiesel, a fuel blend made from palm oil, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1268. 2023. 012057
- Galli F, Nucci S, Pirola C, Bianchi CL. Epoxy methyl soyate as bio-plasticizer: two different preparation strategies. *Chemical Engineering Transactions*. 2014. 37: 601-606.
- Godfred A, Samuel KT, Ephraim E, Amoah A, Eldon RR, Daniel D. Biolubricant production via esterification and transesterification processes: Current updates and perspectives. *International Journal of Energy Research*. 2021: 1–31.
- Guodong F, Yan M, Meng Z, Puyou J, Chengguo L, Yonghong Z. Synthesis of bio-base plasticizer using waste cooking oil and its performance testing in soft poly(vinyl chloride) films. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2019. 4(2): 99-110.
- Hendriyana, Andini H. Making fatty acid methyl ester (FAME) from off grade crude palm oil (CPO) by esterification and transesterification method. *Engineering Journal: Faculty for the Development of Engineering Science and Applications*. 2024. Vol 23, No 02:159-165 (in Indonesia)
- Hong PP, My NL, Hoang THK. Epoxidation of mixture of waste cooking oil and soybean oil with different compositions, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1340.2024. 012006
- Junyang W, Xuebing Z, Dehua L. Preparation of epoxidized fatty acid methyl ester with in situ auto-catalyzed generation of performic acid and the influence of impurities on epoxidation. *Waste and Biomass Valorization*. 2017. 9(10)
- Lei C, Chao C, Wenjun W, Xiu G, Xiaoyan K, Yan J, Liang L, Guoqiang W. Acid-free epoxidation of soybean oil with hydrogen peroxide to epoxidized soybean oil over titanium silicalite-1 zeolite supported cadmium catalysts. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. 91:191–200.
- Medina GY, De Caro P, Thiebaud-Roux S, Lacaze-Dufaure C. Fatty acid methyl esters as biosolvents of epoxy resins: A physicochemical study. *Journal of Solution Chemistry*. 2007. Vol. 36 No.4: 437-446.
- Pamela H, Simona Á, Renato H, Alejandra S. Epoxidation of fatty acid methyl esters derived from algae biomass to develop sustainable bio-based epoxy resins. *Polymers* 2020. 12: 2313.
- Pravin DJ, Chetan DG, Ravindra DK, Anand VP, Unnikrishnan RU. Synthesis and properties of a bio-based plasticizer derived from fatty acid methyl ester of erucic acid. *Journal of Polymers and the Environment*. 2024. 32(9):1-14.
- Rodrigo N, Monica PP, Myriam GT, Helmut R. Phthalate plasticizers covalently bound to PVC: Plasticization with suppressed migration. *Macromolecules*. 2010. 43: 2377–2381.
- Shohibulloh BA, Abu H, Erwana D. Making biolubricants from fatty acid methyl ester (FAME) made from crude palm oil (CPO). *Indonesian Journal of Education and Technology (JPTI)*. 2022. Vol. 2 No. 7: 341-347. (in Indonesia)
- Soni S. Wirawan, Maharani D. Solikhah, Hari Setiaprada, Agus Sugiyono. Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Volume 189, Part A. 113911
- Srikanta D, Anand VP, Vaibhav VG, Narayan CP. Epoxidation of cottonseed oil by aqueous hydrogen peroxide catalysed by liquid inorganic acids. *Bioresource Technology*. 2008. 99: 3737–3744

Yuchen B, Junyang W, Dehua L, Xuebing Z. Conversion of fatty acid methyl ester to epoxy plasticizer by auto catalyzed in situ formation of performic acid: Kinetic modeling and application of the model. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 259: 120791

Isothermal Pyrolysis Kinetics of Various Biomass Types using Thermogravimetric Data

Andini Hizbiyati and Hendriyana

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

andini.hizbiyati@lecture.unjani.ac.id, hendriyana@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Biomassa merupakan sumber bahan bakar terbarukan yang dapat dikonversi menjadi bio-oil sebagai sumber energi alternatif. Bahan baku biomassa yang memiliki potensi tinggi dalam pembuatan bio-oil adalah sekam padi, eceng gondok, dan tongkol jagung. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pembuatan bio-oil dari berbagai biomassa menggunakan metode pirolisis dengan menggunakan variasi beberapa variabel diantaranya yaitu suhu operasi (450°C dan 550°C), ukuran partikel (-2 mm/+1 mm dan +2 mm), dan jenis biomassa. Berdasarkan hasil penelitian, perolehan bio-oil yang tinggi yaitu 49,06 % pada biomassa tongkol jagung dengan ukuran +2 mm pada suhu operasi 450°C. Penyusunan model kinetika dilakukan dengan mengamati perubahan massa per satuan waktu. Pendekatan model kinetika dengan menggunakan orde 1/3 mampu menghasilkan nilai yang hampir mendekati data penelitian. Adapun hasil penyusunan model kinetika diperoleh nilai energi aktivasi proses pirolisis untuk sekam padi yaitu berkisar (24,55 – 27,79) kJ/mol, untuk tongkol jagung berkisar (35,51 – 42,55) kJ/mol, untuk eceng gondok bagian daun berkisar (23,55 – 30,72) kJ/mol, untuk eceng gondok bagian batang berkisar (30,11 – 46,77) kJ/mol, dan untuk eceng gondok campuran berkisar (35,72 – 40,70) kJ/kmol.

Kata kunci: biomassa, pirolisis, bio-oil, model kinetika, energi aktivasi

Abstract

Biomass is a renewable fuel source that can be converted into bio-oil as an alternative energy source. The type of biomass with the potential to produce bio-oil is rice husks, water hyacinths, and corn cobs. This study was conducted to examine manufacture of bio-oil from various biomass using the pyrolysis method using a variety of several variables, including operating temperature (450°C and 550°C), particle size (-2 mm/+1 mm and +2 mm), and type of biomass. It was observed that corn cobs yielded the highest output with 49.06% with a size of +2 mm at an operating temperature of 450°C. The preparation of kinetic models is carried out by observing changes in mass per unit of time. The kinetic model approach using the order of 1/3 is able to produce values that are almost close to the research data. The results of kinetics model preparation obtained energy value of activation of the pyrolysis process for rice husks, which ranges from (24.55 – 27.79) kJ/mol, for corn cobs ranging from (35.51 – 42.55) kJ/mol, for water hyacinths with leaves ranging from (23.55 – 30.72) kJ/mol, for water hyacinths with stems ranging from (30.11 – 46.77) kJ/mol, and for mixed water hyacinths ranging from (35.72 – 40.70) kJ/kmol.

Keywords: biomass, pyrolysis, bio-oil, kinetic model, activation energy

1. Introduction

Population growth has driven increasing needs in the energy sector. Meanwhile, reserves of conventional energy sources derived from fossil fuel continue to depletion. In addition, emissions from the use of fuels from petroleum can damage the environment, such as the greenhouse effect and acid rain. Therefore, a renewable energy source is needed that can be guaranteed to be sustainable and safe for the environment. One of the most potential alternative energy sources is biomass waste. Where the potential of this biomass waste is predicted to be able to produce energy of 1.08 x 10¹¹ toe (tons of oil equivalent) or 10 times the current energy needs (Sikiru, et al., 2024; Kan, Strezov, & Evans, 2016).

Several biomass waste that has the potential as an energy source includes rice husks, corn cobs, and water hyacinth. Each ton of rice will produce around 20%-weight of rice husks with a higher heating value (HHV) energy content of around 14.5-15.7 MJ/kg and a lower heating value (LHV) of around 14.2-15.5 MJ (Hendriyana, 2020). Corn cobs are waste that is rarely utilized. Currently, corn cobs are more widely developed for pellets, because corn cobs contain cellulose, hemicellulose, and lignin (Nugroho, Muhazir, & Asrori, 2024). Water hyacinth is a very fastgrowing aquatic plant. Five thousand seeds can be produced from one water hyacinth plant and can sink to the bottom and can survive for decades (Bote, Naik, & Jagadeeshgouda, 2020).

Fuel oil from rice husk biomass, corn cobs and water hyacinth can be done through thermal cracking or pyrolysis. This fuel oil called bio-oil. Bio-oil produced from the biomass pyrolysis process is usually a thick and corrosive liquid that has a dark brown color. In addition, bio-oil has a very complex chemical composition with its contents

Info Makalah:

Dikirim : 07-13-25;
Revisi 1 : 11-07-25;
Diterima : 12-22-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-899-1240-707
e-mail : andini.hizbiyati@lecture.unjani.ac.id

consisting of furan, aromatic hydrocarbons, aldehydes, ketones, phenols, esters, nitrogen compounds, anhydrosugars, organic and inorganic compounds (Abu Bakar & Titiloy, 2013).

(Fardhyanti, et al., 2019) studied the pyrolysis of 35 mesh rice husks at temperatures of 500°C and 600°C, where the bio-oil produced contained phenolic compounds of 47.98% and 62.65%-mass. The bio-oil from the pyrolysis of rice husks at a temperature range of 300°-400°C contains many methyl ester components (Novita, et al., 2022). Meanwhile, pyrolysis of 0.7-2.0 mm corn cobs at a temperature of 400°C produces bio-oil with a high acetic acid content of 37.49%-mass (Santi, Pertiwi, Matovanni, Cakradetha, & Suriyanto, 2025). For pyrolysis of water hyacinth, it has been carried out by (Ratnani, Widiyanto, & Mel, 2021) at operating conditions of 400 °C and 683°C.

The above studies have not studied the effect of size, pyrolysis temperature and pyrolysis kinetics on rice husk, corn cob and water hyacinth biomass. Therefore, this study focuses on the study of the effect of operating variables of size and temperature on bio-oil yield and discussion of pyrolysis kinetics.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The biomass used in this research were rice husks, corn cobs, and water hyacinth. Rice husk was obtained from rice mill in Cimahi, West Java. The corn cobs used were taken from local farmers in the area Cimahi, West Java. Meanwhile, water hyacinth obtained from Saguling, West Java.

2.2. Pre-treatment

The biomass size used in this study was -2 mm/+1mm which means the particles have an average diameter of 1.5 mm and +2 mm which means the particles have a diameter of 2 mm. Size reduction was carried out starting from grinding (Figure 1.a) followed by sieving (Figure 1.b).



(a)



(b)

Figure 1. (a) Grinding, and (b) Sieving

After the size reduction is done, the biomass is dried using natural heating from sunlight for 1-3 days. This aims to reduce the high air content in the biomass. High moisture content (MC) can cause the use of energy for pyrolysis to be very large, considering the latent heat of water is very large. In addition, the bio-oil obtained has a low calorific value.

The biomass that has been dried in the sunlight, then analyzed for its moisture content by heating it using an oven until a constant biomass weight is obtained. The moisture content in biomass is calculated using the following equation (1).

$$MC (\% - wt) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100\% \quad (1)$$

Where, MC is the water content in biomass after the drying process using sunlight, w_i is the mass of biomass before drying, w_f is the mass of biomass after drying and reaching constant weight.

2.3. Pyrolysis

Figure 2 is experimental set up for pyrolysis process. The pyrolysis process begins with weighing the biomass. Then the reactor is heated to operating temperature. After reaching operating temperature the biomass is fed into the reactor. The pyrolysis gas is condensed in a vertical condenser. The cooling medium used for the condenser is circulated water. The bio-oil produced is collected in a flask, while the uncondensed gas is discharged into the environment. The charcoal by-product remains in the pyrolysis reactor and is removed after the operation is completed. The bio-oil and charcoal produced are then weighed. Meanwhile, the weight of the gas is obtained by calculating the mass balance. The mass balance equation for calculating gas is presented in equation (2) below.

$$\text{Mass of Gas} = \text{Mass of Feed} - \text{Mass of Bio oil} - \text{Mass of Charcoal} \quad (2)$$

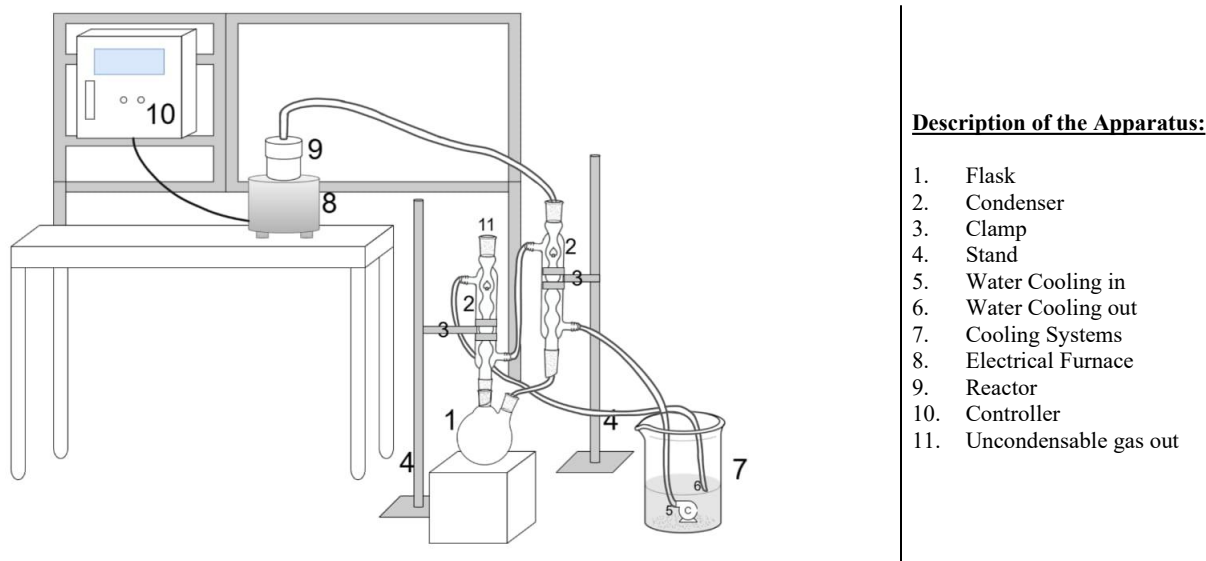


Figure 2. Experimental set up for isothermal pyrolysis

The yield of each product is calculated using equations (3) to (5) as follows:

$$Y_{bio-oil} (\%) = \frac{\text{mass of bio - oil}}{\text{mass of feed}} \times 100\% \quad (3)$$

$$Y_{charcoal} (\%) = \frac{\text{mass of charcoal}}{\text{mass of feed}} \times 100\% \quad (4)$$

$$Y_{gas} (\%) = 1 - Y_{bio-oil} (\%) - Y_{charcoal} (\%) \quad (5)$$

2.4. Kinetics

Pyrolysis kinetics study experiment under isothermal conditions using experimental equipment with configuration as shown in Figure 3. First step, wire mesh support is placed on the analytical balance. Second step, some biomass is weighed and inserted into the wire mesh. Third step, the reactor operating temperature is set (450 and 550°C). Fourth step, biomass is inserted into the reactor after reaching the operating temperature and mass changes are observed on the analytical balance every 5 seconds.

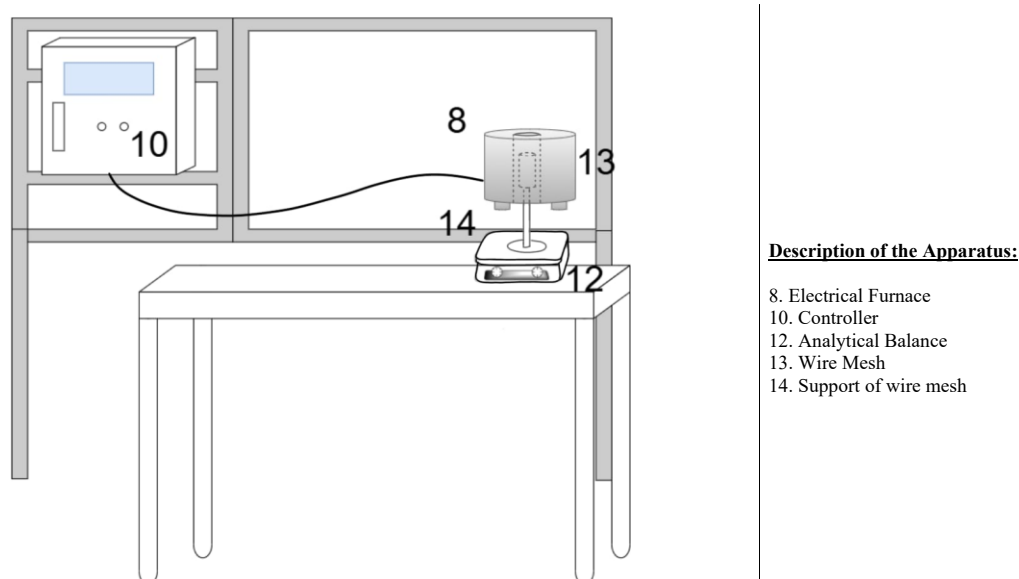


Figure 3. Experimental set up for isothermal pyrolysis kinetics study

3. Results and Discussion

3.1. Biomass Characteristics

The characteristics of biomass have a significant influence on the pyrolysis process. Water content is one of significant characteristic that require careful evaluation due to its influence on thermal conversion efficiency. The water content in biomass will affect the speed of heat increase in the pyrolysis process, the higher the water content in the biomass, the slower the heating process because the heat source will be used more to evaporate water from raw materials (Rizal, et al., 2020). Consequently, it is important to reduce the water content of the biomass used as raw materials in the pyrolysis process. Heating using direct sunlight is used to reduce the water content in the biomass.

Based on Table 1, it can be seen that the initial water content of biomass (rice husk, corn cob and water hyacinth) is very high. Therefore, drying with sunlight is carried out for rice husk material for 1 day, corn cob for 2 days and water hyacinth for 3 days with a drying time limit indicated by a constant mass change. As a result, the water content of several biomass decreased drastically, especially after milling and sieving. This is because the surface area of biomass is smaller, contact with unsaturated air is much faster than biomass that is still in the form of lumps.

Table 1. Biomass Moisture Content for Rice Husk, Corn Cob and Water Hyacinth

Biomass	MC (%)			
	Initial	Sun light	Drying after grinding and sieving	
			-2 mm /+1 mm	+2 mm
Rice husk	9.16	4.55	4.55	4.00
Corn cob	74.08	68.54	4.00	7.69
Water Hyacinth (Leaves)	86.00	46.81	6.25	6.25
Water Hyacinth (Stem)	97.00	81.69	6.67	5.88
Water Hyacinth (Mixture)	90.00	57.41	11.11	13.33

Proximate and ultimate analysis on each type of biomass used are presented in Table 2 below. The highest content in biomass is volatile matter with a value of 57.96% in rice husks, 72.9% in corn stalks and 64.27% in water hyacinths. The hemicellulose content in raw materials is also shown in Table 3, in rice husk biomass and corn cobs, the cellulose content is the highest with 45.8% and 45%, while in water hyacinth the hemicellulose content is the highest with a value of 40.2%.

Tabel 2. Proximate Analysis and Ultimate Analysis

	Rice Husk	Corn Cob	Water Hyacinth
Proximate Analysis (% mass)			
Moisture Content	7.85	7.2	6.25
Volatile Matter	57.96	72.9	64.27
Fixed Carbon	13.52	9.6	15.93
Ash	20.67	10.3	13.27
Ultimate Analysis (% mass)			
C	35.7	43.2	39.15
H	4.48	6.92	5.475
O	31.30	49.55	40.67
N	0	0.14	1.48
S	0.05	0.19	0.15
Reference	(Harnowo & Yuonaidi, 2021)	(Singh, Patil, Tekade, Gawande, & Sawarkar, 2021)	(Tran, et al., 2021)

Tabel 3. Lignocelullose Component

Biomass	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	References
Rice Husk	45.8	16.9	17.2	(Jiang, Du, & Wang, 2021)
Corn Cob	45	35	15	(Chong, Law, & Chan, 2020)
Water Hyacinth	17.6	40.2	7.2	(Tran, et al., 2021)

3.2. Effect of Temperature and Biomass Size on Product Yields

Based on the research results by varying the operational variables, the type of biomass were rice husk, corn cob and water hyacinth, size and operating temperature, the main product obtained from the pyrolysis results is bio-oil and by-products are charcoal and combustible gas (see Figure 4). Table 4 shows the yield of the main product bio-oil and the by-products charcoal and gas at various operating variables.



Figure 4. Products of Pyrolysis: (a) Bio-Oil, (b) Charcoal, and (c) Combustible Gas.

Table 4 shows the yield of bio-oil as the expected main product varies for each type of biomass, size, and operating temperature. The bio-oil obtained in the pyrolysis process is affected by lignocellulose content in biomass. The content of hemicellulose and cellulose will form a volatile substance and will be decomposed at the beginning of the pyrolysis process while the content of lignin in biomass will produce a solid product (Rhomadoni, Jamilatun, Idris, & Setyawan, 2024).

Biomass with high lignin content tends to produce low bio-oil yield, while biomass with high cellulose content tends to produce high bio-oil yield. In this study, it was found that corn cobs produce the highest bio-oil yield compared to rice husks and water hyacinths, this is in line with the data in Table 3, that corn cobs with the highest cellulose and hemicellulose content produce higher bio-oil yields compared to rice husks and water hyacinths.

At higher operating temperatures, most of the bio-oil yields increased. This is likely due to increased decomposition of biomass structures such as lignin, cellulose, and hemicellulose. Increasing the temperature in the pyrolysis process will enhance the lignocellulose decomposition process, consequently it can produce higher yields. In accordance with what was conveyed by (Rhomadoni, Jamilatun, Idris, & Setyawan, 2024) that lignin will decompose at 350-500°C, causing the yield produced at a variation of 500°C to be higher when compared to the lower temperature.

Bio-oil yield tends to increase at smaller particle sizes. It is likely that particles with small surface areas will produce rapid heat transfer, resulting in high bio-oil yields. Particle size of biomass will affect the heat and mass transfer process in the pyrolysis, the larger particles will provide a larger thermal gradient, a longer residence time thus increasing the possibility of side reaction occurring (Aini, Jamilatun, & Pitoyo, 2022).

Table 4. Yield of Bio-Oil, Charcoal and Gas with Various Operating Variables

Biomass	Products	Yield (%)			
		T = 450°C		T = 550°C	
		-2mm /+1mm	+2mm	-2mm /+1mm	+2mm
Rice husk	Bio-oil	29.78	33.72	43.06	42.67
	Arang	46.22	44.83	43.56	39.78
	Gas	24.00	21.44	13.39	17.56
Corn cob	Bio-oil	42.17	49.06	44.56	45.89
	Arang	29.28	27.22	24.44	27.17
	Gas	28.56	23.72	31.00	26.94
Water Hyacinth (Leaves)	Bio-oil	37.72	35.83	42.06	22.39
	Arang	38.50	40.00	35.17	39.50
	Gas	23.78	24.17	22.78	38.11
Water Hyacinth (Stem)	Bio-oil	30.89	27.78	32.11	28.56
	Arang	36.78	36.89	38.56	34.44
	Gas	32.33	35.33	29.33	37.00
Water Hyacinth (Mixture)	Bio-oil	33.56	32.67	25.11	31.78
	Arang	35.44	36.33	36.89	32.22
	Gas	31.00	31.00	38.00	36.00

3.3. Kinetics

Pyrolysis kinetic data were obtained by observing the changes in mass fraction against operating time at constant temperature. The process is divided into two zones as presented in Figure 5, zone (I) is drying and zone (II) is pyrolysis. The drying zone is identified from the difference between the initial mass and the water content in the biomass. While the pyrolysis zone is characterized by the release of volatile substances (smoke) from the biomass sample followed by a drastic decrease in sample mass, the pyrolysis process is considered to be over when no more smoke is produced in the operation.

The determination of the kinetic model of the pyrolysis process uses an approach with kinetic equations stated by (Weerachanchal, Tangsathitkulchai, & Tangsathitkulchai, 2010), this equation states that the decomposition rate of the pyrolysis process depends on any order of reaction, with the equation written as follows:



Where k is the reaction rate constant expressed by Arrhenius, A is the pre-exponential factor, E_a is the activation energy, R is the gas constant and T is the pyrolysis operating temperature and α is the change in the mass fraction of the biomass. The decomposition rate of the pyrolysis process is defined as follows:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1-\alpha)^n = Ae^{-\frac{E}{RT}}(1-\alpha)^n \quad (7)$$

The change in the mass fraction of biomass is calculated using the equation:

$$\alpha = \frac{(m_o - m)}{(m_o - m_f)} \quad (8)$$

With m_o , m_f and m express the values of the initial, final mass fraction and fraction each time.

By using data matching analysis with the reaction kinetics model, it was found that this model was not able to accurately represent the experimental data. The kinetics model II used to predict the value of the kinetic parameters of this pyrolysis reaction is:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k \times \frac{1}{(1-\alpha)^3} \quad (9)$$

The kinetic model fitting results are demonstrated in Figure 6. The kinetic parameters obtained were able to obtain values that were close to the experimental data by order of 1/3. The reaction kinetic parameters obtained at each biomass and process conditions are shown in the following Table 5.

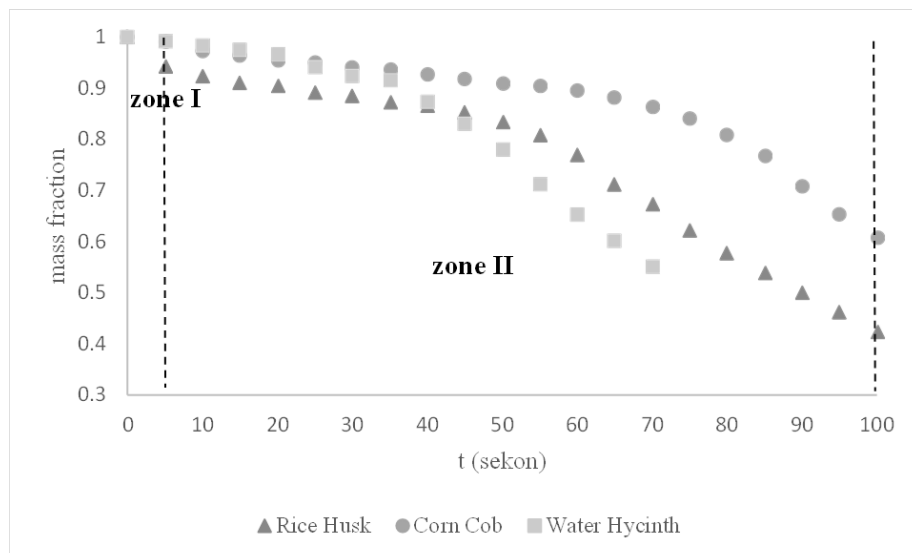


Figure 5. Mass Fraction Against Time in Operation with Size -2mm +1mm at a Temperature of 450°C

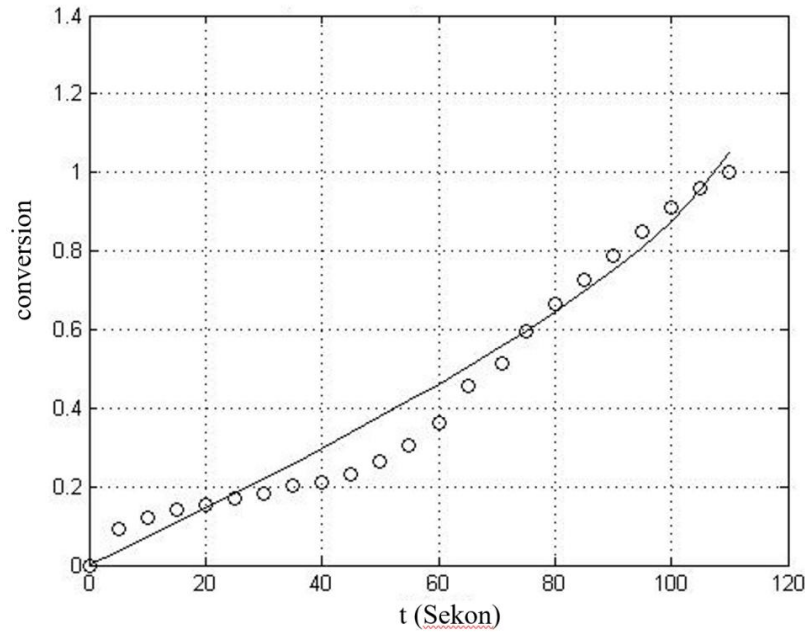


Figure 6. The Kinetics Model Fitting

Table 5. Estimated Pyrolysis Kinetic Parameters

Run	Biomass	Particle Size	Temperature (°C)	k	n	Error	E (kJ/mol)	A
1	Rice Husk	-2mm/+1mm	450	0.007	0.3	1.103	24.55	0.42
3			550	0.0115	0.3	0.631		
2		+2mm	450	0.0065	0.3	1.879	27.79	0.66
4			550	0.0114	0.3	0.630		
5	Corn cob	-2mm/+1mm	450	0.0044	0.3	2.316	42.55	5.22
7			550	0.0104	0.3	0.949		
6		+2mm	450	0.006	0.3	2.627	35.51	2.21
8			550	0.0123	0.3	0.849		
9	Water Hyacinth (Leaves)	-2mm/+1mm	450	0.0082	0.3	0.982	23.55	0.41
11			550	0.0132	0.3	0.528		
10		+2mm	450	0.0115	0.3	0.764	30.72	1.91
12			550	0.0214	0.3	0.478		
13	Water Hyacinth (Stem)	-2mm/+1mm	450	0.0094	0.3	1.259	46.77	22.53
15			550	0.0242	0.3	0.458		
14		+2mm	450	0.0136	0.3	0.633	30.11	2.04
16			550	0.025	0.3	0.264		
17	Water Hyacinth (Mixture)	-2mm/+1mm	450	0.0102	0.3	1.443	35.72	3.88
19			550	0.021	0.3	0.481		
18		+2mm	450	0.0094	0.3	1.028	40.70	8.19
20			550	0.0214	0.3	0.162		

Based on analysis results using the kinetics model, it turns out that water hyacinths have a lower activation energy value as represented in Table 5. The energy value of water hyacinth activation obtained was 23.55 kJ/mol while rice husks were 24.55 kJ/mol and corn cobs were 42.55 kJ/mol. The mechanism of the pyrolysis reaction determines the activation energy, the low value of the activation energy will indicate that the pyrolysis reaction that occurs is proceeding faster (Rambhatla, Panicker, Mishra, Manjeshwar, & Sharma, 2025). This results supports the graphical representation in Figure 5. In the graph, it can be seen that water hyacinth decomposes faster and reaches the end of the pyrolysis process compared to rice husks and corn cobs.

Conclusions

This study indicated that the pyrolysis process was significantly influenced by the specific type of biomass utilized. The lignocellulose content present in the raw materials also contributed to an increased yield of bio-oils. Furthermore, the pyrolysis outcomes were proven to be affected by the operating parameters, particularly temperature and particle size. An increase in the pyrolysis temperature up to 500°C resulted in a higher bio-oil gain, as the decomposition of lignocellulose structures occurred more intensively. Smaller particle sizes accelerated heat transfer and shortened the reaction time, thereby increasing the yield of bio-oils.

Kinetic studies demonstrated that a $1/3^{\text{rd}}$ order reaction model was best suited to describe the decomposition rate of the biomass during the pyrolysis process. Based on the preparation of this kinetic model, the activation energy values for the pyrolysis process were obtained as follows: for rice husks, the energy ranged from (24.55-27.79) kJ/mol; for corn cobs, it ranged from (35.51-42.55) kJ/mol; for water hyacinths with leaves, it ranged from (23.55-30.72) kJ/mol; for water hyacinths with stems, it ranged from (30.11-46.77) kJ/mol; and for mixed water hyacinths, it ranged from (35.72-40.70) kJ/mol. Among the three types of biomass analyzed, water hyacinth possessed the lowest activation energy, which stood at 23.55 kJ/mol. This condition indicated that the pyrolysis process took place faster than it did for rice husks and corn cobs. Consequently, the selection of the biomass type, the initial pre-treatment, and the establishment of the appropriate operating conditions were crucial in determining the effectiveness and efficiency of the pyrolysis process for optimal bio-oil production.

References

- Abu Bakar, M. S., & Titiloy, J. O. (2013). Catalytic Pyrolysis of Rice Husk for Bio-oil Production . *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 362-368.
- Aini, N., Jamilatun, S., & Pitoyo, J. (2022). Pengaruh Tipe Biomassa pada Produk Pirolisis: A Review. *Agroindustrial Technology Journal*, 89-101.
- Bote, M. A., Naik, V. R., & Jagadeeshgouda. (2020). Review on Water Hyacinth Weed as a Potential Bio Fuel Crop to Meet Collective Energy Needs. *Materials Science for Energy Technologies*, 397-406.
- Chong, T. Y., Law, M. C., & Chan, Y. S. (2020). The Potentials of Corn Waste Lignocellulosic Fibre as an Improved Reinforced Bioplastic Composites. *Journal of Polymers and the Environment*.
- Fardhyanti, D. S., Triwibowo, B., Prasetyawan, H., Chafidz, A., Andriyani, S., & Cahyani, N. N. (2019). Improving the Quality of Bio-oil from Pyrolysis Process of Rice Husk by Extraction of its Phenolic Compounds. *JBAT*, 90-100.
- Harnowo, S., & Yuonaidi. (2021). Kinerja Boiler dengan Sistem Pembakaran Bersama antara Ampas Tebu dengan Sekam Padi dan Cangkang Kelapa Sawit. *Semesta Teknika* , 102-110.
- Hendriyana. (2020). Effect of Equivalence Ratio on the Rice Husk Gasification Performance Using Updraft Gasifier with Air Suction Mode. *JBAT*, 30-35.
- Jiang, L., Du, P., & Wang, H. (2021). Seawater modification of lignocellulosic fibers: comparison of rice husk and rice straw fibers. *Materials Research Express*.
- Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Review of Product Properties and Effects of Pyrolysis Parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1126-1140.
- Novita, S. A., Nofialdi, Andasuryani, Fudholi, A., Putera, P., & Hendra. (2022). Performance and Characteristics of Bio-oil from Pyrolysis of Rice Husk. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sciences*.
- Nugroho, P. W., Muhazir, D. F., & Asrori. (2024). The Effect of Corncob Composition and Torrefaction Temperature on the Calorific Value of Silk Tree Wood Pellets. *Engineering and Technology Journal*, 4966-4971.
- Rambhatla, N., Panicker, T. F., Mishra, R. K., Manjeshwar, S. K., & Sharma, A. (2025). Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. *Results in Engineering*.
- Ratnani, R. D., Widiyanto, & Mel, M. (2021). Pyrolysis of Water Hyacinth [*Eichhronia Crassipes* (Mart.) Solms] for Liquid Smoke Production. *E3S Web of Conferences*.
- Rhomadoni, F. R., Jamilatun, S., Idris, M., & Setyawan, M. (2024). Mekanisme dan Aplikasi Pirolisis Biomassa Dalam Produksi Biochar, Bio-Oil dan Gas Pirolisis. *Seminar Nasional Inovasi dan Teknologi (SEMNASINTEK)*, 54-68.
- Rizal, W. A., Suryani, R., Wahono, S. K., Anwar, M., Prasetyo, D. J., Amdani, R. Z., . . . Februanata, N. (2020). Pirolisis Limbah Biomassa Serbuk Gergaji Kayu Campuran: Parameter proses dan Analisis Produk Asap Cair. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 353-364.
- Santi, S. S., Pertiwi, B. C., Matovanni, M. P., Cakradetha, I. S., & Suriyanto. (2025). Study on Indonesian Corncob Particle Size in Fast Pyrolysis Bio-oil. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*.
- Sikiru, S., Abioye, K. J., Adedayo, H. B., Adebukola, S. Y., Soleimani, H., & Anar, M. (2024). Technology Projection in Biofuel Production using Agricultural Waste Materials as a Source of Energy Sustainability: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Singh, S., Patil, T., Tekade, S. P., Gawande, M. B., & Sawarkar, A. N. (2021). Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of corn cob and polyethylene: Thermal degradation behavior, possible synergism, kinetics, and thermodynamic analysis. *Science of the Total Environment*.
- Tran, T. K., Kim, N., Leu, H. J., Pham, M. P., Luong , N. A., & Vo, H. K. (2021). The production of hydrogen gas from modified water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) biomass through pyrolysis process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13976-13984.
- Weerachanchal, P., Tangsathitkulchai, C., & Tangsathitkulchai, M. (2010). Comparison of Pyrolysis Kinetic Models for Thermogravimetric Analysis of Biomass. *Suranaree J. Sci. Technol.*, 387-400.