

**Farizky Wahyudi, Wibawa Hendra Saputera, Dwiwahju Sasongko, dan Hary Devianto**  
 Studi Pengaruh Konsentrasi Katalis ZnO untuk Degradasi Limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) Menggunakan Teknologi Fotokatalitik

**Federiko Markus Lasardo Nainggolan, Tirto Prakoso, dan Meiti Pratiwi**  
 Hidrogenasi Hidrotermal Katalitik Asam Oleat dengan Produksi Hidrogen secara *in-situ* Menggunakan Katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**R.A Rizka Qori Yuliani Putri, Ery Safrianti, Salpiana, Jessica Amanda Putri, Sucahyo Grianto, dan Aji Noor Hakim**  
 Analisa Pengukuran Parameter *Quality of Service* dan *Quality of Experience* pada Layanan HbbTV

**Atika Sari dan Mokhammad Nur Cahyadi**  
 Analisis Fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) Akibat Gempa Palu dengan Formosat-3 / COSMIC

**Muhammad Rifki Fanany, Septhian Marno, Tirto Prakoso, Aqsha Aqsha, Astri Nur Istyami, Meiti Pratiwi, dan Antonius Indarto**  
 Pemodelan Proses dan Evaluasi Ekonomi Produksi *Bio-Oil* dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit

**Mina Naidah Gani, Hepi Ludyati, Rifa Hanifatunnisa, Eril Mozef, dan Rizqa Nur Ananti**  
 Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah Jarak Jauh Berbasis LoRa Menggunakan Sensor pH dan Kelembaban

**Anto Destianto, Yudi Herdiansah, dan Agus Sulaeman**  
 Perbandingan Efektifitas *Protective Coating, Silica Fume*, dan Semen Tipe II Terhadap Pengaruh Klorida dan Sulfat pada Beton

**Rinto Yusriski, Budi Astuti, dan Andri Rachmat Kumalasian Nasution**  
 Penjadwalan Dinamis Menggunakan Metode *Rolling Time Window* (RTW) pada Kasus *Flowshop* 3 Mesin untuk Meminimumkan Total Biaya *Lateness, Earliness* dan *Re-Scheduling*

**Agus Juhara, Hanafi, Rifqi Adhyaksa P, dan Novan Selamat Nugraha R**  
 Pemanfaatan Limbah *Polyethylene* pada Campuran Lapis Tipis Aspal Beton

## TIM REDAKSI

- Editor In Chief : • Dr. Martijanti, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57217586993)
- Managing Editor : • Dr. Hendriyana, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID : 57189732631)
- Advisory Editorial Board : • Dr. Fitri Hadiyah, S.T., M.T., IPM  
(Universitas Sriwijaya, Indonesia. Scopus ID : 57194602385)
- Dr. Iris Mahani, S.T., M.T.  
(Institut Teknologi Bandung, Indonesia. Scopus ID : 57197848218)
- Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Sinta ID : 133135)
- Editor : • Andri Rahmat Kumalasian Nasution, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6718339)
- 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)
- Xbal Meiprastyo, S.T., M.Eng.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6722189)
- Andini Hizbiyati, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- Ragil Handito, S.T., M.Eng.  
(Korea National University of Transportation, Korea.)
- Tiara Ariani Putri, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
-

**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](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

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 2023

- Reviewers :
- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 6506054959]
  - 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. I. N. Suprpta Winaya, S.T., M.A.Sc., Ph.D. (Universitas Udayana, Indonesia) [SCOPUS ID: 18635759300]
  - Prof. Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg. (Politeknik Negeri Bali, Indonesia) [SCOPUS ID: 55189864100]
  - Dr. Arief Nur Pratomo, S.T., M.T. (Universitas Pertahanan, Indonesia) [SCOPUS ID: 57216756313]
  - Dr. Asep Najmurrokhman, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 55919091000]
  - Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M. (Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia) [SCOPUS ID: 23975188900]
  - Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57218863103] [ORCHID ID: 0000-0003-1711-5413] [SINTA ID: 5984218]
  - Dr.Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 25638780900]
  - Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T. (Universitas Brawijaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 56688583600]
  - Dr. Eng. Dwi Hantoko., B.Sc., M.Sc (King Fahd University of Petroleum and Minerals, Arab Saudi) [SCOPUS ID: 57203536113] \*
  - Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng. (Institut Pertanian Bogor, Indonesia) [SCOPUS ID: 57195301854]
  - Dr. Eng. Ir. Nur Indrianti, M.T. (UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia) [SCOPUS ID: 15071306300]
  - Dr. Eng. Yoanda Alim Syahbana, S.T., M.Sc. (Politeknik Caltex Riau, Indonesia) [SCOPUS ID: 37075904000]
  - 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. Ir. Herman, M.T., (Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia) [SINTA ID: 6030796] \*
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T, M.T. (Univeristas 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. 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) [fSCOPUS ID: 57205031839]
- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T. (Universitas Sebelas Maret, Indonesia) [SCOPUS ID: 37114996900] \*
- Dr. Khoiruddin, S.T., M.T. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia) [SCOPUS ID: 55584284500]
- Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6098629]
- Dr. Putu Teta Prihartini Aryanti, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56951380600] [ORCHID ID: 0000-0003-0200-418X] [SINTA ID: 6001600]
- Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 56582391600]
- Dr. Sabhan Kanata, ST., M.Eng. (Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57420428900]
- Dr. Suhartono, S.T., M.Si. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57189075734]
- Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia) [SCOPUS ID: 15838524700]
- Dr.-Ing. Amalia Suzianti, S.T., M.Sc. (Universitas Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 55836286200]

- 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. (Univeristas 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]
- Jamaluddin Bangki, S.T., M.T. (Universitas Dayanu Ikhsanuddin, Indonesia) [SINTA ID: 6082832]
- Khamaludin, S.T., M.T. (Universitas Islam Syekh Yusuf, Indonesia) [SCOPUS ID: 57223191789]
- M. Reza Hidayat, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57188573208]

- Naftalin Winanti, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SCOPUS ID: 57200994613]
- Nirmawana Simarmata, S.Pd., M.Sc. (Institut Teknologi Sumatera, Indonesia) [SCOPUS ID: 57301196400] \*
- Salita Ulitia Prini, S.T., M.T. (Badan Riset dan Inovasi Nasional - BRIN, Indonesia) [SCOPUS ID: 57208581701]
- Sofyan Basuki, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia) [SINTA ID: 6686946]
- Sussi, S.Si., M.T. (Telkom University, Indonesia) [SCOPUS ID: 57215071175] \*
- Syah Alam, S.Pd., M.T. (Universitas Trisakti, Indonesia) [SCOPUS ID: 57191903622] \*
- Tommi Hariyadi S.T., M.T. (Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia) [SCOPUS ID: 53263841200]
- Wahyu Setyo Pambudi, S.T., M.T. (ITATS Surabaya, Indonesia) [SCOPUS ID: 57202921245]



## DAFTAR ISI

<b>Studi Pengaruh Konsentrasi Katalis ZnO untuk Degradasi <i>Limbah Palm Oil Mill Effluent</i> (POME) Menggunakan Teknologi Fotokatalitik</b> Farizky Wahyudi, Wibawa Hendra Saputera, Dwiwahju Sasongko, dan Hary Devianto	105-113
<b>Hidrogenasi Hidrotermal Katalitik Asam Oleat dengan Produksi Hidrogen secara <i>in-situ</i> Menggunakan Katalis NiO/<math>\gamma</math>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> Federiko Markus Lasardo Nainggolan, Tirto Prakoso, dan Meiti Pratiwi	114-121
<b>Analisa Pengukuran Parameter <i>Quality of Service</i> dan <i>Quality of Experience</i> pada Layanan HbbTV</b> R.A Rizka Qori Yuliani Putri, Ery Safrianti, Salpiana, Jesica Amanda Putri, Sucahyo Grianto, dan Aji Noor Hakim	122-133
<b>Analisis Fluktuasi <i>Total Electron Content</i> (TEC) Akibat Gempa Palu dengan Formosat-3 / COSMIC</b> Atika Sari dan Mokhamad Nur Cahyadi	134-141
<b>Pemodelan Proses dan Evaluasi Ekonomi Produksi <i>Bio-Oil</i> dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit</b> Muhammad Rifki Fanany, Septhian Marno, Tirto Prakoso, Aqsha Aqsha, Astri Nur Istyami, Meiti Pratiwi, dan Antonius Indarto	142-152
<b>Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah Jarak Jauh Berbasis LoRa Menggunakan Sensor pH dan Kelembaban</b> Mina Naidah Gani, Hepi Ludyati, Rifa Hanifatunnisa, Eril Mozef, dan Rizqa Nur Ananti	153-161
<b>Perbandingan Efektifitas <i>Protective Coating</i>, <i>Silica Fume</i>, dan Semen Tipe II Terhadap Pengaruh Klorida dan Sulfat pada Beton</b> Anto Destianto, Yudi Herdiansah, dan Agus Sulaeman	162-170
<b>Penjadwalan Dinamis Menggunakan Metode <i>Rolling Time Window</i> (RTW) pada Kasus <i>Flowshop</i> 3 Mesin untuk Meminimumkan Total Biaya <i>Lateness</i>, <i>Earliness</i> dan <i>Re-Scheduling</i></b> Rinto Yusriski, Budi Astuti, dan Andri Rachmat Kumalasian Nasution	171-178
<b>Pemanfaatan Limbah <i>Polyethylene</i> pada Campuran Lapis Tipis Aspal Beton</b> Agus Juhara, Hanafi, Rifqi Adhyaksa P, dan Novan Selamat Nugraha R	179-189



## DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 22 Nomor 2, bulan November 2023. Dalam edisi ini disajikan 9 (sepuluh) makalah berkaitan dengan bidang Ilmu Teknik, yang mencakup Teknik Kimia, Teknik Elektro, Teknik Mesin, Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, Teknik Industri, dan Teknik Geomatika yang meliputi: (1) Studi Pengaruh Konsentrasi Katalis ZnO untuk Degradasi *Limbah Palm Oil Mill Effluent* (POME) Menggunakan Teknologi Fotokatalitik, (2) Hidrogenasi Hidrotermal Katalitik Asam Oleat dengan Produksi Hidrogen secara *in-situ* Menggunakan Katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (3) Analisa Pengukuran Parameter *Quality of Service* dan *Quality of Experience* pada Layanan HbbTV, (4) Analisis Fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) Akibat Gempa Palu dengan Formosat-3 / COSMIC, (5) Pemodelan Proses dan Evaluasi Ekonomi Produksi *Bio-Oil* dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit, (6) Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah Jarak Jauh Berbasis LoRa Menggunakan Sensor pH dan Kelembaban, (7) Perbandingan Efektifitas *Protective Coating, Silica Fume*, dan Semen Tipe II Terhadap Pengaruh Klorida dan Sulfat pada Beton, (8) Penjadwalan Dinamis Menggunakan Metode *Rolling Time Window* (RTW) pada Kasus *Flowshop* 3 Mesin untuk Meminimumkan Total Biaya *Lateness, Earliness* dan *Re-Scheduling*, dan (9) Pemanfaatan Limbah *Polyethylene* pada Campuran Lapis Tipis Aspal Beton.

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 22 (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 ketidak-sempurnaan dalam Jurnal Teknik sangat kami harapkan demi kemajuan dan penyempurnaan dalam terbitan selanjutnya. Semoga pemuatan karya dalam terbitan kali ini dapat menjadi pemicu peneliti-peneliti untuk melahirkan karya-karya lain dengan ide-ide original dan bermanfaat untuk masyarakat.

Cimahi, November 2023

Dewan redaksi

## Studi Pengaruh Konsentrasi Katalis ZnO untuk Degradasi Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) Menggunakan Teknologi Fotokatalitik

Farizky Wahyudi<sup>1</sup>, Wibawa Hendra Saputera<sup>1</sup>, Dwiwahju Sasongko<sup>1</sup>, dan Hary Devianto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

[wahyudifarizky@gmail.com](mailto:wahyudifarizky@gmail.com), [whsaputera@itb.ac.id](mailto:whsaputera@itb.ac.id), [sasongko@itb.ac.id](mailto:sasongko@itb.ac.id), [hardev@itb.ac.id](mailto:hardev@itb.ac.id)

### Abstrak

Indonesia merupakan salah satu negara *center market* kelapa sawit terbesar di dunia sehingga perkembangan industri kelapa sawit dalam negeri tumbuh dengan sangat pesat. Namun, meningkatnya aktivitas perdagangan kelapa sawit berdampak terhadap meningkatnya limbah yang dihasilkan yaitu *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Mayoritas pabrik saat ini masih menggunakan *open pond* sebagai teknologi pengolahan POME, namun penggunaan teknologi ini dinilai belum efektif untuk pengolahan POME. Fotokatalitik merupakan teknologi berbasis energi sinar (UV, tampak, sinar matahari) untuk menghasilkan senyawa radikal yang dimanfaatkan sebagai agen pengoksidasi limbah POME. Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah ZnO. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD dan UV-vis DRS, struktur kristal dari ZnO adalah *hexagonal wurtzite* dengan energi celah pita sebesar 3,22 eV. Berdasarkan hasil uji aktivitas degradasi fotokatalitik limbah POME, diperoleh bahwa penggunaan katalis ZnO dengan konsentrasi 0,5 g/L dinilai cukup efisien untuk mendegradasi kandungan organik pada limbah POME dengan persentase reduksi *chemical oxygen demand* (COD) mencapai 22,85%, warna 48,53% dengan konstanta laju reaksi COD (*k*) adalah  $2,6 \times 10^{-3}$  menit<sup>-1</sup>.

Kata kunci: POME, fotokatalitik, COD, radikal, ZnO

### Abstract

Indonesia is among the world's largest palm oil market countries leading to significant growth in the domestic palm oil industry. However, the increase in palm oil trading has also led to a rise in the production of waste known as Palm Oil Mill Effluent (POME). Currently, the majority of factories use open ponds for POME processing, but this method is considered ineffective for treating POME. To address this issue, researchers are exploring photocatalytic technology, which utilizes light energy (UV, visible, sunlight) to produce radical compounds that act as oxidizing agents for POME degradation. In this study, ZnO was employed as a catalyst. The XRD and UV-vis DRS characterizations confirmed that ZnO had a hexagonal wurtzite crystal structure with a band gap energy of 3,22 eV. The photocatalytic activity test results revealed that using 0.5 g/L ZnO catalyst proved to be efficient in degrading organic content in POME. The percentage of chemical oxygen demand (COD) degradation reached 22.85%, color degradation reached 48.53% and the reaction rate kinetics constant of COD degradation was at  $2.6 \times 10^{-3}$  min<sup>-1</sup>.

Keywords: POME, photocatalytic, COD, radical, ZnO

### 1. Pendahuluan

Permasalahan mengenai lingkungan merupakan isu serius yang saat ini dihadapi oleh seluruh kalangan terutama dari sektor perindustrian. Pihak industri dituntut agar limbah yang dihasilkan sesuai dengan standar pembuangan yang telah ditetapkan oleh Pemerintah supaya tidak mencemari lingkungan. Salah satu limbah yang sukar diolah adalah limbah yang berasal dari pabrik kelapa sawit yaitu *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Limbah ini sangat berpotensi mencemari lingkungan karena kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) yang tinggi.

Secara umum, POME di Indonesia memiliki nilai COD sekitar 15.000 hingga 100.000 mg/L dan BOD 10.250 hingga 100.000 mg/L (Rajani dkk., 2019). Berdasarkan nilai tersebut, POME yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit tidak dapat dibuang langsung ke lingkungan melainkan harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu yang bertujuan untuk menurunkan nilai COD dan BOD. Pemerintah Indonesia telah menetapkan standar pembuangan limbah untuk industri kelapa sawit dalam PermenLH No. 5 tahun 2014 yang menyatakan bahwa kadar COD dan BOD maksimal yang boleh dibuang ke lingkungan adalah 350 mg/L dan 100 mg/L.

Indonesia sebagai negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia mengalami masalah mendesak dalam pengolahan POME. Mayoritas pabrik kelapa sawit saat ini masih menggunakan sistem konvensional, seperti kolam terbuka (*open pond*) sebagai basis dalam pengolahan POME. Penelitian yang dilakukan oleh Badrun dkk., (2019), menunjukkan bahwa dalam waktu 14 bulan, sekitar 3.380 kg COD bocor ke sungai akibat pengolahan POME yang belum memadai. Oleh karena itu, diperlukan teknologi alternatif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah pengolahan POME, salah satunya adalah teknologi fotokatalitik (Saputera, Amri, Daiyan, dkk., 2021).

#### Info Makalah:

Dikirim : 07-18-23;

Revisi 1 : 08-26-23;

Revisi 2 : 08-30-23;

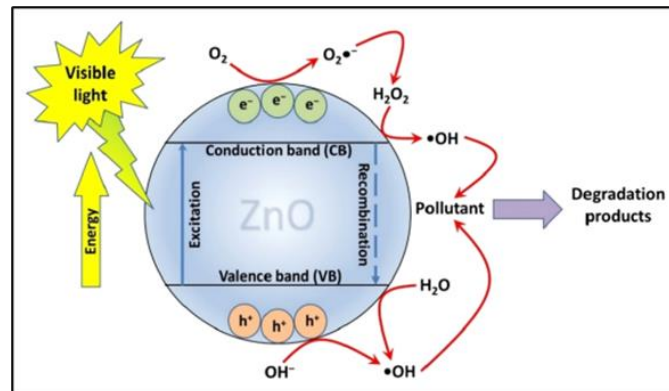
Diterima : 09-06-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [whsaputera@itb.ac.id](mailto:whsaputera@itb.ac.id)

Teknologi fotokatalitik merupakan suatu teknologi berbasis energi terbarukan dengan memanfaatkan cahaya/sinar sebagai sumber energi untuk mendegradasi limbah organik melalui reaksi reduksi-oksidasi. Mekanisme teknologi fotokatalitik ditunjukkan dalam Gambar 1. Pada awalnya, material semikonduktor menyerap cahaya, menyebabkan perpindahan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Sebagai akibat dari perpindahan elektron ini, molekul oksigen bereaksi dengan elektron di pita konduksi (mengalami reduksi) membentuk senyawa radikal superoksida ( $\bullet\text{O}_2^-$ ), sedangkan air akan bereaksi dengan muatan positif (*holes*) di pita valensi (mengalami oksidasi) membentuk radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ). Senyawa radikal yang dihasilkan ini yang berperan dalam mendegradasi senyawa organik pada POME sehingga dapat menurunkan kadar COD dan kekeruhan. Namun, teknologi ini memiliki keterbatasan yaitu laju rekombinasi elektron-*holes* yang cepat, dimana elektron yang telah berpindah ke pita konduksi dapat kembali ke pita valensi, menghambat proses redoks berjalan dengan efektif.



Gambar 1. Mekanisme Proses Fotokatalitik dalam Mendegradasi Limbah Organik (Abdullah dkk., 2017).

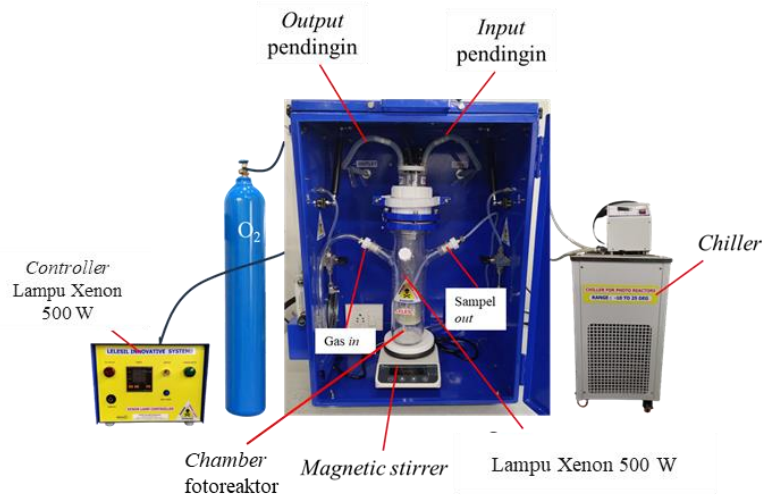
Semikonduktor merupakan material yang memiliki sifat diantara konduktor dan insulator. Kelebihan material semikonduktor memiliki energi celah pita  $< 1 - 6$  eV, sehingga memungkinkan proses fotoeksitasi elektron berlangsung dan mencegah terjadinya rekombinasi elektron (Ameta dkk., 2018). Semikonduktor ZnO merupakan semikonduktor yang baik digunakan untuk proses fotokatalitik karena tingginya energi celah pita yaitu 3,2 eV (Karthikeyan dkk., 2020), sehingga pada penelitian ini akan dipelajari lebih lanjut terhadap pemakaian semikonduktor ZnO untuk mendegradasi kandungan COD dan kekeruhan pada limbah POME.

## 2. Metode

Penelitian yang dilakukan terdiri dari dua variabel yaitu bebas dan terikat. Adapun variabel terikat terdiri dari jenis katalis ZnO yang diperoleh secara komersial dan laju alir oksigen 70 mL/menit, sedangkan variabel bebas adalah konsentrasi umpan katalis yaitu 0,25 g/L dan 0,5 g/L dari volume POME. Berikut akan dipaparkan lebih rinci mengenai teknis serta tahapan dalam studi ini.

### 2.1. Bahan dan Peralatan Utama

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah ZnO (Merck,  $\geq 99$  %) yang diperoleh secara komersial dan aquades. Peralatan utama dalam penelitian ini adalah perlengkapan fotoreaktor. Perlengkapan fotoreaktor terdiri dari beberapa alat seperti *chiller*, lampu Xenon 500 W beserta *controller* (Lelesil Innovation System, India) dan *chamber* fotoreaktor seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, mula-mula katalis ZnO ditimbang sesuai dengan variasi konsentrasi kemudian dilarutkan ke dalam 350 mL POME yang sudah diencerkan sebanyak 40 kali dan dilanjutkan ultrasonikasi (Hwashin Ultrasonic, Power Sonic 410) selama 60 menit. Larutan yang telah disonikasi selanjutnya dilakukan penjenjuran gas oksigen ( $\geq 95\%$ , CV Sangkuriang) 70 mL/menit selama 30 menit agar mencapai kondisi setimbang. Setelah setimbang, *chiller* dan lampu xenon 500 W dinyalakan selama 100 menit dan dilakukan pengambilan sampel setiap 20 menit. Tahapan terakhir sampel yang telah diambil dilakukan analisis COD dan warna mengikuti prosedur SNI 6989:2019 dan SNI 6989.80:2011.



Gambar 2. Perlengkapan Alat Fotoreaktor.

## 2.2. Karakterisasi Katalis dan Analisis COD serta Warna pada POME

Karakterisasi katalis berperan untuk mempelajari struktur penyusun suatu material yang meliputi komponen morfologi serta analisis fisik-kimia pada suatu material. Pada Studi ini, karakterisasi katalis yang dilakukan adalah *X-ray diffraction* (XRD, Bruker D8 Advance, USA) untuk menentukan struktur kristal material dan *UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy* (UV-VIS DRS, Thermo Scientific Evolution 200, USA) untuk menentukan energi celah pita (*bandgap energy*) pada katalis.

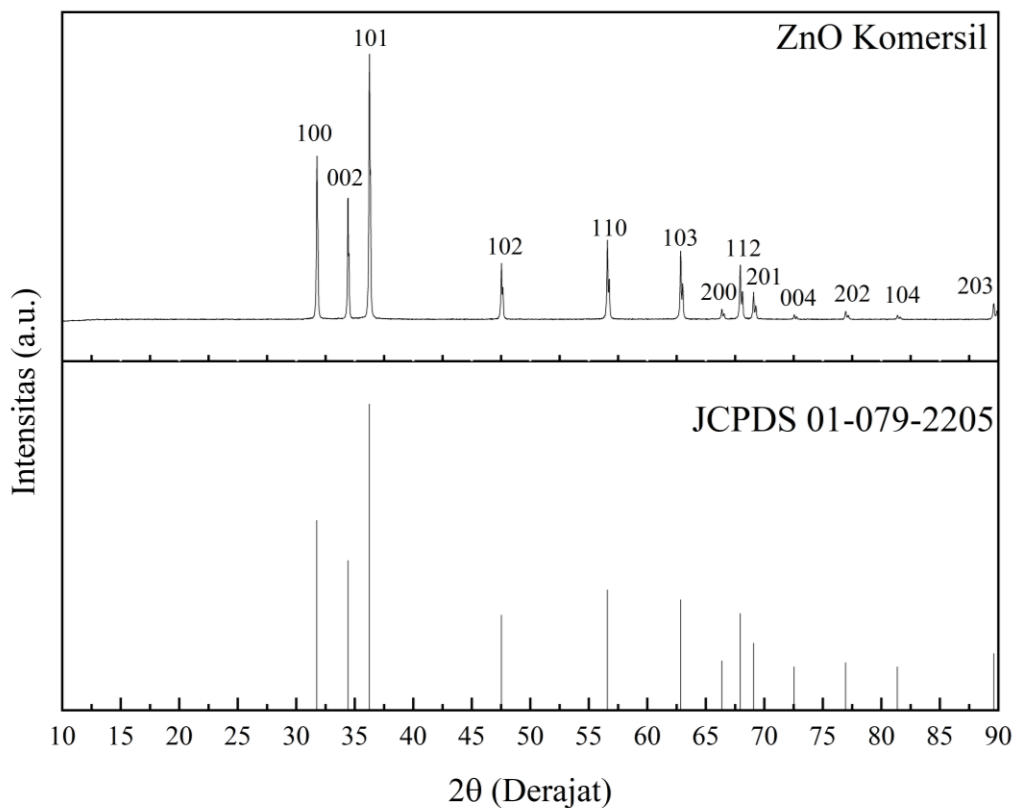
Pembacaan konsentrasi COD dilakukan dengan mengikuti SNI 6989.73 : 2019 Air dan Air Limbah – Bagian 2. Pengambilan POME dalam sistem fotoreaktor setiap 20 menit menggunakan *disposable syringe* 10 mL yang dipasang pada *syringe filter* (ukuran 0,22  $\mu\text{m}$ ). Setelah POME diambil dan filtrasi, sebanyak 2,5 mL POME diinjeksikan ke dalam *test tube* beserta pelarutnya dan dipanaskan pada suhu 150 °C selama 2 jam dengan peralatan *Hach DRB-200* COD. Sampel didiamkan hingga suhu ruangan sebelum dianalisis absorbansinya menggunakan *double beam* spektrofotometri (Shimadzu 1800, Jepang) pada panjang gelombang 550 – 650 nm. Prosedur pengujian warna pada POME menggunakan metode yang diterbitkan oleh pemerintah melalui SNI 6989.80:2011 Air dan Air Limbah - Bagian 80 : Cara uji warna secara spektrofotometri. Penentuan kurva kalibrasi dilakukan dengan mengencerkan larutan induk 500 PtCo pada berbagai varian konsentrasi yang selanjutnya dilakukan penentuan absorbansi POME yang telah difiltrasi pada panjang gelombang 400 nm.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Karakterisasi Katalis

#### a. Karakterisasi XRD

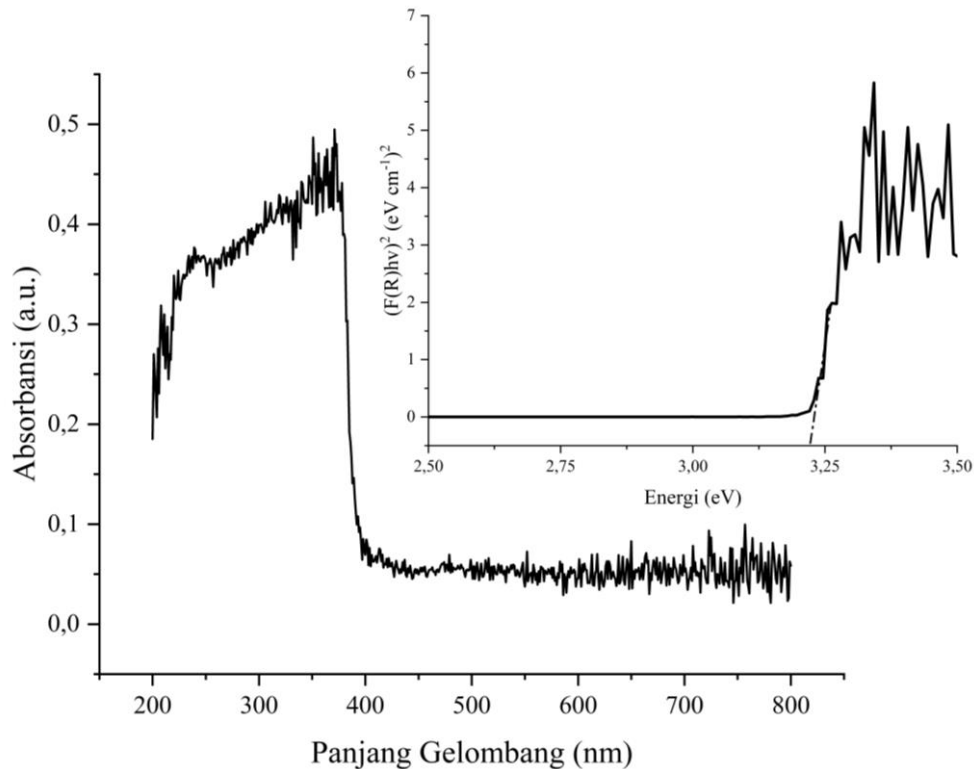
Karakterisasi XRD bertujuan untuk menentukan struktur kristal dan senyawa penyusun dari sebuah katalis. Hasil karakterisasi XRD ZnO komersial ditunjukkan pada Gambar 3 kemudian dicocokkan dengan *database JCPDS International Center of Diffraction Data* menggunakan *software X'pert Highscore*. Berdasarkan kecocokan tersebut diperoleh bahwa jenis struktur kristal yang diperoleh adalah *Hexagonal Wurtzite P63MC* dengan puncak terletak pada 2 $\theta$  31,76°, 34,41°, 36,25°, 47,53°, 56,59°, 62,85°, 66,37°, 67,94°, 69,08°, 72,56°, 76,95°, 81,37° dan 89,6°. Adapun persentase kristalin yang diperoleh berdasarkan analisis tersebut adalah 83,5% dan 16,5% bersifat amorf yang mengindikasikan struktur kristal yang terbentuk lebih teratur dan terulang secara konsisten.



Gambar 3. Difraktogram Katalis ZnO Komersil yang Dibandingkan dengan Standar JCPDS.

#### b. Karakterisasi Spektrofotometri UV-VIS DRS

Karakterisasi spektrofotometri bertujuan untuk menentukan energi celah ( $E_g$ ) pita pada katalis. Energi celah pita merupakan energi yang dimiliki oleh katalis untuk melakukan proses fotoeksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Jika suatu katalis memiliki energi celah pita yang tinggi, maka energi yang dibutuhkan oleh foton harus lebih tinggi agar proses fotoeksitasi dapat terjadi ( $E > E_g$ ). Namun, rendahnya energi celah pita berpotensi untuk terjadinya rekombinasi elektron sehingga proses redoks diantara kedua pita tidak dapat terjadi. Penentuan energi celah dihitung dengan persamaan Kubelka-Munk kemudian diplot dengan metode Tauc Plot dan ditarik garis linear hingga memotong sumbu energi (sumbu x) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.



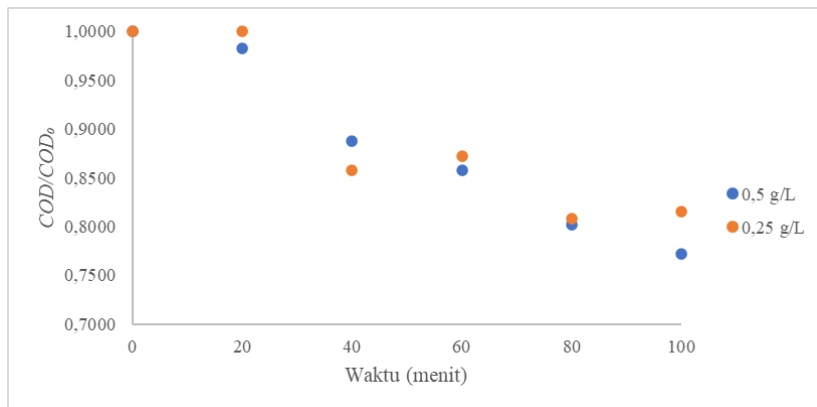
Gambar 4. Touc Plot pada Katalis ZnO Komersial.

Gambar 4 menunjukkan bahwa aktivitas penyerapan katalis lebih intens terjadi pada penyinaran penggunaan panjang gelombang sinar UV (200 – 400 nm) dibandingkan penyinaran panjang gelombang sinar tampak. Berdasarkan Gambar 3, ZnO komersial memiliki energi celah pita 3,22 eV. Semakin tinggi nilai energi celah pita suatu material maka semakin besar pula energi foton yang harus disediakan. Selain itu, material dengan energi celah pita yang rendah memiliki kemampuan penyerapan foton lebih baik sehingga laju fotoeksitasi elektron lebih cepat. Türkyılmaz dkk., (2017) telah mengkaji salah satu strategi untuk menurunkan energi celah pita pada katalis ZnO dengan metode *doping* dengan logam. Energi celah pita pada katalis ZnO murni adalah 3,24 eV sedangkan energi celah pita setelah di *doping* dengan beberapa logam seperti Ag, Ni, Fe dan Mn adalah 3,15, 3,10, 3,05 dan 3,00 eV. Fenomena penurunan energi celah pita akibat *doping* logam karena terjadi pergeseran energi celah pita menjadi lebih rendah. Selain itu, keberadaan logam juga berperan sebagai penangkap elektron (*electron scavenger*) pada pita konduksi sehingga kinerja fotokatalis menjadi lebih efisien dengan mengurangi laju rekombinasi elektron-*holes*.

### 3.2. Uji Aktivitas Katalis

#### a. Penurunan Parameter COD pada Limbah POME

COD merupakan parameter yang menunjukkan kebutuhan oksigen terlarut untuk mengoksidasi zat organik dalam air limbah secara kimiawi. Parameter COD sering digunakan untuk menentukan kualitas akuatik, sehingga nilai COD yang besar menunjukkan semakin tinggi zat organik dalam suatu lingkungan. Proses degradasi zat organik dengan menggunakan fotokatalis ZnO komersial telah dilakukan dengan konsentrasi umpan katalis sebesar 0,25 dan 0,5 g/L selama 100 menit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Adapun notasi  $C/C_0$  merupakan perbandingan nilai COD pada waktu  $t$  menit dan COD pada waktu awal (0 menit).

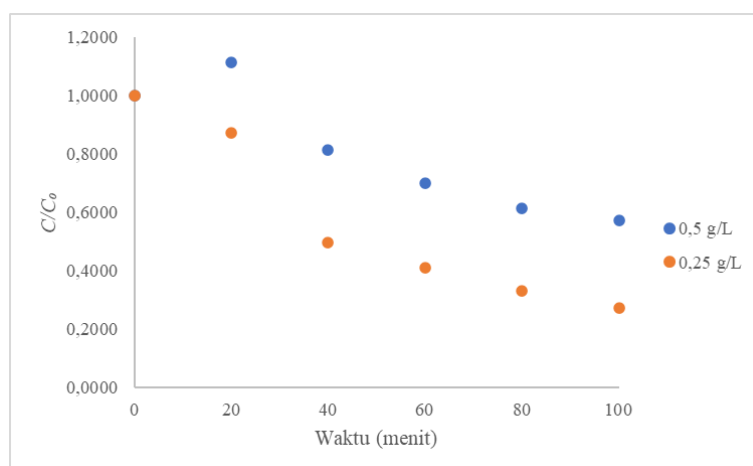


Gambar 5. Pengaruh Konsentrasi Katalis terhadap Penurunan Parameter COD pada Limbah POME.

Gambar 5 menunjukkan bahwa perbandingan nilai COD semakin menurun seiring dengan semakin lamanya waktu operasi. Hal ini menunjukkan bahwa adanya katalis ZnO cukup berperan untuk mendegradasi kandungan organik pada POME. Selain itu, jika ditinjau dari pengaruh konsentrasi umpan katalis yang ditambahkan, performa dengan konsentrasi katalis 0,5 g/L menunjukkan penurunan yang lebih signifikan dibandingkan dengan 0,25 g/L yang lebih fluktuatif. Fenomena ini dapat disebabkan oleh pengaruh konsentrasi umpan katalis yang berdampak terhadap laju degradasi zat organik. Selain itu terdapat penurunan COD yang cukup signifikan pada menit ke 40 dibandingkan dengan menit yang lain, hal ini mengindikasikan bahwa waktu aktifnya katalis ZnO bekerja berada pada rentang 20-40 menit waktu operasi. Secara umum, proses degradasi fotokatalitik bergantung dengan tingkat produksi senyawa radikal. Oleh karena itu, korelasi terhadap semakin banyak katalis yang diumpankan maka semakin banyak pula pembentukan senyawa radikal yang terjadi (Ng & Cheng, 2016). Adapun persentase akhir nilai COD yang diperoleh pada konsentrasi katalis 0,5 g/L adalah 22,85% dan 0,25 g/L adalah 18,44%. Penelitian lain terkait degradasi POME dengan katalis ZnO secara fotokatalitik juga dilakukan Ng dkk., (2017), dalam penelitiannya diperoleh persentase COD terhadap degradasi POME mencapai 51,83% dengan konsentrasi katalis 1 g/L, kemudian penelitian serupa juga dilakukan oleh Lam dkk., (2018) dengan katalis ZnO memperoleh persentase akhir penurunan COD adalah 96% selama 240 menit. Jika dibandingkan dengan penelitian Lam dkk., (2018) hasil pada penelitian ini masih memperoleh angka degradasi yang cukup kecil, hal ini dapat disebabkan adanya perbedaan kondisi operasi yang digunakan seperti jenis katalis ZnO, konsentrasi katalis, dan waktu reaksi. Oleh karena itu, untuk memperoleh hasil degradasi POME yang optimal perlu dilakukan optimasi kondisi operasi proses yang tepat.

#### b. Penurunan Parameter Warna pada Limbah POME

Karakteristik POME secara visual berwarna coklat, kental dan berbau tajam. Gambar 6 menunjukkan pengaruh konsentrasi umpan katalis terhadap penurunan zat warna pada POME.



Gambar 6. Pengaruh Konsentrasi Katalis terhadap Penurunan Parameter Warna pada Limbah POME.

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa katalis dengan konsentrasi 0,25 g/L memberikan efisiensi penurunan warna POME lebih baik dari pada 0,5 g/L. dengan efisiensi penurunan kandungan zat warna yang dihasilkan secara berturut-turut adalah 73,5% dan 48,35%. Seperti yang diketahui bahwa konsentrasi katalis korelasi terhadap pembentukan senyawa radikal. Namun, semakin banyak katalis yang ditambahkan juga berdampak terhadap meningkatnya



kekeruhan warna analit yang diperoleh, kekeruhan ini dapat disebabkan oleh sifat atau pengotor katalis sendiri yang terkandung dalam katalis ZnO (León dkk., 2017). Selain itu, adanya pencahayaan dari lampu yang diberikan juga turut memfasilitasi proses *leaching* pengotor katalis ke dalam analit. Adanya proses *leaching* tentunya tidak diinginkan selama proses katalisis berlangsung karena dapat melarutkan komponen aktif katalis ke dalam medium reaksi sehingga laju degradasi kekeruhan semakin lambat. Asumsi lain penyebab terjadinya perubahan warna pada POME adalah akibat adanya penyerapan sinar oleh senyawa organik. Beberapa senyawa organik pada POME memiliki penyerapan sinar pada spektrum panjang gelombang tertentu, terutama senyawa yang berperan sebagai kromofor. Kromofor merupakan molekul penyusun senyawa organik yang memiliki sifat penyerapan sinar yang kuat, sehingga adanya senyawa kromofor dapat memfasilitasi terjadinya proses fotolisis dan mengakibatkan terjadinya perubahan struktur molekul pada POME menjadi lebih jernih (Hodzic dkk., 2015). Meskipun demikian, proses degradasi warna pada POME tidak mudah untuk dilakukan terdapat beberapa penyusun senyawa kompleks yang berperan untuk memberikan warna pada POME yang sulit untuk didegradasi oleh senyawa radikal karena memiliki energi ikatan yang kuat. Salah satu senyawa kompleks penyumbang warna pada POME adalah senyawa fenol (10 – 100 mg/L), Morales-Flores dkk., (2011) melakukan penelitian terkait degradasi fenol secara fotokatalitik menggunakan semikonduktor ZnO, berdasarkan penelitian tersebut diperoleh bahwa untuk mendegradasi 15 ppm POME diperlukan waktu 540 menit.

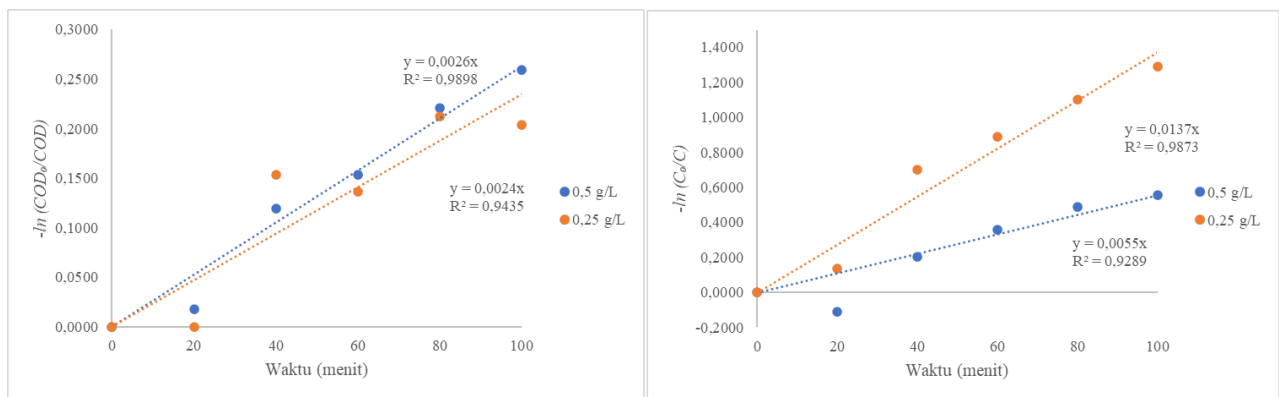
### c. Kinetika Reaksi

Berdasarkan data degradasi kandungan organik (COD) dan warna yang telah diperoleh selanjutnya dapat ditentukan kinetika reaksi penurunannya. Secara umum terdapat tiga pendekatan untuk menentukan kinetika reaksi, diantaranya Langmuir-Hinshelwood (L-H), Eley-Rideal (ER) dan Mars Van Krevelen (MVK). Pada penelitian ini pendekatan perhitungan kinetika reaksi menggunakan L-H, hal ini dilandasi terhadap asumsi reaksi terjadi di permukaan katalis serta adanya proses adsorpsi dan desorpsi terhadap dua reaktan. Selain itu, asumsi kondisi reaksi berupa kuasi *first order reaction* juga turut dipertimbangkan atas dasar salah satu reaktan (oksigen) dianggap dalam keadaan jenuh sehingga hanya dianalisis perubahan konsentrasi senyawa organik yang direpresentasikan melalui analisis perubahan warna dan COD. Berdasarkan asumsi tersebut, penentuan kinetika dapat diekspresikan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1 dan 2.

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

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

Keterangan  $C_0$  adalah konsentrasi mula-mula (0 menit) dan  $C$  adalah konsentrasi saat waktu  $t$  (menit) serta  $k$  merupakan konstanta laju reaksi nyata ( $\text{menit}^{-1}$ ). Untuk menentukan konstanta laju reaksi ( $k$ ) dilakukan plot linear antara  $-\ln(C_0/C)$  vs waktu ( $t$ ) sehingga  $k$  merupakan *slope* dari kelinearan plot seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva Kinetika Reaksi *Pseudo-First-Order* untuk Parameter (a) COD dan (b) Warna pada Limbah POME.

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis plot  $\ln C_0/C$  vs  $t$  terhadap perbandingan konsentrasi katalis ZnO 0,5 dan 0,25 g/L. Diperoleh bahwa laju degradasi POME terhadap parameter COD dengan konsentrasi 0,5 g/L lebih tinggi dibandingkan dengan 0,25 g/L dengan masing-masing nilai  $2,6 \times 10^{-3}$  dan  $2,4 \times 10^{-3}$   $\text{menit}^{-1}$ . Kinetika degradasi parameter warna tertinggi diperoleh pada konsentrasi katalis 0,25 g/L dibandingkan dengan konsentrasi 0,5 g/L. Perbedaan kinetika reaksi yang diperoleh selaras dengan persentase degradasi katalis dimana laju degradasi POME

parameter COD tertinggi diperoleh pada konsentrasi katalis 0,5 g/L sedangkan laju degradasi parameter warna pada 0,25 g/L. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut ditunjukkan **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.** perbandingan hasil penelitian

degradasi POME dengan parameter COD, warna dan konstanta kinetika reaksi dengan penelitian sebelumnya. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, percobaan degradasi POME menggunakan ZnO komersial memperoleh persentase yang masih rendah, namun konstanta kinetika laju reaksi yang diperoleh masih cukup tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa performa katalis sangat bergantung terhadap jenis katalis yang digunakan, selain itu perlakuan modifikasi katalis juga turut mempengaruhi performa kinerja katalis.

Katalis	Konsentrasi Katalis (g/L)	Energi Celah Pita (eV)	Sumber Sinar	Waktu Kontak (menit)	Penurunan COD (%)	Penurunan Warna (%)	Konstanta kinetika laju reaksi (menit <sup>-1</sup> )	Referensi
ZnO Komersil	0,5	3,22	Xenon 500 Watt	100	22,85	48,35	$2,6 \times 10^{-3}$	Penelitian ini
BiVO <sub>4</sub>	1	2,50	Xenon 300 Watt	240	24	-	$1,04 \times 10^{-3}$	(Saputera, Amri, Mukti, dkk., 2021)
CaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,75	1,52	Xenon 500 Watt	480	69,05	-	$2,71 \times 10^{-3}$	(Charles dkk., 2019)
TiO <sub>2</sub> Komersil	1	3,15	UV 100 Watt	1200	78	-	$2,9 \times 10^{-3}$	(Ng & Cheng, 2015)
WO <sub>3</sub>	0,5	3,59	UV	960	84,7	98,28	$3,2 \times 10^{-3}$	(Y. W. Cheng dkk., 2017)
TiO <sub>2</sub> /Ag	1	2,50	UV 100 Watt	480	85	-	$3,58 \times 10^{-3}$	(C. K. Cheng dkk., 2016)
TiO <sub>2</sub> /Cu	0,83	-	UV 1000 Watt	420	> 40	-	$2,60 \times 10^{-5}$	(Ng dkk., 2014)
TiO <sub>2</sub> /Pt	1	3,15	UV 100 Watt	480	90	-	$1,34 \times 10^{-3}$	(C. K. Cheng dkk., 2015)

Tabel 1. Perbandingan Hasil Penelitian dalam Studi Terkait.

## Kesimpulan

ZnO merupakan semikonduktor yang efektif untuk mendegradasi senyawa organik pada POME, serta adanya pengaruh konsentrasi penambahan ZnO pada katalis turut memberikan pengaruh terhadap efisiensi proses. Dari hasil karakterisasi katalis diperoleh struktur kristal ZnO merupakan *hexagonal wurtzite* dengan energi celah pita adalah 3,22 eV. Hasil uji aktivitas menunjukkan bahwa efisiensi degradasi POME terhadap parameter COD lebih baik pada konsentrasi katalis 0,5 g/L dengan persentase degradasi sebesar 22,85% yang disebabkan sisi aktif katalis lebih banyak dibandingkan konsentrasi katalis 0,25 g/L. Namun, semakin banyak katalis yang ditambahkan memberikan efek keruh terhadap analit (POME) sehingga degradasi warna pada POME lebih efektif pada konsentrasi katalis 0,25 g/L dengan persentase degradasi adalah 73,5%.

## Daftar Notasi

- $C$  = Konsentrasi warna [mg/L]  
 $C_0$  = Konsentrasi warna pada  $t = 0$  [mg/L]  
 $COD$  = COD POME [mg/L]  
 $COD_0$  = COD POME pada  $t = 0$  [mg/L]

## Daftar Pustaka

- Abdullah, H., Khan, M. M. R., Ong, H. R., & Yaakob, Z. (2017). Modified TiO<sub>2</sub> photocatalyst for CO<sub>2</sub> photocatalytic reduction: An overview. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 22(March), 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.08.004>
- Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. (2018). Photocatalysis. Dalam *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology* (hlm. 135–175). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>
- Badrun, Y., Retnawati, S. F., Fauzi, M. R., Harahap, I., & Anggraini, D. A. (2019). Analisis pencemaran sungai Rokan akibat kegiatan pabrik kelapa sawit. 2018, 24–36.
- Charles, A., & Cheng, C. K. (2019). Photocatalytic treatment of palm oil mill effluent by visible light-active calcium ferrite: Effects of catalyst preparation technique. *Journal of Environmental Management*, 234, 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.024>

- Charles, A., Khan, M. R., Ng, K. H., Wu, T. Y., Lim, J. W., Wongsakulphasatch, S., Witoon, T., & Cheng, C. K. (2019). Facile synthesis of  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  for visible light driven treatment of polluting palm oil mill effluent: Photokinetic and scavenging study. *Science of the Total Environment*, 661, 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.195>
- Cheng, C. K., Deraman, M. R., Ng, K. H., & Khan, M. R. (2016). Preparation of titania doped argentine photocatalyst and its photoactivity towards palm oil mill effluent degradation. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1128–1135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.104>
- Cheng, C. K., Rizauddin Derahman, M., & Khan, M. R. (2015). Evaluation of the photocatalytic degradation of pre-treated palm oil mill effluent (POME) over Pt-loaded titania. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.10.016>
- Cheng, Y. W., Chang, Y. S., Ng, K. H., Wu, T. Y., & Cheng, C. K. (2017). Photocatalytic restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using tungsten oxides catalyst. *Journal of Cleaner Production*, 162, 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.023>
- Hodzic, A., Madronich, S., Kasibhatla, P. S., Tyndall, G., Aumont, B., Jimenez, J. L., Lee-Taylor, J., & Orlando, J. (2015). Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols: effect on secondary organic aerosol formation and lifetime Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 15, 8113–8149. <https://doi.org/10.5194/acpd-15-8113-2015>
- Karthikeyan, C., Arunachalam, P., Ramachandran, K., Al-Mayouf, A. M., & Karuppuchamy, S. (2020). Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications. Dalam *Journal of Alloys and Compounds* (Vol. 828). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154281>
- Lam, S. M., Wong, K. A., & Sin, J. C. (2018). Fabrication of Flower-like ZnO Micro/Nanostructures for Photodegradation of Pre-treated Palm Oil Mill Effluent. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 112(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/112/1/012003>
- León, D. E., Zúñiga-Benítez, H., Peñuela, G. A., & Mansilla, H. D. (2017). Photocatalytic Removal of the Antibiotic Cefotaxime on  $\text{TiO}_2$  and ZnO Suspensions Under Simulated Sunlight Radiation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3557-4>
- Morales-Flores, N., Pal, U., & Sánchez Mora, E. (2011). Photocatalytic behavior of ZnO and Pt-incorporated ZnO nanoparticles in phenol degradation. *Applied Catalysis A: General*, 394(1–2), 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.01.011>
- Ng, K. H., & Cheng, C. K. (2015). A novel photomineralization of POME over UV-responsive  $\text{TiO}_2$  photocatalyst: kinetics of POME degradation and gaseous product formations. *RSC Advances*, 5(65), 53100–53110. <https://doi.org/10.1039/c5ra06922j>
- Ng, K. H., & Cheng, C. K. (2016). Photo-polishing of POME into  $\text{CH}_4$ -lean biogas over the UV-responsive ZnO photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*, 300, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.105>
- Ng, K. H., Deraman, M. R., Ang, C. H., Chong, S. K., Kong, Z. Y., Khan, M. R., & Cheng, C. K. (2014). Phototreatment of palm oil mill effluent (POME) over  $\text{Cu/TiO}_2$  photocatalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 9(2), 121–127. <https://doi.org/10.9767/bcrec.9.2.6011.121-127>
- Ng, K. H., Khan, M. R., Ng, Y. H., Hossain, S. S., & Cheng, C. K. (2017). Restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using UV/ $\text{TiO}_2$  and UV/ZnO photocatalytic systems: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 196, 674–680. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.078>
- Rajani, A., Kusnadi, Santosa, A., Saepudin, A., Gobikrishnan, S., & Andriani, D. (2019). Review on biogas from palm oil mill effluent (POME): Challenges and opportunities in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 293(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/293/1/012004>
- Saputera, W. H., Amri, A. F., Daiyan, R., & Sasongko, D. (2021). Photocatalytic technology for palm oil mill effluent (POME) wastewater treatment: Current progress and future perspective. *Materials* (Vol. 14, Nomor 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14112846>
- Saputera, W. H., Amri, A. F., Mukti, R. R., Suendo, V., Devianto, H., & Sasongko, D. (2021). Photocatalytic degradation of palm oil mill effluent (Pome) waste using  $\text{BiVO}_4$  based catalysts. *Molecules*, 26(20). <https://doi.org/10.3390/molecules26206225>
- Türkyılmaz, Ş. Ş., Güy, N., & Özacar, M. (2017). Photocatalytic efficiencies of Ni, Mn, Fe and Ag doped ZnO nanostructures synthesized by hydrothermal method: The synergistic/antagonistic effect between ZnO and metals. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 341, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.03.027>

## Hidrogenasi Hidrotermal Katalitik Asam Oleat dengan Produksi Hidrogen secara *in-situ* Menggunakan Katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Federiko Markus Lasardo Nainggolan<sup>1</sup>, Tirta Prakoso<sup>1</sup>, dan Meiti Pratiwi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

[federico.nainggolan@gmail.com](mailto:federico.nainggolan@gmail.com), [tirta.prakoso@itb.ac.id](mailto:tirta.prakoso@itb.ac.id), [meiti@cheitb.id](mailto:meiti@cheitb.id)

### Abstrak

Reaksi hidrogenasi adalah salah satu reaksi yang sangat penting bagi industri oleokimia untuk mengubah asam lemak tak jenuh menjadi asam lemak jenuh dan turunannya. Kebutuhan hidrogen dalam jumlah besar pada reaksi hidrogenasi akan menjadi suatu masalah dalam hal ketersediaan hidrogen dan keekonomisannya. Teknologi hidrotermal katalitik menawarkan beberapa keuntungan diantaranya dapat memproduksi hidrogen secara *in-situ*. Fokus penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan muatan logam pada katalis, pengaruh penambahan timah pada katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan pengaruh penambahan gliserol sebagai sumber produksi H<sub>2</sub> secara *in-situ* terhadap konversi hidrogenasi asam oleat. Katalis dibuat dengan metode impregnasi kering. Karakterisasi XRD, XRF dan BET pada katalis mengkonfirmasi keberadaan logam Ni dan Sn pada katalis. Konversi Hidrogenasi pada reaksi tanpa gliserol menggunakan katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada 300°C selama 6 jam tidak menunjukkan perubahan yang signifikan dengan penambahan muatan logam. Namun, penambahan logam Sn meningkatkan selektivitas produksi H<sub>2</sub> *in-situ* yang digunakan untuk menghidrogenasi asam oleat dengan konversi hidrogenasi sebesar 36%. Penambahan gliserol pada reaktan juga meningkatkan konversi hidrogenasi dibandingkan dengan reaksi tanpa gliserol.

Kata kunci: asam oleat, hidrogenasi, hidrotermal, produksi H<sub>2</sub> *in-situ*, penambahan logam Sn

### Abstract

Hydrogenation reaction is one of the most important reactions for the oleochemical industry to convert unsaturated fatty acids into saturated fatty acids and their derivatives. The need for large amounts of hydrogen in hydrogenation reactions will be a problem in terms of hydrogen availability and economy. Catalytic hydrothermal technology offers several advantages including the ability to produce hydrogen *in-situ*. The focus of this research is to evaluate the effect of metal charge addition on the catalyst, the effect of tin addition on NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst and the effect of glycerol addition as a source of H<sub>2</sub> production *in-situ* on the hydrogenation conversion of oleic acid. The catalyst was prepared by dry impregnation method. XRD, XRF and BET characterization of the catalysts confirmed the presence of Ni and Sn metals on the catalysts. Hydrogenation conversion in the reaction without glycerol using NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst at 300°C for 6 hours did not show significant changes with the addition of metal loading. However, the addition of Sn metal increased the selectivity of *in-situ* H<sub>2</sub> production used to hydrogenate oleic acid with a hydrogenation conversion of 36%. The addition of glycerol to the reactants also increased the hydrogenation conversion compared to the reaction without glycerol.

Keywords: oleic acid, hydrogenation, hydrothermal, *in-situ* H<sub>2</sub> production, addition of Sn metal

### 1. Pendahuluan

Pengembangan metode untuk mengubah minyak nabati dan lemak hewani menjadi barang yang berguna telah menarik perhatian industri dalam beberapa tahun terakhir. Hidrolisis, hidrogenasi, transesterifikasi, dan interesterifikasi dapat memodifikasi struktur kimiawi minyak dan lemak, sehingga memungkinkan produksi bahan bakar *drop-in* seperti bahan bakar jet hijau dan bahan bakar diesel, serta bahan kimia yang diminati oleh industri kosmetik, farmasi, makanan, dan pelumas (Hollak dkk., 2014).

Reaksi hidrogenasi adalah salah satu reaksi yang sangat penting bagi industri oleokimia untuk mengubah asam lemak tak jenuh menjadi asam lemak jenuh dan turunannya. Dalam skala luas, proses hidrogenasi digunakan untuk menangani minyak nabati, minyak pelumas, sabun, dan minyak industri. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, hidrogenasi telah digunakan untuk memproduksi barang-barang non-makanan seperti obat-obatan dan kosmetik.

Dalam melangsungkan reaksi hidrogenasi dibutuhkan suplai hidrogen. Hidrogen akan bereaksi dengan asam lemak tak jenuh untuk membentuk asam lemak jenuh atau kurang jenuh (Aurélio dkk., 2021). Kebutuhan hidrogen dalam jumlah yang besar ini akan menjadi suatu masalah dalam hal ketersediaan hidrogen dan keekonomisannya. Saat ini, sebagian besar hidrogen diproduksi dari bahan bakar fosil melalui *steam reforming* gas alam. Hal ini dianggap kurang efisien dan memberikan dampak tidak baik ke lingkungan (Yeh dkk., 2015).

#### Info Makalah:

Dikirim : 08-21-23;

Revisi 1 : 09-27-23;

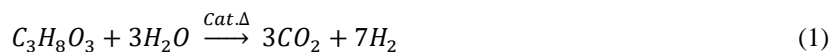
Diterima : 10-24-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [tirta.prakoso@itb.ac.id](mailto:tirta.prakoso@itb.ac.id)

Teknologi hidrotermal katalitik cukup menjanjikan untuk menjawab permasalahan tersebut. Teknologi ini menawarkan beberapa keuntungan diantaranya dapat memproduksi hidrogen secara *in-situ*, sehingga tidak dibutuhkan suplai hidrogen dari eksternal (Costa dkk., 2020). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari produksi H<sub>2</sub> secara in situ dari gliserol untuk reaksi hidrogenasi dan reaksi yang berbeda. Gliserol akan bereaksi dengan air melalui *aqueous phase reforming* (APR) untuk menghasilkan hidrogen dan karbon dioksida (persamaan 1). Selanjutnya H<sub>2</sub> yang dihasilkan akan bereaksi dengan asam lemak tak jenuh membentuk asam lemak jenuh (persamaan 2) (V. Domínguez-Barroso dkk., 2019).



Selain ketersediaan hidrogen, katalis yang sesuai dan kondisi operasi juga menjadi elemen kunci untuk melangsungkan reaksi hidrogenasi. (Díaz dkk., 2014) telah mempelajari hidrolisis-hidrogenasi minyak kedelai dan lemak menggunakan katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, diverifikasi bahwa gliserol yang dihasilkan bekerja sebagai donor hidrogen, memungkinkan terjadinya hidrogenasi asam lemak tak jenuh. Konversi maksimum tercapai dalam 3 jam, katalis 25% NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, suhu 250°C dan 270°C dan 250 rpm. Beberapa tahun berikutnya peneliti membandingkan logam Ni atau Pd pada penyangga Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau SiO<sub>2</sub>. Didapatkan kondisi operasi untuk mencapai konsentrasi asam stearat maksimum adalah 25% berat NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau katalis 5% berat PdO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, rasio berat minyak/air 1:1, temperatur 290°C dan kecepatan pengadukan 500 rpm. Penambahan logam timah dianggap dapat meningkatkan selektivitas produk asam lemak jenuh. Aurélio dkk., (2021) melaporkan Penambahan timah, yang diukur dalam semua proporsi molar meningkatkan konversi trigliserida dan mempercepat reaksi hidrolisis. Hal ini juga meningkatkan produksi H<sub>2</sub> *insitu* dan selektivitas asam lemak jenuh. Katalis juga menjadi lebih selektif untuk hidrogenasi asam linoleat. Disamping itu, beberapa katalis karbida logam transisi berbasis Ni dengan penyangga Al-SBA-15 dipelajari untuk dekarboksilasi hidrotermal asam oleat dan minyak kedelai untuk menghasilkan hidrokarbon rentang diesel tanpa tambahan H<sub>2</sub>. Dengan penambahan gliserol, katalis NiWC/Al-SBA-15 menunjukkan konversi asam oleat yang lebih besar dan selektivitas terhadap heptadekana; Namun, sebagian besar asam oleat dihidrogenasi untuk menghasilkan asam stearat. Konversi asam oleat dan selektivitas tertinggi untuk heptadekana masing-masing adalah 97,3% dan 5,2% (Al Alwan dkk., 2015).

Berdasarkan hal yang telah disebutkan di atas, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan muatan logam pada katalis, pengaruh penambahan logam timah pada katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan pengaruh penambahan gliserol sebagai sumber produksi H<sub>2</sub> secara *in-situ* terhadap konversi hidrogenasi asam oleat. Distribusi gas yang dihasilkan setelah reaksi juga dipelajari untuk mengetahui reaksi-reaksi yang terjadi.

## 2. Metode

### 2.1. Sintesis dan Karakterisasi Katalis

Katalis monometalik nikel (Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dibuat dengan metode impregnasi kering. Sejumlah Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (*Sigma Aldrich*) yang telah diperhitungkan dilarutkan dalam air dan kemudian secara perlahan-lahan dimasukkan ke dalam penyangga  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (diperoleh dari Laboratorium Teknik Reaksi Kimia dan Katalisis) dengan pengadukan terus menerus. Tiga muatan logam yang berbeda digunakan dalam percobaan (5, 10, dan 20 % berat). Kemudian, sampel dikeringkan pada suhu 110°C selama 24 jam dan dikalsinasi selama 4 jam pada suhu 450°C. Katalis yang diperoleh disebut XNiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (X = 5, 10, 20), di mana X mewakili muatan logam.

Katalis bimetalik (NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dibuat dengan larutan prekursor SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (*Sigma Aldrich*) menggunakan metode impregnasi kering. Katalis bimetalik dikeringkan pada suhu 110°C selama 24 jam dan dikalsinasi selama 4 jam pada suhu 450°C. Katalis ini disebut NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, di mana rasio molar Ni:Sn adalah 1:1 (masing-masing 5 % berat. Semua kalsinasi dilakukan dengan *muffle furnace* di udara statis. Katalis dihancurkan dan diayak hingga ukuran 60 *mesh*. Selanjutnya katalis hasil sintesis dikarakterisasi dengan *X-ray diffraction* (XRD), *X-ray fluorescence spectrometry* (XRF) dan *Brunauer Emmett Teller* (BET).

### 2.2. Prosedur Eksperimen dan Metode Analisis

Reaksi dilakukan dengan reaktor *batch* 125 ml yang dilengkapi dengan tungku pemanas (dibuat oleh PT Juang Teknik). Pada bagian bawah digunakan *hotplate* untuk pengadukan. Kecepatan pengadukan dijaga konstan (600 rpm). Campuran reaksi (10 g asam oleat (*Bratachem*), 40 g air deionisasi, dan 0,5 g katalis dimasukkan ke dalam reaktor dengan hati-hati. Kemudian, suhu reaksi (300°C) diatur sebelum memulai waktu reaksi dan mencapai *autogenic pressure* 80-85 bar. Setelah waktu reaksi yang diinginkan selesai (6 jam), reaksi dipadamkan dengan merendam reaktor ke dalam air pada suhu ruang dan produk gas yang dihasilkan ditampung ke dalam *gas bag* untuk dianalisis lebih lanjut. Kemudian, produk hasil reaksi dituangkan ke dalam gelas kimia dan pelarut heksana digunakan untuk mengambil fraksi minyak yang masih tertinggal di dalam reaktor. Selanjutnya produk dipisahkan dengan penyaringan vakum untuk memisahkan katalis. Setelah penyaringan, campuran fasa cair dibagi menjadi fasa yang larut dalam air

(fasa bawah) dan fasa yang larut dalam heksana (fasa atas). Fasa yang larut dalam heksana diuapkan pada suhu 80°C untuk menghilangkan heksana menggunakan distilasi sederhana. Produk kemudian dianalisis dengan menghitung angka asam dan angka iodin. Komposisi gas dianalisis menggunakan *Gas Chromatograph-Thermal Conductivity Detector* (GC-TCD).

Pertama, eksperimen dilakukan tanpa gliserol untuk setiap katalis. Selanjutnya dilakukan eksperimen dengan menambahkan 5 g gliserol pada campuran reaksi untuk setiap katalis yang diuji. Hal ini dilakukan untuk mengetahui efek penambahan gliserol sebagai sumber hidrogen tambahan untuk reaksi hidrogenasi.

Angka asam (mg KOH/g sampel) dihitung menggunakan standar *AOCS Official Method Cd 3d-63*. Angka iodin (AI, mg I<sub>2</sub>/100 g sampel) dihitung menggunakan standar *AOCS Official Method Cd 1-25*. Konversi reaksi hidrogenasi diperkirakan dengan persamaan (3) (M. V. Domínguez-Barroso dkk., 2016):

$$\text{Konversi Hidrogenasi } (C = C, \%) = \frac{AI_0 - AI_f}{AI_0} \times 100 \quad (3)$$

Shimadzu GC-14 B digunakan untuk menganalisis komposisi gas hasil reaksi. Kromatografi gas ini menggunakan detektor TCD dan kolom TDX-01. Argon digunakan sebagai gas pembawa dengan kecepatan 30 mL/menit. Kondisi operasi yang digunakan adalah temperatur kolom 45°C, injektor 45°C, detektor 45°C, dengan waktu analisis selama 50 menit.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Karakterisasi Katalis

Permukaan katalis merupakan tempat adsorpsi reaktan dan tempat berlangsungnya reaksi. Penurunan dan peningkatan luas permukaan katalis berpengaruh terhadap kesempatan reaktan untuk teradsorpsi ke katalis. Karakterisasi dengan BET bertujuan untuk mengetahui luas permukaan, volume pori, dan ukuran partikel katalis. Hasil luas permukaan, volume pori, dan ukuran partikel katalis disajikan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Analisis BET Katalis.

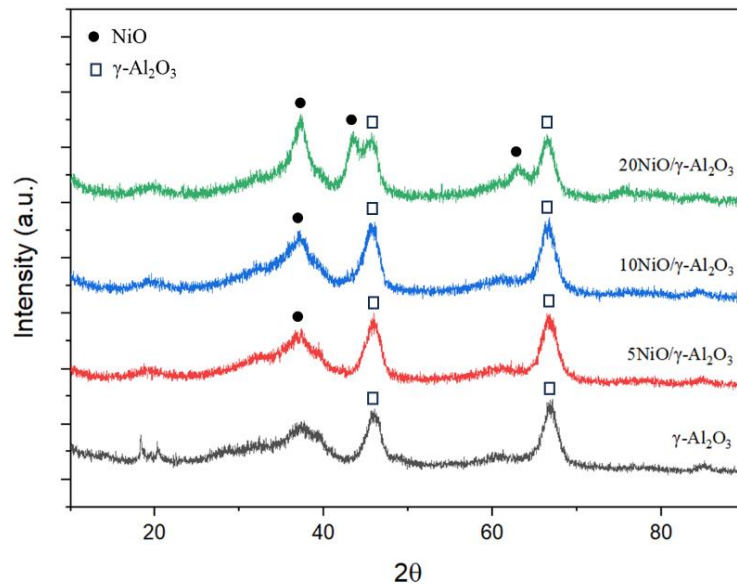
Katalis	Luas Area Permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Volume Pori (mL/g)	Ukuran partikel (nm)
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	213,165	0,43898	4,1187
5NiO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	188,413	0,39767	4,2212
10NiO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	151,872	0,37405	4,9258
20NiO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	123,113	0,29042	4,7179
NiSn/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	170,179	0,37004	4,3488

Hasil analisis BET katalis memperlihatkan bahwa adanya perubahan sifat pori katalis setelah penempelan logam Ni pada penyangga (Tabel 1). Penurunan luas area permukaan dan volume pori setiap katalis (5NiO, 10NiO, 20NiO dan NiSn) dibandingkan dengan luas area permukaan dan volume pori penyangga ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) masing-masing adalah sebesar 11,6%, 28,8%, 42,2%, 20,2% dan 9,4%, 14,8%, 33,8%, 15,7%. Penambahan konsentrasi logam Ni atau fasa aktif NiO berakibat pada penurunan luas area permukaan dan volume pori katalis yang dapat dianggap cukup signifikan. Hal ini disebabkan karena sebagian fasa aktif NiO menutupi pori-pori katalis yang berukuran kecil. Hasil yang mirip ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan Hossain dkk., (2018) & Rodiansono dkk., (2015).

Tabel 2. Hasil Analisis XRF dari Komposisi Katalis.

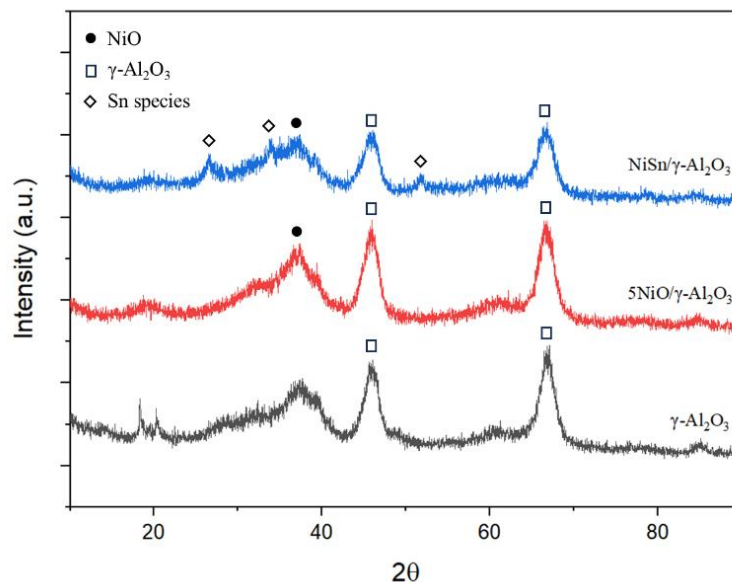
Elemen	5NiO	10NiO	20NiO	NiSn
Al	49,70	46,45	40,30	42,89
Ni	4,32	8,68	16,93	4,16
Sn	-	-	-	5,51

Analisis XRF digunakan untuk menentukan komposisi katalis dalam hal kandungan Ni, Sn, dan Al seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Seperti yang diharapkan, kandungan Ni dari katalis sangat dekat dengan nilai kandungan masing-masing variasi katalis (5%, 10%, 20% berat dan katalis NiSn masing-masing 5%). Hasil yang mirip ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan Zulkepli dkk., (2018).



Gambar 1. Pola XRD dari katalis XNiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Difraktogram *X-ray Diffraction* (XRD) dari katalis XNiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, penyangga  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan NiO ditunjukkan pada Gambar 1. Identifikasi fasa kristal dilakukan dengan perbandingan dengan data JCPDS (1994). Penyangga menunjukkan puncak difraksi yang terletak pada  $2\theta = 45,6^\circ$  dan  $66,6^\circ$  (JCPDS 84-1410). Nikel oksida, yang diperoleh dari kalsinasi nikel nitrat, menunjukkan puncak difraksi pada posisi  $2\theta = 37,2^\circ$ ,  $43,3^\circ$  dan  $62,8^\circ$  yang terkait dengan kristal NiO dari struktur kubik dan kelompok spasial Fm3 m (JCPDS 47-1049). Hasil yang serupa disajikan oleh (Aurélio dkk., 2021; Kim, 2019).



Gambar 2. Pola XRD dari katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Pola XRD dari katalis bimetalik disajikan pada Gambar 2. Hasil XRD dari katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dibandingkan dengan katalis 5NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5% berat Ni) karena katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dibuat dengan perbandingan Ni:Sn adalah 1:1 (masing-masing 5% berat) sehingga dapat dibandingkan perbedaan pola XRD saat penambahan Sn. Pola XRD katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan katalis 5NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dapat diidentifikasi pada posisi  $2\theta = 45,6^\circ$  dan  $66,6^\circ$  pada katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan katalis 5NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Puncak pada  $2\theta = 26,6^\circ$ ,  $33,9^\circ$ , dan  $51,8^\circ$  dapat dikaitkan dengan Sn. Setelah menambahkan Sn, puncak NiO tidak lagi terlihat jelas. Hasil ini serupa dengan yang disajikan (Aurélio dkk., 2021). Dengan demikian, penambahan Sn meningkatkan dispersi Ni pada permukaan katalis dan menghindari sintering atau aglomerasi kristal Ni, membuatnya lebih kecil dan



dengan demikian tidak terdeteksi oleh analisis XRD. Puncak-puncak yang terkait dengan  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> masih terdeteksi dalam katalis bimetalik, namun intensitasnya berkurang. Adapun persentase kristalinitas semua katalis yang diperoleh berdasarkan analisis XRD adalah kecil yang mengindikasikan struktur kristal yang terbentuk tidak teratur / bersifat amorf (kristalinitas rendah).

### 3.2. Hidrogenasi Asam Oleat

Karakteristik hasil hidrogenasi asam oleat dengan dan tanpa gliserol pada suhu 300°C dalam 6 jam reaksi ditunjukkan pada Tabel 3. Tercatat dalam tabel bahwa ketika reaksi dilakukan tanpa gliserol, nilai angka asam hasil reaksi menunjukkan perubahan yang tidak terlalu signifikan pada katalis monometalik NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan berbagai muatan logam Ni. Dengan adanya penambahan logam Sn, nilai angka asam menunjukkan penurunan yang signifikan jika dibandingkan dengan reaksi tanpa katalis. Ketika reaksi dilakukan dengan menambahkan gliserol, diperoleh penurunan angka asam yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan reaksi tanpa gliserol. Serupa dengan hasil reaksi tanpa gliserol, penambahan muatan logam Ni tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap nilai angka asam sedangkan penambahan Sn memberikan efek yang cukup besar.

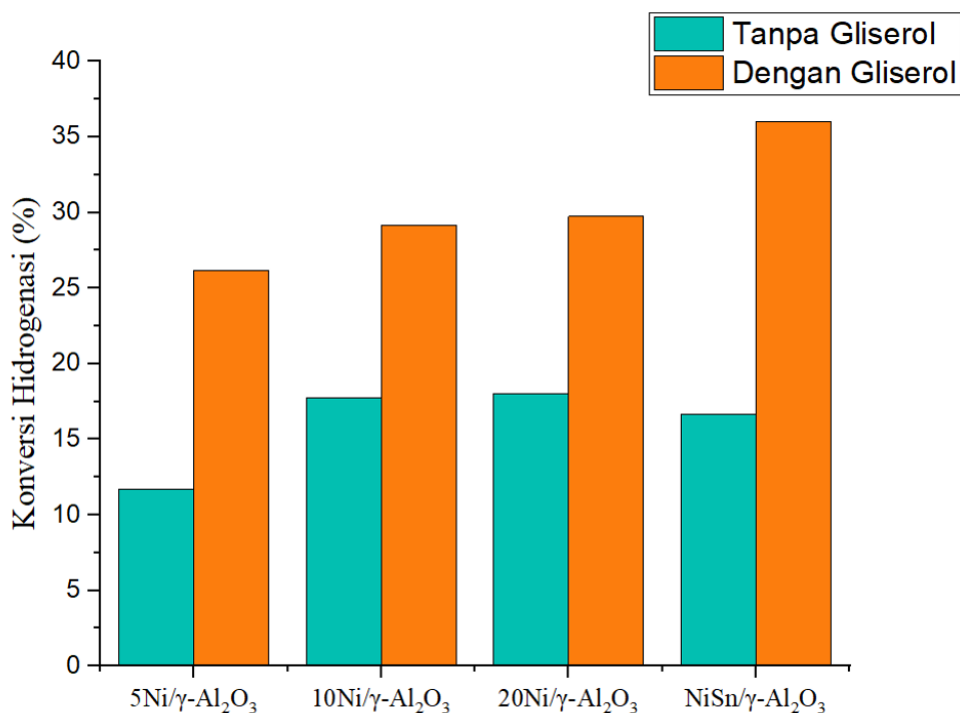
Tabel 3. Karakteristik Produk Hidrogenasi Tanpa dan Dengan Gliserol  
 (Waktu reaksi: 6 jam, Temperatur: 300°C).

Keterangan	Tanpa Katalis	5NiO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10NiO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20NiO/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiSn/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Tanpa Gliserol:					
Angka Asam (mgKOH/g)	193,95	185,83	179,12	183,89	158,73
Angka Iodin (mg I <sub>2</sub> /100g)	123,16	108,74	101,29	100,93	102,64
Dengan Gliserol:					
Angka Asam (mgKOH/g)	170,14	168,40	166,93	159,66	149,50
Angka Iodin (mg I <sub>2</sub> /100g)	92,20	90,93	87,22	86,53	78,77

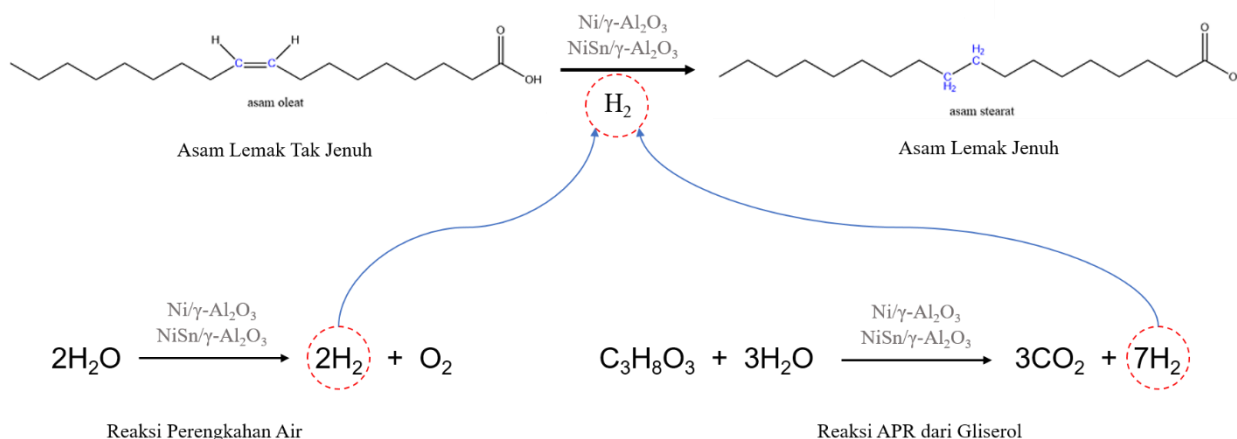
Terjadinya reaksi hidrogenasi in-situ dapat dikonfirmasi dari analisis angka iodin hasil reaksi. Setelah itu dihitung konversi hidrogenasi dengan dan tanpa gliserol yang disajikan pada Gambar 3. Pada reaksi yang dilakukan tanpa menggunakan gliserol, konversi hidrogenasi menunjukkan kenaikan dengan menambahkan muatan logam Ni, walaupun tidak signifikan pada muatan logam 10% ke 20%. Pada katalis bimetalik NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, konversi hidrogenasi seolah terlihat mengalami penurunan. Namun jika dibandingkan dengan katalis 5NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> konversi hidrogenasi sebenarnya mengalami kenaikan mengingat katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> disintesis dengan muatan logam Ni dan Sn masing-masing adalah 5%.

Pada reaksi yang dilakukan dengan menggunakan gliserol, konversi hidrogenasi untuk setiap katalis meningkat cukup signifikan jika dibandingkan dengan reaksi tanpa gliserol. Peningkatan konversi hidrogenasi pada setiap katalis (5NiO, 10NiO, 20NiO dan NiSn) dibandingkan dengan reaksi tanpa gliserol masing-masing adalah sebesar 124%, 64%, 65%, dan 116%. Hal ini mengindikasikan setiap variasi katalis menggunakan gliserol untuk menghasilkan hidrogen (Gambar 4). Sama halnya dengan reaksi tanpa gliserol, konversi hidrogenasi dengan katalis monometalik NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan peningkatan yang tidak signifikan. Namun, katalis bimetalik NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan potensi terbesar untuk memanfaatkan H<sub>2</sub> yang dihasilkan secara in situ dari gliserol untuk menghidrogenasi asam oleat. Hal ini menunjukkan bahwa katalis monometalik Ni tidak cukup efektif untuk reaksi hidrogenasi meskipun dengan melakukan penambahan muatan logam. Sedangkan penambahan logam Sn dapat menghidrogenasi asam oleat dengan konversi sebesar 36%, hal ini dinilai cukup efektif dan kemungkinan akan memberikan hasil yang lebih baik dengan melakukan penambahan muatan logam Sn ke dalam penyangga. Literatur lain (Yeh dkk., 2015) melaporkan bahwa penambahan Sn ke katalis logam dapat meningkatkan selektivitas untuk produksi H<sub>2</sub> selama *aqueous phase reforming* (APR) gliserol.

Saat reaksi tanpa gliserol, sumber hidrogen kemungkinan berasal dari interaksi air dengan permukaan logam pada katalis atau disosiasi air (Gambar 4). Pada sebagian besar permukaan logam, air teradsorpsi pada suhu rendah (<100 K) dan dapat terdisosiasi menjadi OH dan H pada suhu yang lebih tinggi (120-200 K). Pada logam tertentu (Fe, Co, Ni), gugus hidroksil permukaan terdisosiasi secara *irreversibel* menjadi O dan H dan gas hidrogen dapat dibentuk dengan rekombinasi spesies H (Bion & Duprez, 2016). (Yeh dkk., 2015) melaporkan bahwa Pt/C bereaksi langsung dengan air (350°C, 2 jam) untuk menghasilkan 0,018 ± 0,002  $\mu$ mol H<sub>2</sub> /mg Pt/C. Namun, jumlah H<sub>2</sub> yang diproduksi tidak mencukupi untuk menjelaskan semua hidrogenasi yang diamati dalam percobaan. Katalis dalam air saja menghasilkan 0,018  $\mu$ mol H<sub>2</sub>/mg Pt/C, tetapi reaktor mengandung 20  $\mu$ mol asam lemak per miligram katalis. Hal ini mendukung dugaan bahwa konversi hidrogenasi pada reaksi tanpa gliserol rendah (<20%) karena kurangnya kebutuhan hidrogen untuk menghidrogenasi asam oleat.



Gambar 3. Konversi Hidrogenasi Dengan dan Tanpa Gliserol (Waktu Reaksi: 6 jam, Temperatur: 300°C).

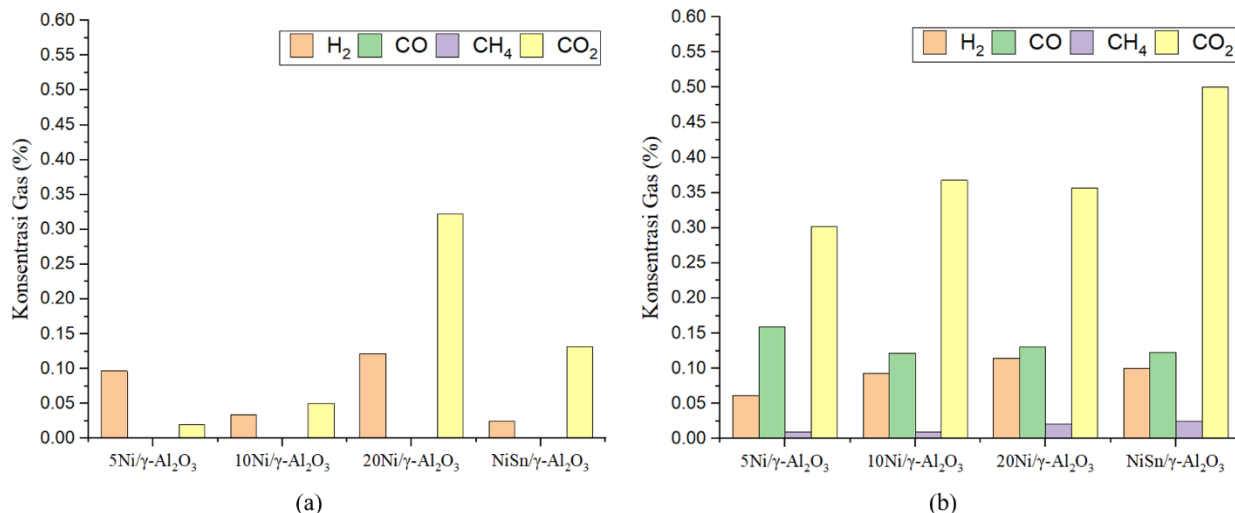
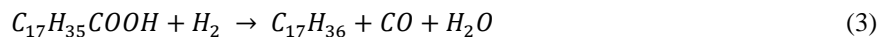


Gambar 4. Skema yang Diusulkan untuk Reaksi Hidrogenasi Asam Lemak Tak Jenuh Melalui Katalis NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3.3. Distribusi Fasa Gas Hasil Reaksi

Gambar 5 menyajikan distribusi gas setelah reaksi. Pada reaksi tanpa gliserol, katalis 20NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan konsentrasi gas H<sub>2</sub> sisa terbesar. Dengan nilai konversi hidrogenasi yang tidak berbeda signifikan dengan katalis 10NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hal ini memberikan dugaan bahwa katalis 20NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cukup efektif untuk memproduksi hidrogen, namun kurang efektif dalam reaksi hidrogenasi. Katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan konsentrasi gas H<sub>2</sub> sisa terkecil. Jika dibandingkan dengan katalis 5NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dapat dikatakan lebih efektif dalam reaksi hidrogenasi karena menghasilkan konversi hidrogenasi yang lebih besar dengan mengonsumsi H<sub>2</sub>.

Hanya gas H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> yang terdeteksi pada reaksi tanpa gliserol. Sedangkan dengan adanya penambahan gliserol pada reaktan menghasilkan gas H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub> pada akhir reaksi. Gas CO dan CO<sub>2</sub> yang terbentuk mengindikasikan adanya reaksi lanjutan dari reaksi hidrogenasi. Dugaan yang kuat mengarah ke reaksi dekarbonilasi (menghasilkan gas CO) dan dekarboksilasi (menghasilkan gas CO<sub>2</sub>) seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3 dan 4 (Miao dkk., 2016). Sedangkan gas CH<sub>4</sub> mengindikasikan adanya kemungkinan terjadi reaksi metanasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan 5 dan 6. Reaksi ini tidak diinginkan karena mengonsumsi sejumlah besar H<sub>2</sub> (Yao dkk., 2021).



Gambar 5. Distribusi Gas Hasil Reaksi Hidrogenasi (a) Tanpa Gliserol, dan (b) Dengan Gliserol.

## Kesimpulan

Hidrogenasi asam oleat dengan produksi H<sub>2</sub> *in-situ* telah dipelajari dalam paper ini. Hidrogenasi ditunjukkan oleh konversi hidrogenasi dengan dan tanpa gliserol. Katalis monometalik NiO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dinilai kurang efektif untuk reaksi hidrogenasi. Namun, penambahan logam Sn pada Ni meningkatkan selektivitas untuk produksi H<sub>2</sub> yang digunakan untuk menghidrogenasi asam oleat dengan konversi hidrogenasi sebesar 36% pada reaksi dengan gliserol selama 6 jam pada suhu 300°C. Penambahan gliserol pada reaktan meningkatkan konversi hidrogenasi dibandingkan dengan reaksi tanpa gliserol. Peningkatan pada setiap katalis (5NiO, 10NiO, 20NiO dan NiSn) masing-masing adalah sebesar 124%, 47%, 65%, dan 116%. Gas yang dihasilkan selama reaksi juga dianalisis. Hanya gas H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> yang terdeteksi pada reaksi tanpa gliserol. Sedangkan dengan adanya penambahan gliserol pada reaktan menghasilkan gas H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub> pada akhir reaksi. Gas CH<sub>4</sub>, CO, dan CO<sub>2</sub> yang terbentuk mengindikasikan adanya reaksi lanjutan dari reaksi hidrogenasi. Adapun saran yang dapat dilakukan pada penelitian berikutnya untuk meningkatkan konversi dan selektivitas diantaranya mengaktifkan katalis terlebih dahulu dengan mengalirkan H<sub>2</sub> pada kondisi dan operasi tertentu, melakukan variasi rasio logam Ni dan Sn pada katalis NiSn/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan melakukan percobaan dengan waktu reaksi yang lebih lama.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada laboratorium Termofluida dan Sistem Utilitas (TSU) dan laboratorium Metodika Perancangan dan Pengendalian Proses (MP3), Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

## Daftar Notasi

a.u.	= arbitrary units
AI <sub>0</sub>	= angka iodin dari bahan baku (asam oleat) [mg I <sub>2</sub> /100 g sampel]
AI <sub>f</sub>	= angka iodin setelah reaksi [mg I <sub>2</sub> /100 g sampel]
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	= gliserol
Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	= nikel (II) nitrat heksahidrat
SnCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	= timah (II) Klorida Dihidrat
JCPDS	= <i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards</i>

## Daftar Pustaka

- Al Alwan, B., Salley, S. O., & Ng, K. Y. S. (2015). Biofuels production from hydrothermal decarboxylation of oleic acid and soybean oil over Ni-based transition metal carbides supported on Al-SBA-15. *Applied Catalysis A: General*, 498, 32–40. <https://doi.org/10.1016/J.APCATA.2015.03.012>

- Aurélio, C., Crisóstomo, B., Almeida, S. S., & Soares, R. R. (2021). Towards triglycerides-based biorefineries: Hydrolysis-reforming-hydrogenation in one-pot over Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based catalysts. *Catalysis Today*, 367, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.07.020>
- Bion, N., & Duprez, D. (2016). Water splitting as a tool for obtaining insight into metal–support interactions in catalysis. *Comptes Rendus Chimie*, 19(10), 1326–1336. <https://doi.org/10.1016/J.CRCI.2015.11.020>
- Costa, C. Z., Sousa-Aguiar, E. F., Couto, M. A. P. G., & Filho, J. F. S. de C. (2020). Hydrothermal Treatment of Vegetable Oils and Fats Aiming at Yielding Hydrocarbons: A Review. *Catalysts* 2020, Vol. 10, Page 843, 10(8), 843. <https://doi.org/10.3390/CATAL10080843>
- Díaz, G. C., Tapanes, N. de la C. O., Câmara, L. D. T., & Aranda, D. A. G. (2014). Glycerol conversion in the experimental study of catalytic hydrolysis of triglycerides for fatty acids production using Ni or Pd on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or SiO<sub>2</sub>. *Renewable Energy*, 64, 113–122. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2013.11.006>
- Domínguez-Barroso, V., Herrera, C., Larrubia, M. Á., & Alemany, L. J. (2019). Coupling of glycerol-APR and in situ hydrodeoxygenation of fatty acid to produce hydrocarbons. *Fuel Processing Technology*, 190, 21–28. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2019.03.011>
- Domínguez-Barroso, M. V., Herrera, C., Larrubia, M. A., & Alemany, L. J. (2016). Diesel oil-like hydrocarbon production from vegetable oil in a single process over Pt-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pd/C combined catalysts. *Fuel Processing Technology*, 148, 110–116. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2016.02.032>
- Hollak, S. A. W., Ariëns, M. A., De Jong, K. P., & Van Es, D. S. (2014). Hydrothermal Deoxygenation of Triglycerides over Pd/C aided by In Situ Hydrogen Production from Glycerol Reforming. *ChemSusChem*, 7(4), 1057–1062. <https://doi.org/10.1002/CSSC.201301145>
- Hossain, M. Z., Chowdhury, M. B. I., Jhwar, A. K., Xu, W. Z., Biesinger, M. C., & Charpentier, P. A. (2018). Continuous Hydrothermal Decarboxylation of Fatty Acids and Their Derivatives into Liquid Hydrocarbons Using Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst. *ACS Omega*, 3(6), 7046–7060. [https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.8B00562/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AO-2018-00562E\\_M002.GIF](https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.8B00562/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AO-2018-00562E_M002.GIF)
- Kim, J. K. (2019). PEG-assisted Sol-gel Synthesis of Compact Nickel Oxide Hole-Selective Layer with Modified Interfacial Properties for Organic Solar Cells. *Polymers* 2019, Vol. 11, Page 120, 11(1), 120. <https://doi.org/10.3390/POLYM11010120>
- Miao, C., Marin-Flores, O., Davidson, S. D., Li, T., Dong, T., Gao, D., Wang, Y., Garcia-Pérez, M., & Chen, S. (2016). Hydrothermal catalytic deoxygenation of palmitic acid over nickel catalyst. *Fuel*, 166, 302–308. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.10.120>
- Rodiansono, R., Astuti, M. D., Ghofur, A., & Sembiring, K. C. (2015). Catalytic Hydrogenation of Levulinic Acid in Water into  $\gamma$ -Valerolactone over Bulk Structure of Inexpensive Intermetallic Ni-Sn Alloy Catalysts. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 10(2), 192–200. <https://doi.org/10.9767/BCREC.10.2.8284.192-200>
- Yao, X., Strathmann, T. J., Li, Y., Cronmiller, L. E., Ma, H., & Zhang, J. (2021). Catalytic hydrothermal deoxygenation of lipids and fatty acids to diesel-like hydrocarbons: a review. *Green Chemistry*, 23(3), 1114–1129. <https://doi.org/10.1039/D0GC03707A>
- Yeh, T. M., Hockstad, R. L., Linic, S., & Savage, P. E. (2015). Hydrothermal decarboxylation of unsaturated fatty acids over PtSn<sub>x</sub>/C catalysts. *Fuel*, 156, 219–224. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.04.039>
- Zulkepli, S., Juan, J. C., Lee, H. V., Rahman, N. S. A., Show, P. L., & Ng, E. P. (2018). Modified mesoporous HMS supported Ni for deoxygenation of triolein into hydrocarbon-biofuel production. *Energy Conversion and Management*, 165, 495–508. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.03.087>

## Analisa Pengukuran Parameter *Quality of Service* dan *Quality of Experience* pada Layanan HbbTV

R.A Rizka Qori Yuliani Putri<sup>1</sup>, Ery Safrianti<sup>1</sup>, Salpiana<sup>1</sup>,  
Jessica Amanda Putri<sup>1</sup>, Sucahyo Grianto<sup>1</sup>, dan Aji Noor Hakim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kota Pekanbaru, Indonesia

[rizkaqoriyuliani@lecturer.unri.ac.id](mailto:rizkaqoriyuliani@lecturer.unri.ac.id), [esafrianti@eng.unri.ac.id](mailto:esafrianti@eng.unri.ac.id), [Salpiana0632@student.unri.ac.id](mailto:Salpiana0632@student.unri.ac.id),  
[jessica.amanda5573@student.unri.ac.id](mailto:jessica.amanda5573@student.unri.ac.id), [Sucahyo.grianto@student.unri.ac.id](mailto:Sucahyo.grianto@student.unri.ac.id), [Aji.noor4268@student.unri.ac.id](mailto:Aji.noor4268@student.unri.ac.id)

### Abstrak

*Hybrid Broadcast Broadband TV* (HbbTV) adalah standar pengiriman untuk persinyalan, transmisi, presentasi layanan televisi interaktif yang disempurnakan serta aplikasi terkait, dirancang untuk digunakan melalui jaringan penyiaran dan Internet. Standar ini merupakan satu-satunya memungkinkan koneksi langsung antara konten linear dan *online*, dapat berjalan pada terminal *hybrid* mencakup koneksi siaran dan Internet. Standar ini memberikan dimensi baru pada layanan yang ditawarkan oleh program saluran televisi (TV dan Internet) dan meningkatkan pengalaman pengguna bagi konsumen dengan memungkinkan layanan yang inovatif dan interaktif melalui jaringan siaran dan *broadband*. Spesifikasi HbbTV dikembangkan oleh Asosiasi HbbTV untuk secara efektif mengelola jumlah konten yang tersedia untuk meningkatkan pesat yang ditargetkan untuk konsumen akhir saat ini. HbbTV adalah teknologi yang memadukan siaran televisi tradisional dengan layanan internet dan aplikasi interaktif. Penelitian ini membahas peran QoS dan QoE dalam implementasi HbbTV, dengan fokus pada pengukuran parameter menggunakan *software* wireshark mempengaruhi kualitas layanan dan pengalaman pengguna. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dengan mengukur parameter QoS dan QoE. Hasil pengukuran QoS rata-rata *throughput* 47531,8 bps, *Packet loss* 4,9968%, *delay* 189,38 ms dan *jitter* 17700 ms Selanjutnya dalam pengukuran QoE, survei dilakukan untuk mengumpulkan data dari pengguna. Hasil analisis data menunjukkan bahwa terdapat 7,7% harapan konsumen terhadap penggunaan HbbTV lebih ditingkatkan.

Kata kunci: *HbbTV*, *quality of service*, *quality of experience*, pengukuran parameter

### Abstract

Hybrid Broadcast Broadband TV (HbbTV) is delivery standard for signaling, transmission, presentation of enhanced interactive television services and related applications, designed for use over broadcast networks and Internet. It is only standard that allows direct connection between linear and online content. It works on hybrid devices that include both broadcast and Internet connections. This standard will bring new dimension to services delivered through television programs (TV and Internet) and enhance consumer user experience by enabling innovative and interactive services over broadcast and broadband networks. improve. The HbbTV specification was developed by the HbbTV Association to effectively manage the rapidly increasing amount of content for today's consumers. HbbTV is a technology that combines traditional television broadcasts with Internet services and interactive applications. This research focuses on role of QoS and QoE in HbbTV implementations and measurement of parameters using Wireshark software that affect quality of service and user experience. The research method is experiment measuring QoS and QoE parameters. The QoS measurements were average throughput 47531,8bps, packet loss 4,9968%, delay 189.38ms, jitter 17700ms. We also conducted QoE measurement survey to collect user data to be collected. Data analysis revealed that 7.7% of consumer expectations of HbbTV users need to be improved.

Keywords: *HbbTV*, *quality of service*, *quality of experience*, parameter measurements

### 1. Pendahuluan

Indonesia meratifikasi rekomendasi *International Telecommunication Union* (ITU) untuk menerapkan televisi digital. Saat ini beberapa penyelenggaraan penyiaran TV sudah melakukan uji coba TV digital dengan format DVB-T2. Siaran televisi digital di Indonesia sudah tidak dapat terelakkan lagi keberadaannya. Sistem penyiaran digital merupakan perkembangan yang sangat pesat di dunia penyiaran dimana terdapat peningkatan kapasitas layanan melalui efisiensi pemanfaatan spektrum frekuensi radio. Sistem penyiaran televisi digital bukan hanya mampu

#### Info Makalah:

Dikirim : 05-22-23;  
Revisi 1 : 07-20-23;  
Revisi 2 : 08-22-23;  
Revisi 3 : 08-31-23;  
Diterima : 10-24-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -  
e-mail : [rizkaqoriyuliani@lecturer.unri.ac.id](mailto:rizkaqoriyuliani@lecturer.unri.ac.id)

menyalurkan data gambar dan suara tetapi juga memiliki kemampuan multifungsi dan multimedia seperti layanan interaktif dan bahkan informasi peringatan dini bencana. HbbTV sudah banyak digunakan dengan berjumlah 2.260.000 pelanggan di Indonesia menggunakan HbbTV, hal ini didukung oleh peraturan mengenai regulasi penyiaran Indonesia yaitu UU No. 32 Tahun 2002. Tercantum dalam ketentuan umum UU 32 tahun 2002 yang dijelaskan pada pasal 1 bahwa siaran adalah rangkaian pesan dalam bentuk suara, gambar atau suara dan

gambar atau yang berbentuk grafis, karakter, baik yang bersifat interaktif maupun tidak, yang dapat diterima melalui perangkat penerima siaran. Selain itu penyiaran dijelaskan bahwa suatu kegiatan pemancarluasan siaran melalui sarana pemancar dan sarana transmisi di darat, laut dan Antariksa dengan menggunakan spektrum frekuensi radio yang melalui udara, kabel dan media lainnya untuk dapat diterima secara serentak dan bersamaan oleh masyarakat dengan perangkat penerima siaran.

Konsorsium Hbb TV (kemudian *Hbb TV Association*) lahir pada bulan Februari 2009 dari proyek H4TV Prancis dan proyek profil HTML Jerman. HbbTV pertama kali diperagakan pada tahun 2009, di Perancis oleh *France Televisions* dan dua pengembang teknologi *Set Top Box*, *Inverto Digital Labs of Luxembourg*, dan *Pleyo of France*, untuk acara olahraga tenis Roland Garros dengan transmisi DTT dan koneksi IP dan di Jerman menggunakan satelit Astra pada 19,2° BT selama pameran IFA dan IBC (Musdar saleh, 2020).

Pada bulan Juni 2014, Asosiasi HbbTV bergabung dengan Open IPTV Forum, sebuah asosiasi industri yang serupa untuk layanan televisi *Internet Protocol (IPTV) end-to-end* yang didirikan pada tahun 2007 dan berkaitan erat dengan inisiatif berbasis *browser* HbbTV. digabungkan dengan dan spesifikasi media untuk televisi jaringan dan dekoder. Seiring dengan menyatunya pasar IPTV, OTT, siaran hibrida, dan TV pita lebar, kedua inisiatif ini akan bergabung di bawah bendera Asosiasi HbbTV. Pada bulan September 2016, Aliansi *Smart TV*, yang didirikan pada tahun 2012 oleh LG Electronics, Panasonic, Toshiba dan TP Vision, bergabung dengan HbbTV, dan ia memperluas cakupan spesifikasi HbbTV untuk menangani layanan *over-the-top* dan merampingkan standar mengumumkan untuk memperluas. Penggabungan ini diharapkan akan selesai dalam waktu satu tahun.

Kualitas Layanan (*Quality of Service/QoS*) dan Kualitas Pengalaman (*Quality of Experience/QoE*) adalah faktor kunci yang harus dipertimbangkan dalam pengembangan teknologi televisi digital seperti *HbbTV*. *QoS* mengacu pada seberapa baik jaringan dan layanan dapat memberikan performa tertentu, sedangkan *QoE* merujuk pada bagaimana pengguna merasakan dan menikmati layanan. Dalam konteks HbbTV, *QoS* dan *QoE* sangat penting karena pengguna akan terhubung dengan jaringan internet untuk menggunakan layanan terkait, seperti *VoD* atau aplikasi web. Pada penelitian ini, akan dilakukan studi tentang pengaruh kualitas layanan (*QoS*) dan kualitas pengalaman (*QoE*) terhadap penggunaan HbbTV. Penelitian ini akan melibatkan pengukuran kinerja jaringan dan kualitas layanan, serta pengukuran pengalaman pengguna dalam menggunakan HbbTV.

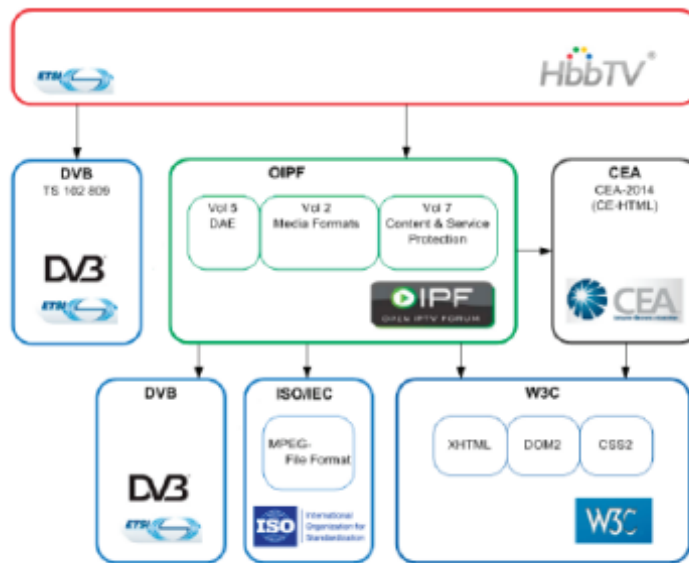
## 2. Metode

### 2.1. Teknologi Media Hybrid TV dan Layanan

Standar Hbb-TV merupakan sistem yang komprehensif dengan dua keuntungan utama. Sistem ini menggabungkan siaran (satelit, kabel dan terestrial) dan *broadband* (Internet di seluruh dunia) untuk menyediakan lingkungan peramban standar yang memungkinkan layanan web disampaikan di TV. Di pasaran, pengguna dapat membeli perangkat elektronik konsumen (CE) seperti perangkat *TV broadband* terintegrasi dan *set top box* (STB). Ini adalah sistem penyiaran yang disempurnakan yang mencakup elemen interaktif, berbagai layanan sesuai permintaan, dan fitur lain yang tidak dapat dengan mudah disematkan di lingkungan linear (satu arah) tradisional (Viv et al., 2019).

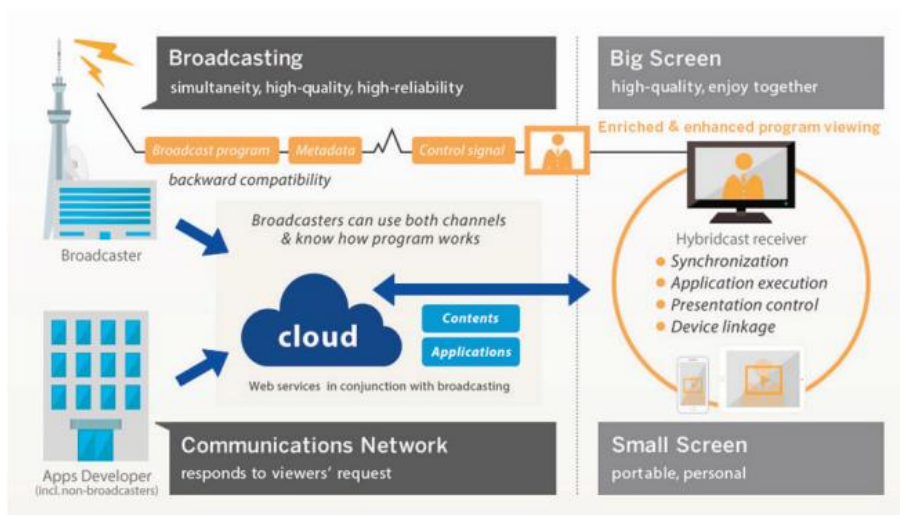
HbbTV awalnya dikembangkan sekitar tahun 2009 dan di standarisasi pertama kali oleh ETSI pada tahun 2010. Spesifikasi HbbTV dengan versi 1.5 yang dikeluarkan oleh konsorsium HbbTV dibulan April 2012, dan saat ini, standar HbbTV 2.0 telah selesai. HBB-NEXT telah mendukung spesifikasi teknis HbbTV 2.0. mendukung jaringan tautan jejaring sosial seperti *Facebook* dan menyediakan antarmuka pengguna multimedia yang disempurnakan seperti identifikasi pembicara, kontrol suara, dan lain-lain. Selain itu, dapat melihat fitur baru baik kelompok dan individu. Terutama, upaya sinkronisasi siaran dan konten yang disampaikan lewat internet akan sangat membantu bagi semua orang tanpa terkecuali distabilitas. HbbTV telah memperoleh momentum yang besar dipasar Eropa. Penyelenggara penyiaran di 14 negara Eropa telah mulai menawarkan layanan HbbTV secara rutin atau telah mengumumkan untuk segera mulai.

Konsumen sekarang memiliki berbagai teknologi pengiriman, perangkat konsumen, dan konten media yang dapat mereka gunakan. Dalam hal distribusi, media dapat disampaikan melalui penyiaran dan teknologi *broadband*. Di sisi lain, teknologi penyiaran seperti *Digital Video Broadcasting (DVB)* dapat mengirimkan konten media yang sama ke banyak konsumen secara bersamaan. Media dapat disiarkan melalui terestrial (seperti *DVB-T*), satelit (seperti *DVB-S*), seluler (seperti *DVB-H*), dan teknologi kabel (seperti *DVB-C*). Di sisi lain, teknologi *IP broadband* dapat menyediakan layanan interaktif, dua arah, dan adaptif yang disesuaikan dengan sumber daya dan preferensi pelanggan. Namun, teknologi ini biasanya memiliki kinerja yang lebih rendah dalam hal skalabilitas, stabilitas, dan latensi dibandingkan dengan teknologi *broadcast*. Dalam konteks ini, media dapat disampaikan melalui berbagai format berbasis *IP*, yaitu teknologi unduhan dan *streaming*, yang mana yang terakhir ini semakin populer (Boronat et al., 2018).



Gambar 1. Standar HbbTV Standar 1.0.

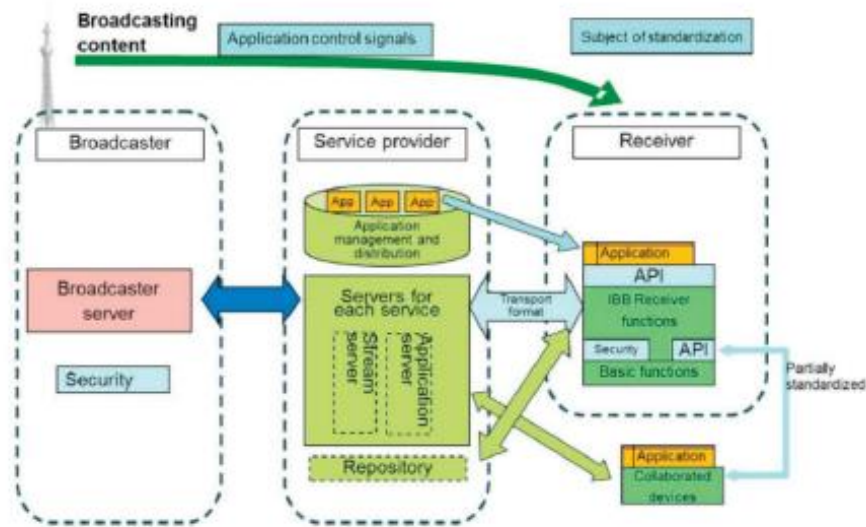
Untuk menyediakan sistem berbasis HTML yang terbuka dan tersandarisasi yang memungkinkan pengembangan konten yang efisien dengan memanfaatkan layanan *on-line* yang ada *independen* dari produsen atau *operator platform* tertentu. Untuk menggunakan sebanyak mungkin komponen standar yang sudah ada untuk memperoleh keuntungan yang banyak. Dalam penetapannya hanya seperangkat fitur minimum yang diperoleh untuk semua kebutuhan dasar, yang memungkinkan integrasi yang mudah dalam *platform* perangkat keras yang ada dan penerimaan di seluruh *value-chain*. Mengizinkan kombinasi semua jaringan distribusi penyiaran dengan teknologi internet. Memungkinkan pembuatan layanan IBB menggunakan layanan siaran dan sumber daya tambahan dari internet pada saat bersamaan. Untuk memberikan potensi kepada penerus Teletext dan untuk menghindari penguasaan sinyal TV oleh layanan web pihak ketiga yang tidak sah. Dapat menerapkan layanan radio (Gavrila et al., 2021).



Gambar 2. Arsitektur Hybridcast.

IPTV forum Jepang mempublikasikan spesifikasi teknis *hybridcast* v.1.0 pada bulan Maret 2013, yang mewujudkan generasi baru layanan TV yang terhubung. Fitur *hybridcast* yang luas biasa adalah adopsi HTML5, standar web terbaru W3C yang dikembangkan, dalam standar TV yang terhubung dengan siaran-sentris. Pada September 2014, IPTV forum Jepang mengeluarkan spesifikasi teknis *hybridcast* v.2.0 dengan tambahan fitur seperti MPEG-DASH, layanan *streaming* standar dan non-siaran yang berorientasi adaptif (Vlv et al., 2019).





Gambar 3. Keseluruhan Sistem Model *Hybridcast*.

Model sistem konseptual keseluruhan dari *hybridcast* yang ditunjukkan pada gambar 3. memperlihatkan bahwa untuk memperluas layanan secara mudah dengan memungkinkan pihak ketiga selain penyelenggara penyiaran untuk mengantisipasi dalam rantai layanan sebagai penyedia layanan yang mengembangkan dan mendistribusikan aplikasi. Ketika penyelenggara penyiaran mempunyai beberapa kontrol ke penyedia layanan untuk layanan yang berbentuk layanan penawaran ada di skenario sentris penyiar. *Broadcaster* menyediakan sinyal penyiaran digital, metadata dan konten video ke *service provider*. *Service provider* adalah tokoh utama yang menyediakan layanan sistem *hybridcast*. Penyedia layanan menghasilkan konten dan aplikasi untuk menyediakan layanan, dan mengoperasikan server untuk mengaktifkan setiap layanan. *Receiver* menyediakan fungsi untuk mengeksekusi aplikasi, membuat presentasi yang dikontrol oleh aplikasi, dan berinteraksi dengan pengguna serta menerima dan menyajikan siaran konten.

Ada dua jenis utama layanan media *streaming* yang dapat dibedakan: terkelola dan tidak terkelola. Di satu sisi, layanan terkelola biasanya beroperasi di dalam lingkungan taman bertembok (terkendali) (misalnya, *Televisi Protokol Internet* atau IPTV). Mereka terutama mengandalkan *streaming* berbasis *push*, dengan membuat menggunakan protokol standar Protokol Transportasi Waktu Nyata (RTP) dan pendampingnya RTP *Control Protocol* (RTCP) (Casner, 2017). Mereka sangat cocok untuk layanan yang sensitif terhadap penundaan dan interaktif layanan. Di sisi lain, layanan yang tidak dikelola dapat beroperasi di seluruh dunia, dan terutama bergantung pada solusi HTTP *Adaptive* Solusi HTTP *Adaptive Streaming* (HAS). Keuntungan utama mereka adalah kemampuan beradaptasi, skalabilitas, keandalan, di mana-mana, dan biaya efisiensi. Dalam konteks ini, vendor dan standarisasi yang berbeda telah menentukan solusi HAS mereka sendiri, seperti HTTP *Streaming Langsung* (HLS) oleh *Apple*, *Adaptif Dinamis Streaming* melalui HTTP (DASH) oleh ISO/IEC dan MPEG, *HTTP Dynamic Streaming* (HDS) oleh *Adobe*, dan *Microsoft Smooth Streaming* (MSS) oleh *Microsoft*. Solusi-solusi HAS berada di bawah perbaikan tanpa henti dan semakin banyak diadopsi untuk pengiriman media *broadband* (misalnya, DASH telah diadopsi oleh Standar HbbTV, dan digunakan di banyak media populer, seperti *Netflix* dan *YouTube*) (Boronat et al., 2018).

## 2.2. Parameter Quality of Service

*Quality of Service* (QoS) adalah ukuran yang mengukur kualitas jaringan dan bertujuan untuk menentukan karakteristik dan properti dari sebuah layanan. QoS mengelola serangkaian atribut kinerja yang ditentukan dan dikaitkan dengan layanan. QoS mengacu pada kemampuan jaringan untuk memberikan layanan yang baik pada lalu lintas jaringan tertentu dengan menggunakan berbagai teknologi (Ades Nugraha, 2021)(Dhika & Tyas, 2021).

Berikut beberapa karakteristik untuk melakukan pengukuran kualitas layanan dalam sebuah jaringan internet :

### a. *Throughput*

*Throughput* yaitu kecepatan (*rate*) transfer data efektif, yang diukur dalam bps (*bit per second*). *Troughput* adalah jumlah total kehadiran paket yang sukses yang diamati pada tujuan selagi interval waktu tertentu dibagi oleh durasi interval waktu tersebut (Fahmi, 2018).

Persamaan perhitungan *Througput*:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Paket data di terima}}{\text{Lama pengamatan}} \quad (1)$$

b. *Packet Loss*

*Packet loss* adalah satu parameter yang menggambarkan suatu kondisi yang menunjukkan jumlah total paket yang hilang dapat terjadi karena *collision* dan *congestion* pada jaringan (Wulandari, 2016).

Persamaan perhitungan *Packet Loss*:

$$\text{Packet Loss} = \frac{\text{Paket data di terima}}{\text{Paket data yang dikirim}} \times 100\% \quad (2)$$

c. *Delay (Latency)*

*Delay (Latency)* atau waktu tunda dapat mempengaruhi kualitas tampilan pada Hybrid TV. Semakin rendah *latency*, semakin baik kualitas tampilan pada Hybrid TV.

Persamaan perhitungan *Delay*:

$$\text{Rata - rata Delay} = \frac{\text{Total Delay}}{\text{Total Paket yang di terima}} \quad (3)$$

$$\text{Delay} = \text{Total paket yang di terim} - \text{rata rata delay} \quad (4)$$

d. *Jitter*

*Jitter* atau variasi dalam waktu antar-paket data dapat mempengaruhi kualitas tampilan pada Hybrid TV. Semakin kecil nilai *jitter*, semakin baik kualitas tampilan pada Hybrid TV.

Persamaan perhitungan *Jitter* :

$$\text{Jitter} = \frac{\text{Total variasi delay}}{\text{Total paket yang di terima}} \quad (5)$$

$$\text{Total variasi Delay} = \text{delay} - (\text{rata - rata delay}) \quad (6)$$

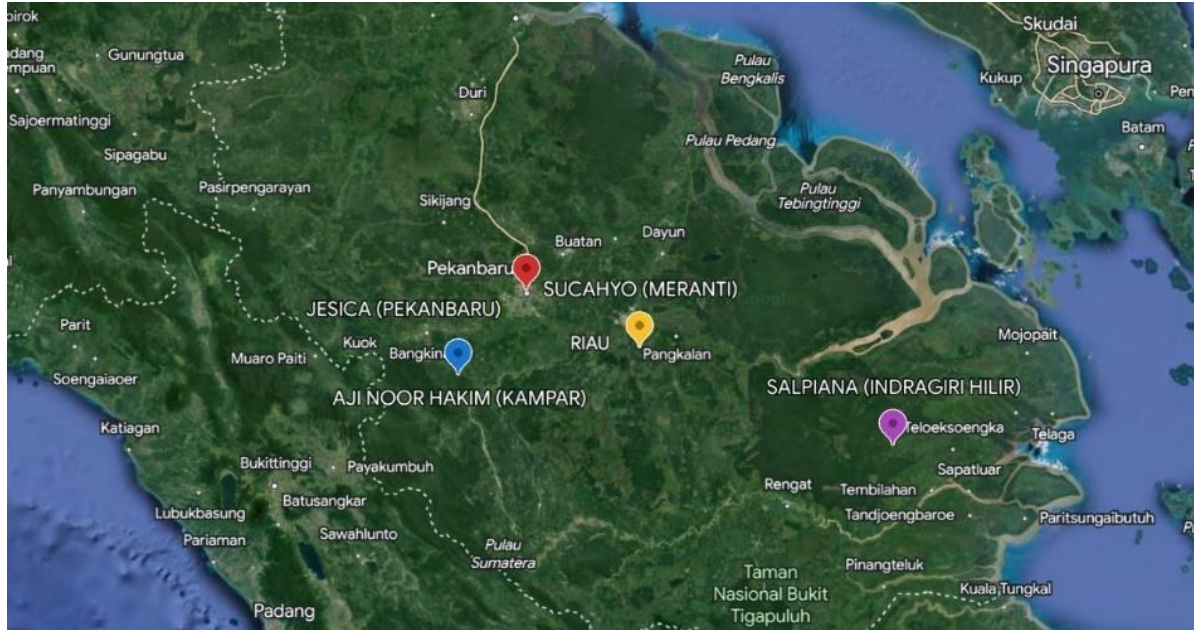
### 2.3. *Quality of Experience*

*Quality of experience* atau (QoE) merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menggambarkan tingkat kepuasan pengguna dalam menggunakan layanan ataupun aplikasi tertentu. Pada *quality of experience* ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kecepatan, keandalan, latensi, kualitas audio/video, responsivitas antarmuka dan faktor-faktor pengalaman pengguna lainnya (Reiter et al., 2014).

Perlu untuk diketahui bahwa perhitungan untuk QoE dapat bervariasi tergantung pada jenis layanan yang akan dianalisis. Metrik yang relevan untuk mengukur *quality of experience* dalam *video streaming*. Dalam penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengguna dengan mempertimbangkan perseptif subjektif pengguna dan arah pandangan mata. Dari perseptif subjektif ini peneliti bertujuan untuk mengumpulkan wawasan mengenai gangguan dan utilitas yang diberikan pada layanan HbbTV. Pada pengguna layanan HbbTV belum pernah mengalami berbagai kasus pengguna layanan yang sebelumnya, karena hingga tanggal survei berlangsung, pengguna belum benar-benar diimplementasikan menggunakan teknologi *hybrid*. Desain studi korelasional atau deskriptif dan *cross sectional* digunakan untuk melakukan penelitian ini. Informasi dari peserta diperoleh tanpa memanipulasi lingkungan, dengan mengumpulkan bukti dunia nyata. Selain itu, penelitian ini hanya melibatkan interaksi satu kali dengan para pengguna, dengan mengumpulkan informasi yang ditargetkan melalui kuesioner *online anonin* (Boronat et al., 2018).

### 2.4. *Layanan dan fitur pada Hbb TV*

Pada penelitian ini, video dari *youtube* diakses secara *streaming* dengan menggunakan jaringan yang tersedia. Lalu lintas data di *capture* menggunakan *wireshark*. Data yang terdapat di *wireshark* kemudian di filter. Data yang sudah di filter kemudian di hitung nilai *throughput*, *packet loss*, *delay* dan *jitter*. Berikut merupakan hasil pengujian yang dilakukan pada 5 hari yang berbeda dan dengan 4 lokasi yang berbeda. filter kemudian di hitung nilai *throughput*, *packet loss*, *delay* dan *jitter*. Berikut merupakan hasil pengujian yang dilakukan pada 5 hari yang berbeda dan dengan 4 lokasi yang berbeda. Penelitian ini dilakukan pada 4 tempat berbeda yang berada di Provinsi Riau, Indonesia. Adapun ke empat tempat berbeda dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4. Sebaran Wilayah Penelitian HbbTV.

Dari gambar 4. Bahwa sebaran Wilayah Penelitian HbbTV di Provinsi Riau. Dibagi menjadi 4 wilayah yaitu, Indragiri Hilir, Pekanbaru, Meranti dan Kampar.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Quality of Service

Dapat dilihat bahwa sebaran lokasi Penelitiannya berada di empat Kabupaten Provinsi Riau, Indonesia, Dengan empat lokasi yang berbeda-beda menghasilkan data yang bervariasi. Parameter yang diacu yaitu *delay*, *throughput*, *jitter* dan *packet loss*. Dari empat wilayah sebaran penelitian didapatkan hasil data penelitian berupa parameter berikut ini.

Tabel 1. Hasil Perhitungan untuk Wilayah Indragiri Hilir.

Pengukuran	HARI					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
<i>Throughput</i>	3709 bps	5983 bps	6783 bps	6767 bps	7262 bps	27536,8 bps
<i>Packet loss</i>	0,001 %	0,007 %	0,001 %	0,003 %	0,001 %	0,0122 %
<i>Delay</i>	2,1 ms	1,3 ms	2,1 ms	2,9 ms	0,7 ms	7,42 ms
<i>Jitter</i>	0,0009 ms	1,33 ms	0,0001 ms	1,0004 ms	0,0000 ms	1,3315 ms

Dapat dilihat pada tabel 1. sudah mendapatkan *packet loss*, namun di hari berikutnya terjadi peningkatan waktu untuk mendapatkan *packet loss*. Hal ini dapat terjadi sebab pada hari pertama tiba di lokasi penelitian. Langsung melakukan percobaan dengan menggunakan *software wireshark* yang dimana untuk menonton *streaming video* menggunakan *Youtube*. Dalam konteks ini, *throughput*, *packet loss*, *delay* dan *jitter* merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur dan menganalisis kinerja jaringan. Pada tabel 1 bahwa *packet loss* yang dihasilkan rata-rata berada pada 0,01% dengan tertinggi terjadi di hari kedua penelitian. Hal ini terjadi karena pengaruh cuaca pada saat hari kedua terjadi hujan. Menyebabkan kualitas jaringan menjadi buruk pada hari kedua.

Tabel 2. Hasil Perhitungan untuk Wilayah Pekanbaru.

Pengukuran	HARI					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
<i>Throughput</i>	68 bps	189 bps	274 bps	2382 bps	1561 bps	3225,2 bps
<i>Packet loss</i>	1,4%	0,1%	0,2%	2,6%	0%	4,3%
<i>Delay</i>	71,3 ms	31,4 ms	23,9 ms	3,5 ms	4,7 ms	131,04 ms
<i>Jitter</i>	0,157574 ms	5,09x10 <sup>3</sup> ms	6467,01 ms	56766,61 ms	2029,55 ms	1,76x10 <sup>4</sup> ms

Dapat dilihat pada tabel 2. pada *delay* yang terjadi pada wilayah Pekanbaru lebih besar yaitu mencapai 71,3 dibandingkan dengan wilayah lainnya. Selain itu *throughput* yang dihasilkan selama lima hari penelitian mengalami peningkatan dari hari ke harinya. Sehingga mendapatkan nilai rata-rata untuk *throughput* yaitu 3225,2.

Tabel 3. Hasil Perhitungan untuk Wilayah Kepulauan Meranti.

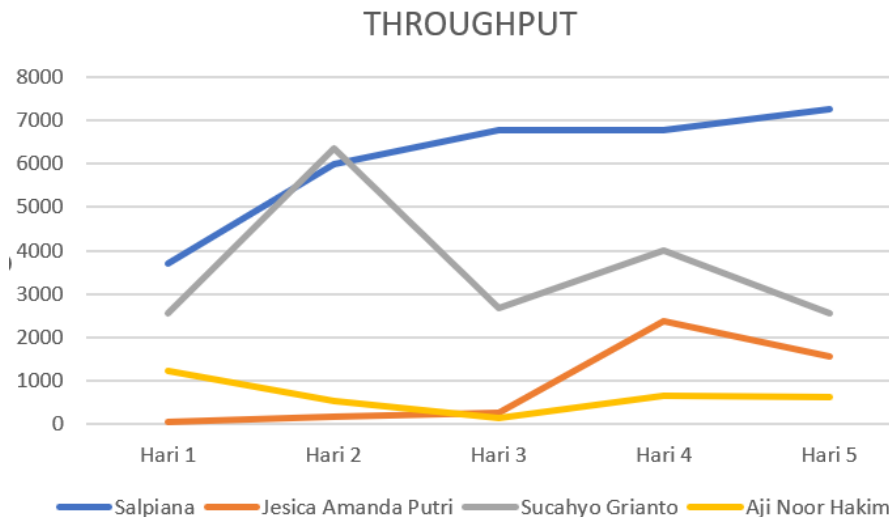
Pengukuran	HARI					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
<b>Throughput</b>	2528 bps	6343 bps	2667 bps	4014 bps	2557 bps	16093,4 bps
<b>Packet loss</b>	0,003%	0,418%	0,237%	0,007%	0,021%	0,6692%
<b>Delay</b>	30,1 ms	1 ms	1 ms	1,4 ms	0,3 ms	33,56 ms
<b>Jitter</b>	5,62 ms	15,54 ms	40,7 ms	12,1 ms	11,2 ms	76,2 ms

Dapat dilihat pada tabel 3. bahwa *packet loss* yang untuk Kepulauan Meranti merupakan yang terbesar dibandingkan dengan wilayah lainnya. Selain itu *delay* yang untuk wilayah Kepulauan Meranti cukup tinggi yaitu dengan rata-rata *delay* selama lima hari penelitian di Kepulaun Meranti yaitu sebesar 33,56.

Tabel 4. Hasil Perhitungan untuk Wilayah Kampar.

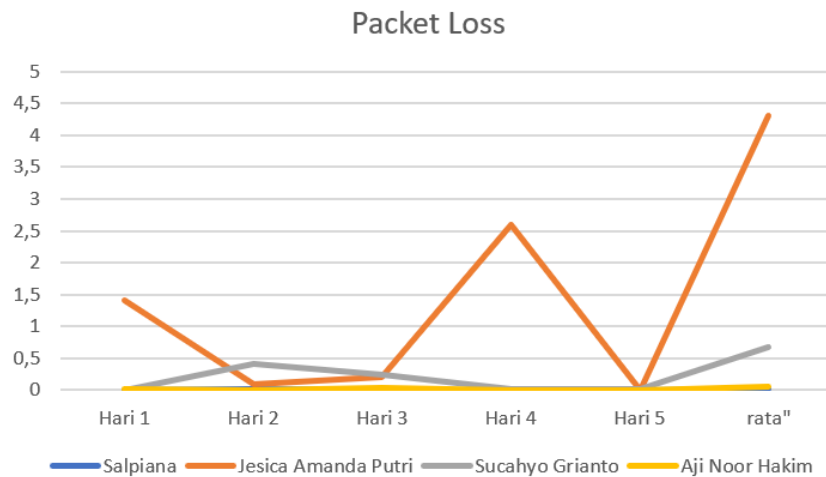
Pengukuran	HARI					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
<b>Throughput</b>	1219 bps	542 bps	152 bps	668 bps	623 bps	2705,6 bps
<b>Packet loss</b>	0,013%	0,003%	0,042%	0,003%	0,003%	0,0616%
<b>Delay</b>	5,6 ms	15,6 ms	34,3 ms	11,9 ms	11,2 ms	69,44 ms
<b>Jitter</b>	5,62 ms	15,54 ms	40,7 ms	12,1 ms	11,2 ms	76,2 ms

Dari data tabel 4. hasil rata-rata untuk wilayah Kampar dapat dilihat bahwa nilai *delay* untuk wilayah Kampar lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah kepulauan meranti. *Packet loss* untuk wilayah Kampar di hari penelitian ketiga mengalami peningkatan yang pesat sebesar 0,01% dibandingkan dengan hari-hari lainnya, ini disebabkan dengan oleh adanya pemadaman listrik untuk wilayah pandoa, Kampar.



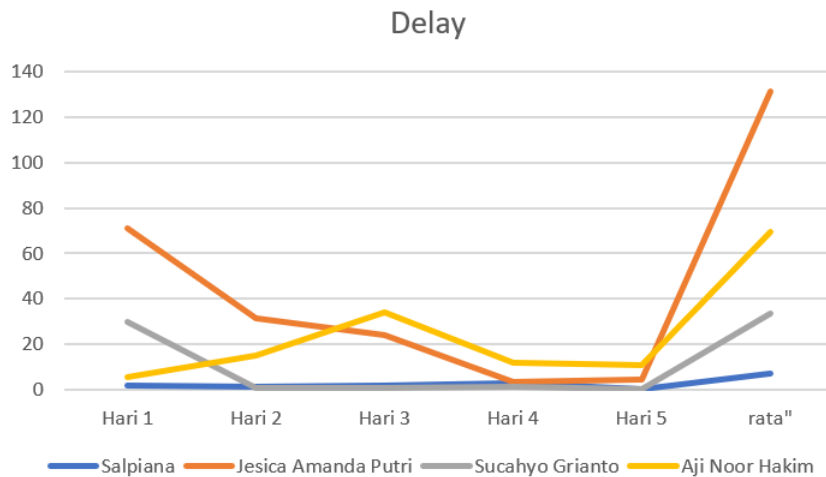
Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai Throughput.

Dari gambar 5 dapat diketahui bahwa nilai *troughput* untuk wilayah Salpiana lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya. Disusul dengan Sucahyo Grianto, Jessica Amanda Putri, dan Aji Noor Hakim.



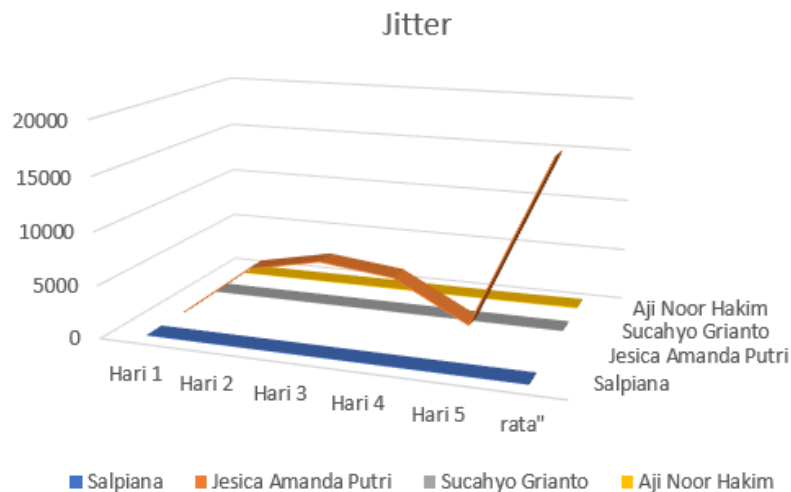
Gambar 6. Grafik Perbandingan Nilai *Packet loss*.

Dari gambar 6 dapat diketahui bahwa nilai untuk Jesica Amanda Putri lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya. Disusul dengan Sucahyo dan nilai yang terendah ada untuk Salpiana pada *Packet Loss*



Gambar 7. Grafik Perbandingan *Delay*.

Dari gambar 7. Diketahui bahwa nilai terendah *delay* pada Salpiana di Indragiri Hilir, dan untuk nilai tertinggi dipegang oleh Jesica Amanda Putri yang ada di Pekanbaru.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Jitter.

Dari gambar 8. Diketahui bahwa nilai tertinggi berada pada Pekanbaru tempat peneliti Jesica sedangkan untuk 3 wilayah lainnya berada pada garis terendah.

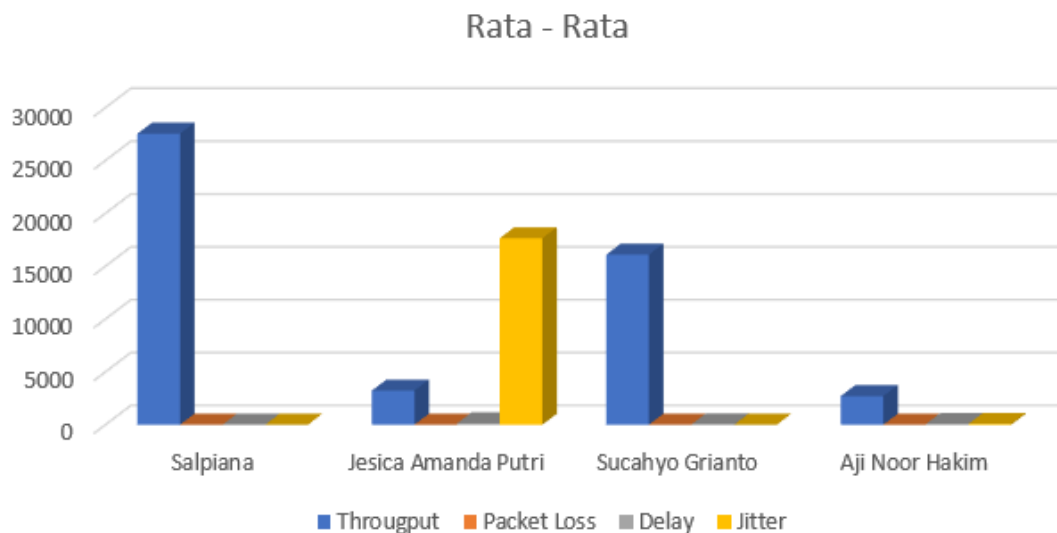
Tabel 5. Rata-Rata Parameter QoS untuk Seluruh Wilayah.

Wilayah	Throughput (bps)	Packet loss (%)	Delay (ms)	Jitter (ms)
Indragiri Hilir	27536,8	0,0122	7,42	1,33315163
Pekanbaru	3225,2	4,3	131,04	1,76x10 <sup>4</sup>
Kepulauan Meranti	16093,4	0,6692	33,56	6,5978
Kampar	2705,6	0,0616	69,44	76,2

Dari tabel 5. didapatkan hasil rata-rata nilai yang didapatkan dari empat wilayah sebaran penelitian yang dilakukan di provinsi Riau. Indragiri Hilir mempunyai *throughput* yang tinggi dibandingkan dengan yang lainnya hal ini dikarenakan beberapa faktor utama yaitu *bandwidth* yang cukup baik, kualitas jaringan yang baik, penggunaan protokol efisien, pemilihan perangkat jaringan yang tepat, pengaturan jaringan yang optimal, pengelolaan lalu lintas yang efektif dan penggunaan teknologi tingkat tinggi. Untuk wilayah penelitian Pekanbaru mengalami *jitter* yang tinggi mencapai  $1,76 \times 10^4$  hal ini terjadi karena kepadatan lalu lintas jaringan, gangguan, gangguan dan konflik jaringan, pengalihan paket jaringan, kualitas jaringan yang rendah, kelebihan beban jaringan, masalah perangkat jaringan dan *protocol* jaringan yang tidak efisien.

Penggunaan *protocol* jaringan yang tidak sesuai atau pengaturan protokol yang tidak tepat dapat menyebabkan *jitter* yang tinggi. Hasil rata-rata pengukuran QoS dari 4 wilayah yang berbeda dimana mendapatkan *throughput* 47531,8 bps, *Packet loss* 4,9968%, *delay* 189,38 ms dan *jitter* 17700 ms. Penelitian yang dilakukan di wilayah kepulauan meranti mengalami kenaikan yang signifikan pada *packet loss* dibandingkan dengan 3 sebaran wilayah yang lainnya. Penyebab utamanya berbagai hal salah satunya adalah terjadi kepadatan lalu lintas, gangguan jaringan, konflik dan kegagalan perangkat jaringan, *overoad* pada *buffer* atau antrean, kualitas sinyal jaringan yang rendah, kelebihan beban pada server atau aplikasi, gangguan pada jalur pengiriman dan pengaturan dan konfigurasi yang tidak tepat.

Jaringan mengalami kepadatan lalu lintas yang tinggi, dengan jumlah paket data yang melebihi kapasitas jaringan yang tersedia, maka terjadinya *packet loss* yang dapat menjadi lebih mungkin. Ketika kapasitas jaringan tidak dapat menampung jumlah paket yang dikirim, beberapa paket dapat hilang atau diabaikan, yang menyebabkan *packet loss*. *Buffer* atau antrean pada perangkat jaringan yang terlalu penuh, *packet loss* dapat terjadi. Ketika *buffer* atau antrean tidak dapat menampung semua paket yang masuk, paket yang melebihi kapasitas akan ditolak atau dihapus, yang menyebabkan *packet loss*. Jaringan pada wilayah penelitian ke empat yaitu Kampar. Tidak banyak mengalami kenaikan yang signifikan. Cenderung lebih kepada rata-rata.



Gambar 9. Rata-Rata Parameter QoS.

Pada gambar 9. untuk rata-rata parameter QoS dapat dilihat diagram yang menampilkan nilai yang cukup *signifikan* terdapat pada *throughput* dan *jitter*. Dengan melihat gambar 9 dapat diketahui bahwa nilai grafik yang mengalami kenaikan yang *signifikan* pada *throughput* dari peneliti Salpiana dan untuk nilai tertinggi *jitter* dari peneliti Jesica yang bertempat di wilayah Pekanbaru, dan untuk yang terendah berada pada peneliti Aji yang terletak pada wilayah Kampar. Pada tabel 6. Diperlihatkan persentase dari QoS (Wulandari, 2016).



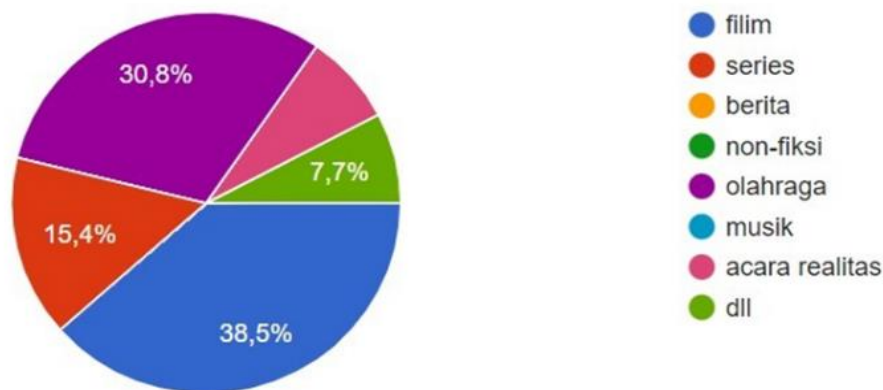
Tabel 6. Persentase dari Nilai QoS.

Nilai	Parameter (%)	Indeks
3,8 - 4	95 - 100	Sangat Memuaskan
3 - 3,79	75 - 94,75	Memuaskan
2 - 2,99	50 - 74,75	Kurang Memuaskan
1 - 1,99	25 - 49,75	Jelek

Hasil Analisis QoS, dapat dijadikan sebagai rekomendasi untuk implementasi fisik jaringan internet yang harapan kedepannya bisa menunjang penambahan layanan-layanan yang dapat menunjang kegiatan kantor. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran terhadap jaringan internet dari parameter *Delay/Latency*, *Jitter*, *Packet loss* dan *Throughput*. Dengan rujukan tabel 6. Dapat diketahui bahwa untuk daerah yang memiliki nilai memuaskan adalah daerah Indragiri dengan indeks Sangat memuaskan, lalu disusul oleh meranti, kemudian Pekanbaru dan Kampar. Dengan analisa bahwa jumlah pengguna atau penduduk yang untuk wilayah Kampar mencapai 898.840 jiwa sedangkan untuk wilayah Indragiri Hilir hanya 663.248 jiwa (riau.bps.go.id 2023) dengan pertimbangan kepadatan penduduk tersebut menjadi salah satu penyebab kekuatan jaringan pada wilayah tersebut rendah. Selain itu topografi wilayah atau sebaran penduduk yang tidak merata menjadi salah satu penyebab lemahnya jaringan di suatu daerah. Dikarenakan pembangunan cenderung dilakukan pada wilayah-wilayah yang memiliki penduduk yang merata diseban kabupatennya. Dan untuk wilayah yang tidak berkembang cenderung tertinggal dan kurang diperhatikan oleh pemerintah.

### 3.2. Quality of Experience

HbbTV adalah teknologi yang menggabungkan siaran televisi tradisional (seperti *TV Terrestrial*, *kabel* atau *satelit*) dengan konten dan layanan internet, memberikan pengalaman menonton yang interaktif dan lebih kaya bagi para pengguna. Untuk peneliti mencoba untuk melakukan penelitian terhadap QoE untuk HbbTV pada siaran yang sering ditonton oleh masyarakat. Untuk tontonan siaran yang sering di gemari oleh masyarakat terdapat pada gambar 10.



Gambar 10. Jenis Tontonan Film yang Banyak Disukai.

Pada gambar 10. menjelaskan bahwa sekitar 38,5% orang akan memilih menonton film, diikuti dengan acara olahraga yang mencapai 30,8% selebihnya terbagi pada acara series, berita, *non-fiksi*, musik dan acara realitas. Namun, dari banyak partisipan ada beberapa yang menyatakan bahwa saat menonton mengalami gangguan seperti terjadinya *delay* sehingga mengganggu konsumen dalam menikmati layanan yang diberikan. Pada gambar 9 ditampilkan beberapa harapan konsumen untuk HbbTV.

Tabel 7. Survey Pertanyaan Menggunakan Gform.

No	Pertanyaan
1	Jenis Kelamin, Usia, Tingkat Studi, Pekerjaan dan genre TV yang disukai ?
2	Pada slide 2 Diberikan pertanyaan mengenai kualitas video, alasan tertarik menonton, kelemahan dan harapan yang diinginkan oleh konsumen terhadap siaran TV tersebut untuk kedepannya?
3	Pada slide 3 diberikan pertanyaan tingkat keseringan menonton acara tv tersebut, kelemahan dan ketertarikan terhadap acara Tv tersebut dan kasus memberikan keterlibatan terhadap penonton terhadap acara TV tersebut serta apakah tanyangan tersebut memberikan dampak manfaat terhadap penonton.?

*Kuesioner* ini disebarakan sejak tanggal 31 Maret 2023 dan ditutup pada 25 April 2023. Dengan penyebarannya dilakukan dengan beberapa media sosial yaitu *WhatsApp*, *Instagram* dan media sosial lainnya. Dari sebaran *kuisisioner* didapatkan bahwa konsumen HbbTv berharap agar layanan HbbTV lebih ditingkat lagi, menampilkan *subtitle* dan mengharapakan *audio line* aslinya dengan yang ditayangkan lebih disinkronkan kembali. Dari penyebaran *kuesioner*



didapatkan bahwa alasan utama masyarakat tertarik menggunakan HbbTV adalah kualitas gambar dan suara yang lebih baik, pengalaman menonton yang lebih interaktif karena dapat mengakses aplikasi seperti *game*, *Youtube* dan *Netflix*, serta memudahkan dalam akses konten video dan *music* dalam *streaming* secara langsung dari layar televisi tidak membutuhkan perangkat seperti Hp dan Komputer.

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian *Quality of Service* dan *Quality of Experience* untuk HbbTV dapat diambil kesimpulan bahwa QoS memberikan gambaran tentang kondisi jaringan di empat wilayah penelitian di Provinsi Riau. Faktor-faktor seperti ketersediaan *bandwidth*, kualitas jaringan, penggunaan protokol yang tepat, dan pengaturan jaringan mempengaruhi kualitas jaringan di setiap wilayah. Rekomendasi dari penelitian ini dapat dijadikan panduan untuk meningkatkan infrastruktur dan teknologi jaringan di wilayah-wilayah tertentu yang membutuhkan perhatian lebih guna menghadapi tuntutan layanan yang semakin meningkat.

Penelitian terhadap QoE untuk HbbTV pada siaran yang sering ditonton oleh masyarakat, ditemukan bahwa sekitar 38,5% orang lebih memilih menonton film, diikuti oleh acara olahraga dengan 30,8%. Namun, beberapa partisipan mengalami gangguan saat menonton, seperti *delay* yang mengganggu pengalaman menonton. Dari *kuesioner* yang disebar melalui media sosial, beberapa harapan konsumen untuk HbbTV adalah peningkatan layanan dengan tampilan *subtitle* yang lebih baik dan sinkronisasi *audio line* dengan tayangan yang lebih akurat. Alasan utama masyarakat menggunakan HbbTV adalah karena kualitas gambar dan suara lebih baik. Pengalaman menonton yang interaktif dengan akses aplikasi seperti *game*, *YouTube*, dan *Netflix* serta kemudahan akses konten video dan musik secara langsung dari layar televisi tanpa perlu perangkat tambahan. Dengan demikian, pengguna HbbTV berharap untuk pengalaman menonton yang lebih baik dan interaktif, serta peningkatan layanan untuk memenuhi kebutuhan dan preferensi pengguna.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan masukan dan saran yang sangat berharga dalam menganalisa pengukuran parameter *Quality of Service* dan *Quality of Experience* pada layanan HbbTV. Semua bantuan dan dukungan dari berbagai pihak sangat berarti bagi kelancaran penelitian ini.

### Daftar Pustaka

- Ades Nugraha, B. T. (2021). *Analisa Kualitas Internet Pada Jaringan Fiber Optik Pt.Alam Permai*. 97–106.
- Boronat, F., Montagud, M., Marfil, D., & Luzon, C. (2018). Hybrid Broadcast/Broadband TV Services and Media Synchronization: Demands, Preferences and Expectations of Spanish Consumers. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 64(1), 52–69. <https://doi.org/10.1109/TBC.2017.2737819>
- Casner, S. L. (2017). *RTP : A Transport Protocol for Real-Time Applications*. July 2003.
- Dhika, H., & Tyas, S. A. (2021). Quality of Services (Qos) Untuk Meningkatkan Skema Dalam Jaringan Optik. *J I M P - Jurnal Informatika Merdeka Pasuruan*, 5(2). <https://doi.org/10.37438/jimp.v5i2.268>
- Dominguez, A., Agirre, M., Florez, J., Lafuente, A., Tamayo, I., & Zorrilla, M. (2018). Deployment of a Hybrid Broadcast-Internet Multi-Device Service for a Live TV Programme. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 64(1), 153–163. <https://doi.org/10.1109/TBC.2017.2755403>
- Fahmi, H. (2018). *Analisis QOS (Quality of Service) Pengukuran Delay, Jitter, Packet Lost Dan Throughput Untuk Mendapatkan Kualitas Kerja Radio Streaming Yang Baik*. 7.
- Gavrila, C., Popescu, V., Fadda, M., Anedda, M., & Murrioni, M. (2021). On the Suitability of HbbTV for Unified Smart Home Experience. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 67(1), 253–262. <https://doi.org/10.1109/TBC.2020.2977539>
- Gavrila, Cristinel, Popescu, V., Fadda, M., Anedda, M., & Murrioni, M. (2021). On the Suitability of HbbTV for Unified Smart Home Experience. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 67(1), 253–262. <https://doi.org/10.1109/TBC.2020.2977539>
- Jalal, L., Anedda, M., Popescu, V., & Murrioni, M. (2018). QoE Assessment for Broadcasting Multi Sensorial Media in Smart Home Scenario. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB, 2018-June*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/BMSB.2018.8436875>
- Marfil, D., Boronat, F., Sapena, A., & Vidal, A. (2019). Synchronization Mechanisms for Multi-User and Multi-Device Hybrid Broadcast and Broadband Distributed Scenarios. *IEEE Access*, 7, 605–624. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885580>
- Musdar saleh, I. K. (2020). *Analisa Penerapan Bisnis Integrated*. 1–7.
- Peneliti, T., Sdppi, P., & Penelitian, B. (2018). *Kajian Integrated Broadcast Broadband ( Ibb ) Di Indonesia*.
- Porcu, S., Floris, A., Anedda, M., Popescu, V., Fadda, M., & Atzori, L. (2020). Quality of experience eye gaze analysis on HbbTV smart home notification system. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems*

- Reiter, U., Brunnström, K., De Moor, K., Larabi, M. C., Pereira, M., Pinheiro, A., You, J., & Zgank, A. (2014). Factors Influencing Quality of Experience. *T-Labs Series in Telecommunication Services*, 55–72. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02681-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02681-7_4)
- Riau.bps.go.id. Penduduk kabupaten/kota (jiwa), 2021-2023. Online at <https://riau.bps.go.id/indicator/12/21/1/penduduk-kabupaten-kota.html>, accessed 15 July 2023
- Sotelo, R. (2018). An Integrated Broadcast-Broadband System That. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 64(September), 1. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8260541>
- Vlv, Q. D. O., Wkh, R. L., & Urdgfdvw, E. (2019). *Analysis of the Hybrid Broadcast Broadband Television Standard-HbbTV*. September, 23–25.
- Wulandari, R. (2016). Analisis QOS (*Quality of Service*) Pada Jaringan Internet (Studi Kasus : UPT Loka Uji Teknik Penambangan Jampang Kulon – LIPI). *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, 2(2), 162–172. <https://doi.org/10.28932/jutisi.v2i2.454>

## Analisis Fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) Akibat Gempa Palu dengan Formosat-3 / COSMIC

Atika Sari<sup>1</sup> dan Mokhamad Nur Cahyadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, ITS, Surabaya, Indonesia

[atika.sari@eng.unila.ac.id](mailto:atika.sari@eng.unila.ac.id), [cahyadi\\_geod@yahoo.com](mailto:cahyadi_geod@yahoo.com)

### Abstrak

Gempa bumi merupakan getaran yang terjadi akibat dari adanya pergeseran lempeng. Gempa bumi yang terjadi akan menimbulkan 3 macam gelombang dan salah satunya adalah gelombang akustik yang bergerak secara vertikal dan mempengaruhi *electron* yang bergerak bebas di lapisan ionosfer. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) akibat gempa dengan menggunakan data FORMOSAT-3 / COSMIC. Metode yang digunakan adalah analisis waktu serta lokasi terjadinya fluktuasi TEC dari hasil *plotting* data FORMOSAT-3 / COSMIC terhadap waktu dan lokasi terjadinya gempa. Data yang digunakan adalah data netCDF yang berisi informasi nilai TEC dan waktu okultasi yang pada FORMOSAT-3 / COSMIC data tersebut diambil dengan menggunakan Teknik Global *Positioning System Radio Occultation* (GPSRO). Hasil dari Pada Gempa Palu 28 September 2018 diperoleh 28 okultasi dengan waktu anomali 10 menit setelah gempa dan jarak dengan episenter adalah  $\pm 3700$  km.

Kata kunci: ionosfer, gempa bumi, formosat-3/COSMIC, okultasi

### Abstract

Earthquakes are vibrations that occur as a result of plate shifts. When an earthquake occurs, it will cause three kinds of waves, and one of them is an acoustic wave that moves vertically and affects electrons that move freely in the ionosphere. This study aims to analyze Total Electron Content (TEC) fluctuations due to earthquakes using FORMOSAT-3 / COSMIC data. The method used is the analysis of the time and location of the occurrence of TEC fluctuations from the results of plotting the FORMOSAT-3 / COSMIC data against the time and location of the earthquake. The data used is netCDF data, which contains information on the TEC value and occultation time which on FORMOSAT-3 / COSMIC, the data was taken using the Global Positioning System Radio Occultation (GPSRO) technique. The results of the Palu earthquake on September 28, 2018 obtained 28 occultations with an anomaly time of 10 minutes after the earthquake and the distance to the epicenter was  $\pm 3700$  km.

Keywords: ionosphere, earthquake, formosat-3/COSMIC, occultation

### 1. Pendahuluan

Gempa merupakan getaran sesaat yang terjadi akibat pergeseran kerak bumi (Andreas, dkk. 2006). Semakin besar magnitudo gempa yang terjadi maka gangguan yang akan dihasilkan pada atmosfer akan besar juga. Hal ini disebabkan karena besarnya energi tersebut dapat mengganggu densitas elektron yang ada di ionosfer hingga radius 400 km dari pusat gempa (Cahyadi & Heki, 2013). Ada tiga jenis gelombang yang dihasilkan oleh gempa bumi: (1) gelombang akustik yang merambat dengan kecepatan 1 km/s selama  $\pm 10$  menit secara vertikal sampai pada lapisan F ionosfer, (2) gelombang gravitasi merambat dengan kecepatan 0,3 km/s yang ditimbulkan oleh gempa bumi, tsunami dan gerakan besar bumi (3) Gelombang Rayleigh merambat dengan kecepatan 4 km/s, yang ditimbulkan oleh gelombang permukaan dan merambat dari pusat gempa secara horizontal (Muslim, 2015). Pemantauan efek dari gempa bumi terhadap ionosfer dalam penelitian menggunakan satelit FORMOSAT -3 / *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate* (COSMIC). Misi dari mikrosatelit tersebut adalah untuk peramalan cuaca, pemantauan iklim, dan penelitian atmosfer, ionosfer dan geodesi. Mikrosatelit tersebut merupakan eksperimen sains Taiwan – AS yang berkolaborasi untuk mengorbitkan enam konstelasi mikrosatelit di *Low Earth Orbital* (LEO) yang memiliki ketinggian 750-800 km. Masing-masing satelit terdiri dari misi yaitu : *GPS Occultation Experiment* (GOX), *Tiny Ionospheric Photometer* (TIP) dan *Tri-Band Beacon* (TBB). GOX berfungsi untuk mengumpulkan sinyal *Global Positioning System* (GPS) untuk studi atmosfer, ionosfer dan geodesi. TIP dan TBB memberikan informasi distribusi elektron untuk penelitian ionosfer (Wu, dkk. 2005).

Analisis fluktuasi TEC yang terjadi setelah adanya gempa dengan menggunakan FORMOSAT-3/COSMIC. Mengetahui adanya fluktuasi *Total Electron Content* (TEC) dengan menggunakan data FORMOSAT ini dapat digunakan sebagai langkah *Early Warning System* (EWS) apabila pengamatan ini dilakukan secara kontinyu. Salah satu anomali yang terjadi sebelum gempa didapatkan dari pengukuran variasi TEC menggunakan data GPS (Subakti, 2008). Fluktuasi TEC pada *Coseismic Ionospheric Disturbance* (CID) terjadi 15 menit hingga 1 jam setelah terjadinya gempa. Fluktuasi pada CID digunakan

#### Info Makalah:

Dikirim : 06-03-23;  
Revisi 1 : 07-28-23;  
Revisi 2 : 09-16-23;  
Revisi 3 : 10-06-23;  
Revisi 4 : 10-21-23;  
Diterima : 10-24-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 822-3130-1125  
e-mail : [atika.sari@eng.unila.ac.id](mailto:atika.sari@eng.unila.ac.id)

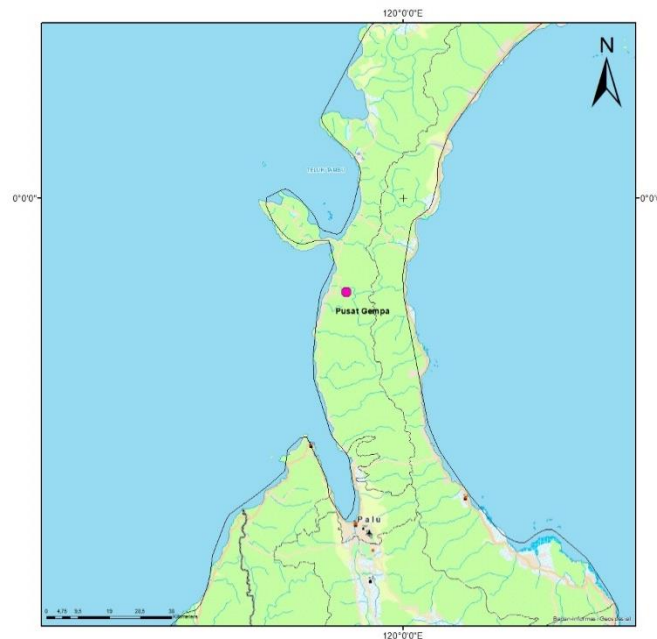
sebagai EWS sebelum tsunami datang. Pergerakan dari gelombang tsunami ini cukup lambat sekitar 600-700 km/jam (Cahyadi & Heki, 2015). Penelitian sebelumnya pernah dilakukan mengenai analisis perubahan ionosfer akibat gempa bumi di Sumatra Barat, pada penelitian tersebut menggunakan GPS untuk analisis perubahan TEC (Saputra, 2017).

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari satelit FORMOSAT-3/COSMIC yang merupakan satelit LEO yang mengorbit setiap hari dan mengalami okultasi sehingga data yang digunakan dapat dimanfaatkan untuk pengamatan fluktuasi TEC. Data netCDF yang dapat diunduh secara gratis dari web TACC ini akan diolah dan ditampilkan dalam *software* Matlab, data yang ditampilkan sudah difilter menurut posisi okultasi pada radius  $\pm 6000$  km dari *episenter*. Lalu dilakukan analisis waktu terjadinya gempa dan adanya fluktuasi elektron sesuai dengan kecepatan rambat gelombang sesuai dengan penelitian Cahyadi & Saputra, (2017) dan jarak terjadinya fluktuasi TEC dan dibandingkan dengan KP indeks untuk mengetahui aktivitas geomagnet pada waktu itu, karena KP index yang tinggi mempengaruhi pergerakan ion bebas di ionosfer. Penggunaan FORMOSAT-3/COSMIC ini dapat bermanfaat apabila data okultasi yang dihasilkan lebih banyak dan rapat, hal ini akan mengisi kekosongan data pada pengukuran GPS *Continuously Operating Reference Station* (CORS). Tujuan penelitian ini untuk mengetahui adanya pengaruh fluktuasi elektron akibat adanya gempa dengan menggunakan FORMOSAT-3/COSMIC yang merupakan satelit LEO dan menggunakan metode RO, yang selanjutnya bisa digunakan untuk metode alternatif EWS selain menggunakan GNSS dan pada satelit ini juga tidak perlu menggunakan pengukuran langsung di lapangan hanya melalui okultasi satelit LEO. Pengamatan menggunakan data ini sebaiknya dilakukan dengan data yang lebih banyak dan secara berkelanjutan agar mengetahui adanya fluktuasi dan sebagai salah satu langkah EWS. Pada penelitian ini hanya berfokus pada gempa palu tanggal 28 september 2018 pukul 10:02:45 UT dengan menggunakan data dari FORMOSAT-3/COSMIC untuk mengetahui adanya fluktuasi TEC pada lapisan ionosfer.

Sulawesi tersusun oleh tatanan tektonik yang masih aktif bergerak dan sering menghasilkan gempa, patahan dan sesar membentang dari Palu sampai dengan sisi timur Sulawesi yang berbatasan dengan Laut Banda (Pusat studi Gempa Nasional, 2017). Gempa Donggala, Sulawesi Tengah menurut BMKG bersumber dari sesar Palu Koro di sekitar selat Makasar. Sesar ini membentang dari Sulawesi tengah sampai selat Karimata. Sesar Palu Koro secara geomorfologi merupakan sesar mendatar (*strike-slip*). Sesar Palu Koro sendiri sudah empat kali gempa yang menimbulkan tsunami yaitu pada tahun 1927 dengan magnitudo 6.3 SR, tahun 1968 dengan magnitudo 7.4 SR, tahun 1996 dengan magnitudo 7.7 SR dan tahun 2018 dengan magnitudo 7.5 SR, dan merupakan sesar dengan pergeseran yang tinggi (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017). Gempa bumi utama di tahun 2018 terjadi pada pukul 10.02 UT, hingga pukul 13.00 UT 22 gempa susulan yang tercatat. Mencegah adanya banyak korban akibat adanya gempa dan tsunami di daerah Palu ini dapat dilakukan pemantauan berkala salah satunya menggunakan GNSS, untuk mengetahui pergerakan sesar. Apabila pengamatan dilakukan secara terus menerus dan kontinu diharapkan dapat mengetahui pola pergerakan untuk mencegah banyaknya korban akibat adanya gempa.

## 2. Metode

Secara umum penelitian ini tergolong pada jenis penelitian deskriptif kuantitatif dengan melakukan analisis dari satu jenis obyek yaitu pada gempa Palu 28 September 2018 dan menggunakan data dari hasil satelit FORMOSAT-3/COSMIC untuk mengetahui adanya fluktuasi yang terjadi pada lapisan ionosfer. Lokasi penelitian ini adalah di Palu dengan koordinat  $0^{\circ} 15' 21.24''$  LS  $119^{\circ} 50' 45.6''$  BT pada 28 September 2018 dengan waktu 10:02:45 UTC pada *magnitudo* 7.5 SR dan kedalaman 20 Km, dengan status gempa bumi dan tsunami zona subduksi (USGS, 2018). Pada penelitian ini dilakukan dengan 3 tahapan yaitu tahap pertama persiapan, tahap kedua pengolahan data dan tahap terakhir yaitu tahap analisis data.

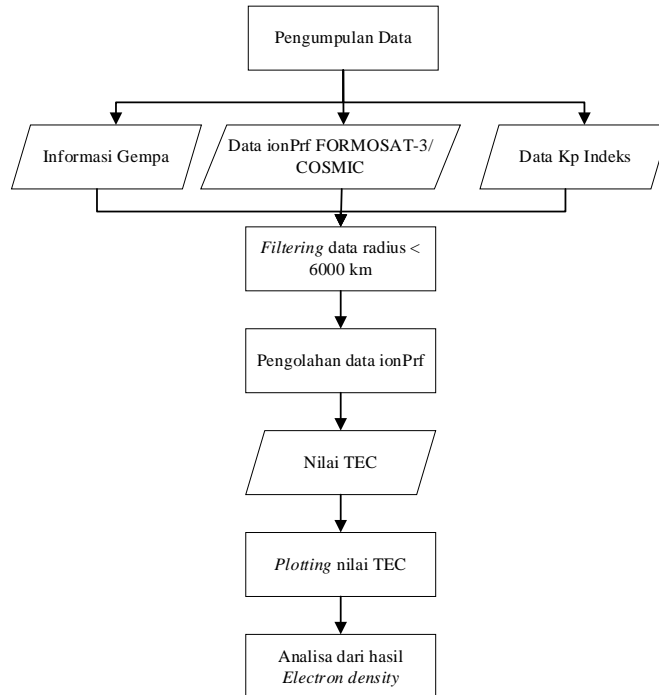


Gambar 1. Inset Peta.

Tahap pertama pada penelitian ini yaitu persiapan yang dilakukan dengan mengumpulkan studi literatur serta mempelajari berbagai hal berkaitan dengan penelitian. Langkah selanjutnya adalah menentukan objek penelitian, yang dimana objek penelitian ini adalah gempa Palu, 28 september 2018 data yang diperlukan adalah informasi mengenai gempa seperti magnitude gempa, kedalaman, koordinat pasti, jenis gempa dan lainnya bisa didapatkan di web USGS. Untuk data FORMOSAT-3/COSMIC sendiri dapat diunduh pada web <https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/tar/rest.html>.

Tahap kedua adalah pengolahan data. Data penelitian yang diperoleh selanjutnya dilakukan pengolahan untuk mengetahui adanya fluktuasi elektron di ionosfer setelah terjadinya gempa bumi. Elektron sendiri merupakan partikel yang bergerak bebas di ionosfer, sehingga apabila adanya gangguan seperti gelombang akan menyebabkan elektron saling bergerak bebas dan mempengaruhi jalannya sinyal satelit yang melewati, pada pengukuran GNSS efek ionosfer sendiri sering dihilangkan karena dapat mempengaruhi ketelitian data (Cahyadi, 2014). Pada penelitian ini akan difokuskan pada fluktuasi sinyal dari satelit LEO yaitu FORMOSAT-3/COSMIC akibat gempa Palu. FORMOSAT-3/COSMIC menghasilkan data ionPrf yang tersedia dalam format netCDF. Dari data ionPrf yang berisi densitas elektron, *longitude*, *latitude*, serta besarnya sudut lintasan satelit (Schreiner, 2014). Dalam data FORMOSAT-3/COSMIC sendiri banyaknya data tiap hari berbeda tergantung dari banyaknya okultasi yang terjadi, dan waktu terjadinya okultasi juga tidak selalu sama (Fong, 2008). Okultasi sendiri merupakan titik pertemuan antara sinyal GPS dengan Formosat-3/ COSMIC yang berorbit LEO yang dibelokkan di area atmosfer yang bisa menghasilkan profil di atmosfer (Matyjasiak, 2016). Untuk data Formosat-3/COSMIC sendiri dapat diunduh secara gratis di web CDAAC dalam pembacaan file dan pengeplotan digunakan Matlab. Data yang telah di dapatkan akan dilakukan *filtering* data dengan data okultasi yang berada pada radius  $\pm 6000$  km dari pusat gempa hal ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab (Liu et al, 2019). Penyaringan data dilakukan sebelum dilakukannya *plotting* dengan menggunakan Matlab untuk mengetahui adanya fluktuasi, data ditampilkan berurut dari waktu terjadinya gempa untuk menganalisis terjadinya fluktuasi yang ditimbulkan oleh gempa. Apabila sudah terlihat adanya fluktuasi, hal itu perlu dilakukan pengecekan apakah ada peningkatan aktivitas geomagnet yang ditandai dengan KP index, apabila pada waktu itu tidak terjadi peningkatan aktivitas geomagnet atau badai lemah dengan rentang nilai Kp index  $-30nT$  sampai  $-50nT$  maka bisa dimungkinkan untuk fluktuasi itu disebabkan oleh pengaruh dari gelombang akustik yang ditimbulkan dari gempa.

Gambar 2 dijelaskan mengenai proses pengolahan analisis fluktuasi TEC, dimulai dari tahap persiapan yang terdiri dari studi literatur serta pengumpulan data yang terdiri data-data informasi gempa seperti lokasi pusat gempa, waktu terjadinya gempa serta *magnitude* gempa yang didapatkan dari *website* USGS. Pada tahap pengolahan dimulai dengan *filtering* data dengan radius  $\leq 6000$  km dari pusat gempa, lalu dilakukan pengolahan data ionprf yang selanjutnya menghasilkan nilai TEC yang dilakukan *plotting* dan analisis. Pada tahap akhir dilakukan kesimpulan dan penulisan hasil.

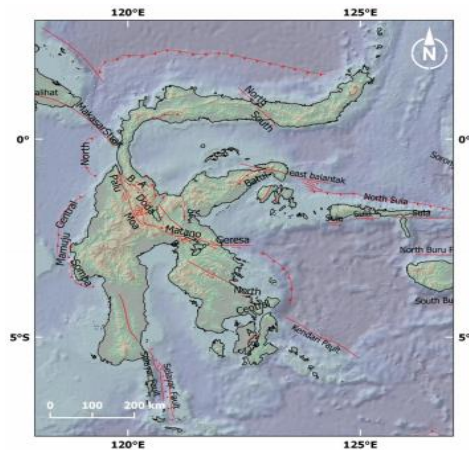


Gambar 2. Diagram Alir Pengolahan Data.

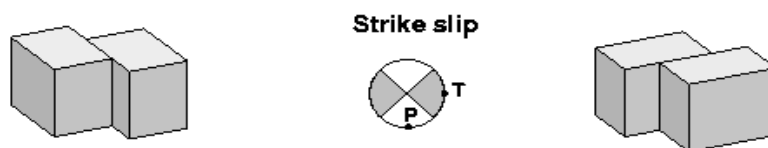
Pengolahan data netCDF dari formosat dapat menggunakan program matlab untuk mendapat nilai *electron density*. Data pada netCDF dapat dilakukan *plotting* nilai *electron density* nya dengan menggunakan Matlab untuk memperoleh profil vertikal TEC. Setelah dilakukan *plotting* anomali maka dilakukan analisis *electron density*nya, Penelitian ini dapat digunakan untuk memastikan adanya pengaruh gelombang akustik dari gempa bumi didasarkan pada KP indeks dan juga kecepatan, serta waktu terjadinya fluktuasi. Validasi hasil penelitian didasarkan pada kecepatan gelombang dan apakah ada pengaruh dari aktivitas matahari yang mempengaruhi pergerakan elektron bebas di ionosfer.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Gempa yang terjadi di sekitar episenter rata-rata kedalamannya adalah  $\leq 30$  km. Lokasi sesar yang aktif melewati area gempa dapat dijadikan informasi tambahan dalam melakukan analisis mengenai gempa yang terjadi di Palu, serta hal ini bisa dijadikan tambahan informasi apabila akan adanya penelitian lanjutan di sekitar Palu.

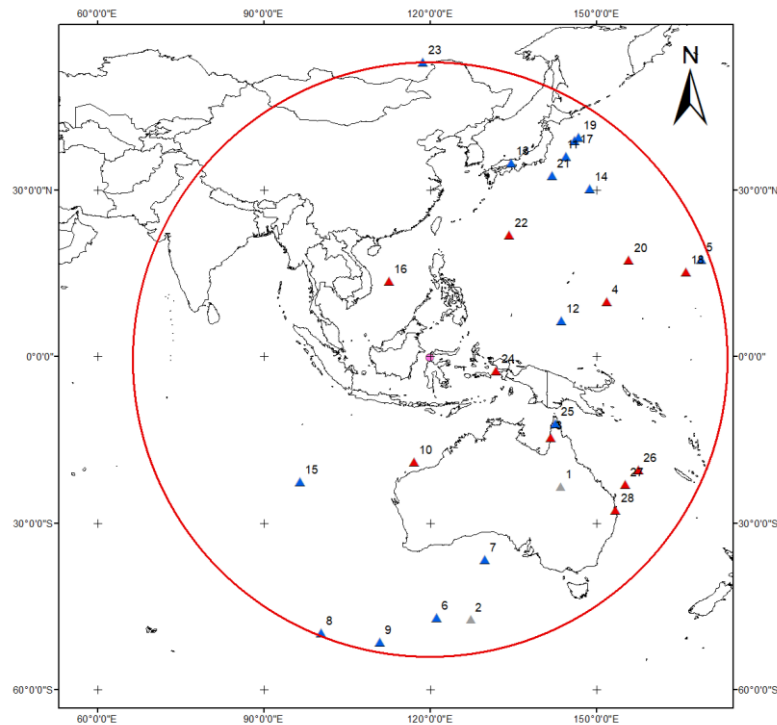


Gambar 3. Peta Sesar Aktif di Pulau Sulawesi. (Pusat studi Gempa Nasional, 2017)



Gambar 4. Mekanisme Gempa *Strike Slip* pada Gempa Palu 28 September 2018. (USGS, 2014)

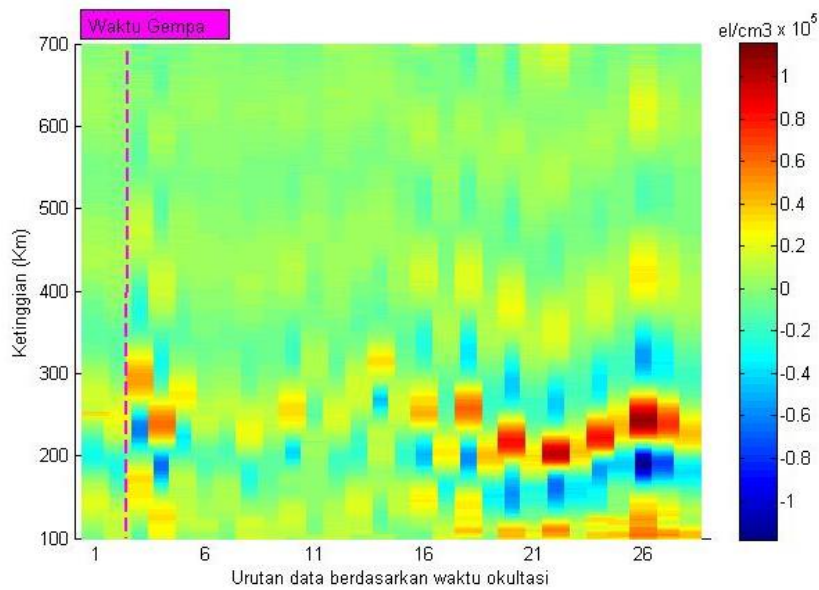
Gambar 4 menunjukkan mekanisme gempa di Palu yaitu *strike slip* yang ditunjukkan pada *beachball focal mechanism*, pada gambar tersebut terlihat bahwa pergerakan gempa adalah mendatar atau bergerak secara horizontal berlawanan arah, pergerakan ini disebabkan oleh adanya patahan di sekitar pusat gempa (USGS, 2023). Gempa 28 September 2018 dengan menggunakan data ionPrf dan dilakukan *plotting* area okultasi maka dengan menggunakan radius  $\pm 6000$  km dari pusat gempa didapatkan okultasi pada saat gempa yang ditunjukkan pada gambar 5 dan penomorannya didasarkan pada urutan waktu okultasi pertama sampai terakhir pada area tersebut.



Gambar 5. Posisi Okultasi Formosat-3/COSMIC pada Gempa 28 September 2018 dengan Radius  $\pm 6000$  km dari Pusat Gempa.

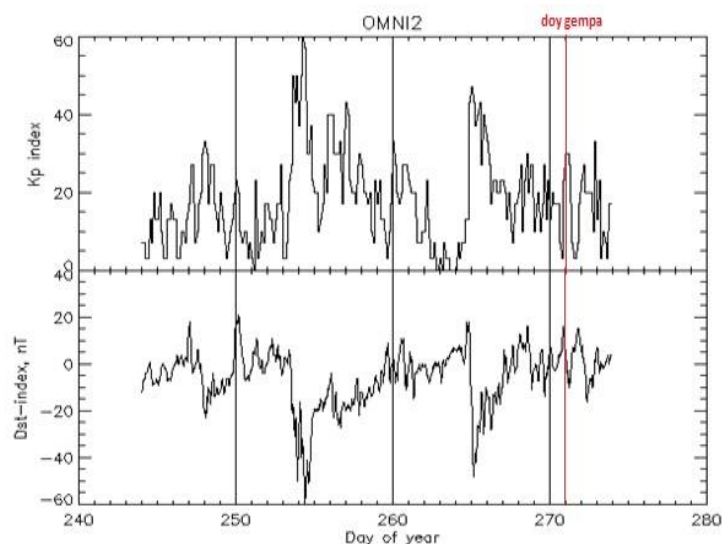
Hasil dari penyaringan data FORMOSAT-3/COSMIC didapatkan 28 titik okultasi terjadi pada radius  $\pm 6000$  km dari pusat gempa. Pada titik okultasi tersebut akan diurutkan sesuai dengan waktu terjadinya okultasi yang ditandai dengan nomor seperti pada gambar 5. Fluktuasi yang didapatkan pada 11 titik okultasi yang berwarna merah, 2 titik okultasi terjadi sebelum gempa dengan warna abu-abu dan 15 titik berwarna biru yang tidak terjadi fluktuasi. Gelombang yang dihasilkan akibat gempa diasumsikan bergerak menyebar secara vertikal mendekati ionosfer mencapai profil. Jika kecepatan gelombang secara horizontal lebih besar dari gelombang Rayleigh dan tsunami berarti waktu tempuh pendek profil tidak akan mengalami fluktuasi. Jika kecepatan gelombang horizontal lebih cepat dari gelombang tsunami namun lebih lambat daripada gelombang Rayleigh maka profil akan mengalami fluktuasi. Ketika kecepatan gelombang horizontal hampir sama dengan kecepatan gelombang Rayleigh atau gelombang tsunami maka fluktuasi dari profil disebabkan oleh gelombang Rayleigh atau tsunami. Jika kecepatan gelombang horizontal lebih lambat dari gelombang tsunami artinya gelombang tsunami sudah melalui lokasi profil. Permukaan laut yang terus – menerus terganggu selama lebih dari 10 jam setelah kejadian tsunami memungkinkan adanya fluktuasi pada profil sebagai tanda gelombang pasca tsunami. Lokasi okultasi yang mengalami fluktuasi pada gambar 5 terlihat bahwa posisi profil berada di laut. Gelombang seismic menyebabkan fluktuasi GPS TEC sekitar  $836 \pm 256$  s pada gempa Tohoku (Liu et al, 2016). Mengacu pada penelitian Liu et al.(2019) waktu tempuh horizontal diperkirakan pada 540 – 840 s yang merupakan selisih antara waktu terjadinya gempa sampai adanya fluktuasi di profil ionosfer. Kecepatan dari fluktuasi akan dihitung dari jarak horizontal profil ke pusat gempa dan dibagi dengan waktu tempuhnya. Pada titik okultasi ke-4 didapatkan waktu tempuh yaitu 10 menit (600 s) sehingga hal ini termasuk dari perkiraan waktu tempuh gelombang dan jarak 3700 km dari pusat sehingga kecepatan berkisar 6 km/s.





Gambar 6. Ilustrasi Terjadinya Fluktuasi pada Profil Vertikal *Electron Density* pada Gempa 28 September 2018 Radius  $\pm 6000$  km dari Pusat Gempa.

Gambar 6. didapatkan profil vertikal *electron density* dari 09:48 sampai 22:54 UT sebanyak 28 data okultasi dengan radius  $\pm 6000$  km dari episenter pada gempa 28 September 2018 pukul 10:02:45 UT. Dari data okultasi tersebut didapat yang mengalami fluktuasi adalah data nomor 4 dengan waktu okultasi 10:12 UT yaitu selisih 10 menit setelah terjadinya gempa dengan jarak  $\pm 3700$  km dari episenter, dari gambar 6 didapatkan banyak terjadinya fluktuasi dikarenakan pada gempa palu terdapat banyak gempa susulan yang terjadi dimulai dari gempa pertama pada 07:00 UT. Gambar 6. dalam diperhatikan pada perbedaan warna pada hasil *plotting* sebelum terjadinya gempa, rentang nilai *electron density* adalah pada  $-0,4$  sampai  $-0,3$   $\text{el}/\text{cm}^3$  sedangkan setelah terjadinya gempa, rentang *electron density*nya meningkat menjadi  $-1$  sampai dengan  $1$   $\text{el}/\text{cm}^3$ . Kecepatan gelombang yang diperoleh berkisar  $6$   $\text{km}/\text{s}$  Dari hasil penelitian pada gempa Tohoku oleh Liu et al.(2019) diperoleh kecepatan berkisar  $2-3.6$   $\text{km}/\text{s}$ . hal tersebut dapat dikarenakan okultasi yang terjadi di lintang rendah atau mendekati ekuator lebih sedikit dibandingkan dengan pada lintang tinggi.



Gambar 7. Kp Indeks dan Dst Indeks pada Tanggal 1 September 2018 Hingga 30 September 2018

Kp indeks ini berhubungan dengan aktivitas geomagnetik, yang dapat mempengaruhi pergerakan elektron bebas di ionosfer apabila terjadi badai tinggi. Sehingga untuk memastikan pada waktu terjadinya gempa fluktuasi yang dihasilkan apakah benar akibat dari gelombang yang ditimbulkan oleh gempa atau ada pengaruh dari gelombang lain salah satunya adalah Kp indeks. Kp indeks untuk mengetahui adanya aktivitas geomagnetik pada doy 271 kp indeks pada gambar 7 merupakan nilai  $\text{kp indeks} \times 10$  yang pada gambar dijelaskan bernilai 25 dikatakan badai lemah. Dan

untuk Dst indeks didapatkan nilainya yaitu 10 nT. Pada gambar 7. dapat dilihat bahwa pada gempa 28 September 2018 dengan doy 271 tidak terjadi gangguan yang mengakibatkan gangguan pada atmosfer.

### Kesimpulan

Hasil penggunaan FORMOSAT-3/COSMIC untuk mengetahui adanya fluktuasi pada gempa Palu 28 September 2018 didapatkan adanya 28 titik okultasi dengan area  $\pm 6000$  km dari pusat gempa, dengan rincian 2 titik okultasi sebelum terjadinya gempa, 11 titik okultasi setelah terjadinya gempa yang mengalami fluktuasi dan 15 titik okultasi yang nilai fluktuasinya tidak signifikan. Hasil yang didapatkan dari 11 titik okultasi yang mengalami fluktuasi pada titik ke 4 didapatkan fluktuasi 10 menit setelah gempa dan posisi okultasinya 3700 km dari lokasi episenter, maka kecepatan gelombang yang didapat adalah 6 km/s, untuk hasil tersebut setelah divalidasi aktivitas geomagnetik apakah ada indikasi badai namun dari hasil Kp indeks menunjukkan badai lemah, jadi dimungkinkan adanya fluktuasi didasarkan pada pengaruh gelombang seismik. Penelitian selanjutnya diharapkan adanya penelitian efek gelombang sebelum dan sesudah terjadinya gempa serta menggunakan FORMOSAT-7/COSMIC-2 yang sudah beroperasi dikarenakan okultasi yang terjadi semakin banyak dan rapat.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas TACC atas dukungan datanya pada penelitian ini dan Penulis juga berterima kasih kepada Prof. Dr. Buldan Muslim M.Si atas diskusinya yang bermanfaat.

### Daftar Pustaka

- Andreas H., dkk.. (2006). Implikasi Co-Seismic dan Post-seismic Horizontal Displacement Gempa Aceh 2004 terhadap status Geometrik Data Spasial wilayah Aceh dan Sekitarnya, Bandung : Departemen Teknik Geodesi ITB.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2013). Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(4), 1777–1787. <https://doi.org/10.1002/jgra.50208>.
- Cahyadi, M. N. (2014). Near-Field Coseismic Ionospheric Disturbances of Earthquakes In and Around Indonesia. Sapporo : Hokkaido University.
- Cahyadi, M. N., & Heki, K. (2015). Coseismic ionospheric disturbance of the large strike-slip earthquakes in North Sumatra in 2012: Mw dependence of the disturbance amplitudes. *Geophysical Journal International*, 200(1), 116–129. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu343>.
- Cahyadi, M. N., & Adi Saputra, F. (2017). Perbandingan Perubahan Total Electron Content (Tec) Ionosfer Akibat Gempa Bumi Dan Letusan Gunung Api (Studi Kasus : Gempa Bumi 2 Maret 2016 dan Gunung Merapi 2010). *Jurnal Geoid*, Vol 12: 195-201.
- Fong, C. J., Yang, S. K., Chu, N. H., Huang, C. Y., Yeh, J. J., Lin, C. T., Kuo, T. C., Liu, T. Y., Yen, N. L., Chen, S. S., Kuo, Y. H., Liou, Y. A., & Chi, S. (2008). FORMOSAT-3/COSMIC constellation spacecraft system performance: After one year in orbit. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11), 3380–3394. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2005203>.
- Liu JY et al. (2016). The vertical propagation of disturbances triggered by seismic waves of the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake over Taiwan. *Geophys Res Lett* 43:1759–1765. <https://doi.org/10.1002/2015gl067487>.
- Liu, J. Y., Chen, C. Y., Sun, Y. Y., Lee, I. te, & Chum, J. (2019). Fluctuations on vertical profiles of the ionospheric electron density perturbed by the March 11, 2011 M9.0 Tohoku earthquake and tsunami. *GPS Solutions*, 23(3). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0866-7>.
- Matyjasiak, B. (2016). Radio occultation diagnostics and ionosphere behaviour. [https://www.astron.nl/lofarwiki/lib/exe/fetch.php?media=public:meetings:radio\\_occultatio\\_b.matyjasiak.pdf](https://www.astron.nl/lofarwiki/lib/exe/fetch.php?media=public:meetings:radio_occultatio_b.matyjasiak.pdf). Diakses pada 30 November 2022.
- Muslim, Buldan. (2015). Pengujian Teknik Korelasi Untuk Deteksi Pengaruh Aktivitas Gempa Bumi Besar Pada Ionosfer. *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol 12 : 87-102.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Kementerian PUPR.
- Saputra, Febrian Adi. (2017). Analisis Perubahan Ionosfer Akibat Gempa Bumi Sumatra Barat Tanggal 2 Maret 2016. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Geomatika- Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Schreiner, Bill, Sergey Sokolovsky, Xinan Yue, Janet, Zeng. (2014). Radio Occultation Retrieval Processing for Ionospheric Scientists. IROWG Ionosphere-Atmosphere Coordination Workshop.
- Subakti, Hendri. (2008). Analisis Variasi GPS-TEC yang Berhubungan dengan Gempabumi Besar di Sumatra. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- USGS. (2014). <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/becchball.php>, diakses 20 Mei 2022.

USGS.(2023).<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/focal-mechanisms-or-beachballs#:~:text=A%20focal%20mechanism%2C%20or%20%22beachball,of%20the%20fault%20that%20slipped>. Diakses pada 16 September 2023.

USGS. (2018).<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/dyfi/intensity>. Diakses pada Mei 2022

Wu, Bor-Han dkk..(2005). FORMOSAT-3/COSMIC Science Mission Update. GPS Solut 9: 111-121.

## Pemodelan Proses dan Evaluasi Ekonomi Produksi Bio-Oil dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit

Muhammad Rifki Fanany<sup>1</sup>, Septhian Marno<sup>2</sup>, Tirta Prakoso<sup>1</sup>, Aqsha Aqsha<sup>1</sup>, Astri Nur Istiyami<sup>1</sup>, Meiti Pratiwi<sup>1</sup>, dan Antonius Indarto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Research and Technology Innovation, PT. Pertamina (Persero), Jakarta Timur, Indonesia

[mrifki.fanany1998@gmail.com](mailto:mrifki.fanany1998@gmail.com), [septhian.marno@pertamina.com](mailto:septhian.marno@pertamina.com), [tirta.prakoso@itb.ac.id](mailto:tirta.prakoso@itb.ac.id), [aqsha@itb.ac.id](mailto:aqsha@itb.ac.id), [astrinuristiyami@itb.ac.id](mailto:astrinuristiyami@itb.ac.id), [meiti@cheitb.id](mailto:meiti@cheitb.id), [antonius.indarto@itb.ac.id](mailto:antonius.indarto@itb.ac.id)

### Abstrak

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah padat yang merupakan sisa produksi dari pengolahan kelapa sawit menjadi minyak sawit mentah (MSM). Tingginya jumlah TKKS yang dihasilkan memerlukan penanganan yang tepat untuk meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan sekitar. Salah satu solusi untuk menangani hal tersebut adalah dengan mengolah TKKS menjadi bio-oil dengan menggunakan teknologi *fast pyrolysis*. Sebelum mengaplikasikan proses tersebut di dunia nyata, perlu dilakukan evaluasi ekonomi terlebih dahulu untuk mengetahui apakah proses tersebut dapat menguntungkan secara ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi ekonomi pada proses produksi bio-oil berbahan baku TKKS dengan menggunakan teknologi *fast pyrolysis*. Aspen Plus digunakan pada penelitian ini untuk melakukan pemodelan proses, sedangkan evaluasi ekonomi didasarkan pada beberapa literatur seperti buku dan jurnal terdahulu. Berdasarkan hasil evaluasi ekonomi, *total capital cost* (TCC) yang diperlukan untuk membangun fasilitas ini sebesar 1.152.686 USD dengan *operating expenditure* (OpEx) sebesar 168.107 USD. Kemudian, dari indikator ekonomi berupa *payback period* (PBP) dan *internal rate of return* (IRR), fasilitas ini memerlukan waktu 4 tahun untuk mencapai PBP dengan IRR sebesar 22%.

Kata kunci: tandan kosong kelapa sawit, bio-oil, *fast pyrolysis*, tekno-ekonomi

### Abstract

Oil palm empty fruit bunches (OPEFB) are solid waste which is the residue from processing palm oil into crude palm oil (CPO). The high number of OPEFB produced requires proper handling to minimize the negative impact on the surrounding environment. One of the solutions to deal with this is to process OPEFB into bio-oil using fast pyrolysis technology. Before applying the process in the real world, it is necessary to do an economic evaluation first to find out whether the process can be economically profitable. This study aims to carry out an economic evaluation of the bio-oil production process made from OPEFB using fast pyrolysis technology. Aspen Plus was used in this study to carry out process modeling, while the economic evaluation was based on several literatures such as previous books and journals. Based on the results of the economic evaluation, the total capital cost (TCC) required to build this facility is USD 1,152,686 with an operating expenditure (OpEx) of USD 168,107. Then, from the economic indicators in the form of payback period (PBP) and internal rate of return (IRR), this facility takes 4 years to reach PBP with an IRR of 22%.

Keywords: empty palm oil bunches, bio-oil, fast pyrolysis, techno-economic

### 1. Pendahuluan

Salah satu komoditas perkebunan terbesar di Indonesia adalah kelapa sawit. Saat ini, kelapa sawit banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi minyak sawit mentah (MSM). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (Statistik, 2020), terjadi peningkatan jumlah produksi MSM dari tahun 2016 yang berjumlah 31,49 ton MSM menjadi 47,12 ton MSM pada tahun 2019. Pada tahun 2020 terjadi sedikit penurunan produksi MSM sehingga jumlahnya menjadi 44,76 ton dengan luas areal perkebunan mencapai 14,59 hektar. Dengan meningkatnya jumlah kelapa sawit yang diolah menjadi MSM, maka terjadi pula peningkatan jumlah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang ada. Jumlah TKKS mencapai 8,95 juta ton yaitu 20% dari total produksi kelapa sawit (Destyorini & Indayaningsih, 2019).

Dalam produksi minyak sawit, tandan kosong kelapa sawit merupakan produk samping proses yang akan berakhir menjadi limbah. Tingginya jumlah limbah TKKS yang ada dan minimnya pemanfaatan limbah tersebut memerlukan penanganan supaya limbah tersebut tidak menumpuk sehingga dapat meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan (Purnama dkk., 2021). Jika dilihat dari senyawa-senyawa yang terkandung dalam TKKS seperti lignin, holoselulosa, selulosa, hemiselulosa, dan zat ekstraktif lainnya (Sudiyani & Hermiati, 2010), tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki potensi untuk diolah menjadi *bio-oil* ataupun *bio-char*.

Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengolah limbah TKKS menjadi bio-oil ataupun bio-char adalah teknologi *fast pyrolysis*

#### Info Makalah:

Dikirim : 09-12-23;

Revisi 1 : 10-06-23;

Diterima : 10-25-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [antonius.indarto@itb.ac.id](mailto:antonius.indarto@itb.ac.id)

(Febriyanti dkk., 2019). Menurut Hu dkk (2017), teknologi *fast pyrolysis* pada suhu tinggi mampu memaksimalkan perolehan gas yang didapat. Namun, aspek ekonomi dari teknologi yang akan digunakan untuk memproduksi bio-oil perlu dievaluasi terlebih dahulu keekonomiannya, sehingga dapat diambil kesimpulan apakah teknologi yang digunakan memungkinkan untuk direalisasikan di dunia nyata. Pada penelitian ini akan dilakukan studi tekno-ekonomi pengolahan tandan kosong kelapa sawit menjadi *bio-oil* dengan menggunakan teknologi *fast pyrolysis*.

## 2. Metode

Penelitian dilakukan dengan bantuan perangkat lunak yaitu Aspen Plus. Proses utama dibagi menjadi tiga yaitu persiapan umpan (*pre-treatment*), *fast pyrolysis*, dan pemurnian produk. Terdapat dua fasa utama pada simulasi ini yaitu gas dan padat. Umpan berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS), produk samping berupa *char*, dan *ash* didefinisikan sebagai *nonconventional solid* (Brassard dkk., 2018). TKKS sebagai komponen *nonconventional solid* memerlukan data *proximate analysis* dan *ultimate analysis* untuk mendefinisikannya ke dalam Aspen Plus (dapat dilihat pada Tabel 1), data *proximate* dan *ultimate analysis* diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Abdul Samad & Saleh, 2022). Peng-Robinson dipilih sebagai *property method* karena kondisi operasi proses melibatkan suhu tinggi serta komponen proses yang terlibat berupa hidrokarbon dan gas ringan.

Tabel 1. *Proximate Analysis* dan *Ultimate Analysis* Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).

Komposisi	TKKS (basis basah % massa)
<i>Proximate Analysis</i>	
Karbon Tetap	15,37
Zat Mudah Menguap	65,01
Kadar Air	15,77
Kandungan Abu	3,85
<i>Ultimate Analysis</i>	
C	43,53
N	1,73
H	7,20
O	47,09
S	0,46

### 2.1. Pemodelan Proses

TKKS yang merupakan limbah produksi MSM, memiliki kandungan air yang sangat tinggi, hal ini dapat meningkatkan jumlah energi panas yang perlu disuplai ke dalam reaktor pirolisis. Oleh karena itu, kandungan air dalam TKKS perlu dikurangi terlebih dahulu pada tahap persiapan umpan (*pre-treatment*). Proses persiapan umpan terdiri dari proses pengeringan umpan. Proses pengeringan dilakukan untuk mengurangi kadar air TKKS hingga mencapai kurang dari 8% (Brassard dkk., 2018). Proses pengeringan disimulasikan menggunakan reaktor stoikiometri, flash separator, dan sebuah manipulator. Reaksi yang terjadi pada reaktor stoikiometri yaitu  $\text{TKKS} + 0,0555084\text{H}_2\text{O}$  (Aspen Technology Inc., 2013). Kemudian, uap air akan terbawa bersama media pengering berupa udara panas untuk dibuang melalui *exhaust*, sedangkan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) kering akan diumpankan menuju reaktor pirolisis.

Proses *fast pyrolysis* dilakukan pada suhu 550 °C dengan menggunakan dua blok utama yaitu reaktor perolehan sebagai tempat terjadinya proses dekomposisi serta *solid separator* sebagai tempat pemisahan gas hasil pirolisis dengan produk samping berupa bio-char (Hu dkk., 2017). Perolehan produk pada reaktor pirolisis menggunakan data dari penelitian yang telah dilakukan oleh Bhattacharya dkk (2009). Produk dari reaktor pirolisis selanjutnya diumpankan menuju *solid separator*. Bio-char yang merupakan produk samping dari reaktor pirolisis memiliki banyak manfaat salah satunya dijadikan sebagai bahan untuk penyubur tanah (Sukmawati, 2020).

Setelah melewati proses pirolisis, selanjutnya gas hasil pirolisis akan didinginkan dan dipisahkan antara fasa gas dan liquidnya. Proses pemisahan antara gas yang tidak bisa dikondensasikan (*non-condensable gas*) dengan bio-oil disimulasikan menggunakan dua blok utama, yaitu *cooler* dan *flash separator*. Penggunaan cooler bertujuan untuk merubah fasa gas menjadi *liquid* sehingga didapat bio-oil dalam fasa *liquid*, kemudian dialirkan menuju flash separator untuk memisahkan bio-oil dari gas hasil pirolisis yang belum terkondensasi dan gas yang tidak dapat dikondensasi.

### 2.2. Evaluasi Ekonomi

Analisis tekno-ekonomi dilakukan setelah pemodelan proses selesai. Tahapan perhitungan yang digunakan pada evaluasi ekonomi akan didasarkan pada literatur yang digunakan yaitu Turton dkk (2001). Tahap pertama yang dilakukan dalam evaluasi ekonomi adalah menghitung *Capital Expenditure* (CapEx). Perhitungan CapEx diawali dengan menghitung *bare module equipment cost* ( $C_{BM}$ ). *Bare module cost* merupakan biaya yang dibutuhkan untuk tiap unit alat pada kondisi dasar, untuk menghitung *bare module cost* diperlukan data ukuran alat, kondisi operasi,

ataupun kapasitas alat tersebut. Perhitungan *bare module cost* dapat menggunakan Persamaan 1 dari literatur Turton dkk (2001).

$$C_{BM} = C_p^0 F_{BM} \quad (1)$$

Setelah didapatkan *bare module cost* dari masing-masing alat, maka dapat dilakukan perhitungan terhadap *total module cost* ( $C_{TM}$ ) yang merupakan biaya yang diperlukan untuk membuat perubahan pada fasilitas yang sudah ada,  $C_{TM}$  dapat dihitung menggunakan persamaan 2. Selanjutnya, menghitung *grassroots cost* ( $C_{GR}$ ) yang merupakan biaya yang diperlukan untuk membangun seluruh fasilitas baru menggunakan Persamaan 3 yang berasal dari Turton dkk (2001).

$$C_{TM} = 1.18 \sum_{i=1}^n C_{BM,i} \quad (2)$$

$$C_{GR} = C_{TM} + 0.50 \times \sum_{i=1}^n C_{BM,i}^0 \quad (3)$$

Tabel 2. Asumsi Analisis Tekno-Ekonomi.

Parameter	Satuan	Nilai
<b>Asumsi</b>		
<i>Lifetime</i>	Tahun	10
Kapasitas Produksi Bio-Oil	Ton/Tahun	300
Pabrik mulai beroperasi	Tahun	2
Waktu beroperasi dalam setahun	Jam	7500
<i>Bank Interest</i>	%	5,75
<i>Sales Tax</i>	%	11
<i>Income Tax</i>	%	25
<i>Discount Rate</i>	%	3
<b>Input</b>		
<i>Bare Module Cost</i> ( $C_{BM}$ )	USD	$C_{BM} = C_p^0 F_{BM}$
<i>Total Module Cost</i> ( $C_{TM}$ )	USD	$C_{TM} = 1.18 \sum_{i=1}^n C_{BM,i}$
<i>Grassroots Cost</i> ( $C_{GR}$ )	USD	$C_{GR} = C_{TM} + 0.50 \times \sum_{i=1}^n C_{BM,i}^0$
<i>Process Plant Cost</i> (PCC)	USD	$C_{BM} + C_{TM}$
<i>Total Plant Cost</i> (TPC)	USD	$1,3 \times PCC$
<i>Total Capital Cost</i> (TCC)	USD	$1,1 \times TPC$
<i>Working Capital Investment</i> (WCI)	USD	$0,2 \times TCC$
<i>Operation and Maintenance Cost</i> (OMC)	USD	$0,04 \times TCC$
<b>Input-Variable Cost</b>		
Tandan Kosong Kelapa Sawit	USD/Kg	0,008
<b>Input-Utility Cost</b>		
Listrik	USD/KWH	0,06
Air Pendingin	USD/1000 m <sup>3</sup>	14,8
Steam	USD/1000 Kg	29,59
Udara Pengering	USD/tahun	55
<i>Total Utility Cost</i>	USD/100 std m <sup>3</sup>	0,35
<b>Output</b>		
Bio-Oil	USD/Kg	0,07
Bio-Char	USD/Kg	1
<b>Indikator Analisis Tekno-Ekonomi</b>		
<i>Net Present Value</i> (NPV)	USD	$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{PV_n}{(1+i)} \times (1+i)^{-n}$
<i>Payback Period</i> (PBP)	Tahun	$PBP = \text{years with negative NPV} + \frac{ NPV }{PV}$
<i>Internal Rate of Return</i> (IRR)	%	$0 = \sum_{n=0}^N \frac{PV_n}{(1+IRR)^n}$

Setelah perhitungan Capital Expenditure (CapEx) selesai, selanjutnya dilakukan perhitungan operating expenditure (OpEx). Komponen perhitungan operating expenditure (OpEx) terdiri dari biaya bahan baku tandan

kosong kelapa sawit, biaya pengolahan limbah, biaya utilitas, dan biaya tenaga kerja. Berikut perhitungan dan asumsi-asumsi yang digunakan dalam evaluasi ekonomi tercantum pada Tabel 2.

Catatan:

- a. *Income tax* diperoleh dari Indonesia Investmens (Purnama dkk., 2021).
- b. *Sales tax* diperoleh dari TRADING ECONOMICS (Indonesia Salex Tax Rate, 2023).
- c. Biaya utilitas diperoleh dari Turton dkk (2001).

### 2.3. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas bertujuan untuk mengetahui pengaruh naik turunnya beberapa parameter seperti harga bahan baku, pendapatan pabrik (*revenue*), *operating expenditure* (OpEx), dan parameter lainnya terhadap indikator ekonomi seperti *net present value* (NPV), *internal rate of return* (IRR), dan parameter ekonomi lainnya. Analisis sensitivitas dilakukan pada beberapa scenario yaitu ketika terjadi perubahan harga pada sensitivitas sebesar 90%, 95%, 100%, 105%, 110%, 115%, dan 120%. Hasil analisis sensitivitas dapat ditampilkan dalam bentuk *spider diagram* untuk mengetahui parameter yang berpengaruh terhadap indikator ekonomi.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Pemodelan Proses

Pemodelan proses merupakan salah satu tahapan dalam perancangan suatu proses yang bertujuan untuk memperoleh neraca massa, neraca energi, spesifikasi alat, dan informasi penting lainnya. Hasil pemodelan proses produksi bio-oil dari TKKS dapat dilihat pada Gambar 1. Pada kotak bagian 1, merupakan proses persiapan umpan (*pre-treatment*), kotak bagian 2 merupakan proses *fast pyrolysis*, dan kotak bagian 3 merupakan proses pemurnian produk. Data mengenai spesifikasi alat dan utilitas akan digunakan untuk menghitung *capital expenditure* (CapEx) dan *operating expenditure* (OpEx) pada evaluasi ekonomi.

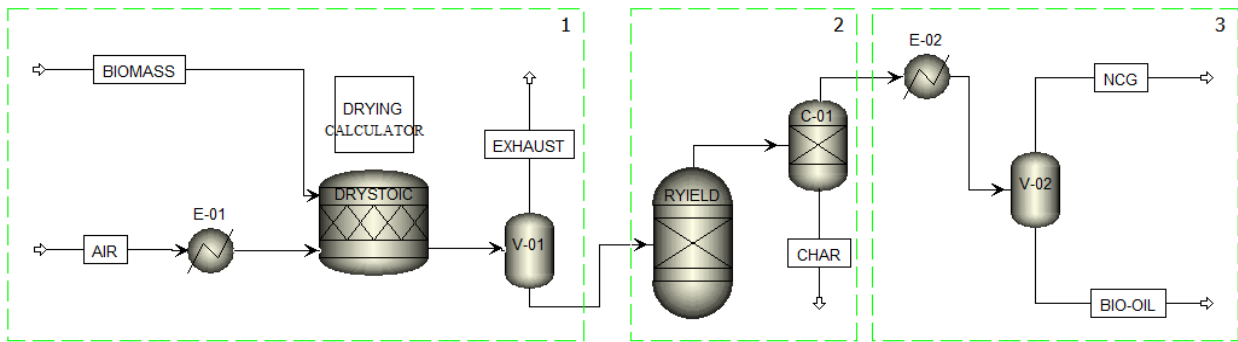
### 3.2. Pre-Treatment

Proses *pre-treatment* bertujuan untuk mengurangi kandungan air yang terdapat dalam tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dari 15,77% menjadi 8%. Berdasarkan literatur dari Fair & Walas (2012), pengeringan TKKS dilakukan pada suhu 120 °C. Udara digunakan sebagai media pemanas didalam reaktor, sebelum memasuki reaktor udara dipanaskan terlebih dahulu hingga suhunya mencapai 120 °C dengan bantuan *heater* (E-01). Udara dipilih sebagai media pemanas karena lebih menguntungkan dari segi ekonomi (Turton dkk., 2001). TKKS dengan kandungan air yang tinggi diumpankan kedalam DRYSTOIC untuk dikurangi kadar airnya sehingga didapat TKKS kering dengan kandungan air kurang dari 8%. Jumlah udara yang dibutuhkan untuk mengurangi kadar air hingga kurang dari 8% adalah sebesar 4000 kg/h, laju alir udara diatur supaya delta perubahan suhu aliran masuk dan keluar *dryer* tidak lebih dari 7 °C (Fair & Walas, 2012). Uap air yang terbentuk akan dibuang bersama dengan udara melalui *exhaust* yang terdapat pada vessel (V-01).

Pengeringan TKKS menggunakan metode pengeringan langsung yaitu TKKS yang berbentuk granular akan dikontakkan secara langsung dengan udara panas yang merupakan media pengeringnya. *Dryer* yang digunakan adalah berupa *belt conveyor dryer*, pemilihan *dryer* ini didasarkan pada beberapa hal seperti proses pengeringan yang berlangsung secara kontinu, skala produksi yang termasuk kedalam skala menengah, serta wujud TKKS yang berbentuk granular. *Belt conveyor* lebih ekonomis daripada *dryer* lain dan juga memiliki rentang efisiensi yang cukup tinggi yaitu 46-58% (Fair & Walas, 2012).

Proses pengeringan TKKS merupakan proses penguapan, dimana kandungan air yang terkandung didalam TKKS akan dihilangkan dengan bantuan panas yang berasal dari udara pengering. Berdasarkan Fair & Walas (2012), perbedaan suhu maksimum pada proses penguapan air adalah sebesar 7 °C. Dapat dilihat pada tabel 3, perbedaan suhu antara udara pengering dengan keluaran pengering menurun seiring bertambahnya jumlah udara pengering yang diumpankan. Perbedaan suhu sebesar 7 °C tercapai ketika udara pengering yang dialirkan adalah sebesar 4000 kg/jam, sehingga dapat diambil kesimpulan jumlah udara pengering yang diumpankan menuju pengering adalah sebesar 4000 kg/jam.





Gambar 1. Diagram Alir Produksi Bio-Oil.

Tabel 3. Hasil Simulasi Pengaruh Aliran Udara Pengering Terhadap Perbedaan Suhu Keluaran Pengering.

Udara Pengering (Kg/Jam)	Udara Pengering (°c)	Keluaran Pengering (°c)	Delta T (°c)	Udara Pengering (Kg/Jam)	Udara Pengering (°c)	Keluaran Pengering (°c)	Delta T (°c)
2000,00	120	106,50	13,50	3591,84	120	112,26	7,74
2061,22	120	106,87	13,13	3653,06	120	112,38	7,62
2122,45	120	107,23	12,77	3714,29	120	112,50	7,50
2183,67	120	107,56	12,44	3775,51	120	112,62	7,38
2244,90	120	107,88	12,12	3836,73	120	112,73	7,27
2306,12	120	108,19	11,81	3897,96	120	112,84	7,16
2367,35	120	108,48	11,52	3959,18	120	112,95	7,05
2428,57	120	108,75	11,25	4000,00	120	113,02	6,98
2489,80	120	109,01	10,99	4020,41	120	113,05	6,95
2551,02	120	109,26	10,74	4081,63	120	113,15	6,85
2612,24	120	109,50	10,50	4142,86	120	113,25	6,75
2673,47	120	109,73	10,27	4204,08	120	113,35	6,65
2734,69	120	109,95	10,05	4265,31	120	113,44	6,56
2795,92	120	110,16	9,84	4326,53	120	113,53	6,47
2857,14	120	110,36	9,64	4387,76	120	113,62	6,38
2918,37	120	110,55	9,45	4448,98	120	113,70	6,30
2979,59	120	110,74	9,26	4510,20	120	113,79	6,21
3040,82	120	110,91	9,09	4571,43	120	113,87	6,13
3102,04	120	111,09	8,91	4632,65	120	113,94	6,06
3163,27	120	111,25	8,75	4693,88	120	114,02	5,98
3224,49	120	111,41	8,59	4755,10	120	114,10	5,90
3285,71	120	111,56	8,44	4816,33	120	114,17	5,83
3346,94	120	111,71	8,29	4877,55	120	114,24	5,76
3408,16	120	111,86	8,14	4938,78	120	114,31	5,69
3469,39	120	111,99	8,01	5000,00	120	114,38	5,62
3530,61	120	112,13	7,87				

### 3.3. Fast Pyrolysis

Proses *Fast Pyrolysis* berfungsi untuk mendekomposisi senyawa-senyawa penyusun bio-oil yang terkandung didalam TKKS. Proses ini melibatkan 2 alat utama yaitu reaktor (RYIELD) dan *solid separator* (C-01). Pemilihan proses didasarkan pada beberapa parameter yaitu suhu operasi, waktu tinggal, dan perolehan produk yang didapat. Penggunaan RYIELD pada penelitian kali ini tidak memungkinkan dilakukannya analisis pengaruh suhu terhadap perolehan bio-oil yang didapat. Proses berlangsung pada suhu 550 °C karena pada suhu tersebut dapat menghasilkan perolehan bio-oil yang maksimum (Hu dkk., 2017). Selain dapat memaksimalkan perolehan bio-oil yang didapat, dengan waktu tinggal yang cepat (0,5-10 s) maka dapat menekan biaya pembelian reaktor karena tidak memerlukan ukuran reaktor yang besar sehingga dapat menekan *capital expenditure* (CapEx).

Ketika TKKS diumpungkan kedalam RPEROLEHAN maka senyawa-senyawa volatile yang terkandung pada TKKS akan terdekomposisi karena terjadinya pemanasan pada RYIELD, dimana sumber panas pada RYIELD bersumber dari energi listrik. Selanjutnya gas hasil pirolisis akan dipisahkan antara fasa gas dengan padatan berupa *char* dengan bantuan *solid separator* (C-01). Pemisahan padatan pada *solid separator* memanfaatkan gaya sentrifugal sehingga padatan akan terdorong ke dinding *separator* kemudian akan menuju ke bagian bawah *separator* untuk selanjutnya dikumpulkan. Gas hasil pirolisis yang telah terbebas dari padatan akan dialirkan menuju proses

permurnian produk. Sementara, *char* yang merupakan produk samping dari proses pirolisis dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler ataupun dijadikan media penyubur tanah.

### 3.4. Produk

Proses pemurnian dimulai dengan kondensasi gas hasil pirolisis dengan suhu 550 °C menjadi 25 °C dengan bantuan *condenser* (E-02), sehingga terbentuk dua fasa yaitu fasa liquid berupa bio-oil dan fasa gas berupa *non-condensable gas* (NCG). Setelah didinginkan, maka akan dipisahkan antara bio-oil dengan NCG dengan bantuan vessel (V-02). Bio-oil merupakan produk bawah sementara produk atas dari vessel yaitu NCG. Komposisi bio-oil hasil pirolisis dapat dilihat pada tabel 2, komposisi bio-oil tersebut sama dengan bio-oil yang diperoleh pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Brassard dkk (2018), hal ini dapat terjadi karena reaktor yang digunakan pada proses pirolisis adalah reaktor perolehan.

Tabel 4. Komposisi Bio-Oil.

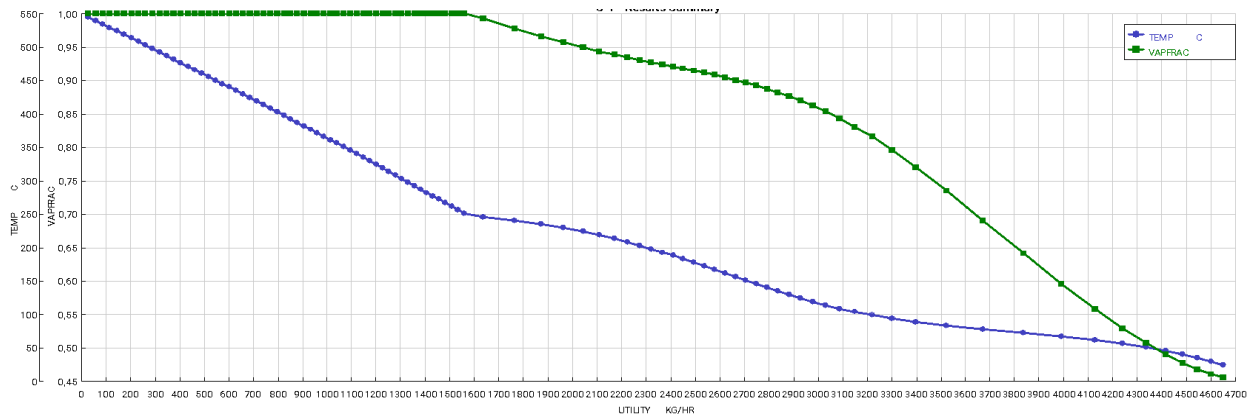
Komponen	Bio-oil (% berat)	
	Simulasi	Literatur Brassard dkk (2018)
Acetol	4,12	4,12
Furfural	12,36	12,36
Dextrose	51,99	51,99
1,2-benzenediol	16,53	16,53
Guaiacol	11,73	11,73
Benzoic Acid	0,33	0,33
Vanilin	1,49	1,49
Oleic Acid	1,45	1,45

### 3.5. Suhu Kondensasi

Gas hasil pirolisis yang bersuhu 550 °C akan diumpungkan kedalam *condenser* (E-02) untuk dikondensasikan, sehingga terbentuk dua fasa yaitu gas dan cair. Fasa gas didominasi oleh *non-condensable gas* (NCG), sedangkan fasa cair terdiri dari komponen penyusun bio-oil, dan air. Pemilihan suhu kondensasi dapat didasarkan pada dua parameter yaitu fraksi uap dan massa air pendingin. Dapat dilihat pada tabel 3, fraksi uap mulai mengalami penurunan secara signifikan, pada suhu 242,42 °C fraksi uap dalam aliran adalah sebesar 1 artinya seluruh komponen dalam fasa gas, kemudian proses kondensasi terus berlanjut hingga pada suhu 51,52 °C fraksi uap dalam aliran adalah sebesar 0,51. Kemudian proses kondensasi terus dilanjutkan hingga suhu 15 °C, namun penurunan fraksi uap dalam aliran tidak terjadi secara signifikan. Dari data yang telah didapat, kondensasi dapat berjalan optimum pada rentang suhu 25 sampai 51,52 °C. Penurunan fraksi uap tidak terjadi secara signifikan karena aliran gas sudah didominasi oleh NCG, sementara *condensable gas* sudah banyak yang terkondensasi.

Tabel 5. Hasil Simulasi Pengaruh Suhu Terhadap Massa Air Pendingin dan Fraksi Uap.

Suhu (°C)	Air Pendingin (kg/hr)	Fraksi Uap	Suhu (°C)	Air Pendingin (kg/hr)	Fraksi Uap
15,00	4731,89	0,45	136,36	2827,74	0,88
20,35	4688,94	0,45	141,67	2783,53	0,89
25,00	4649,02	0,46	146,97	2740,01	0,89
30,30	4599,62	0,46	152,27	2696,84	0,90
35,61	4545,00	0,47	157,58	2653,82	0,90
40,91	4483,64	0,48	162,88	2610,85	0,91
46,21	4413,52	0,49	168,18	2567,94	0,91
51,52	4332,00	0,51	173,48	2525,10	0,91
56,82	4235,61	0,53	178,79	2482,33	0,92
62,12	4120,12	0,56	184,09	2439,50	0,92
67,42	3981,77	0,60	189,39	2396,32	0,92
72,73	3821,97	0,65	194,70	2352,30	0,93
78,03	3655,78	0,70	200,00	2306,76	0,93
83,33	3507,35	0,74	205,30	2258,80	0,93
88,64	3387,18	0,77	210,61	2207,28	0,94
93,94	3290,58	0,80	215,91	2150,79	0,94
99,24	3210,18	0,82	221,21	2087,61	0,95
104,55	3140,66	0,83	226,52	2015,63	0,95
109,85	3078,65	0,85	231,82	1932,23	0,96
115,15	3022,07	0,86	237,12	1834,14	0,97
120,45	2969,55	0,86	242,42	1717,23	0,98
125,76	2920,15	0,87	247,73	1576,20	1,00
131,06	2873,09	0,88	253,03	1547,80	1,00
258,33	1522,67	1,00	406,82	778,76	1,00
263,64	1497,43	1,00	412,12	750,90	1,00
268,94	1472,09	1,00	417,42	722,96	1,00
274,24	1446,63	1,00	422,73	694,94	1,00
279,55	1421,07	1,00	428,03	666,83	1,00
284,85	1395,41	1,00	433,33	638,65	1,00
290,15	1369,64	1,00	438,64	610,39	1,00
295,45	1343,77	1,00	443,94	582,06	1,00
300,76	1317,80	1,00	449,24	553,64	1,00
306,06	1291,73	1,00	454,55	525,15	1,00
311,36	1265,56	1,00	459,85	496,59	1,00
316,67	1239,29	1,00	465,15	467,95	1,00
321,97	1212,93	1,00	470,45	439,23	1,00
327,27	1186,47	1,00	475,76	410,45	1,00
332,58	1159,92	1,00	481,06	381,59	1,00
337,88	1133,27	1,00	486,36	352,65	1,00
343,18	1106,53	1,00	491,67	323,65	1,00
348,48	1079,70	1,00	496,97	294,57	1,00
353,79	1052,78	1,00	502,27	265,42	1,00
359,09	1025,76	1,00	507,58	236,21	1,00
364,39	998,66	1,00	512,88	206,92	1,00
369,70	971,48	1,00	518,18	177,56	1,00
375,00	944,20	1,00	523,48	148,14	1,00
380,30	916,84	1,00	528,79	118,65	1,00
385,61	889,39	1,00	534,09	89,08	1,00
390,91	861,86	1,00	539,39	59,46	1,00
396,21	834,24	1,00	544,70	29,76	1,00
401,52	806,55	1,00	550,00	0,00	1,00



Gambar 2. Pengaruh Suhu Terhadap Laju Alir Air Pendingin dan Fraksi Uap.

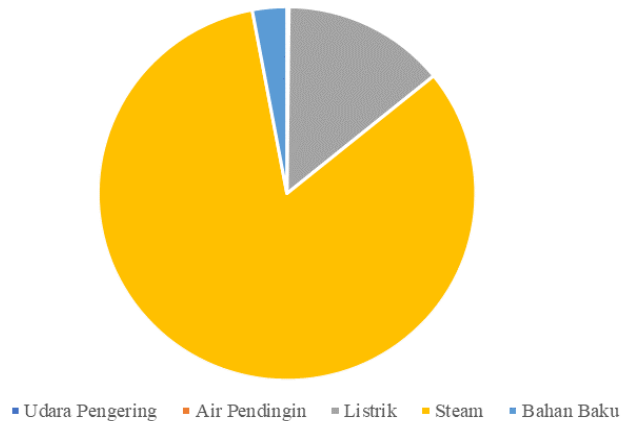
### 3.6. Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi diawali dengan menghitung *bare module equipment cost* ( $C_{BM}$ ) dari masing-masing alat. Perhitungan  $C_{BM}$  seluruhnya menggunakan persamaan yang berasal dari Turton dkk (2001). Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan  $C_{BM}$  antara lain pemilihan material, kondisi operasi, dan kapasitas alat tersebut. Setelah perhitungan  $C_{BM}$  dari tiap-tiap alat selesai, selanjutnya dilakukan perhitungan *total module expenditure* ( $C_{TM}$ ). Hasil analisis tekno-ekonomi tercantum pada tabel 2. *Total capital cost* (TCC) proses produksi bio-oil dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan kapasitas 315 ton/tahun nilainya sebesar 1.152.686 USD (CapEx) sementara itu *operating expenditure* (OpEx) pertahunnya sebesar 168.107 USD/tahun.

Hal yang dapat mempengaruhi besarnya TCC adalah kapasitas pabrik, semakin besar kapasitas pabrik maka semakin besar pula TCC yang perlu diinvestasikan pada saat pembangunan plant. Berdasarkan data pada tabel 5, unit persiapan umpan merupakan unit dengan *capital cost* paling tinggi yaitu mencapai 64,13% dari TCC. Kemudian hal yang berpengaruh pada OpEx adalah adanya fluktuasi harga bahan baku yaitu TKKS, hal ini sangat berpengaruh karena semakin tinggi harga bahan baku akan mengurangi keuntungan yang didapat. Berdasarkan diagram rincian OpEx pada gambar 3, harga bahan baku tidak berpengaruh besar pada OpEx yaitu hanya sebesar 2,9%, sementara itu kebutuhan steam menjadi penyumbang terbesar pada OpEx yaitu mencapai 84,9% dari total OpEx.

Tabel 6. Analisis Tekno-Ekonomi.

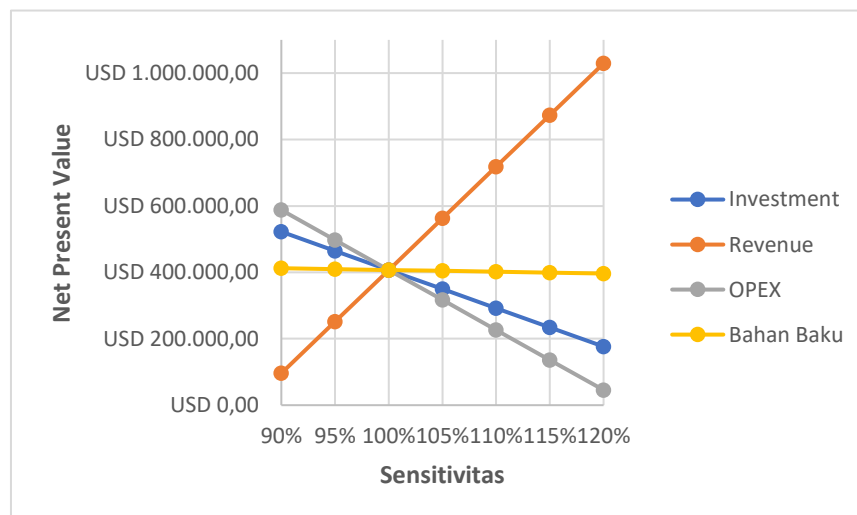
Parameter	Satuan	Biaya
<b>Input Fixed Cost</b>		
<i>Bare Module Cost</i> ( $C_{BM}$ )		
Unit persiapan umpan	USD	180.751
Unit <i>fast pyrolysis</i>	USD	52.368
Unit pemurnian produk	USD	48.724
<i>Total Module Cost</i> ( $C_{TM}$ )	USD	332.576
<i>Grassroots Cost</i> ( $C_{GR}$ )	USD	473.498
<i>Process Plant Cost</i> (PCC)	USD	806.074
<i>Total Plant Cost</i> (TPC)	USD	1.047.896
<i>Total Capital Cost</i> (TCC)	USD	1.152.686
<i>Working Capital Investment</i> (WCI)	USD	230.537
<i>Operation and Maintenance Cost</i> (OMC)	USD	46.107
<b>Input-Variable Cost</b>		
Tandan Kosong Kelapa Sawit	USD/tahun	4800
<b>Input-Utility Cost</b>		
Listrik	USD/tahun	23.544
Air Pendingin	USD/tahun	197
Steam	USD/tahun	139.519
Udara Pengereng	USD/tahun	105
Total Utility Cost	USD/tahun	163.365
<b>Output</b>		
Bio-Oil	USD/tahun	212.638
Bio-Char	USD/tahun	80.645
<b>Indikator Analisis Tekno-Ekonomi</b>		
NPV	USD	913.386
PBP	Tahun	4
IRR	%	22



Gambar 3. Diagram Rincian *Operating Expenditure* (OpEx).

### 3.7. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan terhadap indikator ekonomi yaitu *net present value* (NPV), parameter yang akan dilakukan uji sensitivitasnya antara lain investasi awal (*investment*), pendapatan (*revenue*), *operating expenditure* (OpEx), dan baku. Pada penelitian ini dilakukan perubahan harga sebesar 90%, 95%, 100%, 105%, 110%, 115%, dan 120% dari harga normal. Berdasarkan spider diagram pada gambar 4, besarnya *revenue*, *investment*, dan OpEx sangat berpengaruh pada perubahan nilai NPV. Sementara itu, perubahan harga bahan baku tidak berpengaruh signifikan pada perubahan nilai NPV.



Gambar 4. *Spider Diagram* Sensitivitas NPV.

### Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis proses produksi bio-oil dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dari aspek tekno-ekonominya. Berdasarkan hasil analisis tekno-ekonomi yang dilakukan, untuk mendirikan fasilitas produksi bio-oil dengan bahan baku TKKS memerlukan *total capital cost* (TCC) sebesar 913.386 USD dan *operating expenditure* (OpEx) sebesar 168.107 USD/tahun. Kemudian, fasilitas ini akan mencapai *payback period* (PBP) pada tahun ke-4 dengan *internal rate of return* (IRR) sebesar 14%. Dapat diambil kesimpulan bahwa pendirian fasilitas ini menguntungkan dari aspek ekonominya serta berdampak positif terhadap lingkungan sekitar pabrik pembuatan minyak sawit mentah (MSM) karena limbah padat yang dihasilkan dari pembuatan MSM dapat diubah menjadi suatu produk yang memiliki nilai jual.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Antonius Indarto S.T., M.Eng., Ph.D. atas bantuan yang diberikan selama penelitian ini berlangsung, serta kepada beberapa pihak lain yang telah memberikan dukungan selama penelitian ini berlangsung.

## Daftar Notasi

- $C_{BM}$  = bare module equipment cost  
 $C_{TM}$  = total module cost of the plant  
 $C_{GR}$  = grassroots cost  
 $C_p^0$  = biaya pembelian pada 25 °C dan 1 bar  
 $F_{BM}$  = bare module cost factor  
 $C_{BM}^0$  = bare module equipment cost at base conditions

## Daftar Pustaka

- A. Alcazar-Ruiz, M.L. Ortiz, F. Dorado, L. S.-S. (2022). Gasification versus fast pyrolysis bio-oil production: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 336(November 2021), 130373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130373>
- Abdul Samad, N. A. F., & Saleh, S. (2022). Analysis of Volatile Composition Released from Torrefaction of Empty Fruit Bunch. *Materials Today: Proceedings*, 57(xxxx), 1202–1207. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.462>
- Aspen Technology Inc. (2013). Getting Started Modeling Processes with Solids. *Aspen Technology, Inc.*, 83.
- Bhattacharya, P., Steele, P. H., Hassan, E. B. M., Mitchell, B., Ingram, L., & Pittman, C. U. (2009). Wood/plastic copyrolysis in an auger reactor: Chemical and physical analysis of the products. *Fuel*, 88(7), 1251–1260. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.01.009>
- Brassard, P., Nikoo, M. B., Mahinpey, N., Zheng, H., Kaliyan, N., Morey, R. V., Nugrahany, F., Brown, J. N., Brown, J. N., Ringer, M., Putsche, V., & Scahill, J. (2018). Modelling of Biomass Pyrolysis with Ex-situ Catalytic Upgrading for Bio-crude Production. *Biomass and Bioenergy*, 56(November), 197–210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.032>
- Detchusananard, T., Wuttipisan, N., Limleamthong, P., Prasertcharoensuk, P., Maréchal, F., & Arpornwichanop, A. (2022). Pyrolysis and gasification integrated process of empty fruit bunch for multi-biofuels production: Technical and economic analyses. *Energy Conversion and Management*, 258(February). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115465>
- Fair, J. R. C. W. R. P. J. R., & Walas, S. M. (2012). *Chemical Procces Equipment*.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A. S., & Bindar, Y. (2019). *Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil Dan Gas Dengan Utilization Of Empty Fruit Bunches Waste Into Bio-Char, Bio-Oil And Gases With Pyrolysis Method*. 03(2).
- Herianto. (2018). Economic Analysis of Data Engineering On Production Sharing Contract Case Study Field “A.” *Journal of Economics and Sustainable Development*, 3(1), 10–27. <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>
- Hu, C., Xiao, R., & Zhang, H. (2017). Ex-situ Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass Over HZSM-5 in a Two-Stage Fluidized-Bed/Fixed-Bed Combination Reactor. *Bioresourcetechnology*, 243, 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.011>
- Indonesia Salex Tax Rate*. (2023). Trading Economics. <https://tradingeconomics.com/indonesia/salex-tax-rate>
- Junsittiwate, R., Srinophakun, T. R., & Sukpancharoen, S. (2022). Techno-economic, environmental, and heat integration of palm empty fruit bunch upgrading for power generation. *Energy for Sustainable Development*, 66, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.001>
- Limbong, H. P. (2019). *Performa Reaktor Pirolisis Dengan Bahan Tandan Kosong Kelapa Sawit*. 14(28), 28–32.
- Mo, W., Xiong, Z., Leong, H., Gong, X., Jiang, L., Xu, J., Su, S., Hu, S., Wang, Y., & Xiang, J. (2022). Processes simulation and environmental evaluation of biofuel production via Co-pyrolysis of tropical agricultural waste. *Energy*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.123016>
- Prabowo, D. S., Almada, W., & Sakti, A. (2016). *Sistem Pajak Indonesia*. Indonesia Investmens. <https://www.indonesia-investments.com/id/keuangan/sistem-pajak/item277?>
- Purnama, K. O., Setyaningsing, D., Hambali, E., & Taniwiryo, D. (2021). Peluang *Palm Fatty Acid Distillate* Dari Industri Minyak Sawit Dalam Pembuatan Mono-Digliserida. *Perspektif*, 20(1), 11. <https://doi.org/10.21082/psp.v20n1.2021.11-25>
- Sari, A. N. (2022). *ROI vs IRR: Dua Ukuran Profitabilitas yang Membantu Investor Membuat Keputusan*. <https://www.djkn.kemenkeu.go.id/artikel/baca/15254/ROI-vs-IRR-Dua-Ukuran-Profitabilitas-yang-Membantu-Investor-Membuat-Keputusan.html>
- Su, G., Zulkifli, N. W. M., Ong, H. C., Ibrahim, S., Cheah, M. Y., Zhu, R., & Bu, Q. (2023). Co-pyrolysis of medical protective clothing and oil palm wastes for biofuel: Experimental, techno-economic, and environmental analyses. *Energy*, 273(November 2022), 127221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127221>
- Statistik, B. P. (t.t.). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2020*.
-

- Sudiyani, Y., & Hermiati, E. (2010). Utilization of Oil Palm Empty Fruit Bunch (Opefb) for Bioethanol Production Through Alkali and Dilute Acid Pretreatment and Simultaneous Saccharification and Fermentation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 10(2), 261–267. <https://doi.org/10.22146/ijc.21471>
- Sukmawati. (2020). Bahan Organik Menjanjikan Dari Biochar Tongkol Tagung, Cangkang Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Berdasarkan Sifat Kimia. *J. Agrolantae*, 9(2), 82–94. <https://scholar.archive.org/work/e4lqwldzirfd7hjdq6fkqmkgmy/access/wayback/https://ppnp.e-journal.id/agro/article/download/223/172>
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A., & Bhattacharyya, D. (2001). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (Vol. 40, Nomor 6). [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010316\)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C)



## Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah Jarak Jauh Berbasis LoRa Menggunakan Sensor pH dan Kelembaban

Mina Naidah Gani<sup>1</sup>, Hepi Ludyati<sup>1</sup>, Rifa Hanifatunnisa<sup>1</sup>, Eril Mozef<sup>1</sup>, Rizqa Nur Ananti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Kabupaten Bandung Barat, Indonesia

[mina.naidah@polban.ac.id](mailto:mina.naidah@polban.ac.id), [hepi.ludyati@polban.ac.id](mailto:hepi.ludyati@polban.ac.id), [rifahani@polban.ac.id](mailto:rifahani@polban.ac.id), [emozef@polban.ac.id](mailto:emozef@polban.ac.id),

[rizqa.nur.tkom418@polban.ac.id](mailto:rizqa.nur.tkom418@polban.ac.id)

### Abstrak

Air dan tanah penting di bidang pertanian. Air dibutuhkan dalam fotosintesis, sedangkan tanah sebagai media tanam. Kualitas tanah dipengaruhi kondisi air dan tidak tercemar limbah. Teknologi LoRa memantau kualitas tanah jarak jauh. Parameter penting adalah kelembaban dan pH tanah. Sistem mikrokontroler dengan sensor pH dan kelembaban tanah memantau dan mengirimkan data melalui LoRa. Ada dua jenis sensor yang digunakan pada penelitian ini yaitu sensor untuk mengukur kelembaban dan sensor mengukur pH yang dilakukan pada dua jenis tanah. Sensor kelembaban yang digunakan adalah YL-69 dengan nilai eror rata-rata sebesar 0,077%, dengan rentang eror terkecil adalah 0% dan eror terbesar sebesar 0,016%. Sementara itu, sensor pH *electrode probe* digunakan untuk mengukur tingkat keasaman dengan nilai eror rata-rata sebesar 0,0288%, dan rentang eror terkecil adalah 0,034% dan eror terbesar adalah 0,021%. Hasil pemantauan dikirimkan melalui jaringan LoRa yang terhubung dengan ESP32. Pengujian dilakukan pada dua kondisi yaitu LOS dengan jarak terjauh 500 meter dan NLOS dengan jarak terjauh 50 meter. Berdasarkan hasil pengujian, *gateway* dapat mendeteksi nilai RSSI yang berubah dari -104 dBm hingga -64 dBm, dan nilai SNR yang berada pada rentang -2 dB sampai +10 dB. Nilai *delay* rata-rata saat pengiriman data antara *node* dan *gateway* adalah 2,118 detik.

Kata kunci: Kelembaban, LoRa, Modul ESP32, Tingkat Keasaman (pH)

### Abstract

This study focuses on the pivotal role of water and soil in agriculture, emphasizing their significance for photosynthesis and as a planting medium, respectively. Maintaining uncontaminated soil is crucial for optimal crop growth. Remote monitoring of soil quality is facilitated by LoRa technology, with a microcontroller system employing sensors for soil moisture and pH. YL-69 moisture sensors exhibit an average error of 0.077%, with a range from 0% to 0.016%, while pH electrode probe sensors register an average error of 0.0288%, ranging from 0.034% to 0.021%. The monitoring data is transmitted through the LoRa network connected to ESP32. Field testing under Line-of-Sight (LOS) conditions at a maximum distance of 500 meters and Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions up to 50 meters reveals that the gateway successfully detects RSSI values (-104 dBm to -64 dBm) and SNR values (-2dB to +10dB) within acceptable ranges. The average delay during data transmission between the node and the gateway is measured at 2.118 seconds. This research demonstrates the effectiveness of LoRa technology in remotely monitoring and transmitting crucial soil parameters, providing valuable insights for precision agriculture.

Keywords: Humidity, LoRa, ESP32 Module, Acidity Level (pH)

### 1. Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara yang memiliki karakter agraris di mana sebagian besar penduduknya mencari nafkah sebagai petani. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (Direktorat Analisis dan Pengembangan Statistik, 2021), sektor pertanian bersama-sama dengan sektor kehutanan dan perikanan, menduduki peringkat kedua dengan kontribusi sebesar 14,30% terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) pada tahun 2021. Pertumbuhan sektor pertanian sangat dipengaruhi oleh sumber daya alam yang melimpah serta kesuburan tanah di Indonesia. Dalam sektor pertanian, kualitas air dan tanah sebagai media tanam memiliki peran yang sangat penting. Air berfungsi sebagai salah satu faktor penting dalam proses fotosintesis, sementara kualitas tanah memengaruhi pertumbuhan tanaman sebagai media tanam. Menurut berita dari Dinas Pertanian Pemerintah Kabupaten Buleleng (Admin Distan, 2021), kesuburan tanah dipengaruhi oleh kandungan unsur hara yang berbeda pada setiap jenis tanah. Tingkat keasaman tanah (pH) tanah sangat penting diperhatikan karena dapat mempengaruhi pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Kebanyakan tanaman tumbuh paling baik dalam tanah yang memiliki pH netral hingga sedikit asam, yaitu dengan nilai pH antara 5,6 hingga

#### Info Makalah:

Dikirim : 07-25-23;

Revisi 1 : 10-14-23;

Revisi 2 : 10-20-23;

Diterima : 10-25-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [mina.naidah@polban.ac.id](mailto:mina.naidah@polban.ac.id)

6 (Prabowo & Subantoro, 2017). Tanah dengan pH yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menyebabkan masalah seperti kekurangan nutrisi dan racun tanaman, yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengukur pH tanah secara teratur dan menyesuaikan pH. Hal ini akan membantu meningkatkan produktivitas tanaman dan memastikan bahwa tanaman mendapatkan nutrisi yang mereka butuhkan untuk tumbuh sehat dan kuat. Hal yang juga penting bagi tanaman adalah faktor kelembaban

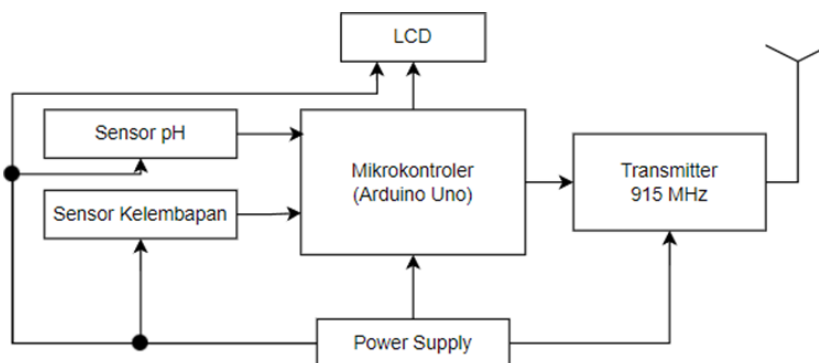
tanah. Kelembaban tanah yang terlalu tinggi biasanya diakibatkan kandungan air yang berlebih, atau sebaliknya. Kualitas tanaman salah satunya disebabkan oleh kelembaban tanah (Karamina, Fikrinda, & Murti, 2017) ; (Maulana, Haidar, & Fadhlán, 2021). Tanaman yang kelembabannya kurang akan mengakibatkan daun-daun yang kecil-kecil dan kering (Djumali, 2014). Untuk daerah perkebunan yang sulit dijangkau oleh pihak pengelola, maka pemantauan kedua parameter tersebut dapat (Direktorat Analisis dan Pengembangan Statistik, 2021) dilakukan terkait pemantauan kualitas tanah dan air menggunakan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *wireless sensor network* (WSN) (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018) ; (Hendrawati, Maulana, & Al Tahtawi, 2019) (Sabiq & Budisejati, 2017) ; (Sahbani & Azwar, 2019) ; (Arafat & Setyati, 2020) ; (Maulana, Haidar, & Fadhlán, 2021) ; (Wardhana, Hariyanto, & Utomo, 2021) ; (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019) ; (Arijuddin, Bhawiyuga, & Amron, 2019) ; (Wisduanto, Bhawiyuga, & Kartikasari, 2019). Pada penelitian-penelitian tersebut, beberapa parameter yang dipantau adalah suhu (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018) ; (Hendrawati, Maulana, & Al Tahtawi, 2019) ; (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019), pH (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018) ; (Sabiq & Budisejati, 2017) ; (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019), kekeruhan (Sabiq & Budisejati, 2017), warna (Sabiq & Budisejati, 2017), kelembaban udara (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018), (Wisduanto, Bhawiyuga, & Kartikasari, 2019) kelembaban tanah (Arijuddin, Bhawiyuga, & Amron, 2019) (Wisduanto, Bhawiyuga, & Kartikasari, 2019) (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019), dan asap (Sahbani & Azwar, 2019). Sensor-sensor yang digunakan antara lain sensor DS18B20 (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018), sensor pH Meter Analog Kit (Sabiq & Budisejati, 2017), sensor pH *electrode probe* (Sabiq & Budisejati, 2017), GE *turbidity* SKU SEN0189 (Sabiq & Budisejati, 2017), modul TCS230 (Sabiq & Budisejati, 2017), dan sensor MQ2 (Sabiq & Budisejati, 2017). Hasil dari pemantauan tersebut disimpan dalam *database* dan ditampilkan pada sebuah *website* [ (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018); (Hendrawati, Maulana, & Al Tahtawi, 2019) ; (Sabiq & Budisejati, 2017); (Sahbani & Azwar, 2019) ; (Arafat & Setyati, 2020) ; (Maulana, Haidar, & Fadhlán, 2021) ; (Wardhana, Hariyanto, & Utomo, 2021) ; (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019)]. Selain itu, beberapa penelitian juga menggunakan modul LoRa untuk pengiriman data secara *real-time* dan jangkauan yang jauh [ (Sahbani & Azwar, 2019) ; (Arafat & Setyati, 2020) ; (Maulana, Haidar, & Fadhlán, 2021) ; (Wardhana, Hariyanto, & Utomo, 2021) ; (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019)]. Pada penelitian (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019), dilakukan pemantauan kelembaban tanah, suhu, pH, dan penyiraman otomatis pada tanaman tomat berbasis IoT. Penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya, seperti penelitian (Syafiqoh, Sunardi, & Yudhana, 2018) tentang pengembangan *wireless sensor network* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk sistem pemantauan kualitas air dan tanah pertanian. Di sini, pemantauan kualitas air dan tanah dilakukan dengan beberapa parameter, seperti suhu dan pH air dan tanah pertanian, dan disimpan dalam *database* serta ditampilkan pada sebuah *website*. Selanjutnya, (Hendrawati, Maulana, & Al Tahtawi, 2019) meneliti tentang sistem pemantauan kualitas air sungai di kawasan industri berbasis WSN (*Wireless Sensor Network*) dan IoT. Pemantauan kualitas air ditentukan dengan beberapa parameter, seperti suhu, pH, dan tingkat kekeruhan air, dan disimpan pada *database* serta ditampilkan pada *website*. Penelitian lainnya adalah oleh (Sabiq & Budisejati, 2017) tentang sistem pemantauan kadar pH, suhu, dan warna pada air sungai melalui web berbasis WSN. Sabiq memanfaatkan teknologi WSN dengan parameter yang diuji yaitu kadar pH, suhu, dan warna dengan hasil pengujian yang ditampilkan pada *website*. (Sahbani & Azwar, 2019), memanfaatkan teknologi LoRa untuk mengirimkan data sensor suhu dan asap secara *real-time* yang mampu mendeteksi kebakaran hutan hingga jarak 700 meter. Sementara itu, (Arafat & Setyati, 2020) mendesain dan implementasi *Wireless Sensor Network* menggunakan LoRa untuk pemantauan tingkat pencemaran udara di Kota Surabaya. Selanjutnya, (Maulana, Haidar, & Fadhlán, 2021) melakukan perancangan dan realisasi sistem komunikasi data dengan pemanfaatan protokol komunikasi LoRa pada aplikasi *smartphone* di area sulit koneksi internet. Sementara itu, (Wardhana, Hariyanto, & Utomo, 2021) merancang dan merealisasi sistem komunikasi darurat menggunakan radio LoRa yang terintegrasi dengan *smartphone* melalui *Bluetooth*. Terakhir, (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019) membuat sistem *monitoring* kelembaban tanah, suhu, pH, dan penyiraman otomatis pada tanaman tomat berbasis *Internet of Things*. Pada penelitian ini, sistem *monitoring* dilakukan dengan beberapa parameter, seperti kelembaban tanah, suhu, pH, dan penyiraman otomatis dengan hasil pengujian yang ditampilkan pada *website*.

Sehingga perlu kiranya dikembangkan suatu sistem untuk memonitor kelembaban dan pH media tanam beberapa jenis tanaman. Pemanfaatan modul LoRa dalam proses transmisi data memungkinkan pemantauan dilakukan secara nirkabel, sehingga memudahkan pengelola untuk memantau dari jarak jauh (Wardhana, Hariyanto, & Utomo, 2021). Selain itu, hasil pengukurannya dapat diintegrasikan dengan *smartphone* agar dimungkinkan untuk mengakses data tersebut secara *mobile* dan mudah dari mana saja. Penelitian akan menerapkan proses pengukuran terhadap parameter kelembaban dan pH tanah menggunakan sensor *soil moisture* (Gunawan, Andhika, & Hibatulloh, 2019) dan sensor pH *electrode probe* (Sabiq & Budisejati, 2017). Pada bagian ini akan digunakan mikrokontroler sedangkan hasil pengukuran ditampilkan pada sebuah LCD. Untuk pengiriman data sensor menggunakan modul LoRa (*Long Range*) (Sahbani & Azwar, 2019) . Modul LoRa yang digunakan bekerja pada frekuensi 915 MHz. Selanjutnya modul LoRa ini terhubung dengan antena yang berfungsi untuk memancarkan sinyal. Untuk bagian *gateway* atau bagian penerima data. Terdapat modul LoRa yang dilengkapi dengan antena dengan tipe yang sama dengan bagian *node* atau penerima yang bekerja pada frekuensi 915 MHz, ada mikrokontroler yang digunakan pada bagian *gateway* (Hendrawati, Maulana, & Al Tahtawi, 2019).

## 2. Metode

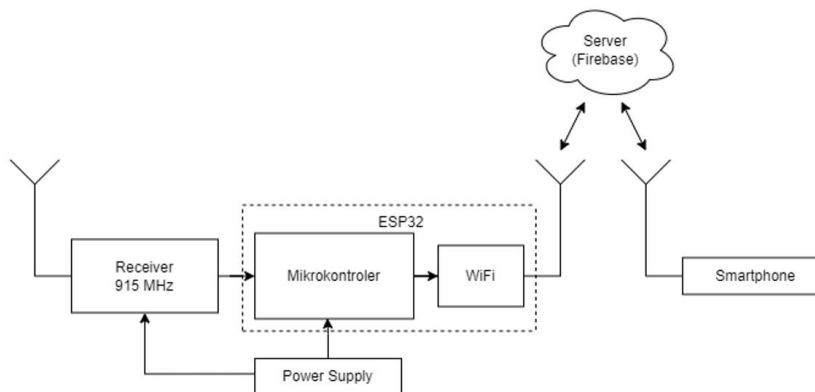
### 2.1. Perancangan Blok Diagram

Perancangan dan realisasi sistem dilakukan pada bagian *hardware* dan *software*. Bagian *hardware* merupakan alat untuk memantau kualitas tanah dengan parameter yang diuji yaitu kelembaban dan tingkat keasaman (pH) tanah. Pada bagian *node*, alat yang dibuat terdiri dari komponen elektronik seperti yang terlihat pada blok diagram pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Bagian Node.

Gambar 1 juga menunjukkan proses pengukuran terhadap parameter kelembaban dan pH tanah menggunakan sensor *soil moisture* YL-69 dan sensor pH *electrode probe*. Pada bagian ini menggunakan mikrokontroler yaitu Arduino Uno dan untuk hasil pengukuran ditampilkan pada sebuah LCD berukuran *16x2*. Untuk pengiriman data sensor menggunakan modul LoRa (*Long Range*). Modul LoRa yang digunakan bekerja pada frekuensi 915 MHz yaitu tipe RFM95. Selanjutnya modul LoRa ini terhubung dengan antena *sleeve dipole* dengan gain 3 dBi yang berfungsi untuk memancarkan sinyal. Pada Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan blok diagram untuk bagian *gateway* atau bagian penerima data. Terdapat modul LoRa yang dilengkapi dengan antena dengan tipe yang sama dengan bagian *node* atau penerima yaitu RFM95 yang bekerja pada frekuensi 915 MHz. Adapun jenis mikrokontroler yang digunakan pada bagian *gateway* yaitu modul ESP32. Hasil pemantauan disimpan pada server *firebase*.

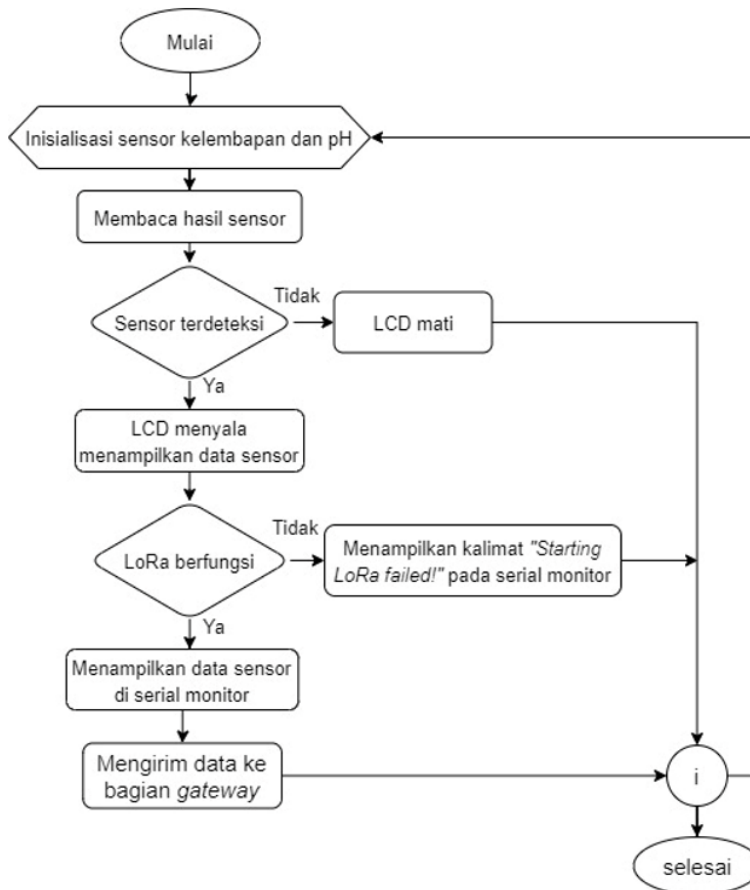


Gambar 2. Blok Diagram Bagian Gateway.

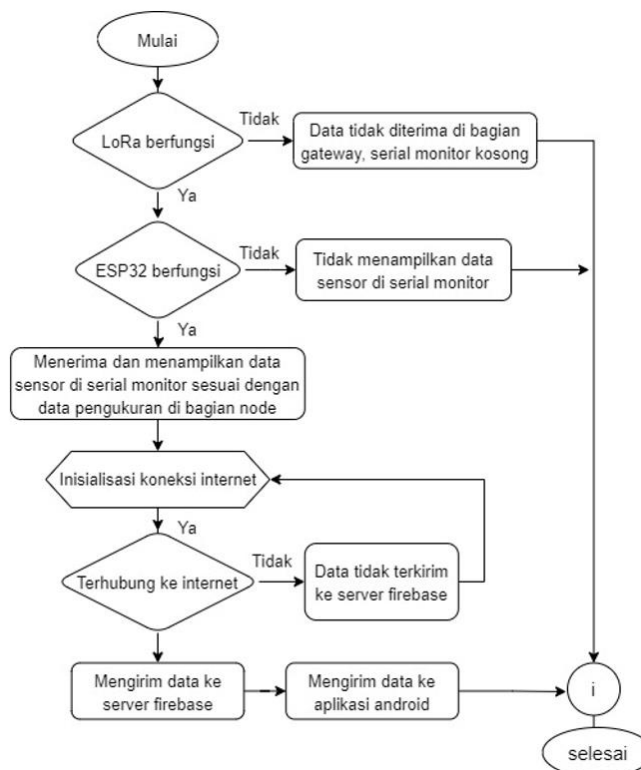
### 2.2. Perancangan Diagram Alir

Pengerjaan pengujian pada proyek ini dilakukan secara bertahap sesuai dengan yang digambarkan dalam *flowchart* di Gambar 3 (bagian *Node*, *hardware* untuk mengolah objek di titik pantau berfungsi sebagai *transceiver*). Program ini dimulai dengan inisialisasi sensor dan modul LoRa, kemudian masuk ke dalam *loop* utama yang berulang, di mana data sensor dibaca, diformat, dikirim melalui LoRa, dan kemudian ditampilkan di serial monitor dengan menunggu konfirmasi dan melakukan pengecekan status pengiriman, serta memberikan opsi untuk menambahkan penundaan waktu sebelum mengulangi siklus, hingga akhirnya data akan muncul di serial monitor.

Pada Gambar 4 (bagian *Gateway*, *hardware* untuk mengolah hasil pengukuran yang telah dikirim dari *node*, dan data diterima di *Receiver*, *Gateway*). Setelah data tiba di *gateway*, *gateway* akan memproses dan mengirim data ke *Firestore*. Aplikasi Android terhubung ke *Firestore* untuk mengambil dan menampilkan data yang diterima dari perangkat LoRa.



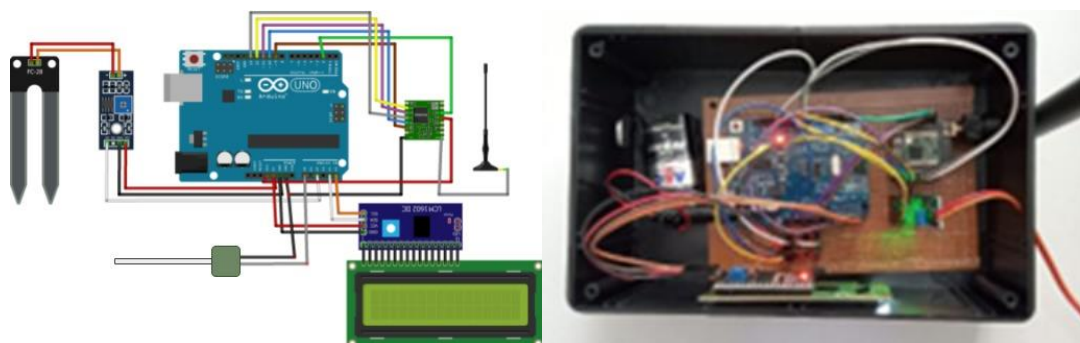
Gambar 3. Flowchart Bagian Node.



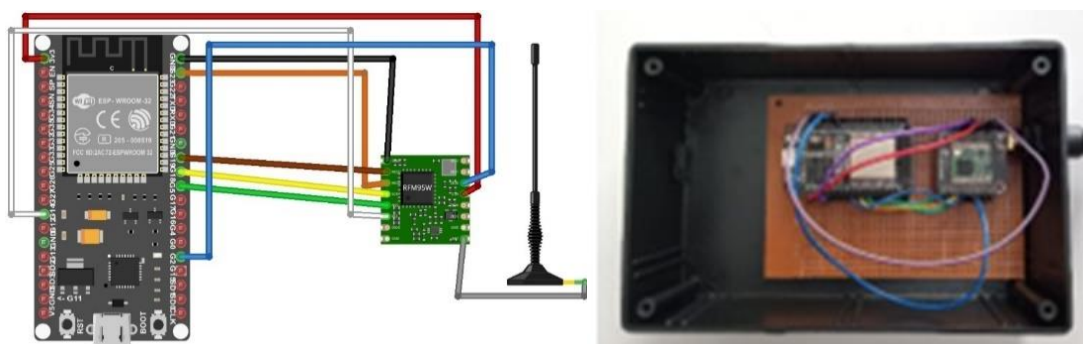
Gambar 4. Flowchart Bagian Gateway.

### 2.3. Realisasi Perangkat Keras

Pada perangkat keras alat direalisasikan kedalam bentuk PCB yang disimpan dalam sebuah *box*. Sebelumnya terlebih dahulu dilakukan proses pengkabelan pada *software fritzing*. Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan realisasi komponen pada PCB yang dibuat untuk *hardware* di bagian *node* dan *gateway*.



Gambar 5. Pengkabelan dan Realisasi Bagian *Node* pada PCB.



Gambar 6. Pengkabelan dan Realisasi Bagian *Gateway* pada PCB.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan pada dua jenis tanah yang berbeda (Tanah A dan Tanah B). Pengujian dilakukan untuk mengetahui perbedaan nilai dari hasil pengukuran. Berikut merupakan hasil pengujian sensor kelembapan tanah YL-69 dan sensor pH *electrode probe* yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Pengujian dilakukan pada tanah yang sama dan diambil sebanyak 10 data hasil pengujian. Berdasarkan pengujian yang dilakukan sensor yang terpasang pada bagian *node* sudah berfungsi dengan baik. Pengujian kelembapan dan pH dilakukan pada dua buah sampel tanah yang berbeda. Didapatkan nilai kelembapan dan pH sesuai dengan yang diinginkan yaitu nilai mendekati 0% (kurang dari 50%) dinyatakan sebagai tanah kering dan nilai kelembapan yang mendekati 100% (rentang 50%-100%) merupakan tanah yang lembab. Sedangkan untuk nilai pH sudah sesuai dengan aturan yang berlaku yaitu tanah asam berada pada rentang 0-6, pH netral ditunjukkan dengan nilai 7 dan tanah basa pada rentang 8-14.

Tabel 1. Pengukuran Sensor Pada Tanah A.

Sensor Kelembaban YL-69			Sensor ph <i>Electrode Probe</i>		
Nilai Analog	Nilai Kelembapan	Ket Tanah	Nilai Analog	Nilai ph	Ket Tanah
870	14%	Kering	21	5,93	Asam
870	14%	Kering	23	5,79	Asam
871	14%	Kering	25	5,65	Asam
870	14%	Kering	27	5,51	Asam
871	14%	Kering	28	5,45	Asam
870	14%	Kering	27	5,51	Asam
870	14%	Kering	27	5,51	Asam
871	14%	Kering	30	5,31	Asam
870	14%	Kering	31	5,24	Asam
870	14%	Kering	30	5,31	Asam

Tabel 2. Pengukuran Sensor Pada Tanah B

Sensor Kelembaban YL-69			Sensor pH <i>Electrode Probe</i>		
Nilai Analog	Nilai Kelembapan	Ket Tanah	Nilai Analog	Nilai pH	Ket Tanah
197	80%	Lembab	19	5,74	Asam
198	80%	Lembab	21	5,60	Asam
199	80%	Lembab	22	5,53	Asam
200	80%	Lembab	22	5,53	Asam
202	80%	Lembab	21	5,60	Asam
201	80%	Lembab	21	5,60	Asam
202	80%	Lembab	21	5,60	Asam
203	80%	Lembab	22	5,53	Asam
204	80%	Lembab	23	5,46	Asam
204	80%	Lembab	23	5,46	Asam

### 3.2. Pengujian Efektivitas Sensor

Tabel 3 dan 4 adalah Pengujian perbandingan sensor yang digunakan pada proyek dilakukan untuk mengetahui efektivitas antara sensor kelembapan YL-69 dan sensor pH *electrode probe* dengan sensor pembanding yang merupakan alat yang sudah diperjual belikan secara konvensional dan sudah berstandar. Sensor pembanding yang digunakan adalah jenis *3 way soil meter* dan *4 in 1 soil survey instrument*. Data hasil pengujian dilampirkan pada Tabel 3. Berdasarkan pengujian didapatkan nilai error rata-rata terhadap sensor kelembapan YL-69 yaitu 0.077% dengan nilai error terkecil 0% dan nilai error terbesar mencapai 0.016%. Sedangkan nilai error rata-rata untuk penggunaan sensor pH *electrode probe* yaitu 0,0288% dengan nilai error terkecil 0,021% dan nilai error terbesar mencapai 0,034%.

Tabel 3. Pengujian Sensor Kelembapan YL-69.

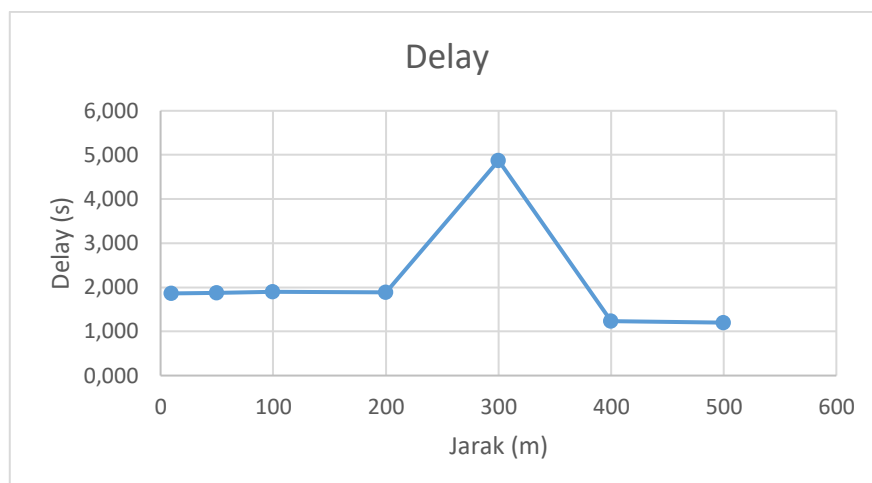
Sensor Kelembapan YL-69	Sensor Kelembapan Pembanding	Error
33%	30%	0,1%
33%	30%	0,1%
32%	30%	0,06%
35%	30%	0,16%
35%	30%	0,16%
27%	29%	0,06%
26%	28%	0,07%
28%	28%	0%
27%	28%	0,03%
27%	28%	0,03%

Tabel 4. Pengujian Sensor pH *Electrode Probe*.

Sensor pH <i>Electrode Probe</i>	Sensor pH Pembanding	Error
5,74	5,55	0,034%
5,74	5,55	0,034%
5,67	5,55	0,021%
5,74	5,55	0,034%
5,74	5,55	0,034%
5,67	5,55	0,021%
5,67	5,55	0,021%
5,74	5,55	0,034%
5,74	5,55	0,034%
5,67	5,55	0,021%

### 3.3. Pengujian Jangkauan

Setelah pengujian sensor berhasil, kemudian dilakukan pengujian terhadap koneksi LoRa dengan memperhatikan jarak jangkauan dari alat dan banyak paket yang dikirim dan diterima. Proses pengujian dilakukan pada kondisi LOS dan NLOS. Penentuan jarak dilakukan mulai dari 10 meter dan 50 meter sebagai jarak terdekat dan dilanjutkan dengan kelipatan 100 meter untuk kondisi LOS dan kelipatan 10 meter untuk kondisi NLOS dengan mempertimbangkan lokasi dari pengujian. Jarak jangkauan untuk pengujian pada kondisi NLOS dipilih dengan nilai jarak kelipatan 10 meter karena lokasi pengujian memiliki banyak *obstacles* seperti pepohonan yang tinggi, rumah tinggal, gedung, dan sebagainya, sehingga akan berpengaruh terhadap jarak jangkauan yang terlalu jauh. Gambar 8 adalah pengujian untuk mengetahui besar *delay* pada saat komunikasi data antara bagian *node* dan *gateway*. Nilai *delay* diamati pada pengiriman data ketika kondisi LOS.



Gambar 7. Grafik Hasil Pengujian Perubahan Jarak Antara *Node* dan *Gateway* terhadap *Delay* Pengiriman Data.

Tabel 5 dan Tabel 6 yang merupakan data hasil pengujian modul LoRa pada kondisi LOS dan NLOS, dengan nilai RSSI (*Received Signal Strength Indication*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui kekuatan sinyal yang diterima. RSSI dikategorikan sebagai teknik berbasis jangkauan karena didasarkan pada redaman sinyal.

Tabel 5. Pengujian Perubahan Jarak Antara *Node* dan *Gateway* terhadap Nilai RSSI Pada Kondisi LOS.

Jarak (meter)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Paket Dikirim	Paket Diterima	Keberhasilan
10	-69	9,75	4	4	100%
50	-79	9,50	4	4	100%
100	-91	10,00	4	4	100%
200	-94	9,25	4	4	100%
300	-95	6,00	4	3	75%
400	-97	4,50	4	4	100%
500	-98	3,75	4	4	100%

Tabel 6. Pengujian Perubahan Jarak Antara *Node* dan *Gateway* terhadap Nilai RSSI Pada Kondisi NLOS.

Jarak (meter)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Paket Dikirim	Paket Diterima	Hasil (%)
10	-64	9,75	4	4	100
20	-77	10,00	4	4	100
30	-85	9,25	4	4	100
40	-90	7,50	4	4	100
50	-104	-2,00	4	4	100

### 3.4. Pengujian Fungsionalitas

Semua aplikasi yang dilakukan telah berhasil dengan baik.

Tabel 7. Pengujian Fungsionalitas Alat

No.	Pengujian	Target	Hasil
1.	Inisialisasi mikrokontroler Arduino dan ESP32	Mikrokontroler dapat melakukan inisialisasi	Tercapai
2.	Inisialisasi Modul LoRa	Modul LoRa dapat bekerja pada frekuensi 915 MHz	Tercapai
3.	Pengiriman Data Menggunakan LoRa	Data mengirimkan data sensor menggunakan LoRa	Tercapai
4.	Integrasi gateway dengan server	Dapat mengirimkan data sensor dari gateway ke server firebase	Tercapai

Komunikasi data antara bagian *node* dan *gateway* sudah berfungsi dengan baik. Pada bagian *node*, mikrokontroler sudah dapat menginisialisasi program dan modul LoRa sudah dapat bekerja pada frekuensi 915 MHz. Data hasil pengukuran sensor dapat dikirimkan menggunakan LoRa dari *node* ke *gateway* dengan menggunakan antena *sleeve dipole* 3dBi. Pengujian proses komunikasi data antara *node* dan *gateway* dilakukan dengan jarak jangkauan yang bervariasi mulai dari 10 meter sampai 500 meter. Berdasarkan pengujian yang dilakukan bagian *gateway* sudah dapat



menerima data yang dikirim oleh bagian *node* dengan sesuai. Namun terdapat perbedaan data yang diterima ketika pengujian pada jarak jangkau 300 meter.

Berdasarkan data hasil pengujian, perubahan jarak tidak terlalu berpengaruh terhadap *delay* pengiriman data. Dengan pengukuran 10 sampel data, jarak memengaruhi nilai RSSI baik pada kondisi LOS ataupun kondisi NLOS. Selain memengaruhi terhadap nilai RSSI, perubahan jarak juga berpengaruh terhadap nilai SNR (*Signal to Noise Ratio*). Nilai SNR yang dihasilkan masih dalam rentang spesifikasi LoRa yaitu antara -20 dB sampai +10 dB.

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis sistem, diperoleh kesimpulan sebagai berikut. Sensor YL-69 pada bagian *node* mampu mendeteksi kelembaban tanah baik dalam kondisi kering maupun basah. Keefektifan sensor kelembaban YL-69 terbukti cukup baik, dengan nilai rata-rata eror sebesar 0,077%. Sensor ini menunjukkan eror terkecil 0% dan eror terbesar mencapai 0,016%. Sementara sensor pH *electrode probe* memiliki nilai eror terbesar sebesar 0,034% dan eror terkecil 0,021%, dengan rata-rata eror sebesar 0,0288%. Bagian *node* dan *gateway* berhasil beroperasi pada frekuensi 915MHz. Sistem dapat berfungsi dalam kondisi *Line of Sight* (LOS) dengan jarak maksimal 500 meter, sementara pada kondisi *Non-Line of Sight* (NLOS) tetap dapat berfungsi baik pada jarak maksimal 50 meter. Namun, ketika melebihi jarak maksimal, sistem rentan terhadap *noise* akibat adanya hambatan seperti bangunan dan pepohonan, yang dapat mengganggu komunikasi menggunakan teknologi LoRa. Perubahan jarak dapat mempengaruhi nilai *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dan *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) yang terdeteksi di *gateway*, tetapi tidak berdampak pada nilai *delay* pengiriman data. Pada kondisi LOS dengan jarak maksimal 500 meter, nilai RSSI tertinggi mencapai -98 dBm, dan SNR sebesar 3,75 dB pada jarak maksimal 50 meter. Sedangkan pada kondisi NLOS dengan jarak maksimal 500 meter, nilai RSSI tertinggi mencapai -104 dBm, dan SNR sebesar -2,00 dB pada jarak maksimal 50 meter. Sementara nilai *delay* rata-rata pengiriman data adalah 2,118 detik. Semakin jauh jangkauan dan semakin banyak hambatan di lokasi pengujian, nilai RSSI dan SNR cenderung menurun, menyebabkan melemahnya kekuatan sinyal.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan finansialnya pada penelitian ini. Khususnya kepada UPPM yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini.

### Daftar Notasi

<i>pH</i>	=	Kadar keasaman [ - ]
<i>RSSI</i>	=	<i>Received Signal Strength Indication</i> [dBm]
<i>SNR</i>	=	<i>Signal to Noise Ratio</i> [dB]
<i>LOS</i>	=	<i>Ligne of Sight</i>
<i>NLOS</i>	=	<i>Non-Ligne of Sight</i>

### Daftar Pustaka

- Admin Distan. (n.d.).(2021). Pengaruh pH Tanah Terhadap Pertumbuhan Tanaman. [Online]. Tersedia: <https://distan.bulelengkab.go.id/informasi/detail/berita/40-pengaruh-ph-tanah-terhadap-pertumbuhan-tanaman>.
- Arafat, Y., & Setyati, E. (2020). Desain dan Implementasi Wireless Sensor Network Menggunakan LoRa untuk Pemantauan Tingkat Pencemaran Udara di Kota Surabaya. *Teknologi: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, 10(2), 75-84.
- Arijuddin, H., Bhawiyuga, A., & Amron, K. (2019). Pengembangan Sistem Perantara Pengiriman Data Menggunakan Modul Komunikasi LoRa dan Protokol MQTT pada Wireless Sensor Network. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 3(2), 1655-1659.
- Badan Pusat Statistik. (2021). Indikator Ekonomi Oktober 2021, Jakarta <https://www.bps.go.id/publication/2021/12/27/12f189f36429a9c71a183094/indikator-ekonomi-oktober-2021.html>
- Djumali, M. S. (2014). Pengaruh Kelembaban Tanah Terhadap Karakter Agronomi, Hasil Rajangan Kering Dan Kadar Nikotin Tembakau. *Berita Biologi*, 13(1), 41-46.
- Gunawan, R., Andhika, T., & Hibatulloh, S. F. (2019). Sistem Monitoring Kelembaban Tanah, Suhu, pH dan Penyiraman Otomatis pada Tanaman Tomat Berbasis Internet of Things. *TELEKONTRAN*, 7(1), 66-78.
- Hendrawati, T. D., Maulana, N., & Al Tahtawi, A. R. (2019) *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa) Kemenristekdikti*, 4(2), 283-292.
- Karamina, H., Fikrinda, W., & Murti, A. T. (2017). Kompleksitas Pengaruh Temperatur dan Kelembaban Tanah Terhadap Nilai pH Tanah di Perkebunan Jambu Biji Varietas Kristal (*Psidium guajava* L.) Bumiaji, Kota Batu. *Jurnal Kultivasi*, 16(3), 587-595.

- Maulana, F. A., Haidar, A., & Fadhlán, M. Y. (2021). Perancangan dan Realisasi Sistem Komunikasi Data dengan Pemanfaatan Protokol Komunikasi LoRa pada Aplikasi Smartphone di Area Sulit Koneksi Internet. *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS) Bandung*, 626-632.
- Prabowo, R., & Subantoro, R. (2017). Analisis Tanah sebagai Indikator Tingkat Kesuburan Lahan budidaya Pertanian di Kota Semarang, 2(2), 37-46.
- Sabiq, A., & Budisejati, P. N. (2017). Sistem Pemantauan Kadar pH, Suhu dan Warna pada Air Sungai Melalui Web Berbasis Wireless Sensor Network. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 5(3), 94-100.
- Sahbani, R., & Azwar, H. (2019). Pengiriman Data Sensor Suhu Dan Asap Menggunakan Longe Range (LoRa). 9th *Applied Business and Engineering Conference Politeknik Caltex Riau*, 1063-1080.
- Syafiqoh, U., Yudhana, S., & Arafat, Y. (2018). Pengembangan Wireless Sensor Network Berbasis Internet of Things untuk Sistem Pemantauan Kualitas Air dan Tanah Pertanian. *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT (JPIT)*, 3(2), 285-289.
- Wardhana, W. G., Hariyanto, T., & Utomo, T. B. (2021). Perancangan dan Realisasi Sistem Komunikasi Darurat Menggunakan Radio LoRa yang Terintegrasi dengan Smartphone Melalui Bluetooth. *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS) Bandung*, 696-702.
- Wisduanto, R. G., Bhawiyuga, A., & Kartikasari, D. P. (2019). Implementasi Sistem Akuisisi Data Sensor Pertanian Menggunakan Protokol Komunikasi LoRa. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 3(3), 2201-2207

## Perbandingan Efektifitas *Protective Coating*, *Silica Fume*, dan Semen Tipe II Terhadap Pengaruh Klorida dan Sulfat pada Beton

Anto Destianto<sup>1</sup>, Yudi Herdiansah<sup>1</sup>, dan Agus Sulaeman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Magister Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

[anto176717@gmail.com](mailto:anto176717@gmail.com), [yudi.herdiansah@lecture.unjani.ac.id](mailto:yudi.herdiansah@lecture.unjani.ac.id), [agussulaeman@lecture.unjani.ac.id](mailto:agussulaeman@lecture.unjani.ac.id)

### Abstrak

Beton yang berada di lingkungan dengan kadar sulfat serta klorida tinggi dapat mempengaruhi durabilitas beton beton. Beberapa teknologi yang sering digunakan diantaranya: *protective coating*, penambahan *silica fume* pada campuran beton, dan semen tipe II. Oleh sebab itu tujuan penelitian ini adalah untuk mengkomparasi efektifitas *protective coating*, penambahan *silica fume* pada campuran beton dan penggunaan semen tipe II untuk meningkatkan durabilitas beton yang terpapar klorida dan sulfat. Benda uji dibuat dalam 4 variasi yaitu; benda uji semen tipe I tanpa proteksi, benda uji semen tipe I dengan proteksi *coating*, benda uji semen tipe I dengan tambahan *silica fume*, semen tipe II tanpa proteksi. Benda uji direndam pada larutan klorida serta sulfat menggunakan lama perendaman 14 hari, 28 hari, 42 hari, dan 56 hari. Peninjauan pengaruh klorida dan sulfat pada beton dilakukan dengan pengujian kuat tekan, pengujian kadar klorida, pengujian infiltrasi klorida, analisis visual dan pengujian perubahan panjang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *protective coating* memiliki ketahanan terhadap klorida dan sulfat, penambahan *silica fume* pada semen tipe I memberikan ketahanan terhadap klorida namun tidak memberi ketahanan terhadap sulfat, sedangkan penggunaan semen tipe II memberikan ketahanan terhadap sulfat namun tidak memberikan ketahanan terhadap klorida.

Kata kunci: Klorida dan Sulfat, Beton

### Abstract

Concrete that is in a surrounding with high sulfate and chloride levels can affect durability of concrete. Numerous technologies that might be often used include: protecting coating, addition of silica fume to concrete mix, and type II cement. Consequently, the intention of this have a look at was to examine effectiveness of shielding coatings, the addition of silica fume to the concrete blend, and the usage of kind II cement to grow the sturdiness of concrete uncovered to chlorides and sulfates. The specimens were made in 4 variations; cement type I specimens without protection, cement type I specimens with coating, cement type I specimens with silica fume, and cement type II without protection. The specimens were immersed in a solution of chloride and sulfate for 14 days, 28 days, 42 days, and 56 days. The study was carried out by testing the compressive strength, chloride content, chloride infiltration, visual analysis, and change of length. The results showed that protective coating had resistance to chloride and sulfate, the addition of silica fume to cement type I provided resistance to chloride but did not to sulfate, while the use of cement type II provided resistance to sulfate but did not provide chloride.

Keywords: Chloride and Sulfate, Concrete

### 1. Pendahuluan

Perkembangan pembangunan infrastruktur di wilayah pesisir pantai dan lepas pantai di Indonesia mendorong perkembangan teknologi yang dapat mengingatkan durabilitas struktur. Klorida dan sulfat merupakan unsur kimia yang terkandung dalam air laut. Kedua unsur tersebut memiliki sifat yang dapat merusak pada struktur. Ketika klorida masuk ke dalam beton, maka akan menyebabkan tulangan baja akan mengalami korosi namun relatif tidak menyebabkan kerusakan pada material betonnya itu sendiri. Namun menurut Navile, A.M. (2010), menyatakan bahwa kandungan garam di air laut terdiri atas beberapa komponen, yaitu NaCl, MgCl<sub>2</sub>, dan MgSO<sub>4</sub> dimana ketika beton dalam masa perawatan kontak dengan air laut maka akan sangat berbahaya karena beton akan mengalami absorpsi.

Selain itu, lingkungan lain yang dapat mempengaruhi kekuatan struktur beton adalah lingkungan yang memiliki kandungan sulfat tinggi. Menurut Arifatunurrillah A., Saputra A. dan Sulistio D. (2019), pada saat serangan sulfat terjadi pada beton, sulfat bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>) pada semen terhidrasi sebagai akibatnya membentuk kalsium sulfat (CaSO<sub>4</sub>) dan kalsium aluminat hidrat (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.13H<sub>2</sub>O) yang kemudian membentuk kalsium sulfoaluminat. Volume kalsium aluminat yang lebih besar dibandingkan volume beton solid membuat beton

mengalami peningkatan volume, sehingga merusak ikatan antar agregat serta semen sebagai bahan pengikat. Hal ini bisa mengurangi kekuatan struktur beton serta memperpendek umur beton.

Oleh sebab itu, untuk menaikkan daya tahan struktur beton terhadap lingkungan yang sarat kandungan klorida dan sulfat maka menurut El Reedy M. A. (2008), terdapat beberapa cara yang dipakai untuk menaikkan durabilitas struktur beton terhadap kondisi-kondisi tersebut

#### Info Makalah:

Dikirim : 03-13-23;

Revisi 1 : 07-14-23;

Diterima : 11-03-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 812-2306-0898

e-mail : [yudi.herdiansah@lecture.unjani.ac.id](mailto:yudi.herdiansah@lecture.unjani.ac.id)

yaitu salah satunya dengan penambahan *silica fume* pada beton. Selain itu, penggunaan *protective coating* dan semen tipe II pada beton merupakan metode yang digunakan untuk meningkatkan daya tahan struktur beton terhadap lingkungan dengan kondisi tersebut.

Namun, pembahasan mengenai efektivitas ketiga metode untuk meningkatkan daya tahan struktur beton terhadap kondisi lingkungan yang kaya kandungan klorida dan sulfat jarang dilakukan. Oleh karena itu penelitian mengenai efektivitas peningkatan daya tahan struktur beton terhadap klorida dan sulfat dengan *protective coating*, penambahan *silica fume* pada beton dan penggunaan semen tipe II perlu dilakukan, sehingga didapatkan informasi yang lebih dalam mengenai metode mana yang lebih efektif digunakan pada struktur beton.

## 2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Teknik Bahan Bangunan, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani. Tahapan penelitian ini terdiri dari: pembuatan benda uji beton, pembuatan larutan NaCl dan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, melakukan perendaman sampel beton pada larutan garam dan asam sulfat, melakukan pengujian benda uji beton, dan pembuatan kesimpulan.

Dimensi spesimen untuk pengujian kuat tekan beton berbentuk silinder beton berdimensi 15 cm × 30 cm. Pada masing-masing benda uji diaplikasikan campuran semen tipe I tanpa proteksi, campuran semen tipe I dengan proteksi *coating*, campuran semen tipe I dengan tambahan *silica fume*, campuran semen tipe II tanpa proteksi. Benda-benda uji tersebut akan direndam di dalam larutan klorida dan sulfat. Variasi lama perendaman pada larutan klorida dan sulfat adalah 14 hari, 28 hari, 42 hari dan 56 hari. Benda uji akan direndam pada larutan klorida dan sulfat setelah masa perawatan 28 hari.

Kuat tekan beton diuji dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) untuk mengetahui besarnya kuat tekan sesuai SNI 1974-2011. Umur benda uji saat dilakukan pengujian kuat tekan beton adalah 28 hari, 42 hari, 56 hari, 70 hari dan 84 hari. Metode percepatan penetrasi klorida mengacu pada RILEM TC 230-PSC. Metode perendaman sulfat dilakukan mengacu pada ASTM C 1012.

## 3. Hasil dan Pembahasan

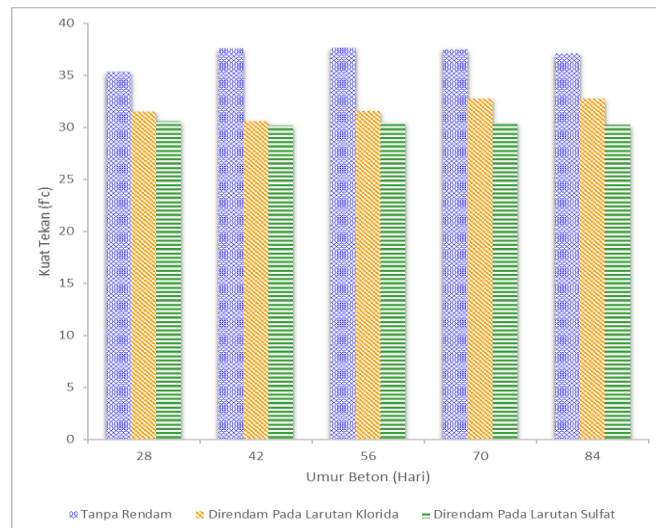
### 3.1. Analisis Pengaruh Klorida dan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton Semen Tipe I Tanpa Proteksi

Kuat tekan beton pada benda uji semen tipe II tanpa proteksi diuji untuk mengetahui efektivitas semen tipe II untuk melindungi beton dari pengaruh klorida dan sulfat. Benda uji akan dilakukan perendaman pada larutan klorida dan sulfat dengan variasi lama perendaman 14, 28, 42, dan 56 hari. Kuat tekan beton (f<sub>c</sub>) yang direncanakan adalah 25 MPa. Nilai kuat tekan beton setelah ditambah margin mengacu pada ACI 301-16 adalah 33,5 MPa. Ringkasan hasil uji kuat tekan beton ditunjukkan pada Tabel 1.

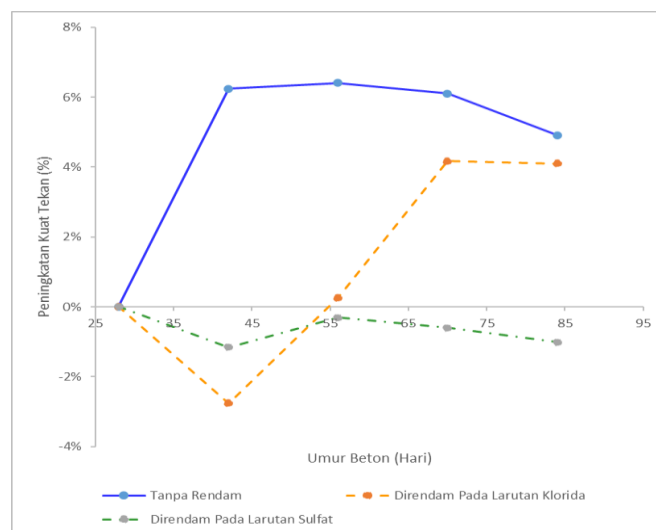
Tabel 1. Hasil Uji Kuat Tekan Semen Tipe I Tanpa Proteksi.

Metode Perendaman	Umur Benda Uji (Hari)	Lama Perendaman (Hari)	Rata - Rata Kuat Tekan (MPa)	Kenaikan Kuat Tekan (%)
Tanpa Rendam	28	0	35,335	0,00%
	42	14	37,540	6,24%
	56	28	37,600	6,41%
	70	42	37,490	6,10%
	84	56	35,335	0,00%
Direndam pada Larutan Klorida	28	0	31,460	0,00%
	42	14	30,590	-2,77%
	56	28	31,540	0,25%
	70	42	32,770	4,16%
	84	56	32,749	4,10%
Direndam pada Larutan Sulfat	28	0	30,545	0,00%
	42	14	30,190	-1,16%
	56	28	30,450	-0,31%
	70	42	30,360	-0,61%
	84	56	30,235	-1,01%

Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kuat tekan benda uji yang direndam pada larutan sulfat lebih rendah dari pada yang direndam dengan larutan klorida dan tanpa perendaman, kuat tekan benda uji yang direndam dengan larutan klorida lebih rendah dibandingkan benda uji yang tidak direndam namun lebih tinggi daripada yang direndam dengan larutan sulfat, kuat tekan benda uji tanpa perendaman lebih tinggi daripada benda uji yang direndam dengan larutan klorida dan sulfat.



Gambar 1. Grafik Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I Tanpa Proteksi untuk Setiap Variasi Perendaman.



Gambar 2. Grafik Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I Tanpa Proteksi untuk Setiap Variasi Perendaman.

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa benda uji tanpa perendaman mengalami peningkatan kuat tekan beton sebesar 6,24% di umur 42 hari, 56 hari serta 70 hari peningkatan kuat tekan beton relatif sama dengan benda uji di umur 42 hari sedangkan beton di umur 84 hari terjadi sedikit penurunan sekitar 1%.

Kuat tekan beton benda uji dengan perendaman di larutan klorida menurun sebesar 2,77% di umur 42 hari, meningkat kembali 0,25% di umur 56 hari, meningkat kembali 4,61% di umur 70 hari sedangkan di umur 84 hari kuat tekan beton relatif sama dengan benda uji 70 hari. Kuat tekan benda uji dengan perendaman di larutan sulfat menurun sebesar 1,16% di umur beton 42 hari, menurun kembali 0,31% di umur 56 hari, menurun kembali 0,61% di umur 70 hari dan menurun kembali 1,01% di umur beton 84 hari. Berdasarkan Gambar 4.1 terdapat perbedaan kuat tekan beton di umur 28 hari sebelum dilakukan perendaman. Hal ini merupakan suatu ketidakwajaran pada benda uji, karena seharusnya pada umur benda uji memiliki nilai kuat tekan benda uji yang relatif sama.

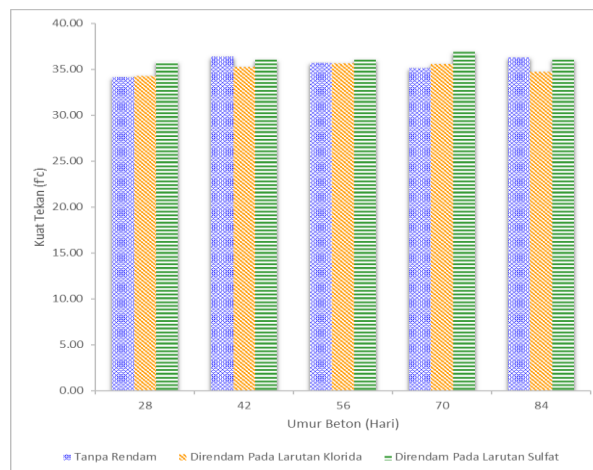
Penyebab terjadinya ketidakwajaran ini terjadi pada proses pembuatan benda uji. Salah satu penyebabnya adalah perbedaan faktor air semen (w/c) yang diaplikasikan. Pada benda uji tanpa perendaman, kuat tekan betonnya lebih tinggi kemungkinan hal ini terjadi diakibatkan oleh jumlah semen pada campuran tersebut lebih banyak dibandingkan benda uji lain.

### 3.2. Analisis Pengaruh Klorida dan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton Semen Tipe I dengan Proteksi *Coating*

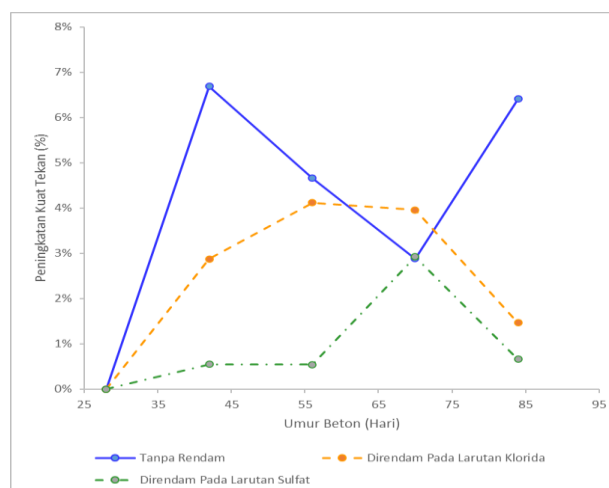
Pengujian kuat tekan beton pada benda uji semen tipe I dengan proteksi *coating* dilakukan untuk mengetahui efektifitas *coating* untuk melindungi beton dari pengaruh klorida dan sulfat. Benda uji akan dilakukan perendaman pada larutan klorida dan sulfat dengan variasi lama perendaman 14, 28, 42, dan 56 hari. Kuat tekan beton (f'c) yang direncanakan adalah 25 MPa. Nilai kuat tekan beton setelah ditambah margin mengacu pada ACI 301-16 adalah 33,5 MPa. Ringkasan hasil uji kuat tekan beton ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I dengan Proteksi *Coating*.

Metode Perendaman	Umur Benda Uji (Hari)	Lama Perendaman (Hari)	Rata - Rata Kuat Tekan (MPa)	Kenaikan Kuat Tekan (%)
<b>Tanpa Rendam</b>	28	0	34,105	0,00%
	42	14	36,385	6,69%
	56	28	35,695	4,66%
	70	42	35,087	2,88%
	84	56	36,291	6,41%
<b>Direndam pada Larutan Klorida</b>	28	0	34,240	0,00%
	42	14	35,225	2,88%
	56	28	35,650	4,12%
	70	42	35,595	3,96%
	84	56	34,741	1,46%
<b>Direndam pada Larutan Sulfat</b>	28	0	35,830	0,00%
	42	14	36,027	0,55%
	56	28	36,025	0,54%
	70	42	36,878	2,92%
	84	56	36,067	0,66%



Gambar 3. Grafik Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I dengan Proteksi *Coating* untuk Setiap Variasi Perendaman.



Gambar 4. Grafik Peningkatan Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I dengan Proteksi *Coating* untuk Setiap Variasi Perendaman.

Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa kuat tekan benda uji yang direndam pada larutan sulfat, larutan klorida dan tanpa perendaman memiliki kuat tekan yang relatif sama berada di kisaran 34 MPa sampai dengan 36 MPa.

Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa kuat tekan beton benda uji tanpa perendaman meningkat sebesar 6,69% di umur 42 hari, di umur 56 hari kuat tekan beton meningkat sebesar 4,66%, di umur 70 hari meningkat sebesar 2,88% dan di umur 84 hari meningkat sebesar 6,41%. Benda uji yang direndam pada larutan klorida kuat tekan betonnya

meningkat sebesar 2,88% di umur 42 hari, di umur 56 hari meningkat sebesar 4,12%, di umur 70 hari meningkat 3,96% dan di umur 84 hari meningkat sebesar 61,46%. Benda uji yang direndam pada larutan sulfat kuat tekan betonnya meningkat sebesar 0,55% di umur beton 42 hari, di umur 56 hari meningkat sebesar 0,54%, di umur beton 70 hari meningkat sebesar 2,92% pada dan di umur beton 84 hari meningkat sebesar 0,66%.

Presentasi kenaikan kuat tekan benda uji semen tipe I dengan proteksi *coating* baik yang direndam pada larutan klorida maupun sulfat masih mengalami kenaikan kuat tekan beton positif walaupun presentasi kenaikan kuat tekan benda uji yang di-*coating* lebih kecil dari benda uji yang tanpa rendam dan direndam dalam larutan klorida.

Presentasi kenaikan kuat tekan beton yang tidak stabil pada benda uji tanpa rendam merupakan suatu hal ketidakwajaran karena tidak sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa kekuatan beton akan meningkat sesuai dengan meningkatnya umur beton dikarenakan proses hidrasi yang terus berlanjut, sehingga pengikat tambahan akan terbentuk antara butiran semen yang akan menyebabkan penguatan sistem (G Nawi Edward, 2008). Ketidakwajaran tersebut terjadi diperkirakan dampak dari jumlah air pada campuran beton yang tidak konsisten sehingga mengakibatkan perbedaan faktor air semen (w/c) yang menyebabkan kuat tekan beton di umur 56 hari serta 70 hari mengalami penurunan.

Berdasarkan Gambar 3 kuat tekan benda uji di umur beton 28 hari memiliki kuat tekan relatif sama yaitu 34,105 MPa untuk benda uji tanpa rendam, 34,240 MPa untuk benda uji direndam di larutan klorida dan 35,83 MPa untuk benda uji direndam di larutan sulfat. Perbedaan nilai kuat tekan dari ketiga benda uji tersebut tidak signifikan sehingga apabila mengacu pada ASTM 178-02 masih masuk dalam kriteria yang disyaratkan.

### 3.3. Analisis Pengaruh Klorida dan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton Semen Tipe I dengan *Silica Fume*

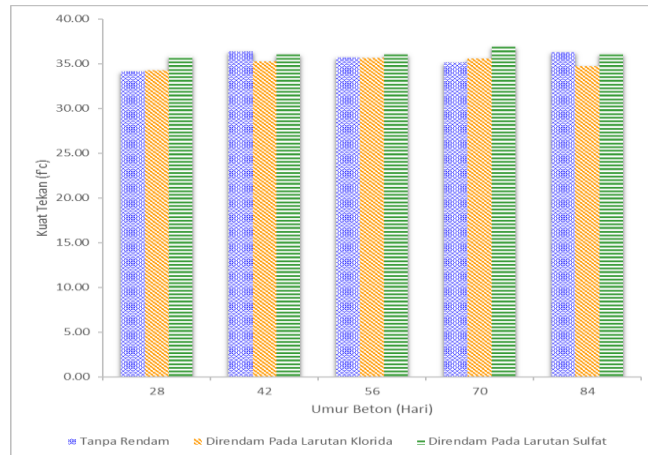
Pengujian kuat tekan beton pada benda uji semen tipe I dengan *silica fume* dilakukan untuk mengetahui efektivitas penggunaan campuran *silica fume* untuk melindungi beton dari pengaruh klorida dan sulfat. Benda uji akan dilakukan perendaman pada larutan klorida dan sulfat dengan variasi lama perendaman 14, 28, 42, dan 56 hari. Kuat tekan beton (f'c) yang direncanakan adalah 25 MPa. Nilai kuat tekan beton setelah ditambah margin mengacu pada ACI 301-16 adalah 33,5 MPa. Ringkasan hasil uji kuat tekan beton ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I dengan *Silica Fume*.

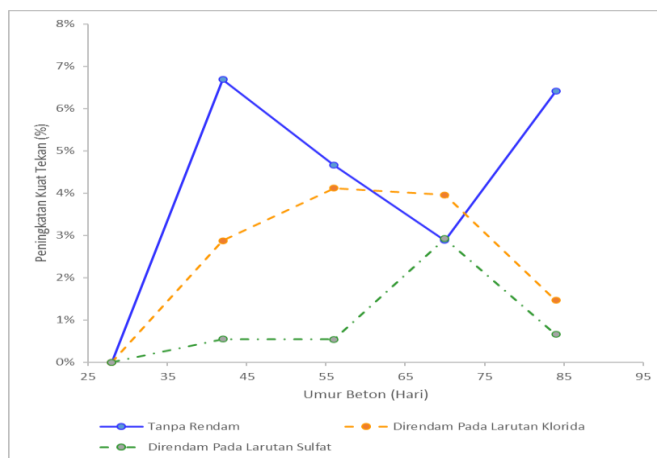
Metode Perendaman	Umur Benda Uji (Hari)	Lama Perendaman (Hari)	Rata - Rata Kuat Tekan (MPa)	Kenaikan Kuat Tekan (%)
Tanpa Rendam	28	0	32,170	0,00%
	42	14	34,715	7,91%
	56	28	34,320	6,68%
	70	42	33,264	3,40%
	84	56	32,947	2,41%
Direndam pada Larutan Klorida	28	0	32,277	0,00%
	42	14	32,147	-0,40%
	56	28	31,920	-1,11%
	70	42	29,043	-10,02%
	84	56	27,983	-13,30%
Direndam pada Larutan Sulfat	28	0	36,580	0,00%
	42	14	36,223	-0,98%
	56	28	35,703	-2,40%
	70	42	28,159	-23,02%
	84	56	26,183	-28,42%

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa kuat tekan benda uji tanpa rendam dan yang direndam pada larutan klorida di umur 28 hari relatif sama yaitu 32,170 MPa untuk benda uji tanpa rendam dan 32,277 MPa untuk benda uji direndam pada larutan klorida sedangkan benda uji direndam di larutan sulfat memiliki kuat tekan beton lebih tinggi yaitu 36,580 MPa. Hal ini merupakan suatu hal ketidakwajaran karena seharusnya di umur 28 hari memiliki kuat tekan yang relatif sama. Penyebabnya adalah perbedaan faktor air semen (w/c) yang diaplikasikan ketika membuat benda uji. Pada benda uji yang direndam di larutan sulfat kuat tekan betonnya lebih tinggi, hal ini diakibatkan oleh jumlah semen pada campuran lebih banyak dari benda uji lain.





Gambar 5. Grafik Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I dengan Proteksi *Coating* untuk Setiap Variasi Perendaman.



Gambar 6. Grafik Peningkatan Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe I dengan Proteksi *Coating* untuk Setiap Variasi Perendaman.

Pada Gambar 6 menunjukkan bahwa kuat tekan beton benda uji tanpa perendaman meningkat sebesar 7,91% di umur beton 42 hari, di umur 56 hari meningkat sebesar 6,68%, di umur beton 70 hari meningkat sebesar 3,40% dan di umur 84 hari kuat tekan beton meningkat sebesar 2,41%

Benda uji yang diredam di larutan klorida kuat tekan betonnya menurun sebesar 0,4% di umur beton 42 hari, di umur 56 menurun sebesar 1,11%, di umur 70 hari menurun sebesar 10,02% dan di umur beton 84 hari kuat tekan beton menurun sebesar 13,30%. Benda uji yang diredam di larutan sulfat kuat tekan beton menurun sebesar 0,98% di umur beton 42 hari, di umur 56 hari menurun sebesar 2,4%, di umur 70 hari menurun sebesar 23,02% dan di umur beton 84 hari menurun sebesar 28,42%.

Presentasi kenaikan kuat tekan benda uji semen tipe I dengan *silica fume* tanpa rendam mengalami kenaikan kuat tekan beton namun benda uji yang diredam di larutan klorida dan sulfat mengalami penurunan. Penurunan kuat tekan beton yang diredam di larutan sulfat lebih besar dibandingkan dengan yang diredam pada larutan klorida.

### 3.4. Analisis Pengaruh Klorida dan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton Semen Tipe II tanpa Proteksi

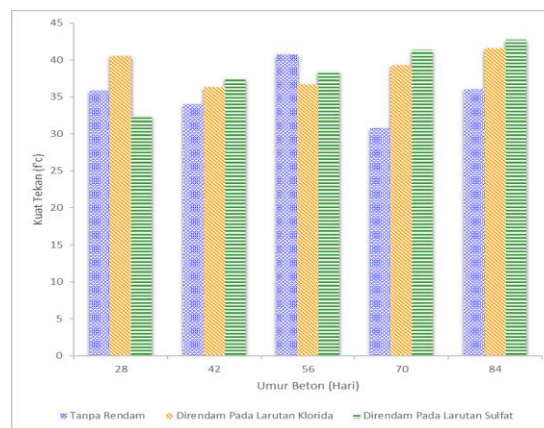
Pengujian kuat tekan beton pada benda uji semen tipe II tanpa proteksi dilakukan untuk mengetahui efektifitas semen tipe II untuk melindungi beton dari pengaruh klorida dan sulfat. Benda uji akan dilakukan perendaman pada larutan klorida dan sulfat dengan variasi lama perendaman 14, 28, 42, dan 56 hari. Kuat tekan beton ( $f'c$ ) yang direncanakan adalah 25 MPa. Nilai kuat tekan beton setelah ditambah margin mengacu pada ACI 301-16 adalah 33,5 MPa. Ringkasan hasil uji kuat tekan beton ditunjukkan pada Tabel 4.

Pada Gambar 7 menunjukkan bahwa kuat tekan benda uji tanpa rendam, benda uji yang akan diredam di larutan klorida dan benda uji yang akan diredam di larutan sulfat memiliki kuat tekan yang berbeda-beda pada umur 28 hari yaitu 35,845 MPa untuk benda uji tanpa rendam, 40,50 MPa untuk benda uji yang diredam di larutan klorida serta 32,40 MPa untuk benda uji yang diredam di larutan sulfat. Hal tersebut merupakan suatu hal ketidakwajaran karena seharusnya di umur 28 hari memiliki hasil yang relatif sama. Penyebabnya adalah perbedaan faktor air semen ( $w/c$ ) yang diaplikasikan pada saat pembuatan benda uji. Kemungkinan penyebabnya adalah kondisi sampel semen yang

kurang bagus karena ada semen yang sudah menggumpal dimana semen yang menggumpal akan sulit bereaksi dengan air sehingga kemampuan semen untuk mengikat agregat tidak sempurna dan kuat tekan betonnya berbeda-beda pada umur 28 hari walaupun dengan job *mixed design* sama.

Tabel 4. Hasil Uji Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe II Tanpa Proteksi.

Metode Perendaman	Umur Benda Uji (Hari)	Lama Perendaman (Hari)	Rata - Rata Kuat Tekan (MPa)	Kenaikan Kuat Tekan (%)
Tanpa Rendam	28	0	35,845	0,00%
	42	14	34,030	-5,06%
	56	28	40,750	13,68%
Tanpa Rendam	56	28	40,750	13,68%
	70	42	30,750	-14,21%
Direndam pada Larutan Klorida	28	0	40,500	0,00%
	42	14	36,280	-10,42%
	56	28	36,670	-9,46%
	70	42	39,240	-3,11%
	84	56	41,597	2,71%
Direndam pada Larutan Sulfat	28	0	32,400	0,00%
	42	14	37,490	15,71%
	56	28	38,430	18,61%
	70	42	41,366	27,67%
	84	56	42,722	31,86%



Gambar 7 Grafik Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe II Tanpa Proteksi untuk Setiap Variasi Perendaman.



Gambar 8. Grafik Peningkatan Kuat Tekan Benda Uji Semen Tipe II Tanpa Proteksi untuk Setiap Variasi Perendaman.

Pada Gambar 8 menunjukkan bahwa kuat tekan beton benda uji tanpa perendaman menurun sebesar 5,06% di umur beton 42 hari, di umur 56 hari kuat tekan beton meningkat sebesar 13,68%, di umur 70 hari menurun sebesar 14,21% di umur beton 84 hari menurun sebesar 14,21%. Kuat tekan beton benda uji yang direndam pada larutan klorida menurun sebesar 10,42% di umur beton 42 hari, di umur beton 56 hari kuat tekan beton menurun sebesar 9,46%, di umur 70 hari menurun sebesar 3,11% dan di umur 84 hari menurun sebesar 2,71%. Kuat tekan beton benda uji yang

direndam pada larutan sulfat menurun sebesar 15,71% di umur beton 42 hari, di umur beton 56 hari kuat tekan beton meningkat sebesar 18,61%, di umur 70 hari meningkat sebesar 27,67% dan di umur 84 hari meningkat sebesar 31,86%.

Karakteristik peningkatan kuat tekan beton pada benda uji tanpa rendam, benda uji yang akan direndam dengan larutan sulfat dan benda uji yang akan direndam dengan larutan sulfat tidak sesuai dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Menurut Ady P. W. (2011) bahwa pengaruh sulfat pada beton mengakibatkan penurunan kuat tekan beton yang signifikan dibandingkan dengan beton yang direndam pada air laut, sedangkan pada hasil pengujian kuat tekan beton benda uji semen tipe II tanpa proteksi yang direndam pada larutan sulfat memiliki tren meningkat. Hal ini merupakan suatu ketidakwajaran pada beton yang direndam dengan larutan sulfat karena pengaruh sulfat pada beton akan menghasilkan magnesium silikat hidrat yang tidak bersifat mengikat sehingga menyebabkan turunnya kekuatan tekan beton. Menurut Aryui E., S. Moersidik S., Hartono M. D., Widnarko S. (1994) bahwa pengaruh klorida pada beton mengakibatkan penurunan kuat tekan beton yang disebabkan oleh proses hidrasi senyawa utama semen tidak sempurna yang mengakibatkan tidak terjadi ikatan yang kuat antara material-material pembentuk beton. Pada hasil uji kuat tekan beton pada benda uji semen tipe II tanpa proteksi yang direndam di larutan klorida memiliki tren menurun pada perendaman 14, 28, dan 42 hari. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya, namun pada hari ke 84 terjadi ketidakwajaran karena kuat tekan beton meningkat walaupun sudah direndam dalam larutan klorida. Menurut G. Nawi Edward (2008) bahwa kekuatan beton akan meningkat sesuai dengan meningkatnya umur beton dikarenakan proses hidrasi yang terus berlanjut, sehingga pengikat tambahan akan terbentuk antara butiran semen yang akan menyebabkan penguatan sistem, namun hasil uji kuat tekan beton tanpa rendam menunjukkan hasil yang naik turun. Hal ini merupakan suatu ketidakwajaran. Kemungkinan hal tersebut terjadi karena kondisi sampel semen yang kurang bagus dimana banyak bagian semen yang menggumpal sehingga sulit bereaksi dengan air dan kemampuan semen untuk mengikat agregat tidak sempurna serta menghasilkan kuat tekan beton berbeda-beda.

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian mengenai perbandingan efektivitas *protective coating*, *silica fume*, dan semen tipe II terhadap pengaruh klorida dan sulfat pada beton, di dapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Benda uji semen tipe I dengan *protective coating*  
Kuat tekan beton pada benda uji semen tipe I dengan *protective coating* setelah direndam di larutan sulfat dan klorida tidak menurun. Kuat tekan beton tetap meningkat walaupun sudah direndam di dalam larutan klorida dan sulfat.
2. Benda uji semen tipe I dengan *Silica fume*  
Kuat tekan beton pada benda uji semen tipe I dengan *silica fume* setelah direndam di dalam larutan sulfat dan klorida mengalami penurunan terutama pada benda uji yang direndam pada larutan sulfat.
3. Benda uji semen tipe II tanpa proteksi  
Kuat tekan benda uji semen tipe II tanpa proteksi menunjukkan hasil yang tidak konsisten dan tidak relevan dengan penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Hal ini disebabkan oleh kondisi sampel semen yang tidak baik dimana kondisi semen telah menggumpal sehingga menyebabkan rasio air semen tidak konsisten.

### Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendanai penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada PT. Adhi Persada Beton, PT. Semen Indonesia, PT. Sika Indonesia yang telah membantu dan mendukung atas terlaksananya penelitian ini. Tidak lupa pula, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan pembuatan artikel ilmiah ini.

### Daftar Pustaka

- ACI 301-16. (2016). *Specifications for Structural Concrete*, Farmington Hills: American Concrete Institute
- ACI 234-06. (2006). *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*, Farmington Hills: American Concrete Institute
- Ady P W., 2011. Pengaruh Pemakaian Semen Portland Tipe II Terhadap Ketahanan Sulfat Pada *Self Compacting Concrete* (SCC) [Skripsi]. Depok: Universitas Indonesia, Program Studi Teknik Sipil.
- ASTM C-1012-04. (2004), *Standard Test Methods for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. (TT): American Society for Testing and Materials.
- ASTM C-114-07. (2007), *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. (TT): American Society for Testing and Materials.
- ASTM E-178-02. (2002), *Standard Test Methods for Dealing With Outlying Observations*. (TT): American Society for Testing and Materials.
- Ariyuni W., Moersidik S. S., Hartono D. M., Widanarko S., 1994, "Pengaruh Ion Klorida ( $Cl^-$ ) dan Ion Sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) pada Kekuatan Tekon Beton Mutu Sedang", Laporan Penelitian, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok.

- Arifatunurrillah A., Saputra A., Sulisty D. (2019), Pengaruh Air Laut Pada Masa Perendaman Terhadap Infiltrasi Ion Klorida Pada Beton Dengan Menggunakan Semen Portland Tipe V. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil Universitas Sebelas Maret*. 3 (1): 1-6.
- SNI 1974 - 2011 (2011). *Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: Badan Standar Nasional.
- SNI 2847 - 2019 (2019). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standar Nasional.
- SNI 7565 - 2012. (2012). *Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Massa*. Jakarta: Badan Standar Nasional
- El-Reedy, Mohammed A. (2008), *Assesment and Repair of Corrosion*. New York: CRC Press.
- G Nawi Edward (2008), *Reinforced Concrete, A Fundamental Approach*. New Jersey: Prentice Hall.
- Navile A. M. (2010), *Concrete Technology*. London: Pearson Education Limited.
- RILEM TC 230-PSC. (2015), *Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability*. (TT): Springer.

# Penjadwalan Dinamis Menggunakan Metode *Rolling Time Window* (RTW) pada Kasus Flowshop 3 Mesin untuk Meminimumkan Total Biaya *Lateness*, *Earliness* dan *Re-Scheduling*

Rinto Yusriski<sup>1</sup>, Budi Astuti<sup>1</sup>, dan Andri Rachmat Kumalasian Nasution<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Manufaktur,  
Universitas Jenderal Achmad Yani, Kota Cimahi, Indonesia

[rinto.yusriski@lecture.unjani.ac.id](mailto:rinto.yusriski@lecture.unjani.ac.id), [budi.astuti@lecture.unjani.ac.id](mailto:budi.astuti@lecture.unjani.ac.id), [andri.rachmatk@lecture.unjani.ac.id](mailto:andri.rachmatk@lecture.unjani.ac.id)

## Abstrak

Penelitian ini membahas masalah penjadwalan *job* pada *flowshop* tiga mesin dengan tujuan untuk meminimumkan total biaya yang terdiri dari biaya *lateness*, biaya *earliness*, dan biaya *re-scheduling*. Penelitian ini mengambil sistem nyata pada salah satu perusahaan manufaktur yang bergerak pada operasi permesinan berbagai komponen. Terdapat 12 *job* dengan pola kedatangan dan saat tenggat (*due date*) yang berbeda. Perusahaan menggunakan metode penjadwalan *First In-First Out* (FIFO) dan mendapatkan hasil berupa beberapa produk selesai lebih awal dan beberapa lainnya selesai terlambat. Penelitian ini mencoba memperbaiki performa penjadwalan perusahaan dengan mengusulkan adanya penjadwalan ulang menggunakan metode *Rolling Time Window* (RTW). Hasil penjadwalan menunjukkan adanya perbaikan performa perusahaan yang diukur dari total biaya *earliness*, *lateness* dan *re-schedule* meskipun relatif kecil (3%). Perbaikan ini diperoleh dengan menyarankan perusahaan melakukan *re-schedule* setiap 15 hari sekali dengan mengevaluasi panjang *window* per 30 hari. Metode FIFO yang dipakai perusahaan masih dapat digunakan mengingat karakteristik *job* yang datang ke perusahaan masih terkendali. Perusahaan dinilai mampu membuat kesepakatan dengan konsumen mengenai saat tenggat pengiriman yang membuat antrian *job* dilantai produksi menjadi tidak terlalu padat.

Kata kunci: penjadwalan dinamis, *flowshop*, *rolling-time-window*

## Abstract

This study discusses the problem of job scheduling in a three-machine flowshop to minimize the total cost of *lateness*, *earliness*, and *rescheduling*. This research takes a real system from one of the manufacturing companies engaged in the machining operations of various components. There are 12 jobs with different arrival patterns and due dates. The company uses the first-in, first-out (FIFO) scheduling method and gets the result that some products finish early and some finish late. This study tries to improve the company's scheduling performance by proposing a rescheduling using the rolling time window (RTW) method. Although it is relatively small, scheduling results show an improvement in company performance as measured by the total cost of *earliness*, *lateness*, and *rescheduling*, although it is relatively small (3%). This improvement is obtained by suggesting the company reschedule every 15 days by evaluating the length of the window per 30 days. The company can still use the FIFO method used by the company considering the characteristics of the jobs that come to it are still under control. The company is deemed capable of making agreements with consumers regarding the delivery deadline, making the job queues on the production floor less crowded.

Keywords: dynamic scheduling, *flowshop*, *rolling-time-window*

## 1. Pendahuluan

Penjadwalan produksi merupakan salah satu kegiatan penting dalam perencanaan dan pengendalian produksi. Pada penelitian penjadwalan, kedatangan pekerjaan (*job*) sering diasumsikan telah diketahui sebelum periode penjadwalan dimulai. Penjadwalan *job* tersebut dikenal sebagai penjadwalan *job* dengan Pola Kedatangan Statis (PKS). Pada beberapa kasus lapangan, pola kedatangan *job* ke lantai produksi dapat bersifat acak. Penjadwalan untuk kasus ini disebut sebagai penjadwalan *job* dengan Pola Kedatangan Dinamis (PKD). Penelitian penjadwalan PKD telah banyak dibahas baik pada pola aliran *job shop* maupun *flow shop*. Bagi pembaca yang memiliki ketertarikan pada penjadwalan PKD dengan pola aliran *job shop* dapat mendalami Mohan, dkk. (2019) yang telah menyusun tinjauan literatur mengenai masalah tersebut. Sementara pada pola aliran *flowshop*, penelitian-penelitian masalah ini dapat diperoleh di antaranya dalam Nurainun (2012), Ilhami (2014), dan Octanaty, dkk. (2015).

Nurainun (2012) membahas mengenai masalah penjadwalan PKD dengan mempertimbangkan saat tenggat pengiriman (*due date*). Penelitian ini mengasumsikan beberapa *job* dengan karakteristik pengerjaan yang sama dapat diproses secara berkelompok dalam suatu *batch*. Konsekuensinya adalah diperlukan tambahan waktu untuk *setup* (persiapan) setiap kali mesin akan mulai memproses suatu *batch*. Dengan

### Info Makalah:

Dikirim : 09-30-21;  
Revisi 1 : 04-04-22;  
Revisi 2 : 10-19-23;  
Diterima : 11-09-23.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 853-2447-0036  
e-mail : [rinto.yusriski@lecture.unjani.ac.id](mailto:rinto.yusriski@lecture.unjani.ac.id)

demikian, keputusan jadwal adalah menentukan pengelompokan *job* dalam *batch* dan menjadwalkan urutan *batch* tersebut pada mesin. Performa jadwal diukur dengan meminimumkan total biaya yang terdiri dari biaya persiapan, biaya proses, dan biaya simpan.

Octanaty, dkk. (2015) mengembangkan model penjadwalan mesin dinamis pada masalah mesin paralel dengan tujuan meminimasi *weighted tardiness*. Ilhami (2014) membahas penjadwalan PKD pada kasus *flow shop* fleksibel tiga tahap dengan fungsi tujuan meminimasi *tardiness* berbobot (*weighted tardiness*). Pada penelitian tersebut, *job* diproses melalui tiga tahapan operasi. Jumlah mesin pada setiap tahap dapat lebih dari satu mesin (mesin paralel). Metode solusi menggunakan model sistem lelang. Hasil pengujian menunjukkan model usulan mampu untuk memecahkan masalah. Pengujian dilakukan dengan membandingkan solusi usulan dengan solusi perusahaan dan solusi metode *Early Due Date* (EDD). Hasil pengujian menunjukkan bahwa solusi usulan memiliki *tardiness* berbobot yang lebih minimum dibandingkan metode lainnya.

Penelitian ini akan membahas masalah penjadwalan PKD pada pola aliran *flowshop*. Motivasi penelitian diperoleh untuk memecahkan masalah pada sistem nyata di PT. ABC, yaitu salah satu perusahaan manufaktur di Indonesia yang bergerak pada bidang permesinan. Perusahaan memiliki masalah dalam menjadwalkan *job* dengan pola datang yang dinamis. Saat ini, perusahaan menjadwalkan *job* dengan menggunakan aturan prioritas *first in-first out* (FIFO). Pekerjaan diurutkan sesuai dengan saat kedatangan mulai dari *job* yang datang paling awal diikuti oleh *job* baru yang datang mengikutinya. Solusi metode *FCFS* ini masih memerlukan perbaikan karena terdapat sebagian *job* yang selesai melewati waktu tenggat pengiriman. Menurut Yusriski, dkk. (2014, 2015a, 2015b, 2016, 2018, 2019, 2023), pengiriman sesuai dengan saat tenggat merupakan faktor penting untuk memenangkan persaingan dan kepercayaan konsumen.

Permasalahan yang terdapat pada PT. ABC dapat diformulasikan sebagai berikut, diketahui terdapat 12 (dua belas) *job* ( $i=1,2,3,\dots,12$ ) yang diproses pada *flowshop* 3 tahap operasi ( $j=1,2,3$ ) dimana setiap *job* dikerjakan pada masing-masing satu mesin pada tahap persiapan seperti mesin untuk proses potong ( $k=1$ ), jika tahap persiapan selesai, selanjutnya masuk tahap permesinan dengan tujuan membentuk komponen seperti mesin bubut ( $k=2$ ), dan komponen yang selesai melalui tahap permesinan akan melalui tahap menghaluskan komponen menggunakan mesin gerinda ( $k=3$ ). Setiap *job* datang ke lantai produksi ( $r_i$ ) tidak secara bersamaan atau bersifat dinamis dengan jumlah unit pemesanan ( $n_i$ ) berbeda-beda dan saat tenggat yang berbeda juga ( $d_i$ ). Waktu proses setiap *job* di setiap mesin ( $t_{ik}$ ) unik atau tidak sama dan pada tahap persiapan, *job* memerlukan proses setup ( $s_{111}$ ). Perusahaan saat ini menerapkan metode penjadwalan dengan menggunakan aturan prioritas FIFO. Masalah yang dihadapi adalah hasil penjadwalan dengan aturan FIFO menunjukkan terdapat sejumlah *job* yang selesai lebih awal ( $C_i < d_i$ , *earliness*) dan beberapa *job* yang selesai melewati saat tenggat yang telah ditentukan ( $C_i > d_i$ , *lateness*). Hal ini berakibat pada meningkatnya biaya yang harus ditanggung perusahaan berupa biaya simpan untuk *earliness job* dan biaya penalti untuk *lateness job* yang akan berdampak pada penurunan profit perusahaan. Penelitian ini membahas mengenai penjadwalan dengan mempertimbangkan penjadwalan ulang untuk memperbaiki performansi jadwal. Dengan demikian, performa tujuan akan diukur dengan minimasi total biaya yang terdiri atas biaya simpan produk jadi, biaya penalti, dan biaya penjadwalan ulang.

## 2. Metode

Metode yang digunakan pada penelitian ini mengadaptasi model matematika Suharyanti dan Halim (2000) yang mengembangkan model Sun dan Lin (1994). Fungsi tujuan dalam Sun dan Lin (1994) menggunakan minimasi biaya *tardiness* yang dikembangkan dalam Suharyanti dan Halim (2000) menjadi meminimumkan total ongkos *lateness* dan *earliness*. Model Suharyanti dan Halim (2000) melakukan pendekatan *time window* untuk mengakomodasi penjadwalan statis dan dinamis. Penelitian ini mengadopsi model tersebut untuk kasus *Flowshop* tiga mesin dengan pengembangan berupa penambahan parameter biaya *re-schedule* (penjadwalan ulang).

$$\text{meminimumkan } Z_i = \sum_{s=1}^W \left( \sum_{i=1}^{n_s} (\alpha_i \max\{C_{irm_i} - d_i, 0\} + \beta_i \max\{d_i - C_{irm_i}, 0\}) + \varphi W \right) \quad (1)$$

Kendala:

$$C_{ijk} - C_{i(j-1)k} \geq t_{ijk}, \quad (2)$$

$$i \in N_s, j \in R_i, (k, l) \in M, k \neq l, s = 1, 2, \dots, W$$

$$C_{ijk} - C_{i(j-1)k} \geq t_{ijk} \wedge C_{i(j-1)k} - C_{ijk} \geq t_{i(j-1)k} \quad (3)$$

$$i \in N_s, k \in M, s = 1, 2, \dots, W$$

$$C_{i1k} - t_{i1k} \geq a_i \quad (4)$$

$$i \in N_s, k \in M, \quad s = 1, 2, \dots, W$$

Fungsi tujuan (1) adalah meminimumkan total biaya yaitu biaya *lateness*, *earliness* dan *re-schedule* pada penjadwalan dengan  $W$  kali *time window* ( $W$  adalah variabel keputusan). Kendala (2) adalah kendala yang menjamin bahwa urutan operasi selalu sesuai dengan *routing* setiap *job* sehingga suatu operasi ke- $j$  dari *job*  $i$  dapat dimulai paling cepat setelah operasi ke- $(j-1)$  telah selesai. Kendala (3) menunjukkan bahwa mesin tidak bisa memproses secara bersamaan beberapa operasi pada satu saat yang sama (mesin hanya bisa memproses satu operasi pada saat yang sama). Dari fungsi (3) tersebut dapat dilihat bahwa jika operasi ke- $j-1$  dari *job*  $i$  mendahului operasi ke  $j$  dari *job*  $i$  untuk diproses pada mesin  $k$ . Kendala (4) menjamin *job* bisa dijadwalkan pada horizon jadwal dengan menetapkan bahwa saat mulai operasi pertama suatu *job* tidak akan kurang dari *available time job* tersebut.

Metode solusi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode *Rolling Time Window* (RTW) dalam Suharyanti dan Halim (2000). Horizon jadwal dibagi dalam beberapa sub-periode yang disebut dengan *Window*. Penjadwalan pada suatu *window* kemudian dibagi dalam dua sesi dengan rentang yang sama panjang. Sesi penjadwalan pertama merupakan sesi jadwal statis, dan sesi jadwal kedua merupakan sesi dinamis yang merupakan sesi penjadwalan ulang dengan mempertimbangkan datangnya *job* baru ke lantai produksi. Pada *windows* berikutnya sesi jadwal kedua akan menjadi sesi statis demikian seterusnya hingga seluruh *windows* terselesaikan. *Trade off* dari masalah ini adalah, semakin panjang *window* maka semakin pendek iterasi yang akan diselesaikan namun akan mengakibatkan sesi statis menjadi panjang dan mengakibatkan banyak *job* yang tidak terevaluasi pada sesi dinamis (efisien tapi tidak efektif). Hal ini akan mengakibatkan kualitas solusi menjadi menurun. Semakin pendek panjang *window* maka kualitas solusi menjadi semakin baik namun akan memperbanyak iterasi yang bisa jadi tidak diperlukan (efektif tapi tidak efisien). Dengan demikian perlu ditentukan panjang *window* yang optimal. Perhitungan panjang *window* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$D = \frac{2h}{(W+1)} \text{ atau } W + 1 = \frac{2h}{D} \tag{5}$$

Suharyanti dan Halim (2000) telah mengusulkan algoritma untuk memecahkan masalah yang terbagi dalam dua tahap yaitu:

Tahap 1: Tahap 1 merupakan algoritma utama yaitu algoritma untuk menghitung panjang *time window* dan juga fungsi tujuan (total biaya *lateness* dan *earliness*). Algoritma ini pada dasarnya adalah algoritma pencarian nilai  $D$ , dengan mencoba-coba secara iteratif (menambahkan nilai  $D$  sebelumnya dengan nilai tertentu ( $\Delta D$ ) untuk mendapatkan nilai  $D$  berikutnya. Nilai  $D$  awal merupakan nilai inisialisasi yang biasanya dibangkitkan secara acak. Keputusan nilai  $D$  ini menjadi variabel *input* untuk menghitung total biaya *lateness* dan *earliness*. Algoritma akan berhenti jika total biaya *lateness* dan *earliness* pada suatu iterasi tidak lebih baik dari iterasi sebelumnya.

Tahap 2: Tahap 2 terdiri dari dua sub algoritma. Sub algoritma pertama adalah algoritma untuk menentukan alokasi *job* dari suatu *window* ke *window* berikutnya. Input dari sub algoritma pertama adalah urutan *job* hasil dari jadwal statis yang diperoleh dari sub algoritma kedua. Pada kasus Suharyanti dan Halim (2000) sub algoritma kedua menggunakan algoritma jadwal *non-delay* yang sesuai untuk kasus *jobshop*. Pada penelitian ini, pendekatan solusi algoritma kedua mengadopsi aturan prioritas *early due date* (EDD).

Detail mengenai algoritma RTW dapat dilihat pada Suharyanti dan Halim (2000).

### 3. Hasil dan Pembahasan

Data *job* dan status pengiriman pada kondisi penjadwalan hasil penjadwalan eksisting menggunakan metode FIFO disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data *Job* dan Status Hasil Penjadwalan Eksisting.  
(Sumber: Pengolahan Data Berdasarkan Kasus pada Sistem Nyata)

(i)	$n_i$	$r_i$	$d_i$	$[t_{i11}, t_{i22}, t_{i33}]$	$s_{i1}$	$C_{i11}$	$C_{i22}$	$C_{i33}$	$\Delta_i$	Pembulatan $\Delta_i$	Status job (earliness/lateness)	Biaya Earliness/Lateness
1	4	1	8	[0.1, 0.3, 0.4]	1	1,4	2,6	4,2	3,8	4	earliness	480.000
2	5	1	2	[0.1, 0.1, 0.3]	1	2,9	3,4	5,7	-3,7	-4	Lateness	1.000.000
3	5	3	12	[0.2, 0.4, 0.6]	1	5,00	7	10	2	2	earliness	300.000
4	4	3	9	[0.1, 0.3, 0.2]	1	6,40	8,2	10,8	-1,8	-2	Lateness	400.000
5	4	4	8	[0.3, 0.7, 0.6]	1	8,60	11,4	13,8	-5,8	-6	Lateness	1.200.000
6	3	4	14	[0.3, 0.7, 0.9]	1	11,40	15,6	21	-7	-7	Lateness	2.100.000
7	3	5	17	[0.1, 0.1, 0.1]	1	12,70	15,9	21,3	-4,3	-5	Earliness	750.000
8	3	6	20	[0.5, 0.3, 0.6]	1	15,20	16,8	23,1	-3,1	-4	Lateness	600.000
9	5	6	18	[0.1, 0.1, 0.1]	1	16,70	17,3	23,6	-5,6	-6	Lateness	1.500.000
10	5	7	20	[0.1, 0.2, 0.1]	1	18,20	19,2	24,1	-4,1	-5	Lateness	1.250.000
11	3	8	26	[0.4, 0.3, 0.6]	1	21,60	23,4	27,7	-1,7	-2	Lateness	600.000
12	3	8	28	[0.1, 0.4, 0.1]	1	22,90	24,6	28	0	0	On time	-
<b>TOTAL BIAYA</b>												<b>10.180.000</b>



Keterangan:  $n_i$  dalam satuan unit,  $t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}, s_i, \Delta_i$  dalam satuan hari,  $r_i, d, C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}$  dalam satuan hari ke-

### 3.1. Contoh perhitungan menentukan *job earliness* pada kondisi eksisting

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa *job* 1 akan memproses 4 unit komponen ( $n_1$ ), pekerjaan tersebut datang pada saat hari ke-0 ( $r_1$ ), dan direncanakan harus selesai pada saat tenggat ( $d_1$ ) di hari ke 8. Jika pekerjaan selesai lebih dari hari ke-8, maka perusahaan akan dikenakan biaya pinalti per hari per komponen, sebaliknya jika pekerjaan selesai sebelum hari ke-8, maka perusahaan harus menyimpan komponen yang selesai diproses sehingga menimbulkan biaya simpan. Formula yang digunakan untuk menghitung waktu penyelesaian ( $C_{ijk}$ ) adalah sebagai berikut:

$$(C_{ijk} = \max[C(i-1)jk, r_i] + s_{ij} + n_i \times t_{ijk}), C(1-1)jk = 0 \quad (6)$$

$$(C_i(j+1)(k+1) = C_{ijk} + n_i + 1 \times t_i(j+1)(k+1)), \quad (7)$$

$$[\Delta_i = d_i - C_{irm}] \quad (8)$$

$$j = 1, 2, \dots, r; k = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

Waktu Setup *job* ke-1 untuk proses ke-1 ( $s_{11}$ ) adalah satu (1) satuan hari, dan waktu dari pengerjaan *job* 1 yang melewati tiga proses pada tiga mesin berbeda ( $t_{111}, t_{122}, t_{133}$ ) masing-masing adalah (0,1; 0,3; 0,4) sehingga dapat dihitung:

- A. Waktu penyelesaian **proses ke-1 job ke-1 pada mesin ke-1** ( $C_{111}$ ) adalah 1,4 satuan waktu yang dihasilkan dari perhitungan waktu pekerjaan siap di lantai produksi ditambah dengan waktu setup kemudian ditambah dengan hasil perkalian antara jumlah komponen dengan waktu proses per komponen pada proses kesatu menggunakan formula (6) ( $C_{111} = \max[0, r_1] + s_{11} + n_1 \times t_{111}$ ), selanjutnya hitung waktu penyelesaian proses ke-2 *job* ke-1 pada mesin ke-2 ( $C_{122}$ ),
- B. Waktu penyelesaian **proses ke-2 job ke-1 pada mesin ke-2** ( $C_{122}$ ) adalah 2,6 yang dihasilkan dari perhitungan waktu selesai proses ke-1 ditambah dengan hasil perkalian antara jumlah komponen dengan waktu proses per komponen pada proses kedua menggunakan formula (7) ( $C_{122} = C_{111} + n_2 \times t_{122}$ ),
- C. Waktu penyelesaian **proses ke-3 job ke-1 pada mesin ke-3** ( $C_{133}$ ) adalah 4,2 yang dihasilkan dari perhitungan waktu selesai proses ke-2 *job* ke-1 ditambah dengan hasil perkalian antara jumlah komponen dengan waktu proses per komponen pada proses ketiga menggunakan formula (7) ( $C_{133} = C_{122} + n_3 \times t_{133}$ ),
- D. Berdasarkan perhitungan waktu proses tersebut maka dapat dihitung selisih antara saat *job* selesai di proses dengan saat tenggat yang telah direncanakan menggunakan formula (8) ( $\Delta_i = d_1 - C_{133}$ ) adalah 3,8 yang artinya pekerjaan selesai lebih cepat dari saat tenggat sebanyak  $3,8 \approx 4$  satuan hari (*earliness*). Pembulatan dilakukan karena satuan hari yang dihitung untuk menentukan perhitungan biaya merupakan bilangan bulat.

### 3.2. Contoh perhitungan menentukan *job earliness* pada *job* eksisting

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa *job* 2 akan memproses 5 komponen ( $n_2$ ), pekerjaan tersebut datang pada saat hari ke-1 ( $r_2$ ), dan direncanakan harus selesai pada saat tenggat ( $d_2$ ) di hari ke-2. Jika pekerjaan selesai lebih dari hari ke-2, maka perusahaan akan dikenakan biaya pinalti/hari/komponen, sebaliknya jika pekerjaan selesai sebelum hari ke-2, maka perusahaan harus menyimpan komponen yang selesai diproses sehingga menimbulkan biaya simpan/hari/komponen. Waktu Setup *job* ke-2 untuk mesin ke-1 ( $s_{21}$ ) adalah satu (1) satuan hari, dan waktu dari pengerjaan *job* 2 yang melewati tiga proses pada tiga mesin berbeda ( $t_{211}, t_{222}, t_{233}$ ) masing-masing adalah (0,1; 0,1; 0,1) sehingga dapat dihitung:

- A. Waktu penyelesaian **proses ke-1 job ke-2 pada mesin ke-2** ( $C_{211}$ ) adalah 2,9 satuan waktu yang dihasilkan dari perhitungan nilai maksimal antara saat pekerjaan datang ke lantai produksi dengan saat proses ke-1 selesai mengerjakan pekerjaan sebelumnya ditambah dengan waktu setup kemudian ditambah dengan hasil perkalian antara jumlah komponen dengan waktu proses per komponen pada proses kesatu menggunakan formula (6) ( $C_{211} = \max[C_{111}, r_2] + s_{21} + n_2 \times t_{211}$ ),
- B. Waktu penyelesaian **proses ke-2 job ke-2 pada mesin ke-2** ( $C_{222}$ ) adalah 3,4 yang dihasilkan dari perhitungan waktu selesai proses ke-1 *job*-2 atau proses ke-2 *job* 1 (pilih yang terbesar) ditambah dengan hasil perkalian antara jumlah komponen dengan waktu proses per komponen pada proses kedua menggunakan formula (7) ( $C_{222} = \max[C_{122}, C_{211}] + n_2 \times t_{222}$ ),
- C. Waktu penyelesaian **proses ke-3 job ke-2 pada mesin ke-3** ( $C_{233}$ ) adalah 5,7 yang dihasilkan dari perhitungan waktu selesai proses ke-2 *job* ke-2 atau proses ke-3 *job* 1 (pilih yang terbesar) ditambah dengan hasil perkalian antara jumlah komponen dengan waktu proses per komponen pada proses ketiga menggunakan formula (7) ( $C_{233} = \max[C_{133}, C_{222}] + n_2 \times t_{233}$ ),

Berdasarkan perhitungan waktu proses tersebut, maka dapat dihitung selisih antara saat *job* selesai di proses dengan saat tenggat yang telah direncanakan menggunakan formula (8) ( $\Delta_i = d_2 - C_{233}$ ) adalah -3,7 yang artinya pekerjaan selesai melewati saat tenggat sebanyak  $-3,7 \approx -4$  satuan hari (*lateness*).

**3.3. Menghitung Total biaya kondisi eksisting**

Total Biaya *lateness* dan *earliness* pada Tabel 1 dihitung menggunakan formula  $Z1_i = |\Delta_i| \times \beta_i \times n_i$  jika status *job earliness* dan  $Z2_i = |\Delta_i| \times \alpha_i \times n_i$  jika status *job* adalah *lateness*. Sedangkan biaya *re-scheduling* ( $Z3 = (W+1) \times \phi_i$ ) pada kondisi eksisting masih 0 karena belum ada proses penjadwalan ulang. Asumsi rata-rata biaya simpan produk jadi (*hc*) adalah Rp.30.000/unit/hari dan rata-rata biaya pinalti akibat keterlambatan (*lc*) adalah Rp.50.000/unit/hari. Berdasarkan hal tersebut, maka perusahaan harus menanggung Total biaya penyimpanan dan pinalti keterlambatan sejumlah Rp. 10.180.000,-. Total biaya penyimpanan dan pinalti keterlambatan dihitung menggunakan formula:

$$Z = \sum_{i=1}^N Z1_i + \sum_{i=1}^N Z2_i + \sum_{i=1}^N Z3 \tag{10}$$

**3.4. Solusi pemecahan masalah**

Solusi penjadwalan dimulai dengan melakukan simulasi pada berbagai nilai panjang *window* (*D*) dengan delta pertambahan ( $\Delta D$ ) tertentu. Pada kasus ini, percobaan dimulai dengan menentukan inisial *window*  $D = 2$ ,  $\Delta D = 2$ , dan  $h=30$  hari kemudian menghitung nilai  $W+1$  dengan formula (5) dan Total Biaya (*Z*) dengan formula (1). Hasil perhitungan dan simulasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi.

No.	D (hari)	HD (hari ke-)	W+1 (kali)	Pembulatan W+1 (kali)	Z1i (Rp)	Z2i (Rp)	Z3i (Rp)	Z (Rp)
1	2	1	30,0	30	360.000	10.950.000	3.000.000	14.310.000
2	4	2	15,0	15	780.000	9.400.000	1.500.000	11.680.000
3	6	3	10,0	10	780.000	9.300.000	1.000.000	11.080.000
4	8	4	7,5	8	990.000	9.000.000	800.000	10.790.000
5	10	5	6,0	6	780.000	9.300.000	600.000	10.680.000
6	12	6	5,0	5	780.000	9.400.000	500.000	10.680.000
7	14	7	4,3	4	780.000	9.400.000	300.000	10.480.000
8	16	8	3,8	4	780.000	9.400.000	300.000	10.480.000
9	18	9	3,3	3	780.000	5.300.000	300.000	9.980.000
.								
.								
.								
15	30	15	2,0	2	780.000	8.900.000	200.000	9.880.000*

Keterangan: D adalah *Window*, HD adalah *Half Window*, W+1 adalah Frekuensi *Re-Schedule*

\*) solusi optimal

Pada setiap penjadwalan ulang, *job* disusun dengan menggunakan pendekatan EDD. Setiap baris pada Tabel 2 menunjukkan hasil simulasi yang dilakukan dimana setiap penjadwalan ulang *job* akan disusun berdasarkan pendekatan *early due date* (EDD). Pada kondisi optimal, ditetapkan panjang *window* (*D*) adalah 30 hari, sehingga jadwal statis dilakukan hari ke-30 dan jadwal dinamis pada hari ke-15. Pada kondisi ini, perubahan jadwal dinamis menjadi jadwal statis (*HD*) dilakukan setiap 15 hari sekali sehingga menghasilkan frekuensi penjadwalan ulang (*W*) sebanyak satu kali. Total Biaya yang dihasilkan pada kondisi  $D=30$  adalah sebesar Rp.9.880.000 yang terdiri atas biaya *earliness* sebesar Rp.780.000, biaya *lateness* sebesar Rp.8.900.000, dan biaya *re-schedule* sebesar Rp.200.000. Nilai Panjang *window* (*D*) pada kondisi optimal tidak selalu sama dengan asumsi Panjang *Window* (*D*) yang digunakan pada contoh kasus, hal tersebut tergantung pada parameter sistem yang dibahas. Hasil penjadwalan dan performansi dari kondisi optimal tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Solusi untuk Penjadwalan dengan  $D= 30$ ,  $HD=15$ , dan  $W+I=2$  kali.

$L_{[i]}$	$d_i$	$r_i$	$C_{i11}$	$C_{i33}$	Saat HD	EC (Rp)	LC (Rp)	RC (Rp)	TC (Rp)
Job 1	8	1	1,4	4,2		480.000	-		
Job 2	2	1	2,9	5,7		-	1.000.000		
Job 3	12	3	5,00	10		300.000	-		
Job 4	9	3	6,40	10,8		-	400.000		
Job 5	8	4	8,60	13,8		-	1.200.000		
Job 6	14	4	11,40	21		-	2.100.000		
Job 7	17	5	12,70	21,3	15	-	750.000	100.000	
Job 9	18	6	14,20	21,8		-	1.000.000		
Job 8	20	6	16,70	23,6		-	600.000		
Job 10	20	7	18,20	24,1		-	1.250.000		
Job 11	26	8	21,60	27,7		-	600.000		
Job 12	28	8	22,90	28		-	-		
					30			100.000	
TOTAL						<b>780.000</b>	<b>8.900.000</b>	<b>200.000</b>	<b>9.880.000</b>

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa pada delapan hari pertama (baris ke-1 sampai baris ke-7) *job* dijadwalkan mengikuti urutan kedatangan atau menggunakan metode FIFO. Urutan *job* adalah 1-2-3-4-5-6-7. Hal ini karena *job* masih dijadwalkan dalam jadwal statis sampai hari ke-15 (lihat kolom  $C_{i11}$ ). Pada baris ke-8 sampai ke-12, terjadi penjadwalan ulang (saat  $t=15$  di kondisi FIFO) untuk *job* yang ada di jadwal dinamis menjadi statis dengan menggunakan aturan prioritas EDD. Pada periode penjadwalan ulang pertama ini urutan *job* menjadi 6-7-9-8-11-12. Periode penjadwalan ulang ke-2 ketika seluruh *job* telah terjadwalkan. Urutan *job* secara keseluruhan adalah 1-2-3-4-5-6-7-9-8-10-11-12.

Selanjutnya, dilakukan analisis perbandingan antara solusi yang diterapkan perusahaan dan solusi yang diusulkan. Pada Tabel 1, perusahaan menggunakan metode *FCFS* dan menghasilkan total biaya sebesar Rp. 10.180.000,-. Sementara dengan menggunakan metode usulan (RTW) berbasis pada EDD diperoleh biaya sebesar Rp. 9.880.000,-. Terdapat efisiensi biaya sebesar Rp.300.000,- (3%). Nilai efisiensi relatif kecil karena disebabkan karena urutan jadwal yang digunakan perusahaan relatif tidak banyak berubah. Perubahan hanya ada pada jadwal *job* ke-8 dan ke-9 yang posisinya ditukar akibat adanya penjadwalan ulang pada hari ke-15. Hal ini juga menunjukkan bahwa kedatangan *job* ke perusahaan relatif terkendali dan perusahaan dinilai dapat mengatur kesepakatan penentuan saat tenggat pengiriman sehingga tidak terjadi antrian pada lantai produksi. Pada penelitian selanjutnya dapat dipertimbangkan untuk menjadwalkan pekerjaan dengan pendekatan mundur agar dapat mengantisipasi pekerjaan terlambat dan meminimasi persediaan pada lantai produksi (Yusriski, dkk., 2021) dan mempertimbangkan penentuan jumlah sumber daya untuk mempercepat proses pekerjaan (Rahmawati, dkk., 2021)

**Kesimpulan**

Penelitian ini membahas masalah penjadwalan pada fasilitas *Flowshop* 3 mesin yang terdapat pada PT. ABC. Pola kedatangan *job* bersifat dinamis dan setiap *job* memiliki saat tenggat masing-masing. Penelitian ini mengusulkan metode *Rolling Time Window* (RTW) untuk memperbaiki performa jadwal perusahaan yang menggunakan aturan *First In First Out* (FIFO). Hasil penelitian menunjukkan adanya perbaikan performa perusahaan yang diukur dari total biaya *earliness*, *lateness* dan *re-schedule* (3%). Perbaikan ini diperoleh dengan menyarankan perusahaan melakukan *re-schedule* setiap 15 hari sekali dengan mengevaluasi panjang *window* per 30 hari ( $D=30$  hari dan  $W=2$  kali). Meskipun begitu, metode FIFO yang dipakai perusahaan masih dapat digunakan mengingat karakteristik *job* yang datang ke perusahaan masih terkendali. Selain itu, perusahaan dinilai mampu membuat kesepakatan dengan konsumen mengenai saat tenggat pengiriman yang membuat antrian *job* di lantai produksi menjadi tidak terlalu padat.

Perlu ada penelitian lebih lanjut menggunakan data-data *job* yang lebih lengkap untuk memastikan karakteristik *job* yang datang ke perusahaan. Data tersebut dapat dibuat distribusi kedatangan yang selanjutnya dapat dijadikan *input* simulasi percobaan guna memastikan saran penjadwalan usulan yang lebih baik.

**Ucapan Terima Kasih**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pimpinan di lingkungan Fakultas Teknologi Manufaktur Unjani dan rekan-rekan dosen di program studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah membantu selama proses penelitian.

**Daftar Notasi**

- $\alpha_i$  = ongkos keterlambatan (*lateness*) *job*-i per unit per satuan waktu
- $\beta_i$  = ongkos simpan (*earliness*) *job*-i per unit per satuan waktu

$\varphi_i$	= ongkos penjadwalan ulang ( <i>re-schedule</i> ) <i>job-i</i> per frekuensi <i>re-schedule</i>
$\Delta_i$	= Rentang Waktu pengerjaan <i>job i</i>
$C_{ijk}$	= saat selesai operasi ke- <i>j</i> dari <i>job-i</i> pada mesin <i>k</i>
$a_i$	= <i>available time job i</i>
$d_i$	= <i>due date job i</i>
$D$	= variabel panjang <i>window</i>
$h$	= Parameter untuk panjang horizon jadwal
$i$	= indeks untuk <i>job</i> , $i = 1, 2, \dots, n$
$j$	= indeks untuk operasi, $1, 2, \dots, r$
$k$	= indeks untuk mesin, $k = 1, 2, \dots, m$
$m_i$	= indeks untuk mesin yang dipakai oleh operasi terakhir <i>job i</i>
$M$	= set proses mesin yang terlibat
$n_i$	= Jumlah komponen <i>job i</i> yang dikerjakan
$N$	= set <i>job</i> yang terlibat
$r_i$	= Waktu awal <i>job i</i> siap diproses pada sistem
$R_i$	= set operasi untuk <i>job i</i>
$S_{i1}$	= Waktu <i>setup job ke-i</i> sebelum masuk ke proses 1
$t_{ijk}$	= <i>job ke-i</i> proses ke- <i>j</i> pada mesin- <i>k</i>
$W$	= variabel banyaknya <i>window</i> .
$Z$	= total biaya <i>earliness</i> , <i>lateness</i> dan <i>re-schedule</i> seluruh <i>job</i>
$Z1_i$	= total biaya <i>earliness job ke-i</i>
$Z2_i$	= total biaya <i>lateness job ke-i</i>
$Z3_i$	= total biaya <i>re-schedule</i>

#### Daftar Pustaka

- Ilhami, M. A. (2014). Pengembangan Model Penjadwalan Dinamis Flexible Flow Shop 3-Stages untuk Meminimasi Weighted Tardiness dengan Sistem Lelang. *Seminar Nasional IENACO-2014*, 363–373. <http://publikasiilmiah.ums.ac.id/handle/123456789/4538>
- Mohan, J., Lanka, K., & Rao, A. N. (2019). A review of dynamic job shop scheduling techniques. *Procedia Manufacturing*, 30, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.006>
- Nurainun, T. (2012). Penjadwalan Batch pada Flow Shop Dinamis untuk Meminimasi Biaya Produksi. *Prosiding Seminar Nasional ReSaTek II-2012*. 1–13.
- Octanaty, D., Ilhami, M. A., & Herlina, L. (2015). Pengembangan Model Penjadwalan Dinamis Mesin Paralel dengan Sistem Lelang untuk Meminimasi Weighted Tardiness (Studi Kasus di PT . XYX). *Jurnal Teknik Industri Untirta*, 3(3). 1-7
- Rahmawati, S., Nasution, A.R.K., Nurholik, M.B. (2021). Penentuan Jumlah Tenaga Kerja pada Departemen Produksi di PT. XYZ dengan Metode Program Dinamis untuk Meminimasi Biaya Tenaga Kerja. *Go-Integratif: Jurnal Teknik Sistem dan Industri*, 2(1). 24-36
- Suharyanti, Y., & Halim, A. H. (2000). Model penentuan panjang time window pada penjadwalan job shop dinamik. *Jurnal Teknologi Industri*, 4(4), 217–228.
- Sun, D., & Lin, L. (1994). A dynamic job shop scheduling framework: A backward approach. *International Journal of Production Research*, 32(4), 967–985. <https://doi.org/10.1080/00207549408956982>
- Yusriski, R., Astuti, B., Ilham, M., & Zahedi. (2019). Integrated Batch Production and Multiple Preventive Maintenance Scheduling on A Single Machine to Minimize Total Actual Flow Time. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 598(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/598/1/012083>
- Yusriski, R., Astuti, B., Sukoyo, Samadhi, T. M. A. A., & Halim, A. H. (2015). Integer Batch Scheduling Problems for a Single-Machine to Minimize Total Actual Flow Time. *Procedia Manufacturing*, 2(February), 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.021>
- Yusriski, R., Samadhi, T. M. A. A., & Halim, A. H. (2014). Batch Scheduling for a Single Machine with Forgetting Effect to Minimize Total Actual Flow Time. *Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2014. 1(October)*. 2055-2060
- Yusriski, R., Sukoyo, S., Ari Samadhi, T. M. A., & Halim, A. H. (2015). Integer batch scheduling problems for a single-machine with simultaneous effects of learning and forgetting to minimize total actual flow time. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6(3), 365–378. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.2.005>
- Yusriski, R., Sukoyo, Samadhi, T. M. A. A., & Halim, A. H. (2016). An Integer Batch Scheduling Model for a Single Machine with Simultaneous Learning and Deterioration Effects to Minimize Total Actual Flow Time. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012073>

- Yusriski, R., Sukoyo, Samadhi, T. M. A. A., & Halim, A. H. (2018). An integer batch scheduling model considering learning, forgetting, and deterioration effects for a single machine to minimize total inventory holding cost. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 319(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012038>
- Yusriski, R., Astusi, B., Biksono, D., Wardani, T. (2021). A Single Macmhine Multi-Job Integer Batch Scheduling Problem with Multi Due Date to Minimize Total Actual Flow Time. *Decision Science Letter*, 10(3). 231-240
- Yusriski, R., Pardiyono, R. Zahedi, Ramhawati S., dan Ramdhani A. (2023). Dynamic Flexible flow shop schedulings with theory of constraint and time window approach to minimize mean tardiness. *AIP Conference Proceedings*, 2510(1).

## Pemanfaatan Limbah *Polyethylene* pada Campuran Lapis Tipis Aspal Beton

Agus Juhara<sup>1</sup>, Hanafi<sup>1</sup>, Rifqi Adhyaksa P<sup>1</sup>, dan Novan Selamat Nugraha R<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

[agus.juhara@lecture.unjani.ac.id](mailto:agus.juhara@lecture.unjani.ac.id), [hanafi@lecture.unjani.ac.id](mailto:hanafi@lecture.unjani.ac.id), [adhyaksarifqi1@gmail.com](mailto:adhyaksarifqi1@gmail.com),

[novannugraha24n@gmail.com](mailto:novannugraha24n@gmail.com)

### Abstrak

Perkerasan lentur merupakan perkerasan jalan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Kinerja campuran beraspal perlu ditingkatkan dengan cara memodifikasi campuran beraspal untuk menghasilkan campuran yang kuat, tahan lama dan tahan terhadap deformasi plastis. Untuk menaikkan kinerja campuran beraspal, salah satu caranya adalah dengan memanfaatkan limbah plastik *Polyethylene* (PE). Lapis Tipis Aspal Beton (LATASTON) mempunyai kandungan aspal relatif tinggi dibandingkan dengan tipe campuran lainnya karena sifatnya yang kedap air. LATASTON pada penelitian ini dilakukan dengan metode kering yaitu menambahkan limbah plastik *Polyethylene* (PE) yang ditambahkan ke dalam campuran agregat dan aspal panas pada temperatur campuran dan diaduk selama 30 - 45 detik. Variasi kadar limbah plastik *Polyethylene* (PE) yang ditambahkan yaitu 3%, 3,5% dan 4% dari berat aspal. Variasi penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) dengan LATASTON dievaluasi berdasarkan karakteristik dasar campuran aspal dimana hasil pengujian menunjukkan peningkatan pada stabilitas 10 – 20% dan nilai kelelahan berada pada 3 – 4mm. Nilai indeks kekuatan sisa menunjukkan dengan penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) dapat meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan dengan persentase 0,55% dibandingkan tanpa penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE). Kadar penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) berada pada rentang 3,5-3,9%.

Kata kunci: Limbah Plastik *Polyethylene* (PE), LATASTON, Metode Kering

### Abstract

Flexible pavement is a road pavement that uses asphalt as a binder. Asphalt mixture performance needs to be improved by modifying using particular material to improve its durability and resistance to plastic deformation. To increase the performance of asphalt mixtures, one of the alternatives is to utilize Polyethylene (PE) plastic waste. Hot Rolled Sheet (HRS) has a relatively high asphalt content compared to other types of mixtures because of is waterproof. This study was carried out using the dry method, Polyethylene (PE) plastic waste was added to the aggregate and hot asphalt mixture at the temperature of the mixture. Variations in the content of Polyethylene (PE) plastic waste added are 3%, 3.5%, and 4% by weight of asphalt. The characteristics of the asphalt mixture were the test results showed an increase in stability of 10 - 20% and the melting value was at 3 - 4mm. The residual strength index value shows that the addition of Polyethylene (PE) plastic waste can increase the resistance to damage by a percentage of 0.55% compared to without the addition of Polyethylene (PE) plastic waste. The level of addition of Polyethylene (PE) plastic waste is in the range of 3.5-3.9%

Keywords: Polyethylene (PE) Plastic Waste, Hot Rolled Sheet, Dry Method

### 1. Pendahuluan

Plastik merupakan limbah yang tidak mudah terurai dan membutuhkan waktu yang lama apabila terurai secara alami. Masalah lingkungan yang sering timbul akibat limbah plastik didaerah perkotaan adalah tercemarnya saluran air, saluran irigasi, sungai-sungai hingga ke daerah pantai. Kondisi ini sering mengakibatkan masalah banjir pada daerah-daerah perkotaan. (Kholidah dkk., 2019) Dalam penelitiannya melihat kontribusi limbah plastik terhadap sampah nasional mencapai 15% yang mana nilai ini menempatkan limbah plastik sebagai kontributor terbesar ke dua setelah limbah organik Pengelolaan sampah plastik menjadi masalah sendiri karena sifat dari bahan plastik yang *non biodegradable* sehingga pengelolaan limbah plastik dengan penimbunan dan pembakaran pun tidak tepat dilakukan. Salah satu hasil dari survei lapangan yang dilakukan di tempat pembuangan sampah sementara jenis kantong keresek dan minuman gelas plastik yang banyak dijumpai, dimana sampah ini sulit terurai dan mencemari lingkungan (Fatimura dkk., 2019).

#### Info Makalah:

Dikirim : 01-11-23;

Revisi 1 : 11-14-23;

Diterima : 11-15-23.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : [hanafi@lecture.unjani.ac.id](mailto:hanafi@lecture.unjani.ac.id)



Gambar 1. Tempat Pembuangan Sementara Sampah (Fatimura dkk., 2019)

Pengolahan sampah plastik umumnya adalah melalui konsep 3R yaitu *reduce* atau mengurangi penggunaan dan pembelian barang berbahan plastik, *reuse* atau penggunaan kembali barang berbahan plastik dan *recycle* atau mendaur ulang limbah plastik menjadi barang baru atau bernilai. Alternatif pemanfaatan limbah plastik menjadi bahan tambah bahan konstruksi sudah mulai diteliti salah satunya adalah penggunaan bahan tambah pada perkerasan aspal. (Sjahanulirwan, 2009) dalam penelitiannya menyimpulkan kelemahan perkerasan aspal dibandingkan dengan perkerasan beton, yaitu biaya pemeliharaan yang tinggi, kurangnya ketahanan terhadap beban berat serta membutuhkan energi yang tinggi terutama untuk tipe campuran aspal panas. Penggunaan limbah plastik diharapkan dapat meningkatkan ketahanan pada lalu lintas berat.

Studi mengenai pemanfaatan limbah plastik menjadi material tambah pada perkerasan aspal sudah dilakukan. Sejak lama dengan tujuan meningkatkan kekuatan perkerasan agar dapat digunakan pada lalu lintas berat. (Suroso, 2008) Membandingkan kinerja campuran beraspal konvensional dengan penambahan limbah plastik LDPE metode basah dan kering dimana hasil dari pada pengujian tersebut menunjukkan dengan penambahan limbah plastik pada campuran beraspal lebih baik dibandingkan dengan campuran aspal konvensional. (Susilowati dkk., 2021) melihat bahwa penambahan plastik pada campuran beraspal menyebabkan daya lekat aspal menjadi lebih baik. Menurut (Setyarini & Tajudin, 2018) penggunaan limbah plastik dengan jenis LDPE sebanyak 7 % dari total campuran AC-BC dapat mengurangi sekitar 1.71 ton sepanjang 1 Km. Penelitian karakteristik penambahan limbah plastik dengan jenis LDPE terhadap *ravelling* menunjukkan dengan penambahan limbah plastik pada aspal dapat meningkatkan kualitas campuran beraspal (Susanto dkk., 2021)

Harga limbah plastik diperkirakan lebih murah dibandingkan dengan plastik asli, untuk itu perlu dikembangkan penggunaan limbah sebagai bahan untuk meningkatkan mutu aspal, dengan cara penanganan atau pemrosesan yang mudah dilaksanakan, sehingga selain harga murah sekaligus dapat menanggulangi masalah limbah plastik yang tidak bisa rusak oleh proses biologi (*nonbiodegradable*).

Aspal modifikasi merupakan aspal minyak yang ditambah dengan bahan tertentu yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja campuran beraspal. (Permana & Aschuri, 2009) melakukan pengujian untuk mengetahui sifat reologi dasar aspal pen 60/80 dengan modifikasi limbah tas plastik, dimana dengan penambahan limbah tas plastik dapat meningkatkan kinerja aspal secara umum. Penggunaan bahan tambah limbah plastik pada aspal modifikasi lainnya ditinjau oleh (Fikri dkk., 2019) menggunakan limbah botol plastik *polyethylene terephthalate* (PET) menunjukkan semakin tinggi kadar penggunaan limbah PET mempengaruhi elastisitas dari aspal pen 60/70.

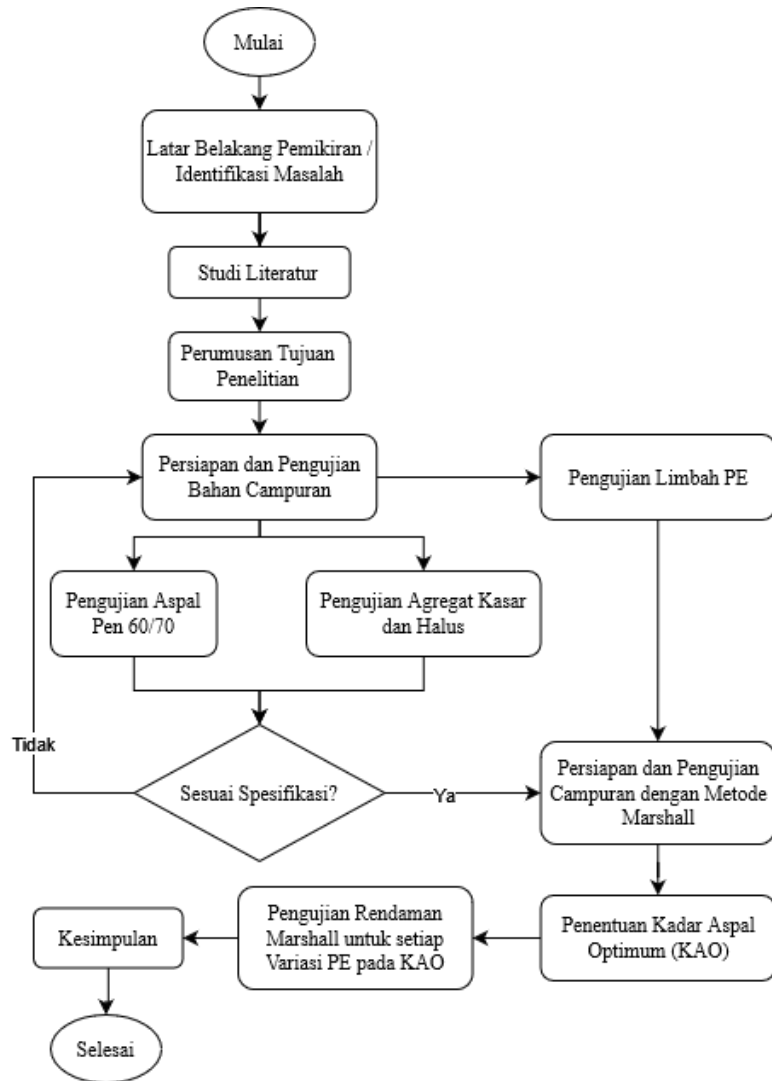
Salah satu jenis perkerasan aspal dengan mempunyai sifat lapisan kedap air adalah Lapis Tipis Aspal Beton (LATASTON atau *Hot Rolled Sheet*). Ada 2 jenis gradasi pada campuran LATASTON, yaitu gradasi senjang dan gradasi semi senjang (Hermanus dkk., 2015). Dimana sifat dari pada LATASTON ini Menurut (Azizah & Rahardjo, 2017) campuran aspal LATASTON mempunyai kandungan aspal relatif tinggi yang bertujuan untuk meningkatkan fleksibilitas, keawetan dan ketahanan. Studi ini meninjau sejauh mana aspal modifikasi limbah plastik *polyethylene* (PE) dapat digunakan pada campuran lapis tipis aspal beton (LATASTON) dan diharapkan dapat menjadi bahan tambah berbasis limbah untuk dapat digunakan menjadi aspal modifikasi mutu tinggi. Penggunaan aspal mutu tinggi pada campuran aspal dapat meningkatkan mutu dan durabilitas dari campuran aspal, sehingga campuran aspal tidak mudah rusak. Berdasarkan uraian diatas hipotesis dari penelitian ini adalah mengetahui komposisi penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) yang optimum pada campuran aspal LATASTON.

## 2. Metode

Penelitian ini dilakukan dengan skala laboratorium dengan menggunakan aspal pen 60/70, agregat kasar, agregat halus dan bahan tambah limbah plastik *Polyethylene* (PE). Tahapan pengujian dimulai dari pengujian agregat dan aspal. Kemudian dilakukan pengujian campuran aspal dengan metode marshall dan perendaman.

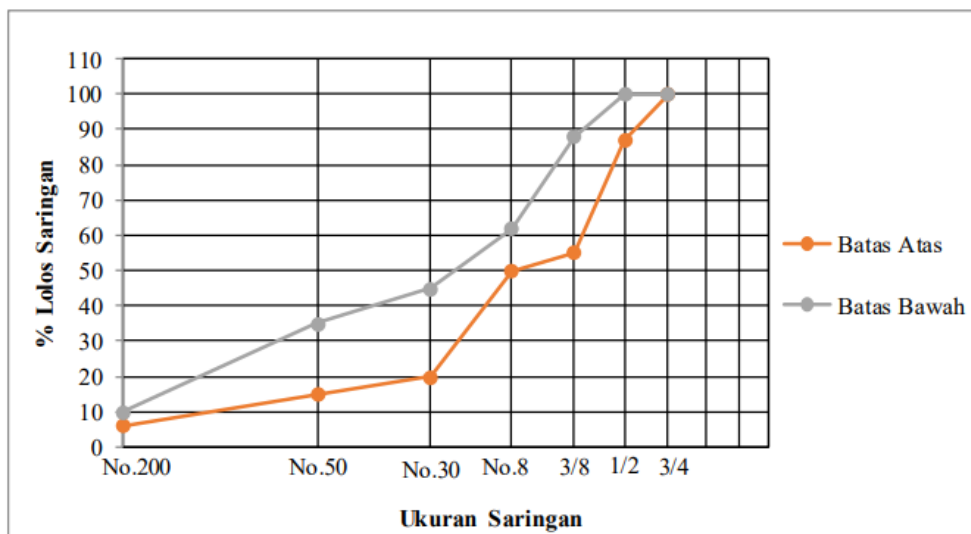
Pengujian campuran aspal dengan modifikasi limbah plastik *polyethylene* (PE) dilakukan dengan metode kering dengan kadar limbah plastik *Polyethylene* (PE) sebesar 3%, 3,5% dan 4% dimasukkan ke dalam agregat panas dengan temperatur campuran kemudian di aduk selama 30-45 detik. Prosedur penelitian dapat dilihat pada diagram alir sebagai berikut.





Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Data hasil pengujian laboratorium selanjutnya dilakukan analisis data dan dibandingkan dengan batasan dari spesifikasi umum bina marga. Analisis gradasi agregat kasar dan halus di tunjukan dalam persen terhadap berat agregat dan bahan pengisi. Batasan gradasi untuk rancangan penelitian ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. Grafik Gradasi Lapis tipis Aspal Beton.

Pengujian campuran aspal menggunakan metode marshall untuk mengetahui nilai kepadatan (*density*), stabilitas (ketahanan/kekuatan), kelelahan (*flow*), *Marshall Quotient* (MQ), Rongga terisi aspal (VFA atau VFB), Rongga dalam agregat (VMA), dan Rongga dalam campuran (VIM). Campuran aspal dibentuk dari agregat, aspal, filler, dan plastik sebagai modifikasi yang dicampur sampai homogen pada suhu tertentu. Campuran beraspal kemudian dipadatkan dalam cetakan marshall (*mould*) hingga terbentuk menjadi campuran beraspal padat.

Untuk pengujian perendaman marshall dilakukan selama 1×24 jam dengan suhu konstan sebesar 60°C dan dilakukan sebelum pengujian pembebanan diberikan. Perendaman marshall dilakukan untuk mengukur kinerja ketahanan campuran beraspal terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh air dan mengevaluasi pengaruh terhadap variasi penambahan bahan plastik.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian agregat dan aspal dapat dilihat pada tabel dibawah

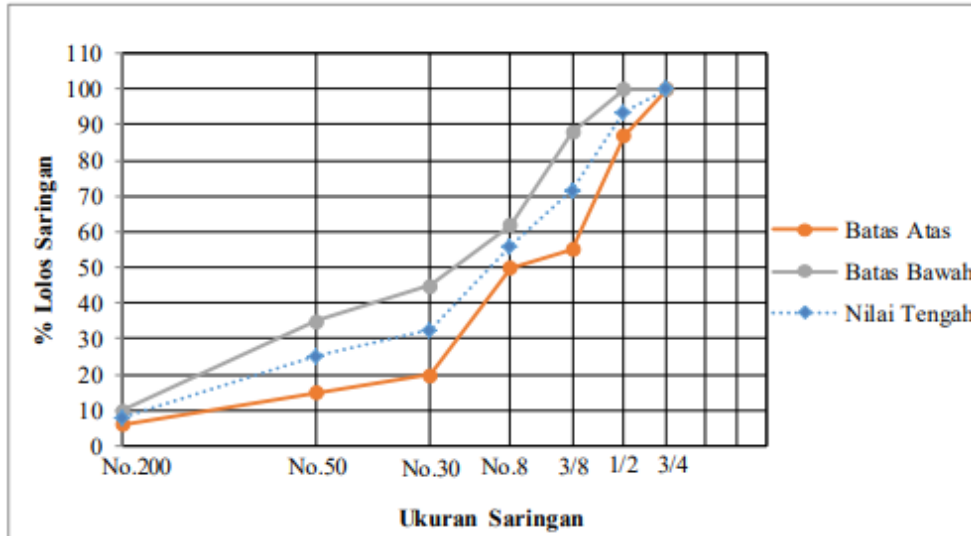
Tabel 1. Hasil Pengujian Agregat Kasar dan Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Syarat	Keterangan
<i>Split</i>				
1	BJ Kering	3.268	Min 2.5	Memenuhi
	BJ SSD	3.359	-	Memenuhi
	BJ <i>Apparent</i>	3.596	-	Memenuhi
	Penyerapan air	2.789	Maks 3%	Memenuhi
2	Keausan Agregat	22.94	Maks 40%	Memenuhi
3	Indeks Kepipihan	23.17	Maks 25%	Memenuhi
4	Indeks Kelonjongan	7.60	Maks 10%	Memenuhi
<i>Screen</i>				
1	BJ Kering	2.706	Min 2.5	Memenuhi
	BJ SSD	2.771	-	Memenuhi
	BJ <i>Apparent</i>	2.895	-	Memenuhi
2	Penyerapan air	2.417	Maks 3%	Memenuhi
3	Keausan Agregat	22.94	Maks 40%	Memenuhi
Abu Batu				
1	BJ Kering	2.583	Min 2.5	Memenuhi
	BJ SSD	2.637	-	Memenuhi
	BJ <i>Apparent</i>	2.730	-	Memenuhi
2	Penyerapan air	2.082	Maks 3%	Memenuhi
3	Lolos Ayakan no. 200	4.538	Maks 10%	Memenuhi
4	Nilai Setara Pasir	61.26	Min 60%	Memenuhi

Tabel 2. Hasil Pengujian Aspal

No.	Jenis Pengujian	Hasil	Syarat	Keterangan
1	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	65.7	60-70	Memenuhi
2	Titik Nyala (°C)	305	Min 232 °C	Memenuhi
3	Titik Bakar (°C)	325	Min 232 °C	Memenuhi
4	Berat Jenis Aspal	1.027	Min 1.0	Memenuhi
5	Daktalitas 25°C (cm)	> 100	Min 100 cm	Memenuhi
6	Titik Lembek (°C)	51.5	Min 48 °C	Memenuhi
7	Viskositas Kinematis 135°C (cSt)	390	Min 300 cSt	Memenuhi

Setelah pengujian agregat dan aspal selanjutnya dilakukan perhitungan perancangan campuran aspal LATASTON meliputi proporsi agregat dan perhitungan kadar aspal rencana. Perhitungan proporsi agregat dilakukan berdasarkan nilai tengah dari persyaratan gradasi LATASTON, dengan proporsi agregat kasar 44%, agregat halus 48%, dan abu batu 8%. Amplop rencana gradasi dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 4. Rencana Gradasi LATASTON

Analisis penentuan kadar aspal (Pb) menggunakan pendekatan rumus empiris. Adapun persamaan empiris sebagai berikut:

$$Pb = 0.035(\%CA) + 0.045(\%FA) + K(\%FF) + C \tag{1}$$

Dari hasil analisis diperoleh nilai kadar 6% - 8% dengan interval 0,5%. Kemudian dilakukan pencampuran benda uji dan di uji dengan metode Marshall dengan variasi limbah plastik *polyethylene* (PE) 0%, 3%, 3.5% dan 4% diperoleh hasil sebagai berikut

Tabel 3. Hasil Pengujian Campuran Aspal LATASTON Kadar PE 0%

Parameter Campuran	Hasil Pengujian HRS -WC					Spesifikasi
	6	6.5	7	7.5	8	
Kadar Aspal (%)	6	6.5	7	7.5	8	-
Kepadatan	2.11	2.14	2.17	2.19	2.19	-
VMA (%)	31.92	31.34	30.77	30.61	30.79	Min 18
VFB (%)	74.68	78.56	82.86	85.45	87.13	Min 68
VIM (%)	8.09	6.72	5.27	4.45	3.96	4 - 6
Stabilitas (kg)	909	977	1007	1053	1016	Min 800
Kelelehan (mm)	3.4	3.5	3.6	3.8	3.9	Min 3

Tabel 4. Hasil Pengujian Campuran Aspal LATASTON Kadar PE 3%

Parameter Campuran	Hasil Pengujian HRS -WC					Spesifikasi
	6	6.5	7	7.5	8	
Kadar Aspal (%)	6	6.5	7	7.5	8	-
Kepadatan	2.12	2.14	2.15	2.16	2.17	-
VMA (%)	31.75	31.49	31.51	31.37	31.57	Min 18
VFB (%)	72.84	76.13	78.67	82.60	87.59	Min 68
VIM (%)	8.63	7.52	6.72	5.46	3.92	4 - 6
Stabilitas (kg)	1003	1103	1121	1108	1121	Min 800
Kelelehan (mm)	3.4	3.2	3.6	3.9	4.1	Min 3

Tabel 5. Hasil Pengujian Campuran Aspal LATASTON Kadar PE 3,5%

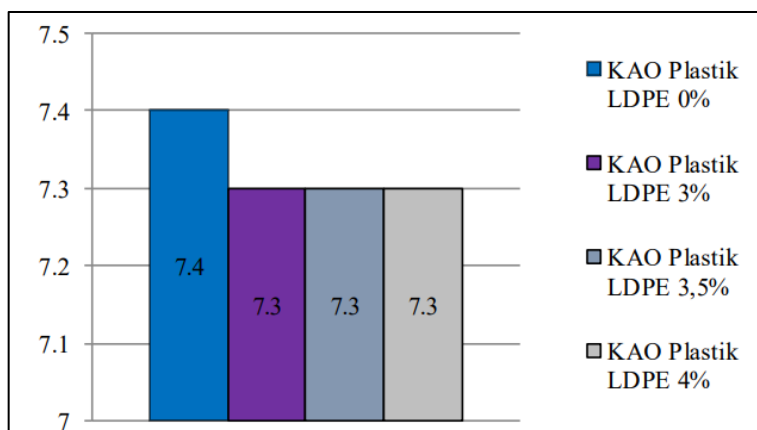
Parameter Campuran	Hasil Pengujian HRS -WC					Spesifikasi
	6	6.5	7	7.5	8	
Kadar Aspal (%)	6	6.5	7	7.5	8	-
Kepadatan	2.13	2.14	2.16	2.17	2.18	-
VMA (%)	31.23	31.26	31.07	31.04	31.36	Min 18
VFB (%)	68.46	75.43	78.25	83.34	91.52	Min 68
VIM (%)	9.85	7.68	6.76	5.17	2.66	4 - 6
Stabilitas (kg)	1004	1154	1205	1233	1229	Min 800
Kelelehan (mm)	3.7	4.0	4.0	4.1	4.2	Min 3

Tabel 6. Hasil Pengujian Campuran Aspal LATASTON Kadar PE 4%

Parameter Campuran	Hasil Pengujian HRS -WC					Spesifikasi
	6	6.5	7	7.5	8	
Kadar Aspal (%)	6	6.5	7	7.5	8	-
Kepadatan	2.12	2.14	2.16	2.17	2.18	-
VMA (%)	31.54	31.26	31.06	31.06	31.36	Min 18
VFB (%)	64.42	72.94	78.97	85.64	92.76	Min 68
VIM (%)	11.22	8.46	6.53	4.46	2.27	4 – 6
Stabilitas (kg)	984	1130	1208	1240	1245	Min 800
Kelelahan (mm)	3.8	4.0	4.1	4.3	4.5	Min 3

### 3.1. Analisis Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Nilai yang diperoleh untuk KAO *marshall* untuk campuran tanpa penambahan plastik didapat sebesar 7,4% dan untuk variasi penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) 3%, 3,5%, dan 4% masing-masing diperoleh nilai KAO sebesar 7,3% yang dapat dilihat pada Gambar di bawah. Data tersebut menunjukkan persentase aspal untuk campuran dengan variasi penambahan plastik lebih sedikit dibandingkan dengan campuran yang tidak menggunakan bahan tambah plastik.



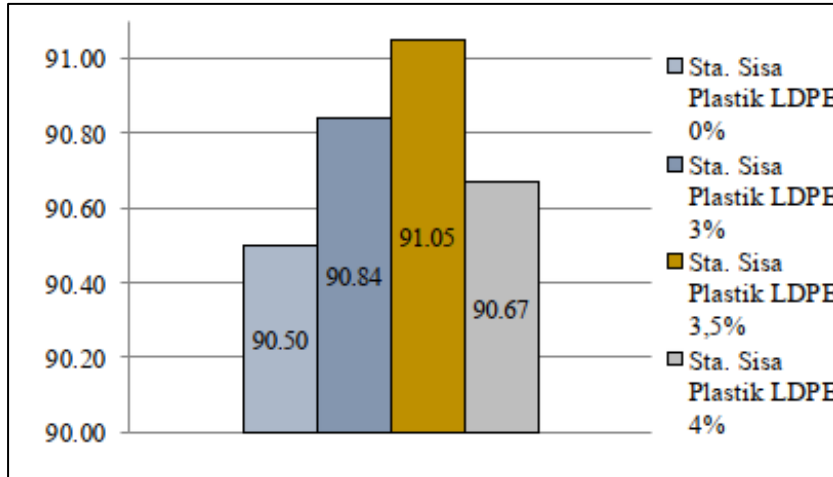
Gambar 5. Perbandingan Kadar Aspal Optimum (KAO).

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Pengujian Campuran Pada KAO.

Parameter	Kadar Plastik				Persyaratan
	0%	3%	3,5%	4%	
KAO (%)	7,4	7,35	7,35	7,35	-
VMA (%)	30,7	31,4	31,1	31,1	18%
VFB (%)	84,9	81,6	82,7	84,0	68%
VIM (%)	4,7	4,7	5,4	4,9	4% - 6%
Stabilitas (kg)	1028	1130	1238	1236	800 kg
Kelelahan (mm)	3,8	3,8	4,1	4,2	3 mm
MQ (kg/mm)	275,0	301,0	303,3	294,0	250 kg/mm

### 3.2. Analisis Pengujian Perendaman Marshall

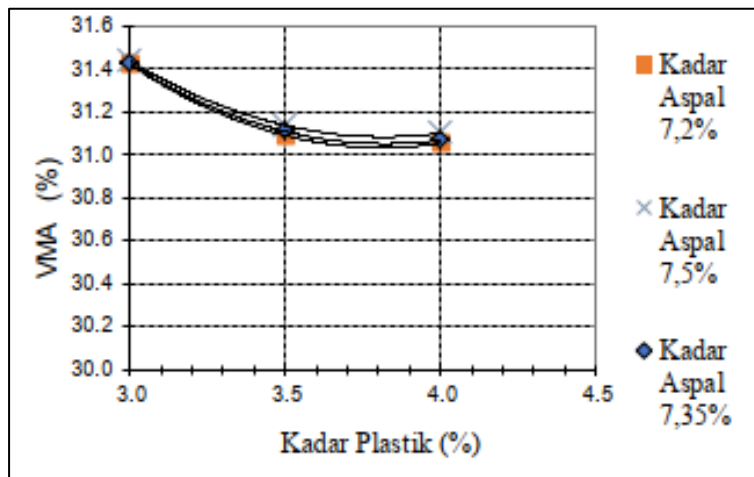
Nilai *Index of Retained Stability* (IRS) atau indeks kekuatan sisa merupakan suatu parameter yang digunakan untuk menunjukkan kemampuan dari campuran untuk menahan kerusakan akibat pengaruh cuaca, suhu, dan air. Dapat dilihat pada Gambar 2, nilai indeks kekuatan sisa campuran untuk campuran yang tidak menggunakan bahan tambah plastik *Polyethylene* (PE) menghasilkan nilai IRS sebesar 90,5%, sedangkan untuk campuran dengan variasi penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) 3% didapat hasil IRS sebesar 90,84%, kemudian untuk campuran dengan variasi penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) 3,5% didapat hasil sebesar 91,05% dan untuk variasi penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) 4% didapat hasil IRS sebesar 90,67%. Hal ini menunjukkan bahwa campuran dengan penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) menghasilkan nilai IRS yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran yang tidak menggunakan bahan tambah plastik.



Gambar 6. Nilai Stabilitas Sisa Pengujian Perendaman

### 3.3. Hubungan Kadar Aspal Optimum dengan Kadar Limbah Plastik Polyethylene (PE) Nilai VMA terhadap Kadar Plastik dengan Kadar Aspal

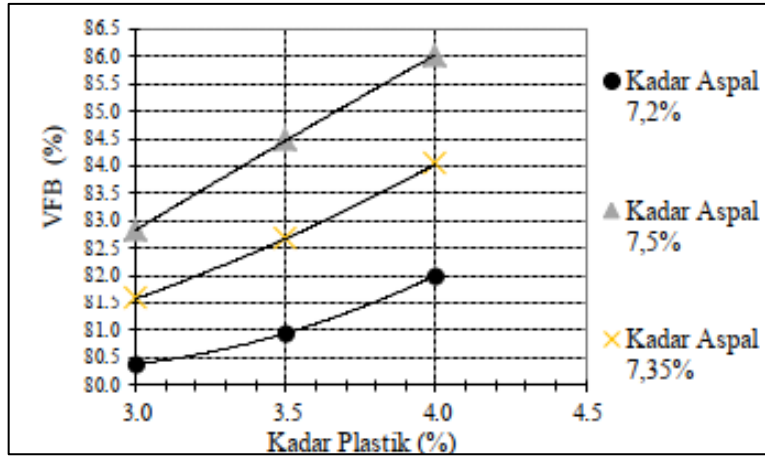
Hubungan antara penggunaan kadar aspal terhadap penggunaan limbah plastik PE menunjukkan pada campuran LATASTON akan memberikan pengaruh penurunan nilai VMA. Hasil pengujian campuran dengan kadar aspal 7,2 %, 7,35 % dan 7,5% pada kadar limbah plastik PE dapat ditarik kesimpulan rongga udara pada campuran rendah sehingga sifat dari campuran yang kedap dan tidak mudah teroksidasi.



Gambar 7. Hubungan Kadar Plastik (%) dengan Nilai VMA (%)

### 3.4. Nilai VFB terhadap Kadar Plastik dengan Kadar Aspal

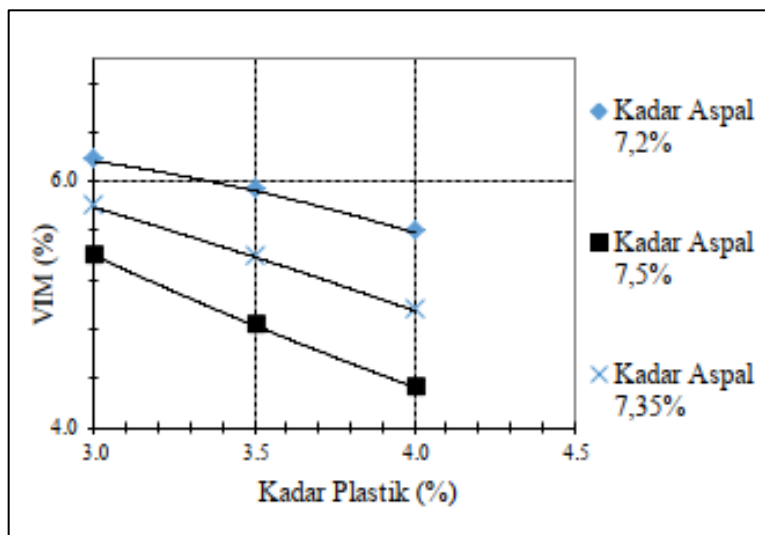
Penggunaan limbah plastik PE sebagai bahan campuran beraspal cenderung meningkatkan nilai VFB. Sehingga dengan bertambahnya kadar limbah plastik PE sebagai bahan campuran beraspal dapat mengurangi besar rongga dalam campuran dikarenakan rongga-rongga dapat terisi oleh aspal sehingga campuran aspal tidak mudah untuk terkelupas. Perbandingan nilai VFB untuk campuran dengan kadar aspal 7,2% dan kadar aspal 7,5% menunjukkan bahwa campuran dengan kadar aspal 7,5% memberikan nilai VFB lebih besar daripada campuran dengan kadar aspal 7,2%.



Gambar 8. Hubungan Kadar Plastik (%) dengan Nilai VFB (%)

### 3.5. Hubungan Nilai VIM Terhadap Kadar Plastik dengan Kadar Aspal

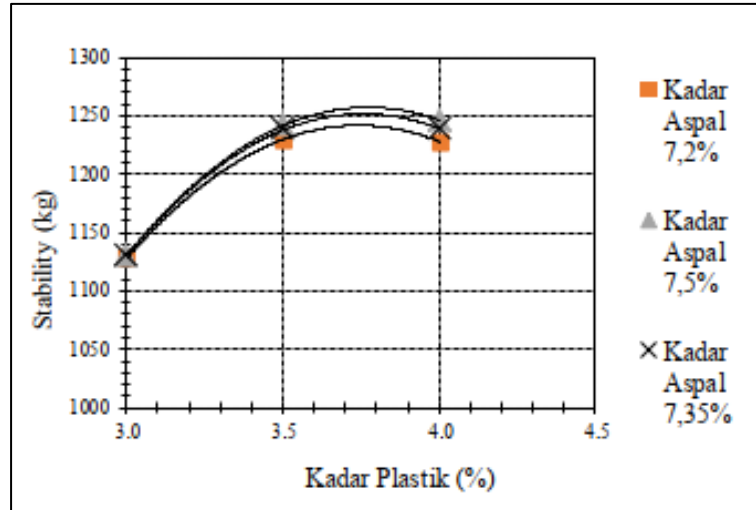
Penambahan limbah plastik PE dapat menurunkan nilai VIM, karena semakin banyak kadar limbah plastik PE yang digunakan akan semakin mengisi rongga-rongga pada campuran beraspal. Nilai VIM yang sangat kecil mengakibatkan lapisan kedap pada campuran sehingga campuran tidak mudah untuk retak atau disintegrasi. Maka penambahan kadar limbah plastik PE yang efektif disarankan berada di rentang 3,5% sampai 3,9%.



Gambar 9. Hubungan Kadar Plastik (%) dengan Nilai VIM (%)

### 3.6. Hubungan Nilai Stabilitas Terhadap Kadar Plastik dengan Kadar Aspal

Nilai Stabilitas campuran aspal dengan penambahan limbah plastik PE memiliki nilai stabilitas lebih tinggi dibandingkan dengan campuran aspal tanpa penambahan bahan limbah plastik PE. Kadar aspal 7,2 % hingga 7,5% menunjukkan bahwa aspal dengan bahan tambah limbah plastik PE dapat membuat campuran tahan terhadap deformasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik PE dapat meningkatkan nilai stabilitas yang tinggi, sehingga perkerasan akan semakin kuat terhadap beban lalu lintas tinggi.

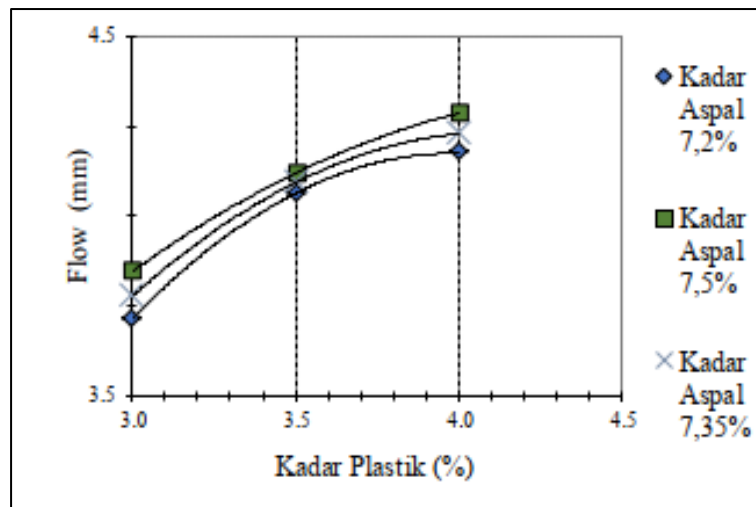


Gambar 10. Hubungan Kadar Plastik (%) dengan Nilai Stabilitas (kg)

### 3.7. Hubungan Nilai Flow Terhadap Kadar Plastik dengan Kadar Aspal

Penggunaan limbah plastik PE cenderung menaikkan nilai kelelahan (*flow*). Kemampuan campuran beraspal terhadap perubahan bentuk dipengaruhi oleh penggunaan kadar aspal terhadap limbah plastik PE, sehingga membuat campuran dengan kadar aspal yang tinggi dan penggunaan limbah plastik PE yang terlalu banyak menyebabkan campuran menjadi lembek.

Untuk hasil yang optimum penambahan kadar plastik efektif berada pada rentang 3,5% sampai 3,9%, karena pada rentang tersebut nilai kelelahan tidak terlalu tinggi serta nilai stabilitas, rongga udara di antara partikel agregat yang terselimuti aspal (VIM), rongga udara yang terisi aspal (VFB) dan rongga udara di dalam mineral agregat (VMA) berada pada rentang nilai maksimum yang menghasilkan campuran beraspal yang lebih kuat.

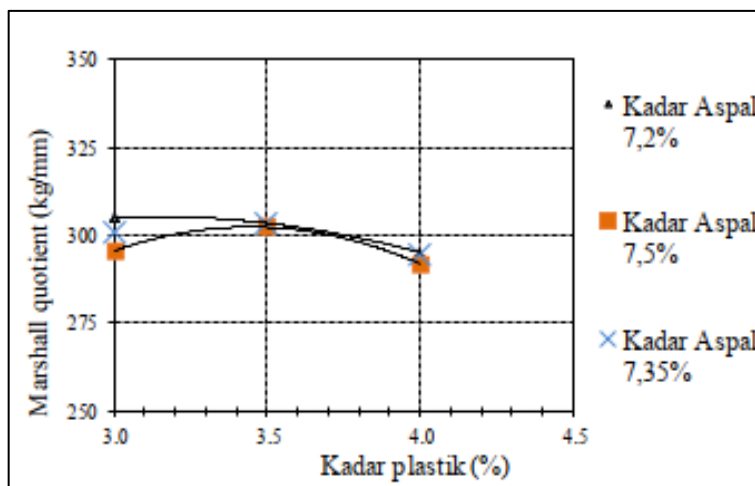


Gambar 11. Hubungan Kadar Plastik (%) dengan Nilai Flow (mm)

### 3.8. Hubungan Nilai MQ Terhadap Kadar Plastik dan Kadar Aspal

Dapat dilihat pada Gambar 11, bahwa campuran beraspal dengan penambahan limbah plastik PE pada campuran beraspal menaikkan nilai MQ. Nilai MQ merupakan indikator terhadap kekakuan campuran, dimana kadar aspal 7,5 % mempunyai nilai MQ 4,25 lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kadar aspal 7,2 % dan 7,35 %.





Gambar 12. Hubungan Kadar Plastik (%) dengan Nilai MQ (kg/mm)

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dengan penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) pada Campuran LATASTON karakteristik campuran dapat dilihat dari nilai stabilitas campuran aspal dengan penambahan kadar limbah plastik PE 3% - 4% meningkat 10% - 20% dibandingkan dengan tanpa penambahan limbah plastik. Dilihat dari peningkatan stabilitas akibat pengaruh penambahan limbah plastik PE pada campuran ini tidak membuat karakter campuran LATASTON menjadi getas. Hal ini bisa dilihat dari nilai kelelahan (*flow*) campuran LATASTON dengan penambahan limbah plastik *Polyethylene* (PE) 3% - 4% diperoleh nilai kelelahan 3 – 4 mm.

Nilai indeks kekuatan sisa pada campuran LATASTON dengan penambahan limbah plastik PE 3% diperoleh nilai 90,84% variasi penambahan limbah plastik PE 3,5% didapat hasil sebesar 91,05% dan untuk variasi penambahan limbah plastik PE 4% diperoleh sebesar 90,67%. Kadar aspal optimum (KAO) untuk campuran penambahan bahan limbah plastik PE sebesar 7,3% dibandingkan dengan campuran tanpa penambahan plastik yaitu 7,4%.

Berdasarkan analisis penambahan kadar limbah plastik PE efektif didapatkan pada rentang 3,5% - 3,9%. Hasil analisis terhadap nilai volumetrik campuran menunjukkan campuran dengan penambahan limbah plastik PE dapat membuat campuran aspal menjadi lebih kedap dan tahan terhadap penebaran dini akibat oksidasi serta tidak mudah terdisintegrasi. Nilai stabilitas, kelelahan (*flow*) dan *Marshall Quotient* (MQ) dengan penambahan limbah plastik PE dengan rentang 3,5% sampai 3,9% menunjukkan campuran akan lebih tahan terhadap deformasi serta dapat menyesuaikan terhadap perubahan bentuk dengan baik (*flexibility*).

### Daftar Notasi

PE	= <i>Polyethylene</i>
VIM	= <i>Void in Mixture</i> [%]
VMA	= <i>Void in Aggregate</i> [%]
VFB	= <i>Void Filled Bitumen</i> [%]
KAO	= Kadar Aspal Optimum [%]
LATASTON	= Lapis Tipis Aspal Beton

### Daftar Pustaka

- Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum : *Spesifikasi Umum 2010 (Revisi 3)*.
- Azizah, N., & Rahardjo, B. (2017). KINERJA CAMPURAN HOT ROLLED SHEET-WEARING COURSE (HRS-WC) DENGAN FILLER ABU AMPAS TEBU. Dalam *JURNAL BANGUNAN* (Vol. 22, Nomor 2). <http://antaranews.com>,2014
- Fatimura, M., Sepriyanti, R., & Yunita, R. (2019). *PENGOLAHAN LIMBAH PLASTIK JENIS KANTONG KRESEK DAN GELAS MINUMAN MENGGUNAKAN PROSES PIROLISIS MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK* (Vol. 4, Nomor 2).
- Fikri, H., Subagja, A., & Manurung, A. S. D. (2019). *Karakteristik Aspal Modifikasi dengan penambahan Limbah Botol Plastik Polyethylene Terephthalate (PET)*.
- Hermanus, G., Kaseke, O. H., & Jansen, F. (2015). KAJIAN PERBEDAAN KINERJA CAMPURAN BERASPAL PANAS ANTARA JENIS LAPIS TIPIS ASPAL BETON-LAPIS AUS (HRS-WC) BERGRADASI SENJANG DENGAN YANG BERGRADASI SEMI SENJANG. *Jurnal Sipil Statik*, 3(4), 228–234.

- Kholidah, N., Faizal, M., & Said, M. (2019). Science & Technology Indonesia Polystyrene Plastic Waste Conversion into Liquid Fuel with Catalytic Cracking Process Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as Catalyst. *Sci. Technol. Indonesia*, 3, 1–6. <https://doi.org/10.26554/sti.2017.3.1.1-6>
- Permana, R., & Aschuri, I. (2009). Studi Sifat-Sifat Reologi Aspal yang Dimodifikasi Limbah Tas Plastik. *Simposium XII FSTPT*.
- Setyarini, N. L. P. S. E., & Tajudin, A. N. (2018). Characteristics of Asphalt Concrete Mixed Using Aggregates Coated by Low Density Polyethylene (LDPE) Plastic Waste. *11th Asia Pacific Transportation and the Environment Conference (APTE 2018)*, 1–4.
- Sjahdanulirwan. (2009). Kelebihan Serta Kekurangan Perkerasan Beraspal Dan Beton. *Puslitbang Jalan dan Jembatan*.
- Suroso, T. W. (2008). *PENGARUH PENAMBAHAN PLASTIK LDPE (LOW DENSITY POLY ETHILEN) CARA BASAH DAN CARA KERING TERHADAP KINERJA CAMPURAN BERASPAL*.
- Susanto, H. A., Merdiana, K., & Indriyati, E. W. (2021). PENGARUH PENAMBAHAN LIMBAH PLASTIK POLYPROPYLENE (PP) TERHADAP KETAHANAN RAVELLING CAMPURAN ASPHALT CONCRETE WEARING COURSE (THE EFFECT OF WASTE POLYPROPYLENE (PP) PLASTIC TO THE RAVELLING RESISTANCE OF ASPHALT CONCRETE WEARING COURSE MIXES). Dalam *Juli-Desember* (Vol. 38, Nomor 2).
- Susilowati, A., Wiyono, E., & Pratikto. (2021). *PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK SEBAGAI BAHAN TAMBAH PADA BETON ASPAL CAMPURAN PANAS*.