

ISSN 2302 – 5182



# TEKNIK DESAIN MEKANIKA

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 13 • Nomor 3 • JULI • 2024 • Hal. 188 - 300

Program Studi Teknik Mesin–Fakultas Teknik  
Universitas Udayana



Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik, Universitas Udayana  
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80362  
Telp./Fax.: +62 361 703321  
<http://www.mesin.unud.ac.id>



JITM-TDM

Volume 13

Nomor 3

Hal. 188-300

Badung, Juli 2024

ISSN 2302-5182

**TEKNIK DESAIN  
MEKANIKA**  
**Jurnal Ilmiah Teknik Mesin**



**Volume 13, Nomor 3, Juli 2024, Hal. 188 – 300**

**Penanggung Jawab**

Koordinator Program Studi Teknik Mesin UNUD

**Ketua Dewan Redaksi**

Dr. I Made Astika, S.T., M.Erg., M.T.

**Redaksi Pelaksana/Tim Validasi**

Dr. I Gede Putu Agus Suryawan, S.T., M.T.

Dr. Eng. Made Gatot Karohika S.T, M.T.

Dr. I Made Parwata, S.T., M.T.

Ketut Astawa, S.T., M.T.

I Wayan Arya Darma, ST, MT.

I Gusti Ngurah Putu Tenaya, S.T., M.T.

Dr. Dewa Ngakan Ketut Putra Negara, S.T., M.Sc.

Ir. I Nengah Suarnadwipa, M.T.

I Putu Angga Yuda Pratama, S.T., M.T.

I

**Editor Ahli**

Dosen-dosen di Program Studi Teknik Mesin  
Universitas Udayana

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin **TEKNIK DESAIN MEKANIKA** diterbitkan oleh Program Studi Teknik Mesin - Universitas Udayana empat kali dalam setahun pada bulan Januari, April, Juli dan Oktober, berisi artikel hasil penelitian dan kajian teoritis-analitis di bidang Teknik Mesin. Dewan redaksi menerima tulisan yang belum pernah serta tidak sedang dipertimbangkan untuk diterbitkan atau dipublikasikan dalam media lain. Naskah diketik dalam Bahasa Indonesia atau bahasa Inggris dengan mengikuti pedoman yang dapat diunduh di halaman website Teknik Mesin UNUD atau web JITM-TDM.

**Alamat Redaksi**

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana

Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali 80362

Telp. / Fax.: 62 361 703321

E-mail: [jitm\\_tdm@me.unud.ac.id](mailto:jitm_tdm@me.unud.ac.id); [t\\_desain\\_mekanika@yahoo.co.id](mailto:t_desain_mekanika@yahoo.co.id)

Info JITM-TDM: [www.mesin.unud.ac.id](http://www.mesin.unud.ac.id)

## Kata Pengantar

Puji syukur tercurahkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas terbitnya Jurnal Ilmiah Teknik Mesin – TEKNIK DESAIN MEKANIKA, Universitas Udayana volume 13 Nomor 3, Juli 2024 ini. Penerbitan jurnal ini bertujuan menyediakan media publikasi untuk hasil-hasil penelitian maupun kajian aplikasi di bidang Teknik Mesin, baik untuk peneliti di kalangan internal maupun eksternal kampus Universitas Udayana, baik dari kalangan mahasiswa maupun dosen.

Dewan redaksi mengucapkan terima kasih atas dukungan dan motivasi dari rekan-rekan di kampus serta pimpinan program studi dalam merealisasikan terbitnya jurnal ini. Dewan redaksi juga menyampaikan terima kasih atas partisipasi rekan-rekan peneliti yang mengirimkan naskahnya untuk dipublikasikan via Jurnal Teknik Mesin Universitas Udayana.

Dalam penerbitan JITM TEKNIK DESAIN MEKANIKA Volume 13 Nomor 3 ini, disajikan 20 artikel, dalam berbagai topik meliputi komposit, material, bahan bakar, sistem bahan bakar, gasifikasi, carbon aktif, dan sistem kontrol.

Akhirnya, Dewan redaksi berharap semoga artikel-artikel dalam jurnal ini bermanfaat bagi pembaca dan memperkuat semangat untuk ikut dalam pengembangan ilmu dan teknologi terutama di bidang Teknik Mesin. Kami tunggu naskah-naskah untuk penerbitan berikutnya.

**Dewan Redaksi**

# TEKNIK DESAIN MEKANIKA

## Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 13 • Nomor 3 • Juli 2024 • Hal. 188 – 300

### Daftar Isi

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Pengaruh Variasi Massa Campuran Sampah Plastik Jenis <i>Low Density Polyethylene</i> (LDPE) Dan <i>Poly Propylene</i> (PP) Terhadap Volume Produk Cair Proses Pirolisis</b><br>Putu Gangga Prabawa Sadhu, I Nengah Suarnadwipa, dan Ketut Astawa | 188 - 191 |
| <b>Uji Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis Sampah Plastik Jenis HDPE, LDPE, dan PP</b><br>Paulina Loveiana Kefi, I Nengah Suarnadwipa, dan I Wayan Bandem Adnyana  | 192-197   |
| <b>Pengaruh Temperatur Reaktor Terhadap Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis Sampah Plastik Polypropylene</b><br>Muchammad Aufa Muqsith, I Nengah Suarnadwipa, dan I Wayan Bandem Adnyana   | 198-201   |
| <b>Pengaruh Variasi Sampah Plastik Jenis High Density Polyethylene (HDPE), Low Density Polyethylene (LDPE), dan Polypropylene (PP) Terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis</b><br>Manshuriin Minduro, I Nengah Suarnadwipa, dan Ketut Astawa         | 202-206   |
| <b>Uji Co-Firing Batubara Dengan Briket Msw Menggunakan Insinerator Fluidized Bed</b><br>Bryan Steve Immanuel, I Nyoman Suprpta Winaya, I Gede Putu Agus Suryawan, I Putu Angga Yuda Pratama  | 207-211   |
| <b>Analisis Performa Kolektor Surya Pelat Datar Dengan Sirip Melintang Berongga Disusun Staggered</b><br>Agil Yanuar Juliarto, Ketut Astawa, Made Sucipta   | 212-218   |
| <b>Analisis Performa Kolektor Surya Pelat Datar Dengan Sirip Melintang Berongga Disusun Aligned Menggunakan Aliran Impinging Jet</b><br>Zefanya Farel Tulak, Ketut Astawa, Made Sucipta   | 219-224   |
| <b>Analisis Performa Kolektor Surya Pelat Datar Dengan Sirip Melintang Berongga Disusun Staggered Menggunakan Aliran Impinging Jet</b><br>Hunafa Arya Purnama, Ketut Astawa, Made Sucipta   | 225-230   |
| <b>Analisis Performa Kolektor Surya Pelat Datar Dengan Sirip Melintang Berongga Disusun Aligned</b><br>Ahmad Husein Alhafidz, Ketut Astawa, Made Sucipta  | 231-236   |
| <b>Sistem Monitoring Electric-Powered Wheelchair (Epw) Berbasis Sensor Accelerometer Terintegrasi Kalman Filter Dan Auto-Encoder Machine Learning</b><br>Jalasecca Wya Dewaruci, I Wayan Widhiada, I Gusti Komang Dwijana                           | 237-243   |



|   |                |
|---|----------------|
| <b>Efektivitas Waste Motor Oil Pada Plat Interceptor Sebagai Media Penurunan Kepekatan Flue Gas Variasi Moisture Content Msw</b><br>I Wayan Andrayuga, I Nyoman Suprpta Winaya, I Wayan Arya Darma, I Gusti Ngurah Putu Tenaya, I Putu Angga Yuda Pratama | <b>244-255</b> |
| <b>Karakteristik Kekerasan Perunggu Sebagai Material Gambelan Pada Proses Casting Pembuatan Gambelan Bali</b><br>Dewa Nyoman Tri Astawa Putra, I.K.G Sugita, DNK Putra Negara   | <b>256-260</b> |
| <b>Pengaruh Penambahan Timah Hitam (Pb) Pada Paduan High-Tin Bronze Terhadap Kekerasan</b><br>I Gede Suarjaya, I Ketut Gede Sugita, dan DNK Putra Negara  | <b>261-265</b> |
| <b>Karakteristik Fluiditas Hasil Pengecoran Al-7Si Metode Sand Casting Akibat Variasi Temperatur Tuang dan Tebal Saluran</b><br>I Kadek Agus Juniarta, I Ketut Gede Sugita, Ni Made Dwidiani  | <b>266-269</b> |
| <b>Pengaruh Temperatur Terhadap Hasil Uji Sem Aglomerasi Co-Firing Rdf Msw Dan Batubara Pada Fluidized Bed Combustor</b><br>Eli Sebastian, I Nyoman Suprpta Winaya, Ketut Astawa, I Putu Angga Yuda Pratama, I Gusti Ngurah Putu Tenaya                   | <b>270-274</b> |
| <b>Pengaruh Rasio RDF MSW Dan Batubara Terhadap Nilai Net Plant Heat Rate (NPHR) Pada Co-Firing Insinerator Fluidized Bed</b><br>Michael Wor Winner, I Nyoman Suprpta Winaya, Ketut Astawa, I Putu Angga Yuda Pratama                                     | <b>275-279</b> |
| <b>Pengaruh Excess Air Terhadap Co-Firing Batu Bara Dengan Briket Msw Menggunakan Insinerator Fluidized Bed</b><br>Edgar Reinard Lie, I Nyoman Suprpta Winaya, I Gede Putu Agus Suryawan  | <b>280-284</b> |
| <b>Pengaruh Penggunaan Cerobong Pemanas Fuel Spray Terhadap Atomisasi Minyak Jelantah Sebagai Bahan Bakar Dengan Atomizer Berbasis Air-Assist</b><br>Christopher Kenan Ho, Ainul Ghurri, I Made Parwata   | <b>285-289</b> |
| <b>Re-Design Sistem Kemudi Kendaraan Bio-Hybrid Obhi-Mec Unud Dengan Menggunakan Single Steering Joint</b><br>Anugrah Putra Adiansyah, I Made Gatot Karohika, I Made Widiyarta  | <b>290-294</b> |
| <b>Pengaruh Dimensi Geometris Cerobong Pemanasan Awal Terhadap Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Dengan Atomizer Berbasis Air-Assist</b>  | <b>295-300</b> |

# Pengaruh Variasi Massa Campuran Sampah Plastik Jenis *Low Density Polyethylene (LDPE)* Dan *Poly Propylene (PP)* Terhadap Volume Produk Cair Proses Pirolisis

Putu Gangga Prabawa Sadhu, I Nengah Suarnadwipa, dan Ketut Astawa  
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

## Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan proses pirolisis sampah plastik jenis *Low Density Polyethylene (LDPE)* yang berupa kantong kresek dan *Poly Propylene (PP)* yang berupa plastik pembungkus makanan dengan tujuan untuk menanggulangi dampak negatif sampah plastik. Pengujian memvariasikan massa campuran sampah plastik jenis *LDPE* dan *PP* pada persentase perbandingan massa massa 75% plastik *PP* terhadap total massa campuran, 50% plastik *PP* terhadap total massa campuran, dan 25% plastik *PP* terhadap total massa campuran. Semakin tinggi persentase massa plastik *PP* terhadap total massa campuran akan meningkatkan volume produk cair yang dihasilkan.

Kata Kunci : Pirolisis, *LDPE*, *PP*, campuran sampah plastik *LDPE* dan *PP*, volume produk cair

## Abstract

In this research a pyrolysis process was carried out for *Low Density Polyethylene (LDPE)* plastic waste in the form of plastic bags and *Poly Propylene (PP)* in the form of plastic food packaging with the aim of overcoming the negative impacts of plastic waste. The test varied the mass of the mixture of *LDPE* and *PP* plastic waste at a mass ratio percentage of 75% *PP* plastic to the total mass of the mixture, 50% *PP* plastic to the total mass of the mixture, and 25% *PP* plastic to the total mass of the mixture. The higher the mass percentage of *PP* plastic to the total mass of the mixture will increase the volume of the liquid product produced

Keywords : Pyrolysis, *LDPE*, *PP*, mixture of *LDPE* and *PP* plastic waste, liquid product volume

## 1. Pendahuluan

Pada era modern ini kebutuhan manusia akan peralatan untuk menunjang kebutuhan hidupnya semakin meningkat. Pada umumnya bahan baku utama untuk pembuatan peralatan adalah plastik. Jenis-jenis plastik yang umumnya dipakai sebagai bahan baku adalah ; *Low Density Polyethylene (LDPE)*, contohnya bungkus makanan ringan, kantong kresek, plastik sampah; *Polyethylene Terephthalate (PET)*, contohnya kemasan minuman, botol minyak, toples selai yang biasanya hanya sekali pakai; *High Density Polyethylene (HDPE)*, contohnya botol shampo, botol susu, galon air minum; *Polyvinyl Chloride (PVC)*, contohnya mainan anak, pipa air, kabel listrik; *Poly Propylene (PP)*, contohnya botol minum bayi, kotak bekal, wadah penyimpanan makanan[1].

Dengan semakin banyaknya jumlah plastik yang dihasilkan untuk memenuhi kebutuhan manusia maka jumlah sampah plastik semakin banyak pula. Salah satu cara untuk menanggulangi dampak negatif atau dampak buruk sampah plastik adalah dengan menerapkan konsep 3R yang merupakan kependekan dari *reuse*, *reduce*, dan *recycle*. *Reuse* memiliki arti menggunakan kembali

produk sudah tidak terpakai seperti menggunakan botol plastik menjadi wadah tanaman, *reduce* artinya mengurangi penggunaan produk yang berpotensi menjadi sampah contohnya mengurangi kantongkresek sekali pakai, dan *recycle* merupakan konsep 3R yang mengelola sampah plastik dengan melakukan daur ulang sampah plastik menjadi produk plastik yang baru. Pirolisis merupakan salah satu penerapan *reuse* yaitu mengolah sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif yang bisa digunakan kembali.

Pirolisis merupakan proses dekomposisi material yang disebabkan oleh suhu. Proses pirolisis dimulai pada kisaran suhu 230°C, pada saat berlangsungnya proses komponen material akan labil secara termal, dan *volatile matters* pada plastik akan terpecah lalu menguap dengan komponen lainnya secara beriringan. Terdapat kandungan tar dan *polyaromatic hydrocarbon* pada produk cair yang mengalami penguapan. Biasanya produk pirolisis terdiri daritiga macam, diantaranya berupa gas ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , dan  $CH_4$ ), tar (*pyrolitic oil*), dan arang. Umpan yang dapat digunakan untuk proses pirolisis dapat berupa material alam tumbuhan, biomassa, dan berbentuk polimer[2].

Penelitian ini akan melakukan proses pirolisis sampah plastik dengan jenis *Low Density Polyethylene* (LDPE) salah satu contohnya adalah kantong kresek dan *Poly Propylene* (PP) yang berupa plastik pembungkus makanan. Proses pirolisis dikerjakan dengan memakai sebuah alat yang tersusun oleh dua komponen inti salah satunya tabung reaktor yang digunakan sebagai tempat terjadinya pemanasan bahan baku plastik. Dan tabung kondensor yang digunakan untuk mendinginkan gas hasil pemanasan menjadi produk cair. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengaruh variasi massa campuran 2 macam sampah plastik yaitu PP dan LDPE terhadap unjuk kerja proses pirolisis. Penelitian ini diharapkan mampu mengurangi jumlah sampah plastik yang kian semakin banyak.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses dekomposisi material yang disebabkan oleh suhu. Proses pirolisis dimulai pada kisaran suhu 230°C, pada saat berlangsungnya proses komponen material akan labil secara termal, dan *volatile matters* pada plastik akan terpecah lalu menguap dengan komponen lainnya secara beriringan. Terdapat kandungan tar dan *polyaromatic hydrocarbon* pada produk cair yang mengalami penguapan. Biasanya produk pirolisis terdiri dari tiga macam, diantaranya berupa gas (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan CH<sub>4</sub>), tar (*pyrolytic oil*), dan arang.

### 2.2. Plastik

Plastik merupakan suatu polimer yang mempunyai karakteristik dan sifat-sifat yang unik tergantung pada molekul penyusunnya. Ada dua kategori jenis plastik yaitu termoplastik dan termoseting. Jenis termoplastik tidak mendapati perubahan penyusunan struktur kimia saat dipanaskan dan dapat dicetak kembali, beberapa contohnya *polystyrene*, *polyethylene*, *polyvinyl chloride* dan *polytetrafluoroethylene* (PTFE). Jenis plastik termoseting dapat dicairkan dan dibentuk namun hanya sekali dan tidak dapat diubah lagi wujudnya. Minyak bumi dan gas alam merupakan material penyusun plastik. Saat diberikan panas pada suhu beberapa ratus derajat celsius plastik akan mengalami penguraian. Umumnya plastik terdiri dari polimer dan karbon, serta hidrogen, oksigen, nitrogen, chlorine, dan sulfur[3].

#### 2.2.1 Low Density Polyethylene (LDPE)

*Low Density Polyethylene* (LDPE) adalah plastik yang mempunyai sifat kokoh, agak tembus pandang, lentur serta lapisan luar sedikit berlemak. Jenis plastik ini memiliki simbol anak panah segitiga dengan angka 4. Plastik LDPE terbentuk

dari minyak bumi yang mudah dibentuk ketika dalam kondisi panas. LDPE mempunyai titik leleh 160 – 240°C. Pada suhu 60 °C plastik jenis ini sangat resisten terhadap reaksi kimia, memiliki daya proteksi yang tergolong baik terhadap air[4].

#### 2.2.1 Poly Propylene (PP)

*Poly Propylene* (PP) adalah jenis plastik yang memiliki simbol anak panah segitigaberangka 5 dan tulisan PP di bawahnya. Plastik PP memiliki karakteristik tembus pandang yang tidak jernih. Jenis plastik ini memiliki sifat kuat, ringan, tahan lama. *Poly Propylene* memiliki titik leleh 200 – 300°C. Dengan keunggulan sifatnya tersebut plastik PP cocok digunakan sebagai kemasan untuk menyimpan berbagai makanan dan minuman[4]. *Poly Propylene* memiliki massa jenis sebesar 0,90-0,92 g/cm<sup>3</sup> yang membuatnya menjadi polimer yang ringan, memiliki kekerasan dan kerapuhan tertinggi serta bersifat labil terhadap perlakuan termal[5].

## 2.3 Komponen Sistem Pirolisis

### 2.3.1 Reaktor

Reaktor adalah alat pemanas yang menguraikan senyawa – senyawa kimia yang tanpa adanya kontak langsung atau tercampur dengan udara luar. Alat ini digunakan dengan cara memasukan bahan baku plastik melalui *hopper* selanjutnya plastik akan dipanaskan didalam tungku lalu akan terjadi perubahan pada plastik menjadi fase uap dan cair [6].

### 2.3.2 Kondensor

Kondensor adalah salah satu jenis alat untuk menukar kalor. Kondensor digunakan untuk mengubah fluida kerja dalam fase gas menjadi fase cair dari suhu yang tinggi lalu keluar melalui dinding-dinding kondensor melewati media kondensasi, sehingga uap akan didinginkan sampai fasenya berubah menjadi fase cair pada suhu rendah. Terdapat dua macam perpindahan panas pada kondensor yaitu secara konduksi dan secara konveksi[7].

## 2.4 Produk Bahan Bakar Cair

Produk utama proses pirolisis berupa minyak yang sejajar dengan bahan bakar konvensional. Minyak hasil pirolisis pada umumnya dapat dipakai untuk menggantikan solar pada mesin diesel baik dipakai sebagai bahan bakar tunggal maupun campuran dengan solar. Minyak plastik memiliki nilai kalor yang perbedaannya tidak jauh dengan solar yang membuat minyak plastik pantas digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Tetapi, terdapat beberapa karakteristik pada minyak plastik perlu dibenahi untuk menaikkan performanya[8].

### 3. Metode Penelitian

Metode penelitian ini adalah eksperimen secara langsung. Pada penelitian ini menggunakan campuran sampah plastik jenis LDPE dan PP yang sudah dicacah pada ukuran rata-rata 1 cm x 1 cm. Variasi sampah plastik dibagi menjadi persentase massa 75% plastik PP terhadap total massa campuran, 50% plastik PP terhadap total massa campuran, dan 25% plastik PP terhadap total massa campuran dengan total massa 1 kg. Suhu pada setiap percobaan ditetapkan pada 300°C dan laju aliran air pendingin 4,9 L/menit.

#### 3.1 Alat

1. Kompor berfungsi sebagai pemanas reaktor.
2. Reaktor berfungsi sebagai tempat memanaskan plastik.
3. *Pressure Gauge* untuk memantau tekanan saat proses pirolisis berlangsung.
4. Termokopel digunakan untuk mengukur suhu reaktor.
5. Kondensor sebagai berlangsungnya proses kondensasi.
6. Pompa air berfungsi memompa air dari *cooling tower* menuju kondensor lalu masuk kembali ke *cooling tower*.
7. *Cooling tower* untuk menurunkan temperatur air pendingin
8. Gelas ukur berfungsi untuk mengukur volume produk cair.

#### 3.2. Bahan

Penelitian ini menggunakan sampah plastik jenis LDPE dan PP sebagai bahan pirolisis. Sampah plastik yang digunakan dicacah terlebih dahulu dengan ukuran 1 cm x 1 cm agar memudahkan dalam menempatkan di dalam reaktor dan memaksimalkan penggunaan ruang reaktor.

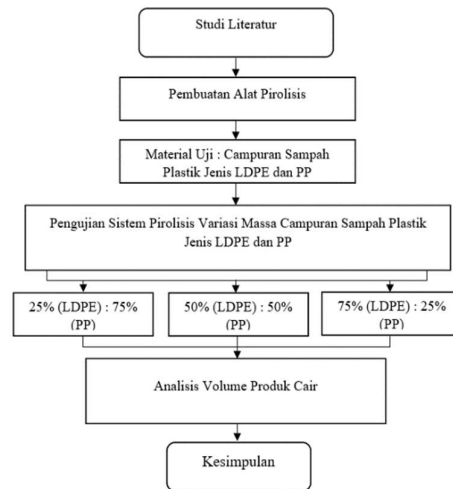


Gambar 1. Plastik LDPE yang sudah dicacah



Gambar 2. Plastik PP yang sudah dicacah

### 3.3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Diagram alir penelitian

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Hasil Volume Produk Cair

Penelitian ini menggunakan campuran sampah plastik jenis LDPE dan PP yang divariasikan menjadi persentase massa 75% plastik PP terhadap total massa campuran, 50% plastik PP terhadap total massa campuran, dan 25% plastik PP terhadap total massa campuran. Data hasil pengujian pirolisis campuran sampah plastik jenis LDPE dan PP dibuatkan dalam bentuk tabel berikut.

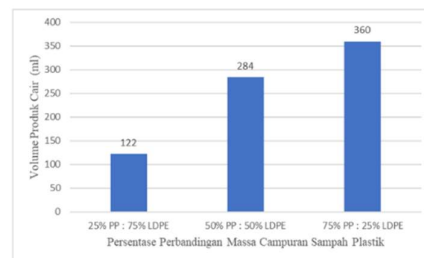
Tabel 1. Data hasil pengujian

| Persentase Massa  | Volume Produk Cair (ml) |
|-------------------|-------------------------|
| 75% PP dari total | 360                     |
| 50% PP dari total | 284                     |
| 25% PP dari total | 122                     |

Dapat dilihat pada Tabel 1 plastik jenis PP dengan persentase massa yang lebih tinggi dibandingkan plastik jenis LDPE dalam total massa campuran dapat menghasilkan volume produk cair lebih banyak.

### 4.2 Pembahasan

#### 4.2.1 Analisis Cair



Gambar 4. Grafik hubungan antara persentase perbandingan massa campuran sampah plastik terhadap volume produk cair

Dijelaskan pada Gambar 4 bahwa volume produk cair tertinggi diperoleh pada persentase perbandingan massa 75% PP : 25% LDPE yaitu sebesar 360 ml sedangkan pada persentase perbandingan massa 25% PP : 75% LDPE merupakan yang terendah yaitu sebesar 122 ml. Dapat dilihat pada grafik bahwa semakin tinggi persentase massa plastik PP terhadap total massa campuran akan meningkatkan volume produk cair yang diperoleh. Perbedaan volume produk cair hasil pirolisis disebabkan oleh adanya perbedaan bahan baku penyusun plastik. Plastik jenis PP lebih mudah kehilangan kekuatan strukturnya dibandingkan jenis plastik LDPE sehingga volume produk cair yang dihasilkan cenderung lebih banyak.

### 5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan bisa disimpulkan bahwa volume produk cair terbesar diperoleh pada persentase perbandingan massa 75% PP : 25% LDPE yaitu sebesar 360 ml sedangkan pada persentase perbandingan massa 25% PP : 75% LDPE merupakan yang terendah yaitu sebesar 122 ml.

### 6. Daftar Pustaka

- [1] Endang K., Mukhtar G., Nego A., Sugiana F. X. A., 2016, *Pengolahan Sampah Plastik dengan Metoda Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak*.
- [2] Wicaksono M. A., Arijanto, 2017, *Pengolahan Sampah Plastik Jenis PET (Polyethylene Terephthalate) Menggunakan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Alternatif*. Jurnal Teknik Mesin S-1, pp. 9-15, vol. 5, no. 1.
- [3] Adoe D. G. H., Bunganaen W., Krisnawi I. F., Soekwanto F. A., 2016, *Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer*. pp.17 - 26, vol. 03, no. 01.
- [4] Widiatmoko H., Purwaningrum P., P F. P. A., 2015, *Analisis Karakteristik Sampah Plastik di Pemukiman Kecamatan Tebet dan Alternatif Pengolahannya*. pp. 24 - 33, vol 7, no.1.
- [5] Khavilla V. P., Wahyuni S., Rianto A. F., Jumaeri., Harjono, 2019, *Preparasi dan Karakterisasi PP (Polypropylene) Termodifikasi LLDPE (Linear Low Densit Polyethylene) dengan Teknik Pencampuran Biasa*.

- [6] Maulana E., Farjri B. N., Mahardika D., 2020, *Perancangan Proses Pembuatan Reaktor Pirolisis Model Horizontal Kapasitas 75 Kg/Jam*. pp. 1-7.
- [7] Maulana E., Pardede M. T. H., Mahardika, D., 2020, *Perancangan Proses Pembuatan Kondensor untuk Pendingin Reaktor Pirolisis Kapasitas 75Kg/Jam*. pp. 1 – 7.
- [8] Syamsiro M., 2015, *Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik*. Jurnal Teknik, pp. 47 - 56, vol. 5, no. 1.

|  |  |
|--|--|
|    | <p><b>Putu Gangga Prabawa Sadhu</b> adalah seorang mahasiswa di Universitas Udayana dengan Program Studi Teknik Mesin sejak tahun 2019. Fokus dalam penelitian bidang konversi energi dengan topik pirolisis sampah plastik sebagai tugas akhir untuk menempuh gelar Sarjana (S1).</p> |
| <p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan teknologi konversi, penyimpanan, dan manajemen energi.</p> |  |

# Uji Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis Sampah Plastik Jenis HDPE, LDPE, dan PP

Paulina Loveiana Kefi, I Nengah Suarnadwipa, dan I Wayan Bandem Adnyana  
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sampah plastik khususnya jenis HDPE (High Density Polyethylene), LDPE (Low Density Polyethylene), dan PP (Polypropylene) untuk dikonversi menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis menggunakan alat pirolisis dengan spesifikasi yang telah dirancang. Bahan bakar cair yang diperoleh diuji karakteristik fisiknya yaitu dari segi besarnya viskositas. Dengan mengetahui viskositas dari bahan bakar cair hasil proses pirolisis sampah plastik tersebut nantinya akan dianalisis secara komparasi dengan viskositas BBM (Bahan Bakar Minyak) komersial di Indonesia untuk mengetahui apakah ada kemiripan di antaranya. Setelah dilakukan proses pirolisis pada sampah plastik jenis HDPE, LDPE, dan PP menggunakan spesifikasi alat pirolisis yang telah dirancang, ketiganya mampu dikonversi menjadi bahan bakar cair. Dengan spesifikasi alat pirolisis yang digunakan dalam penelitian ini menghasilkan karakteristik viskositas yang besarnya dalam jangkauan yang sama dari ketiga bahan bakar cair tersebut ( $\pm 0,7$  cP). Besarnya viskositas ketiga bahan bakar cair tersebut jika dibandingkan dengan viskositas BBM di Indonesia nilainya mendekati BBM jenis bensin dan minyak tanah.

Kata Kunci : Pirolisis, Sampah Plastik, Penanganan Sampah Plastik, HDPE, LDPE, PP, Bahan Bakar Cair, Minyak Pirolisis, Viskositas

## Abstract

This research aims to find out the ability of plastic waste, in particular HDPE (High Density Polyethylene), LDPE (Low Density Polyethylene) and PP (Polypropylene), to be converted into liquid fuel through the pyrolysis process using the pyrolyzer with designed specifications. The liquid fuel obtained is tested for its physical properties, which is viscosity. By knowing the viscosity of the liquid fuel from the pyrolysis process of plastic waste, it can later be compared with the viscosity of commercial fuel oil in Indonesia to find out the similarities. After performing the pyrolysis process on HDPE, LDPE and PP plastic waste using the specifications of the designed pyrolyzer, all three can be converted into liquid fuel. With the specifications of the pyrolyzer used in this research, it produces viscosity characteristics that are in the same range for the three liquid fuels ( $\pm 0,7$  cP). The level of viscosity of the three liquid fuels compared to the viscosity of fuel in Indonesia is close to that of gasoline and kerosene.

Keywords: Pyrolysis, Plastic Waste, Plastic Waste Handling, HDPE, LDPE, PP, Liquid Fuel, Pyrolysis Oil, Viscosity

## 1. Pendahuluan

Plastik merupakan material polimer yang tersusun dari ikatan berulang molekul-molekul sederhana (monomer) dan membentuk molekul raksasa (makromolekul) [1]. Molekul sederhana penyusun material plastik terdiri dari karbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen [2]. Plastik memiliki sifat yang mudah dibentuk, ringan, kedap air, tahan lama, tidak berkarat, dan harganya yang relatif murah. Dengan sifat yang dimiliki tersebut menjadikan plastik banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari.

Penggunaan barang berbahan plastik terus meningkat seiring berjalannya waktu. Dengan adanya hal tersebut tentunya akan sejalan juga dengan peningkatan sampah yang dihasilkan. Pada tahun 2023, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Direktorat Penanganan Sampah) mengakumulasi timbulan sampah di Indonesia mencapai 17.027.843,29 ton dengan sampah plastik menempati peringkat tertinggi kedua sebesar 18,3% [3].

Sampah plastik tergolong sampah jenis anorganik di mana memerlukan waktu yang sangat panjang untuk dapat terurai secara alami. Selain itu, karena plastik adalah jenis material polimer yang memiliki rantai monomer panjang menjadikannya alasan lain dibalik lama atau susahnyanya sampah plastik dapat terurai secara alami. Waktu yang diperlukan untuk sampah plastik dapat terurai sempurna secara alami, yaitu selama 450 tahun untuk terurai di air dan 1000 tahun untuk terurai di tanah [4]. Melihat sangat lamanya sampah plastik dapat terurai secara alami menjadikan peluang besar terjadinya penumpukan dan hal tersebut berpengaruh sangat buruk bagi lingkungan.

Untuk menangani masalah penumpukan sampah plastik tentunya diperlukan tindakan pengelolaan. Berdasarkan peraturan yang ditetapkan oleh pemerintah yang termuat di dalam UU RI Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, tindakan dalam pengelolaan sampah dapat dilakukan dengan cara 3R, yaitu *reduce* (mengurangi), *reuse*



(menggunakan kembali), dan *recycle* (mendaur ulang) [5]. Pirolisis adalah salah satu contoh tindakan *recycle* yang apabila diberlakukan pada sampah plastik akan menghasilkan produk yang dapat dimanfaatkan lagi. Pirolisis sendiri adalah suatu proses yang memanfaatkan termal pada temperatur tinggi tanpa atau dengan udara terbatas untuk mendekomposisi suatu material [6]. Proses pirolisis apabila diberlakukan pada sampah plastik dapat memecah rantai panjang polimer menjadi rantai pendek monomer dalam rupa residu (karbon) pada fase padat; H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, dan CH<sub>4</sub> pada fase gas; dan cairan hasil pirolisis (*pyrolytic oil*) pada fase cair [7].

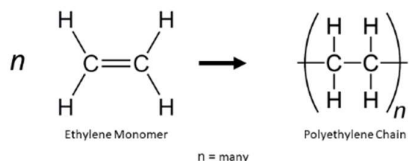
Melalui penelitian ini, peneliti memiliki tujuan untuk menganalisa proses pirolisis pada sampah plastik secara langsung. Dengan proses pirolisis yang dilakukan menggunakan alat pirolisis yang telah dirancang apakah mampu mengonversi sampah plastik khususnya jenis HDPE, LDPE, dan PP menjadi bahan bakar cair. Bahan bakar cair yang berhasil terbentuk pada proses pirolisis nantinya akan diuji besar viskositasnya. Data viskositas tersebut akan di bandingkan dengan BBM (Bahan Bakar Minyak) komersial di Indonesia jenis bensin, minyak tanah, dan solar. Perbandingan data tersebut digunakan untuk melihat apakah bahan bakar cair yang dihasilkan melalui proses pirolisis pada variasi sampah plastik dengan spesifikasi alat yang telah digunakan memiliki kemiripan nilai dengan viskositas BBM komersial di Indonesia.

## 2. Dasar Teori

### 2.1. Sampah Plastik

#### 2.1.1. HDPE

*High Density Polyethylene* (HDPE) adalah plastik yang memiliki karakteristik titik leleh pada temperatur 200 – 280 °C [8]. HDPE merupakan jenis plastik polietilena dengan rumus kimia (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>.



Gambar 1. Struktur dan Persamaan Kimia Plastik Polyethylene [9]

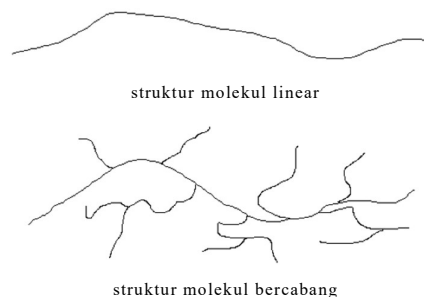
Polietilena memiliki susunan monomer kembar yang berasal dari reaksi antar monomer etilena (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) yang membentuk rantai panjang polimer [9]. Bentuk struktur dan persamaan kimia dari reaksi pembentukan plastik HDPE dapat dilihat pada gambar 1.

#### 2.1.2. LDPE

*Low Density Polyethylene* (LDPE) adalah plastik yang memiliki karakteristik titik

leleh pada temperatur 160°C – 240°C lebih rendah dari plastik HDPE [8]. LDPE merupakan jenis plastik yang terbentuk dari reaksi antar monomer etilena (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) yang membentuk rantai panjang polimer sama seperti plastik HDPE. Rumus kimia dari plastik jenis ini pun juga sama dengan plastik HDPE, yaitu (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>. Bentuk struktur dan persamaan kimia dari reaksi pembentukan plastik LDPE dapat dilihat juga pada gambar 1.

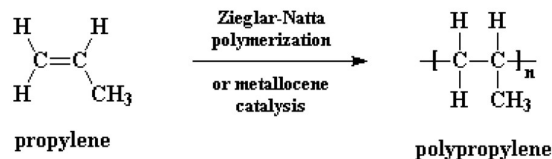
Meskipun memiliki kesamaan dari unsur pembentuknya, tetap ada pembeda antara kedua jenis plastik tersebut, yaitu dari bentuk struktur molekul polimernya. Struktur molekul plastik HDPE berbentuk linear, sedangkan struktur molekul plastik LDPE bentuknya bercabang (dapat dilihat pada gambar 2.). Struktur molekul berbentuk linear memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur molekul bentuk bercabang, tetapi struktur molekul bentuk bercabang harganya lebih murah dan lebih mudah untuk dibuat [10].



Gambar 2. Representasi Skematis dari Struktur Molekul Plastik Linear dan Bercabang [10]

#### 2.1.3. PP

*Polypropylene* (PP) adalah plastik yang memiliki karakteristik titik leleh pada temperatur 200°C – 300°C [8]. Sama seperti plastik HDPE dan LDPE, plastik PP juga tersusun dari monomer kembar.

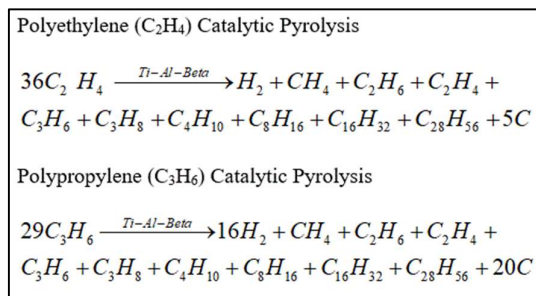


Gambar 3. Struktur dan Persamaan Kimia Plastik Polypropylene [11]

Plastik PP dengan rumus kimia (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>)<sub>n</sub> tersusun dari reaksi antar monomer propilena (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) yang membentuk rantai polimer panjang melalui proses polimerisasi Ziegler-Natta dan dapat juga melalui proses polimerisasi katalisis metalosena [11]. Bentuk struktur dan persamaan kimia dari reaksi pembentukan plastik PP dapat dilihat pada gambar 3.

## 2.2. Pirolisis

Pirolisis adalah suatu proses yang memanfaatkan termal pada temperatur tinggi tanpa atau dengan udara terbatas untuk mendekomposisi suatu material [6]. Dalam proses pirolisis, molekul hidrokarbon yang besar dan kompleks mengalami pemecahan menjadi molekul yang relatif lebih kecil dan sederhana dalam wujud padat, gas, dan cair [12]. Pada umumnya proses pirolisis dilakukan pada temperatur 400°C – 600°C, tergantung pada jenis material yang digunakan dalam proses pirolisis sebagai bahan baku dan juga dengan produk yang akan dibuat [13]. Pada gambar 4. dapat dilihat persamaan reaksi kimia yang terjadi selama proses pirolisis berlangsung pada bahan baku plastik *polyethylene* dan *polypropylene* yang diperoleh dari salah satu hasil penelitian terdahulu [14].



Gambar 4. Persamaan Reaksi Kimia pada Proses Pirolisis Plastik *Polyethylene* dan *Polypropylene* [14]

Dalam proses pirolisis, ikatan unsur hidrogen, karbon, dan oksigen yang membentuk rantai panjang pada suatu material dapat terdekomposisi menjadi molekul sederhana dalam 3 bentuk fase, yaitu :

- Fase gas : berupa CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, dan lain-lain.
- Fase cair : berupa minyak, tar, hidrokarbon yang lebih berat.
- Fase padat : berupa arang atau karbon.

Besarnya dekomposisi pada setiap komponen-komponen tersebut tentunya dipengaruhi juga oleh beberapa parameter pada proses pirolisis, yaitu dari jenis material yang digunakan sebagai bahan baku, temperatur, laju pemanasan, dan lain-lain [12].

## 2.3. Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair adalah material yang mudah terbakar yang tersusun dari penggabungan senyawa hidrokarbon. Senyawa tersebut dapat diperoleh langsung dari alam maupun secara buatan. Pada umumnya, bahan bakar cair berasal dari minyak bumi yang tersusun dari senyawa hidrokarbon cair, nitrogen, oksigen, belerang, mineral, dan metal [15].

## 2.3.1. Viskositas

Viskositas adalah nilai yang digunakan untuk mengukur besarnya ketahanan suatu fluida cair untuk dapat mengalir. Semakin besar nilai viskositas cairan maka cairan tersebut akan semakin sulit mengalir dan begitu juga sebaliknya. Dalam suatu bahan bakar cair, salah satu karakteristik penting yang perlu diketahui adalah besarnya viskositas. Hal tersebut dikarenakan viskositas menentukan mudah atau tidaknya bahan bakar cair untuk dapat mengalir di ruang bakar [12].

Di Indonesia ada berbagai jenis BBM yang dijual di pasaran, beberapa di antara adalah BBM jenis bensin, minyak tanah, dan solar. Ketiga BBM tersebut tentunya memiliki standarnya masing-masing dari berbagai karakteristik dari segi fisik maupun kimia. Salah satu karakteristik fisik yang harus diketahui adalah dari segi viskositas. Pada tabel 1. dapat dilihat standar viskositas dari BBM jenis bensin, minyak tanah, dan solar.

Tabel 1. Viskositas Bahan Bakar Minyak di Indonesia [8]

| Jenis BBM    | Viskositas (cP) |
|--------------|-----------------|
| Bensin       | 0,652           |
| Minyak Tanah | 0,294 – 3,34    |
| Solar        | 2 – 4,5         |

## 3. Metode penelitian

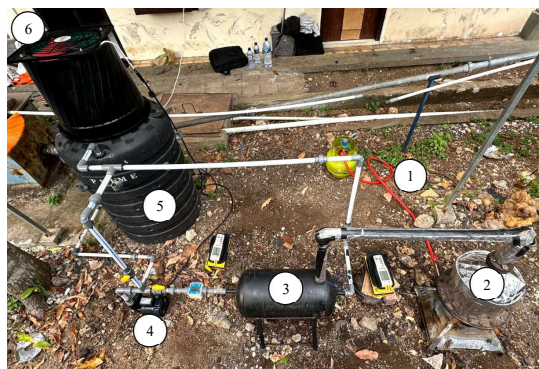
Pengujian secara langsung atau eksperimen adalah metode yang digunakan pada penelitian ini dengan tujuan untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan antara variabel yang satu dengan variabel lainnya. Eksperimen ini menggunakan variasi sampah plastik jenis HDPE, LDPE, PP sebagai bahan baku proses pirolisis dengan massa masing-masing 1 kg dalam ukuran cacahan rata-rata 1 cm × 1 cm per butirnya. Proses pirolisis berlangsung pada temperatur 400°C ± 50°C untuk pemanasan reaktor dan laju aliran volume air 4,9 L/menit sebagai media pendingin pada proses kondensasi di dalam kondensor.

Setelah mendapatkan hasil melalui proses pirolisis berupa bahan bakar cair, hasil tersebut akan diuji menggunakan viskometer untuk mengetahui karakteristik fisiknya dari segi besarnya viskositas. Hasil yang diperoleh akan dibandingkan satu sama lain untuk melihat perbedaannya. Kemudian dari ketiga hasil viskositas tersebut akan dibandingkan dengan viskositas BBM di Indonesia jenis bensin, minyak, tanah, dan solar untuk mengetahui apakah ada kemiripan yang diperoleh.

### 3.1. Alat

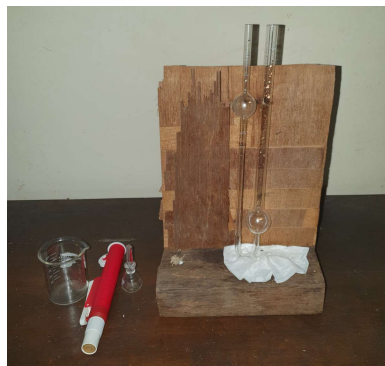
Dalam melakukan penelitian ini diperlukan beberapa komponen dalam rangkaian alat pirolisis yang terdiri dari:

1. Set Pemanas, digunakan untuk memanaskan reaktor yang terdiri dari kompor dan gas LPG.
2. Reaktor, digunakan sebagai tempat terjadinya reaksi dekomposisi pada sampah plastik.
3. Kondensor, digunakan sebagai media pertukaran panas gas hasil pirolisis untuk diubah fase menjadi cair.
4. Pompa, digunakan sebagai alat untuk menyirkulasikan air pendingin dari *water tank* menuju kondensor dan kembali lagi menuju *water tank*.
5. *Water tank*, digunakan sebagai tempat untuk mendinginkan air pendingin yang telah menerima kalor dari gas panas saat berada di dalam kondensor.
6. *Exhaust fan*, digunakan untuk menyirkulasikan udara yang berperan dalam menyerap panas pada air di dalam *water tank*.



Gambar 5. Alat Pirolisis yang Digunakan

Selain rangkaian alat pirolisis, dalam penelitian ini juga membutuhkan alat uji yang digunakan untuk mengukur besarnya viskositas. Untuk mengujinya digunakan set Viscometer Ostwald. Pada gambar 6. dapat dilihat set Viscometer Ostwald yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 6. Set Viscometer Ostwald

### 3.2. Bahan

Bahan yang digunakan selama proses pirolisis, sebagai berikut :

1. Cacahan sampah plastik yang telah dicuci bersih dan dalam keadaan kering pada masing-masing jenis (HDPE, LDPE, dan PP).
2. Gas LPG 3 kg
3. Wadah penyimpanan bahan bakar cair hasil proses pirolisis

### 3.3. Bagan Alur Penelitian



## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis

Melalui proses pirolisis yang telah dilakukan pada sampah plastik jenis HDPE, LDPE, dan PP, dengan menggunakan spesifikasi alat yang telah dirancang ketiganya mampu terkonversi menjadi bahan bakar cair. Pada gambar 7. dicantumkan dokumentasi sampel dari bahan bakar cair yang telah dihasilkan.



Gambar 7. Sampel Bahan Bakar Cair yang Dihasilkan pada Proses Pirolisis Variasi Jenis Sampah Plastik

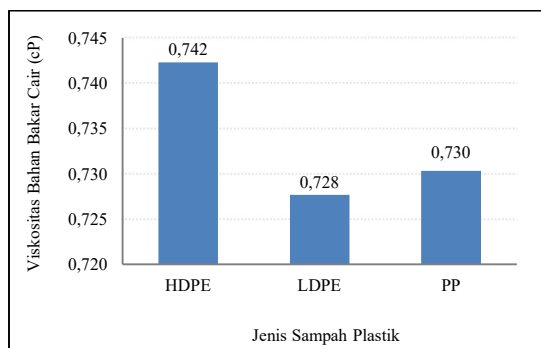
#### 4.2. Hasil Uji Viskositas

Melalui pengujian menggunakan *Viscometer Ostwald* diperoleh nilai viskositas masing-masing bahan bakar cair hasil pirolisis sampah plastik jenis HDPE, LDPE, dan PP. Pada tabel 2. dapat dilihat besarnya viskositas pada masing-masing bahan bakar cair yang telah dihasilkan.

Dengan 3 kali pengulangan pada uji viskositas masing-masing sampel, diperolehlah besarnya rata-rata viskositas pada setiap sampel. Untuk melihat perbedaan besarnya viskositas masing-masing sampel dapat dilihat pada grafik dalam gambar 8.

**Tabel 2. Hasil Pengujian Viskositas Bahan Bakar Cair Produk Pirolisis Variasi Jenis Sampah Plastik**

| Jenis Sampah Plastik | Ulangan | Viskositas (cP) | Rata-rata Viskositas (cP) |
|----------------------|---------|-----------------|---------------------------|
| HDPE                 | 1       | 0,737           | 0,742                     |
|                      | 2       | 0,743           |                           |
|                      | 3       | 0,747           |                           |
| LDPE                 | 1       | 0,718           | 0,728                     |
|                      | 2       | 0,730           |                           |
|                      | 3       | 0,735           |                           |
| PP                   | 1       | 0,841           | 0,730                     |
|                      | 2       | 0,789           |                           |
|                      | 3       | 0,561           |                           |

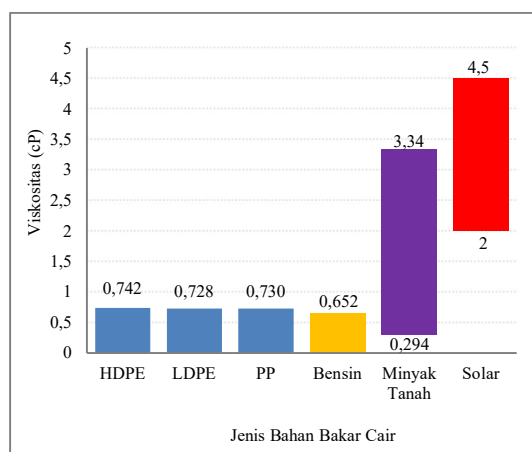


**Gambar 8. Grafik Pengaruh Jenis Sampah Plastik terhadap Viskositas Bahan Bakar Cair yang Dihasilkan pada Proses Pirolisis**

Grafik dalam gambar 8. memaparkan bahwa bahan bakar cair hasil proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE memiliki nilai viskositas yang lebih tinggi dari dua lainnya ( $\text{Viskositas HDPE} > \text{PP} > \text{LDPE}$ ). Meskipun demikian, jika dilihat dari nilainya ketiga bahan bakar cair hasil proses pirolisis sampah plastik tersebut memiliki perbedaan yang relatif kecil dikarenakan ketiganya masih berada di dalam jangkauan nilai 0,7 cP, dengan demikian peneliti menarik kesimpulan bahwa ketiga memiliki nilai viskositas yang relatif sama.

#### 4.3. Perbandingan Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis Variasi Sampah Plastik dengan Standar BBM di Indonesia

Setelah memperoleh data pengujian nilai viskositas masing-masing bahan bakar cair hasil pirolisis variasi jenis sampah plastik, data tersebut akan dibandingkan nilainya dengan standar viskositas BBM di Indonesia jenis bensin, minyak tanah, dan solar. Berdasarkan data yang telah diperoleh melalui pengujian (pada tabel 2.) dan data sekunder yang diperoleh melalui kajian literatur (pada tabel 1.), dapat dilihat perbandingan nilai viskositas antara bahan bakar cair hasil pirolisis variasi jenis sampah plastik dengan BBM di Indonesia pada grafik dalam gambar 9.



**Gambar 9. Grafik Perbandingan Nilai Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Pirolisis Variasi Jenis Sampah Plastik dengan Standar BBM di Indonesia**

Merujuk pada gambar 9., terlihat nilai viskositas bahan bakar cair hasil pirolisis sampah plastik jenis HDPE, LDPE, dan PP memiliki kemiripan nilai viskositas dengan BBM jenis bensin dan minyak tanah. Dengan bensin nilainya mendekati lebih tinggi (0,652 cP) sedangkan dengan minyak tanah berada di antara jangkauannya (0,294 – 3,34 cP).

#### 5. Kesimpulan

Melalui eksperimen dalam penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa alat pirolisis yang digunakan mampu mengonversi sampah plastik jenis HDPE, LDPE, dan PP menjadi bahan bakar cair. Setelah diuji, ketiga bahan bakar cair tersebut memiliki nilai viskositas yang relatif sama karena masih di dalam jangkauan nilai yang sama, yaitu  $\pm 0,7$  cP. Dengan nilai viskositas tersebut dapat disimpulkan bahwa bahan bakar cair hasil proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE, LDPE, dan PP memiliki kemiripan dengan standar BBM komersial di Indonesia jenis bensin (0,652 cP) dan minyak tanah (0,294 – 3,34 cP).



#### Daftar Pustaka

- [1] Admani B. & Arnata I. W., 2015, *Teknologi Polimer*, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana.
- [2] Suarsana I. K., 2017, *Diktat Ilmu Material Teknik*, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana.
- [3] Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) - Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024, *Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah*, <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>, diakses pada tanggal 23 Januari 2024.
- [4] Arini W., 2022, *Pyrolysis System terhadap Sampah Plastik Polypropylene (PP) Menjadi Bahan Bakar*, Science, and Physics Education Journal (SPEJ), vol. 5, no. 2, pp. 55–60.
- [5] Undang-undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2024, *Pengelolaan Sampah*.
- [6] Ridhuan K., & Suranto J., 2016, *Perbandingan Pembakaran Pirolisis dan Karbonasi pada Biomassa Kulit Durian terhadap Nilai Kalori*, *Turbo : Jurnal Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Metro*. vol. 5, no. 1, pp. 50–56.
- [7] Dhaniswara T. K. & Fahrani D. D., 2021, *Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) dari Sampah Botol Plastik Bekas Air Minum dengan Metode Pirolisis*, *Journal of Research and Technology*, vol. VII, pp. 83–92.
- [8] Damayanti Z., Sudarti, & Yushardi, 2023, *Analisis Karakteristik Fuel Pirolisis Sampah Plastik Berdasarkan Jenis Plastik yang Digunakan : Review*, *Inovasi Teknik Kimia*, vol. 8, no. 1, pp. 26–33.
- [9] The Syracuse Chemistry of Artifacts Project (SCOAP), 2023, *Plastic*, pada laman : <https://tmkorter.expressions.syr.edu/plastics/>, diakses pada tanggal 29 Mei 2023.
- [10] Polymer Science Learning Center, 2016, *Polyethylene*, pada laman : <https://www.pslc.ws/mactest/polefin.htm>, diakses pada tanggal 29 Mei 2023.
- [11] Polymer Science Learning Center, 2023, *Polypropylene*, pada laman : <https://pslc.ws/macrog/pp.htm>, diakses pada tanggal 29 Mei 2023.
- [12] Husein A., 2018, *Pengaruh Temperatur Pembentukan Fuel Oil pada Pirolisis Plastik Low Density Polyethylene (LDPE)*, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
- [13] Novita S. A., Santosa, Nofialdi, Andasuryani, & Fudholi A., 2021, *Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa*, *Agroteknika*, vol. 4, no. 1, pp. 53–67.
- [14] Hamid K., Sabir R., Hameed K., Waheed A., & Ansari M. U., 2021, *Economic Analysis of Fuel Oil Production from Pyrolysis of Waste Plastic*, *Austin Environ Sci*, vol. 6, no. 1, pp. 1053.
- [15] Pani S., Sukarja H., & Sigit Y., 2017, *Pembuatan Biofuel dengan Proses Pirolisis Berbahan Baku Plastik Low Density Polyethylene (LDPE) pada Suhu 250°C dan 300°C*, *Jurnal Engine*, vol. 1, no. 1, pp. 32–38.



**Paulina Loveiana Kefi** adalah seorang mahasiswa di Universitas Udayana dengan Program Studi Sarjana Teknik Mesin sejak tahun 2019. Fokus dalam penelitian bidang konversi energi dengan topik pirolisis sampah plastik sebagai tugas akhir untuk menempuh gelar Sarjana (S1).

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan teknologi konversi, penyimpanan, dan manajemen energi.

# Pengaruh Temperatur Reaktor Terhadap Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis Sampah Plastik *Polypropylene*

Muchammad Aufa Muqsith, I Nengah Suarnadwipa, dan I Wayan Bandem  
Adnyana

*Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Seiring bertambahnya jumlah penduduk di Indonesia mengakibatkan kebutuhan akan bahan bakar minyak sebagai sumber energi meningkat. Di sisi lain, bertambahnya jumlah penduduk juga mengakibatkan volume sampah yang dihasilkan semakin tinggi, dan salah satu penyumbang sampah terbanyak adalah jenis sampah plastik *polypropylene* (PP). Dalam upaya untuk memenuhi kebutuhan energi dan mereduksi volume sampah plastik tersebut dapat dilakukan melalui metode pirolisis. Pirolisis menggunakan material plastik dapat menghasilkan produk utama berupa bahan bakar cair dan untuk mengetahui apakah produk bahan bakar tersebut layak digunakan sebagai bahan bakar alternatif adalah dengan mengetahui nilai viskositasnya, sehingga tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi temperatur pada reaktor pirolisis terhadap viskositas bahan bakar cair sampah plastik *polypropylene* yang dihasilkan. Variasi temperatur pada reaktor dalam penelitian ini yaitu sebesar 300 °C, 325 °C, 350 °C, 375 °C dan 400 °C dengan bahan yang digunakan yaitu sampah plastik *polypropylene* sebanyak 1 kg. Hasil viskositas tertinggi berada pada variasi temperatur reaktor 400 °C dengan nilai sebesar 0,819 cP sedangkan pada variasi temperatur reaktor 300 °C viskositasnya hanya sebesar 0,671 cP. Berdasarkan hasil penelitian ini, temperatur pada reaktor berpengaruh terhadap viskositas bahan bakar cair yang dihasilkan.

*Kata kunci: Pirolisis, Polypropylene (PP), Temperatur, Bahan Bakar Cair, Viskositas*

## Abstract

The increasing population in Indonesia has resulted in energy needs continuing to rise, and one of the largest contributors to energy consumption is fuel oil. On the other hand, an increasing population also results in higher volumes of waste being produced, and one of the largest contributors to waste is *polypropylene* (PP) plastic waste. In an effort to meet energy needs and reduce the volume of plastic waste, this can be done through the pyrolysis method. The main product of plastic pyrolysis is liquid fuel, and to find out whether the liquid fuel product is suitable for use as an alternative fuel, one must know the viscosity value. So, the aim of this research is to find out how temperature variations in the pyrolysis reactor affect the viscosity of liquid fuel produced from *polypropylene* plastic pyrolysis. The temperature variations in the reactor in this study were 300 °C, 325 °C, 350 °C, 375 °C and 400 °C. The material used was 1 kg of *polypropylene* plastic waste at each temperature variation. The highest viscosity results were at a reactor temperature variation of 400 °C with a value of 0.819 cP, while at a reactor temperature variation of 300 °C, the viscosity was only 0.671 cP. Based on the results of this research, the temperature in the reactor influences the viscosity of the liquid fuel produced.

*Keywords: Pyrolysis, Polypropylene (PP), Temperature, Liquid Fuel, Viscosity*

## 1. Pendahuluan

Energi dan sampah merupakan dua hal yang selalu ada dalam kehidupan manusia. Seiring bertambahnya jumlah penduduk di Indonesia mengakibatkan kebutuhan energi sebagai penunjang kehidupan meningkat. Antara tahun 2000 dan 2011, konsumsi energi final melonjak dari 764 juta setara barel minyak (SBM) pada tahun 2000 hingga mencapai 1.044 juta SBM pada tahun 2011 atau mengalami peningkatan rata-rata 2,87% per tahun dan diprediksi akan terus mengalami peningkatan sebesar 4,7% per tahun dari tahun 2011 hingga 2030 [1]. Oleh karena itu, konsumsi energi yang terus meningkat setiap tahunnya jika tidak dibarengi dengan ketersediaan pasokan energi yang mencukupi di masyarakat akan menimbulkan masalah baru, seperti terjadinya krisis energi.

Di sisi lain, bertambahnya jumlah penduduk di Indonesia mengakibatkan volume sampah yang dihasilkan juga mengalami kenaikan yang signifikan.

Jumlah timbulan sampah yang dihasilkan oleh Indonesia selama tahun 2021 tercatat mencapai 31.113.237 ton dan sebanyak 18,13% atau sekitar 5.640.827 ton di dominasi oleh sampah plastik, dan hal tersebut menjadikan plastik sebagai penyumbang sampah terbesar kedua setelah limbah makanan [2]. Sampah plastik yang tidak diurus dan dibiarkan begitu saja tanpa pengelolaan lebih lanjut dapat memiliki konsekuensi negatif bagi manusia maupun makhluk hidup lain karena zat-zat beracun yang terkandung di dalamnya. Proses pengelolaan sampah plastik sangat penting dilakukan karena dalam plastik mengandung ftalat, pestisida organoklorin, bifenil polikrolinasi (PCB), hidrokarbon aromatik dan zat beracun lainnya yang berbahaya dan bersifat karsinogenik [3].

Terdapat beberapa metode dalam mengelola sampah plastik diantaranya yaitu sistem *landfilling* dan pirolisis, namun pada sistem *landfilling*, sampah plastik hanya dikumpulkan di satu tempat tanpa ada proses pengolahan yang lebih lanjut sehingga metode



ini memerlukan area yang luas dan dianggap tidak bisa mengurangi volume sampah plastik karena plastik memiliki sifat yang tidak mudah terdekomposisi dengan sendirinya.

Selanjutnya ada metode pirolisis untuk mengelola sampah plastik dimana dalam metode ini sampah plastik dipanaskan dalam reaktor dengan tanpa adanya udara atau oksigen dalam prosesnya. Metode pirolisis mengubah sampah plastik menjadi padatan, cairan, dan gas. Produk hasil pirolisis ini memiliki nilai kalor yang tinggi, sehingga dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Selain dapat dijadikan bahan bakar alternatif, sampah plastik yang diolah menggunakan metode pirolisis ini dapat berkontribusi dalam mereduksi jumlah volume sampah plastik.

Melihat adanya potensi pengolahan sampah plastik menggunakan metode pirolisis menjadi bahan bakar cair, penulis tertarik melakukan penelitian tentang Pengaruh Temperatur Reaktor Terhadap Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis Sampah Plastik *Polypropylene*. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk menganalisa bagaimana pengaruh temperatur reaktor terhadap viskositas bahan bakar cair hasil proses pirolisis sampah plastik jenis *polypropylene* (PP) dan untuk mengetahui apakah bahan bakar cair tersebut layak digunakan sebagai bahan bakar alternatif jika dilihat dari segi viskositasnya.

Batasan penelitian yang ditetapkan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Variasi temperatur reaktor pirolisis yang digunakan adalah 300 °C, 325 °C, 350 °C, 375 °C dan 400 °C.
2. Laju aliran volume pendinginan adalah 4,9 L/m.
3. Temperatur lingkungan dianggap konstan (cerah).
4. *Losses* pada proses pemanasan diabaikan.
5. Total massa plastik yang digunakan sebesar 5 kg dengan tiap masing-masing pengujian variasi temperatur sebesar 1 kg.
6. Plastik yang dimaksud adalah dari plastik jenis *polypropylene*.
7. Produk bahan bakar cair yang diteliti adalah tentang hubungan temperatur reaktor terhadap perubahan viskositasnya.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Sampah Plastik

Sampah dibagi menjadi 2 kategori yaitu organik dan anorganik. Sampah organik adalah limbah organik berbentuk padat dan memiliki kandungan air cukup banyak yang biasanya berasal dari limbah agrikultur, sampah organik mudah membusuk dan terdekomposisi karena memiliki rantai karbon yang pendek. Di sisi lain, sampah anorganik adalah sampah berbentuk padat yang memiliki kandungan air sangat sedikit dan sulit terdekomposisi oleh mikroorganisme pengurai karena memiliki rantai karbon yang panjang dan kompleks, salah satu sampah anorganik yaitu plastik.

Salah satu metode dalam memproduksi plastik yaitu melalui proses polimerisasi. Polimerisasi dilakukan dengan cara meleburkan sejumlah molekul sederhana (monomer) sehingga dapat membentuk molekul yang lebih besar (makromolekul atau polimer) melalui proses kimia. Polimer dari plastik tersebut mengandung senyawa hidrokarbon *naphtha* yang terbuat dari penyulingan gas alam atau minyak bumi dan sering digunakan sebagai material untuk membuat plastik sehingga hal ini menyebabkan plastik memiliki nilai kalor yang cukup tinggi.

### 2.2 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses di mana material dipanaskan pada temperatur yang tinggi dalam kondisi tanpa adanya udara atau oksigen sehingga material dapat terurai dan menjadi senyawa-senyawa yang lebih sederhana. Proses pirolisis umumnya dapat menghasilkan berbagai macam produk akhir yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi seperti padatan (*char*), senyawa volatil yang dapat terkondensasi (*bio-oil*) dan juga gas yang tidak bisa terkondensasi. Gas yang dihasilkan dalam proses pirolisis terdiri dari metana, karbon dioksida, etana, karbon monoksida dan hidrogen [4].

### 2.3 Kondensor

Kondensor adalah alat penukar panas atau biasa disebut sebagai *heat exchanger*, yang memiliki fungsi untuk mengembunkan atau mengkondensasikan fluida kerja. Pengembunan terjadi ketika temperatur suatu zat (gas) turun di bawah suhu saturasinya sehingga menyebabkan gas tersebut akan berubah fase menjadi cair.

### 2.4 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan zat yang akan mengalami reaksi kimia dengan pengoksidasi (biasanya udara) ketika dipanaskan sehingga menyebabkan terjadinya proses pembakaran dan dapat menghasilkan energi panas. Bahan bakar dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan wujudnya yaitu bahan bakar padat (arang dan batu bara), bahan bakar cair (solar dan bensin) dan bahan bakar gas. Untuk menentukan kelayakan bahan bakar sebagai sumber energi maka diperlukan pengetahuan tentang karakteristik bahan bakar tersebut, berikut adalah karakteristik beberapa bahan bakar minyak komersial yang ada di Indonesia [5] [6]:

Tabel 1. Karakteristik Bahan Bakar Minyak Komersial

| Jenis Bahan Bakar | Karakteristik       |                 |                  |                 |
|-------------------|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                   | Nilai Kalor (kJ/kg) | Viskositas (cP) | Flash Point (°C) | Fire Point (°C) |
| Bensin            | 47300               | 0,652           | - 43             | - 30            |
| Minyak Tanah      | 43000               | 0,294 – 3,34    | 38               | 52,5            |
| Solar             | 46500               | 2 - 4,5         | 52               | 98,6            |

### 2.5 Viskositas

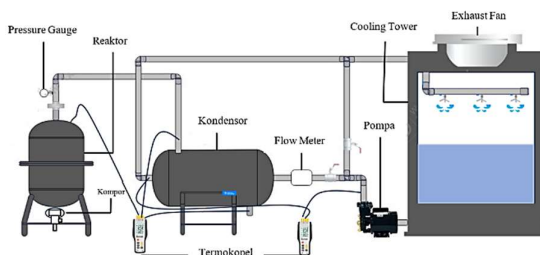
Viskositas atau kekentalan adalah ketahanan dari suatu fluida (cair atau gas) terhadap perubahan bentuk dan pergerakan molekul-molekul yang bergesekan

terhadap satu sama lain [7]. Pada bahan bakar, viskositas penting untuk diketahui karena berkaitan dengan seberapa mudah bahan bakar dapat mengalir ke dalam ruang bakar yang akan mempengaruhi kinerja dari mesin maupun pompa bahan bakar. Jika nilai viskositas yang dimiliki bahan bakar kecil, maka bahan bakar tersebut akan lebih mudah mengalir ke dalam ruang bakar dan selanjutnya mengalami proses pembakaran.

### 3. Metode Penelitian

Penelitian dan pengujian pirolisis ini menggunakan material plastik *polypropylene* yang telah dicacah dengan ukuran  $\pm 1$  cm dan massa sebesar 1 kg pada tiap masing-masing variasi temperatur, proses pencacahan ini bertujuan untuk memaksimalkan ruang di dalam tabung reaktor. Variasi temperatur reaktor yang digunakan adalah 300 °C, 325 °C, 350 °C, 375 °C dan 400 °C.

Pada Gambar 1. Menunjukkan skema alat pirolisis yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Skema Alat Pirolisis

Reaktor yang digunakan pada penelitian ini berjenis *fixed bed*, dengan sumber energi yang digunakan berasal dari LPG dan kondensor yang digunakan berjenis *shell and tube* berfluida pendingin air dengan aliran *counter flow* dan laju aliran pendinginan diatur sebesar 4,9 L/m.

Selanjutnya bahan bakar cair yang diproduksi dari hasil proses pirolisis plastik *polypropylene* pada tiap variasi temperatur reaktor tersebut akan dilakukan pengujian viskositas menggunakan alat uji viskosimeter ostwald seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

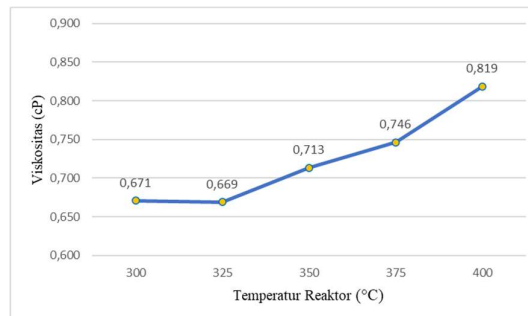


Gambar 2. Alat Uji Viskositas

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Hubungan Temperatur Pemanasan Reaktor Terhadap Viskositas Bahan Bakar Cair

Hasil pengujian viskositas bahan bakar cair hasil proses pirolisis pada setiap variasi temperatur pemanasan reaktor ditunjukkan pada Gambar 3.

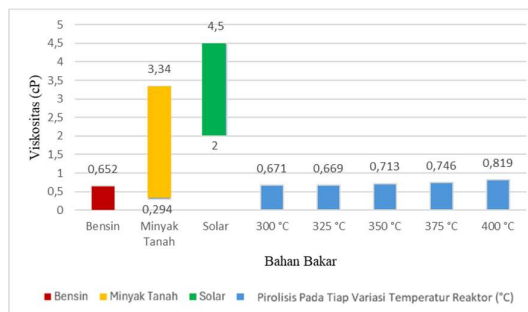


Gambar 3. Grafik Hubungan Temperatur Pemanasan Reaktor Terhadap Viskositas

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa nilai viskositas dari bahan bakar cair pada variasi temperatur pemanasan reaktor 300 °C sebesar 0,671 cP dan mengalami sedikit penurunan pada temperatur 325 °C menjadi sebesar 0,669 cP dan selanjutnya mengalami kenaikan berturut-turut seiring temperatur pemanasan pada reaktor ditingkatkan menjadi sebesar 0,713 cP pada variasi temperatur reaktor 350 °C, sebesar 0,746 cP pada variasi temperatur reaktor 375 °C dan 0,819 cP pada variasi temperatur reaktor 400 °C.

Terjadinya peningkatan nilai viskositas bahan bakar cair pada saat temperatur pemanasan reaktor dinaikkan diakibatkan karena pada saat proses pirolisis menggunakan temperatur pemanasan reaktor yang lebih tinggi menyebabkan semakin banyaknya molekul-molekul berat dengan ikatan rantai hidrokarbon panjang yang terkandung dalam plastik akan ikut terdekomposisi dan berubah fase menjadi gas dan gas yang mengandung molekul-molekul berat tersebut akan terkondensasi dalam kondensor sehingga mengakibatkan viskositas yang dimiliki dari bahan bakar cair yang dihasilkan semakin tinggi.

### 4.2 Perbandingan Viskositas Bahan Bakar Cair Pirolisis dengan BBM Komersial



Gambar 4. Perbandingan Viskositas Bahan Bakar Cair Pirolisis dengan BBM Komersial

Secara keseluruhan viskositas dari bahan bakar cair hasil proses pirolisis plastik *polypropylene* pada setiap variasi temperatur reaktor berada pada rentang yang sama dengan bahan bakar minyak tanah, dimana minyak tanah mempunyai viskositas sebesar 0,293 cP sampai dengan 3,34 cP. Viskositas bahan bakar cair pirolisis pada temperatur reaktor 300 °C dan 325 °C juga mendekati dengan viskositas bensin dimana nilai viskositas dari bensin adalah sebesar 0,652 cP.

## 5. Kesimpulan

Temperatur pemanasan pada reaktor saat proses pirolisis berpengaruh terhadap viskositas bahan bakar cair yang diproduksi, dimana ketika temperatur pemanasan pada reaktor ditingkatkan, viskositas dari bahan bakar cair yang diproduksi pun mengalami peningkatan dengan nilai tertinggi berada pada variasi temperatur reaktor 400 °C yaitu sebesar 0,819 cP. Berdasarkan viskositasnya, bahan bakar cair hasil proses pirolisis plastik *polypropylene* pada penelitian ini layak dijadikan sebagai sumber energi (bahan bakar) alternatif karena memiliki rentang yang sama dengan minyak tanah dan mendekati viskositas dari bensin.

## Daftar Pustaka

- [1] BPPT, 2013, *Outlook Energi Indonesia 2013*, Pengembangan Energi dalam Mendukung Sektor Transportasi dan Industri Pengolahan Mineral.
- [2] SIPSN, 2021, *Data Pengelolaan Sampah & RTH*, Jakarta: Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Diakses pada 22 Maret 2024 melalui SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (menlhk.go.id).
- [3] Thompson, R, C, Moore, C, J, Saal, F, S, Swan, S, H, 2009, *Plastics the environment and human health Current consensus and future trends*, Journal Philosophical Transactions of The Royal Society of London. Series B, Biological Sciences.
- [4] Damayanti, D, Wulandari, Y, Wu, H, 2020, *Product Distribution of Chemical Product Using Catalytic Depolymerization of Lignin*, Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis 15 (2), 432-453.
- [5] Damayanti, Z, Sudarti, Yushardi, 2023, *Analisis Karakteristik Fuel Pirolisis Sampah Plastik Berdasarkan Jenis Plastik Yang Digunakan: Review*, Jurnal Inovasi Teknik Kimia. Vol. 8, No.1.
- [6] Wiratmaja, I, G, 2010, *Pengujian Karakteristik Fisika Biogasoline Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pengganti Bensin*

*Murni*, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM  
Vol. 4 No.2. Oktober 2010 (145-154).

- [7] Britannica, 2024, *Viscosity*, Encyclopedia Britannica. Diakses pada 22 Maret 2024 melalui [www.britannica.com/science/viscosity](http://www.britannica.com/science/viscosity)



**Muchammad Aufa Muqsith** menyelesaikan studi program sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana pada tahun 2024.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan konversi energi.

# Pengaruh Variasi Sampah Plastik Jenis *High Density Polyethylene* (HDPE), *Low Density Polyethylene* (LDPE), dan *Polypropylene* (PP) Terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis

Manshuriin Minduro, I Nengah Suarnadwipa, dan Ketut Astawa  
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

## Abstrak

Sampah plastik merupakan salah satu sumber permasalahan terbesar dalam pencemaran lingkungan. Plastik merupakan kategori sampah anorganik yang dapat menimbulkan dampak positif bahkan negatif bagi kehidupan makhluk hidup apabila tidak dimanfaatkan dan ditanggulangi dengan cara yang benar. Akibat hal tersebut di perlukan upaya untuk menanggulangi ancaman sampah plastik menggunakan cara 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*). Dalam penelitian ini menggunakan metode pirolisis salah satu penerapan reuse yaitu mengolah sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif yang bisa digunakan kembali. Pada penelitian pirolisis ini dilakukan menggunakan 3 jenis sampah plastik yaitu, *High Density Polyethylene* (HDPE), *Low Density Polyethylene* (LDPE), dan *Polypropylene* (PP) yang sudah dicacah. Pengujian ini menggunakan massa sampah plastik sebesar 1 Kg tiap jenis sampah plastik dan menggunakan temperatur reaktor 400°C. Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi dari masing-masing sampah plastik terhadap hasil volume minyak pirolisis. Hasil yang didapat dari pengujian pirolisis yaitu Volume minyak yang dihasilkan dari ketiga jenis sampah plastik tersebut yaitu HDPE 400 mL, LDPE 449 mL, dan PP 921.

Kata Kunci : Pirolisis, variasi sampah plastik HDPE, LDPE, dan PP, Volume Minyak

## Abstract

Plastic waste is one of the biggest sources of environmental pollution problems. Plastic is a category of inorganic waste that can have positive or even negative impacts on the lives of living creatures if it is not used and handled in the right way. As a result of this, efforts are needed to overcome the threat of plastic waste using the 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) method. In this research, one of the applications of reuse is using the pyrolysis method, namely processing plastic waste into alternative fuel that can be reused. This pyrolysis research was carried out using 3 types of plastic waste, namely, *High Density Polyethylene* (HDPE), *Low Density Polyethylene* (LDPE), and *shredded Polypropylene* (PP). This test uses a mass of 1 kg of plastic waste for each type of plastic waste and uses a reactor temperature of 400°C. This research focuses on the influence of variations in each plastic waste on the performance of the pyrolysis system. The results obtained from the pyrolysis test are The volume of oil produced from the three types of plastic waste is HDPE 400 mL, LDPE 449 mL, and PP 921.

Keywords: Pyrolysis, variations in plastic waste HDPE, LDPE, dan PP, oil volume

## 1. Pendahuluan

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan terbesar dalam pencemaran lingkungan. Plastik adalah kategori sampah anorganik yang dapat menimbulkan dampak positif bahkan negatif bagi kehidupan makhluk hidup apabila tidak dimanfaatkan dan ditanggulangi dengan cara yang benar [1]. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), jumlah timbulan sampah di Indonesia selama tahun 2022 tercatat sejumlah 70 juta ton, dan sekitar 24 persennya atau 16 juta ton sampah tidak dikelola [2]. Indonesia berada dalam peringkat kedua di dunia dengan China menempati peringkat pertama kategori negara penghasil sampah terbanyak di dunia. Sampah yang dihasilkan oleh manusia yaitu sekitar sebesar 60%-70% adalah sampah organik, 30%-40% adalah sampah anorganik. Sebesar 14% dari sampah anorganik tersebut adalah sampah plastik [3]. Di

Indonesia, kebutuhan akan penggunaan plastik terus meningkat dengan kenaikan rata-rata 200 ton per tahunnya.

Permasalahan sampah plastik di Indonesia akan semakin memburuk jika tidak ditanggulangi secara serius oleh pemerintah maupun masyarakat. Tingginya angka sampah plastik di Indonesia mengakibatkan permasalahan bagi lingkungan maupun kesehatan. Menurut Putra (dalam Nirmalasari, 2021) peningkatan penggunaan plastik memiliki dampak buruk karena sampah yang dihasilkan merupakan sampah yang sulit terurai. Salah satu dampak pencemaran sampah plastik adalah terganggunya kesehatan lingkungan akibat partikel penyusun plastik yang beracun apabila masuk ke dalam tanah [4].

Berdasarkan pemaparan diatas, sampah plastik yang ada dibagi menjadi beberapa jenis. Jenis-jenis sampah plastik dibagi menjadi 7 yaitu, PET atau PETE (*Polyethylene*

*Terephthalate*), HDPE (*High-Density Polyethylene*), PVC (*Polyvinyl Chloride*), LDPE (*Low Density Polyethylen*), ; PP (*Polypropylene*), PS (*polystyrene*), dan OTHER. Dari berbagai jenis plastik yang ada, perlu dilakukan beberapa upaya untuk menanggulangnya. Cara yang dapat diambil untuk upaya penanggulangan dan pengolahannya adalah dengan 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) [5].

Sehubungan dengan cara pengolahan kembali sampah plastik yang telah dipaparkan diatas, salah satu cara yang juga dapat digunakan dalam mengolah kembali sampah plastik adalah dengan cara pirolisis. Pirolisis merupakan suatu proses dekomposisi bahan oleh temperatur [6].

Jenis plastik yang digunakan dalam proses pirolisis akan menentukan hasil dari proses tersebut. Dalam penelitian ini, peneliti mengkhususkan penelitian pada pengaruh jenis sampah plastik HDPE, PP, dan LDPE terhadap sistem pirolisis.

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini, yaitu Menganalisis pengaruh variasi jenis sampah plastik HDPE, PP, dan LDPE terhadap unjuk kerja sistem pirolisis dari segi Volume Minyak. Adapun masalah yang dibahas pada pengujian ini adalah, Bagaimanakah pengaruh variasi jenis sampah plastik HDPE, PP, dan LDPE terhadap unjuk kerja sistem pirolisis dari segi Volume Minyak. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, maka perlu dilakukan pembatasan antara lain:

1. Penelitian ini hanya membahas mengenai hasil produksi proses pirolisis sampah jenis HDPE, PP, dan LDPE.
2. Alat pirolisis yang digunakan yaitu alat pirolisis dengan kondensor dan reaktor tunggal.
3. Pada penelitian ini sampah plastik yang digunakan dalam bentuk cacahan dengan ukuran 1 cm x 1 cm perbutirnya.
4. Pada penelitian ini massa masing-masing sampah plastik yaitu 1 Kg.
5. Temperatur yang digunakan untuk memanaskan reaktor sebesar 400°C.
6. Head exchanger yang digunakan yaitu tipe shell and tube memanfaatkan air sebagai fluida pendinginnya.
7. Jenis reaktor yang digunakan fixed bad.
8. Laju aliran massa pendinginan yang digunakan sebesar 0,08 L/s (4,8 L/menit)
9. Jenis aliran pada heat exchanger yaitu counter flow (arus balik).
10. Kondisi lingkungan di anggap konstan cerah.
11. Heat losses pada proses pemanasan diabaikan.

12. Unjuk kerja yang dihitung yaitu volume minyak.

## 2. Dasar Teori

### 2.1. Plastik

Plastik adalah produk turunan minyak bumi hasil proses penyulingan. Sifat plastik yang kuat dan tahan lama membuatnya banyak digunakan dalam berbagai produk rumah tangga. Namun, di balik manfaatnya, plastik memiliki sisi negatif yaitu sulit terurai secara alami. Sampah plastik yang dibuang sembarangan tidak bisa diuraikan oleh mikroba dan akan mencemari lingkungan. Hal ini menjadi masalah besar karena plastik dapat terurai membutuhkan waktu ratusan bahkan ribuan tahun.

Plastik masih menjadi pilihan banyak orang dalam kehidupan sehari-hari karena harganya murah, praktis, dan mudah didapat. Alasan di balik kepopuleran plastik ini adalah karena sifatnya yang merupakan hasil dari proses polimerisasi hidrokarbon. Proses ini mengubah molekul kecil hidrokarbon (monomer) menjadi rantai panjang yang kaku, menghasilkan plastik yang kita kenal. Sifat inilah yang membuat plastik kuat, tahan lama, dan mudah dibentuk [7].

#### 2.1.1. Sifat Termal Bahan Plastik

Dalam proses daur ulang plastik, memahami sifat panasnya sangatlah penting. Sifat panas yang perlu diketahui adalah titik lebur ( $T_m$ ), temperatur transisi ( $T_g$ ), dan temperatur dekomposisi. Temperatur transisi ( $T_g$ ) adalah titik di mana plastik mengalami perubahan struktur, membuatnya lebih fleksibel dari keadaan kaku sebelumnya. Titik lebur ( $T_m$ ) adalah suhu saat plastik mulai melunak dan berubah menjadi cair. Di sini, molekul plastik bergerak lebih bebas dan plastik menjadi lebih mudah dibentuk. Temperatur dekomposisi merupakan batas aman pemanasan plastik. Jika melebihi batas ini, plastik akan rusak dan strukturnya terurai. Umumnya, dekomposisi plastik terjadi pada suhu di atas 1,5 kali  $T_g$ . Pengetahuan tentang sifat panas plastik ini membantu kita memilih metode daur ulang yang tepat, mencegah kerusakan plastik selama proses, dan menghasilkan produk daur ulang berkualitas tinggi. [8].

Tabel 1. Data Sifat Thermal Plastik

| Jenis Plastik | $T_m$ (°C)   | $T_g$ (°C) |
|---------------|--------------|------------|
| HDPE          | 200°C-280°C  | -110       |
| LDPE          | 160°C-240°C  | -115       |
| PP            | 200°C-300°C. | 5          |

[9]

## 2.2. Pirolisis

Pirolisis merupakan salah satu cara mendekomposisi suatu bahan plastik dengan menggunakan bantuan temperatur. Pada prosesnya, pirolisis dimulai pada saat temperatur tinggi tanpa melibatkan  $O_2$  [10].

Pirolisis adalah proses termokimia yang mengubah plastik menjadi bahan bakar alternatif. Proses ini dilakukan melalui pemanasan plastik pada temperatur 230-800°C. Pada temperatur tinggi, plastik tersebut meleleh, kemudian terurai menjadi gas. Selama proses berlangsung, rantai panjang hidrokarbon yang menyusun plastik akan terputus menjadi rantai pendek. Gas hasil pirolisis kemudian didinginkan sehingga mengalami kondensasi dan berubah menjadi cairan. ini adalah cairan yang bisa menjadi alternatif bahan bakar. [11].

### 2.2.1 Produk Pirolisis

#### 1. Arang

Arang merupakan gumpalan karbon hitam yang didapat dari proses pembakaran, biasanya kayu, sampah, atau benda padat lainnya. Proses pembakaran ini tidak dilakukan secara sempurna sehingga arang tidak terbakar sepenuhnya. Arang memiliki ciri khas berwarna hitam, ringan, mudah hancur, dan menyerupai batubara. Kandungan karbon dalam arang cukup tinggi, yaitu sekitar 85% hingga 98%. Sisanya terdiri dari campuran berbagai zat kimia lain [12].

#### 2. Asap Cair

Asap cair adalah hasil pengembunan dari uap hasil pembakaran bahan yang kaya karbon. Proses pembakaran bisa dilaksanakan secara langsung maupun tidak langsung. Pada pembakaran langsung, bahan baku dibakar secara terbuka, sedangkan pada pembakaran tidak langsung, asap dari pembakaran dialirkan melalui pipa dan didinginkan untuk menghasilkan asap cair [12].

#### 3. Minyak Pirolisis

Minyak hasil pirolisis memiliki potensi sebagai alternatif bahan bakar solar pada mesin diesel. Minyak ini dapat digunakan untuk bahan bakar Tunggal ataupun dicampur dengan solar. Nilai kalor minyak pirolisis yang tidak jauh berbeda dengan solar menjadikannya pilihan yang layak. Namun, untuk meningkatkan performanya, beberapa sifat minyak pirolisis perlu diperbaiki [11].

## 3 Metode penelitian

Metode yang dapat digunakan pada pengujian ini merupakan pengujian eksperimen untuk mengetahui hasil dari pengaruh variasi jenis sampah plastik HDPE, LDPE, dan PP sebagai bahan baku proses pirolisis dengan masing-masing massa nya sebesar 1 kg yang

sudah di cacah dalam ukuran 1 x 1cm perbutirnya. Proses pirolisis menggunakan temperatur 400°C untuk memanaskan reaktor.

### 3.1. Alat

Untuk melancarkan penelitian ini, kita memerlukan beberapa perlengkapan penting. Bagian selanjutnya membahas alat dan bahan yang digunakan.

1. Kompor berfungsi untuk memanaskan Reaktor.
2. Reaktor berfungsi sebagai tempat pemanas atau pembakaran dan pengurai limbah sampah plastik.



Gambar 1. Reaktor

3. *Pressure Gauge* digunakan untuk memonitor tekanan yang terjadi di dalam tabung reaktor pada saat berlangsung proses pirolisis
4. Kondensor bekerja dengan cara mendinginkan uap atau gas, sehingga tekanannya turun dan berubah wujud menjadi cairan atau minyak. Udara dingin di sekitar kondensor membantu mempercepat proses pendinginan ini.
5. Termokopel berfungsi sebagai alat pengukur temperatur perpindahan panas yang terjadi di dalam kondensor.
6. *Flowmeter* berfungsi untuk mengukur debit air dari pompa menuju ke kondensor.
7. Pompa berfungsi untuk mengalirkan fluida pendingin dari *cooling tower* untuk masuk ke dalam kondensor dan akan kembali ke *cooling tower*.
8. *Cooling Tower* berguna untuk menurunkan temperatur fluida pendingin yang telah mengalami kenaikan suhu sebagai akibat dari pertukaran panas yang terjadi di kondensor.
9. Timbangan *Digital* berfungsi sebagai alat pengukur berat sampah plastik dan berat minyak yang dihasilkan.
10. Gelas Ukur berfungsi sebagai media untuk mengukur volume minyak pirolisis.



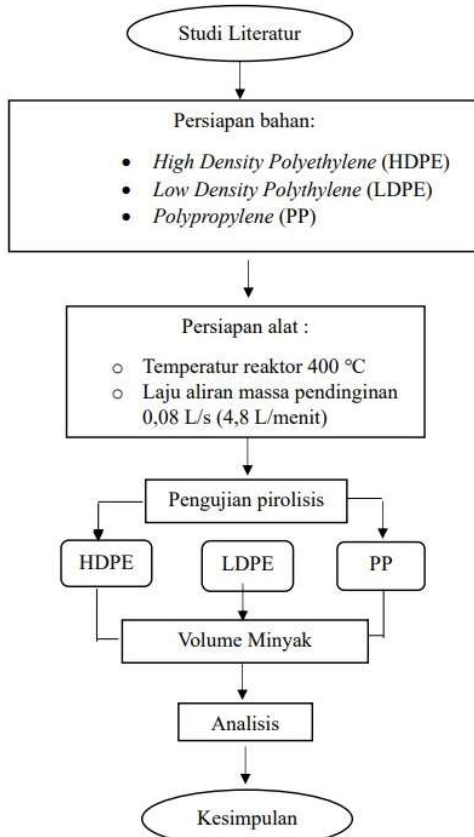
### 2.3. Bahan

Sampah plastik jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) berupa kresak belanja, *Low Density Polyethylene* (LDPE) berupa polybag tanaman, dan *Polypropylene* (PP) berupa gelas plastik yang sudah dicacah berukuran 1 cm x 1 cm perbutirnya, massa sampah plastik sebesar 1 kg.



Gambar 2. Sampah plastik cacahan

### 2.4. Diagram alir penelitian



Gambar 3. Diagram alir penelitian

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Hasil Volume Minyak

Volume minyak yang dihasilkan dari penelitian yang dilakukan sebanding dengan berat bahan dasar plastik yang dipakai. Berat

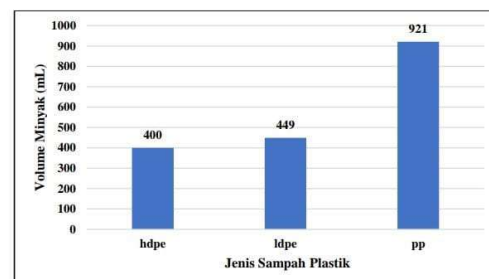
bahan dasar plastik yang dipakai adalah 1kg. Setiap jenis plastik yang digunakan, tetap dengan berat bahan yang sama. Sesuai dengan teorinya, bahwa semakin banyak bahan baku yang digunakan, akan semakin banyak pula proses pirolisis menghasilkan minyak. Berikut disajikan pada tabel 4.3. volume yang dihasilkan dalam setiap penelitian yang dilakukan pada jenis plastik yang berbeda.

Tabel 2. Hasil Volume Minyak

| Jenis Plastik | Volume minyak (mL) |
|---------------|--------------------|
| HDPE          | 400 mL             |
| LDPE          | 449 mL             |
| PP            | 921 mL             |

### 3.2. Pembahasan Volume Minyak

Dari grafik di bawah Penelitian ini mengungkapkan perbedaan volume minyak yang didapat saat pirolisis sampah plastik jenis PP, HDPE, dan LDPE. Sampah plastik PP menghasilkan minyak paling banyak, melebihi HDPE dan LDPE. Hal ini disebabkan oleh kemudahan dekomposisi plastik PP dan mudah menguapnya lelehan plastik PP dibandingkan HDPE dan LDPE. Proses pirolisis tidak bisa mengubah seluruh sampah plastik menjadi minyak, karena saat proses pirolisis akan ada gas yang tidak bisa di kondensasikan. Meskipun tidak semua plastik dapat diubah menjadi minyak, temuan ini menunjukkan potensi sampah plastik PP sebagai bahan dasar produksi bahan bakar alternatif Karena lebih mudah menguap, maka produksi gas akan lebih banyak. Dengan banyaknya gas yang terbentuk, maka kemungkinan gas tersebut dapat diubah fase menjadi cair akan lebih banyak pula. Dengan begitu volume minyaknya akan lebih besar dibandingkan dengan plastik jenis HDPE dan LDPE.



Gambar 4. Diagram Hasil Volume Minyak

## 5 Kesimpulan

Berdasarkan observasi dan pengujian terbaru, jenis plastik PP mendapatkan hasil minyak pirolisis lebih banyak daripada sampah

plastik jenis HDPE dan LDPE. Hal tersebut membuktikan bahwa sampah plastik PP memiliki potensi yang lebih besar untuk diolah menjadi bahan bakar alternatif menggunakan proses pirolisis yang telah teruji.

#### 6. Daftar Pustaka

- [1] Nirmalasari R, Khomsani A A, Rahayu D N, 2021, *Pemanfaatan Limbah Sampah Plastik Menggunakan Metode Ecobrick di Desa Luwuk Kanan*, Jurnal Solma, pp. 469-477.
- [2] KLHK. (2022). *Dijen PSLB3 KLHK Didesak Miliki Langkah Terukur Tangani Volume Sampah*. Dewan Perwakilan Rakyat Republik Indonesia.
- [3] Purwaningrum P. (2016). *Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik di Lingkungan*. JTL, 141-147.
- [4] Rahayu A, Rosti, Sartika, Trendrita M, & Hidayanti U. (2022). *Edukasi Bahaya Sampah Plastik untuk meningkatkan Kesadaran Cinta Lingkungan Masyarakat*. Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat, pp. 56-67.
- [5] Syaiful F L, & Hayati I. (2021). *Inovasi pengolahan sampah plastik menjadi jasa kreatif di kenagarian kinali kabupaten pasaman barat*. Jurnal Hilirisasi, Vol. 4, No 4.
- [6] Riandis J A, Setyawati A R, & Susandy A. (2021). *Pengolahan Sampah Plastik Dengan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak*. Jurnal Chemurgy, pp. 8-14.
- [7] Bow Y, Zulkarnain, Sutini P L, steven R M S, Siti A K, & Yosirham A S. (2018). *Pengolahan Sampah LDPE dan PP Menjadi Bahan bakar Cair Akternatif menggunakan pirolisis thermal cracking*. Jurnal Kinetika, Vol. 9, No 03.
- [8] Surono U B. (2013). *Berbagai metode Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak*. Jurusan Teknik Mesin Universitas Janabadra Yogyakarta, Vol 3 No 1.
- [9] Budiyanoro C. (2010). *Thermoplastic dalam Industri*. Teknik Media, Surakarta.
- [10] Nugroho A S. (2020). *Pengolahan Limbah Plastik LDPE dan PP untuk Bahan bakar dengan cara Pirolisis*. Jurnal Litbang Sukowati, vol 4 no 1 hal 91-100.
- [11] Syamsiro M. (2015). *Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas*

*Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik*. Jurnal Teknik, Vol 5 No 1.

- [12] Ridhuan K, Irawan D, Zanaria Y, & Firmansyah F. (2019). *Pengaruh Jenis Biomassa Pada Pembakaran Pirolisis Terhadap Karakteristik dan Efisiensi Bio Arang- Asap Cair yang dihasilkan*. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Hal 18-27 Vol 20 No 1.



**Manshuriin Minduro** adalah seorang mahasiswa Universitas Udayana Program Studi Sarjana Teknik Mesin sejak tahun 2019. Fokus dalam penelitian bidang Konversi Energi dengan topik pirolisis sampah plastik sebagai tugas akhir untuk menempuh gelar Sarjana (S1).

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan teknologi konversi, penyimpanan, dan manajemen energi.

# UJI *CO-FIRING* BATUBARA DENGAN BRIKET MSW MENGGUNAKAN INSINERATOR *FLUIDIZED BED*

Bryan Steve Immanuel, I Nyoman Suprapta Winaya, I Gede Putu Agus  
Suryawan, I Putu Angga Yuda Pratama

Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Metode *co-firing* telah muncul sebagai strategi yang menjanjikan dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dalam industri pembangkit listrik. *Co-firing* melibatkan pembakaran bersama bahan bakar biomassa dengan bahan bakar fosil konvensional dalam tungku pembakaran yang ada. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performansi *co-firing* pada insinerator *fluidized bed* menggunakan sumber bahan bakar briket MSW yang bersumber dari TPST Kertalangu Denpasar dengan campuran bahan bakar batubara. Panas yang digunakan sebesar 800°C yang disuplai oleh *heater* terkontrol melalui kontrol panel listrik. Uji coba pembakaran briket MSW dan batu bara dilakukan dalam insinerator *fluidized bed* dengan volume ruang bakar 902,75 cm<sup>3</sup>, dengan ruang fluidisasi sebesar 451,375 cm<sup>3</sup>, ruang bahan bakar 150,46 cm<sup>3</sup> dan ruang bed material 300,92cm<sup>3</sup>. Melalui proses konversi ke fraksi massa, maka didapati kebutuhan massa bahan bakar yaitu 140 gram untuk mengisi volume bahan bakar di dalam reaktor, sehingga persentase briket 8% memiliki perbandingan massa briket MSW sebesar 11.2 gram dan batu bara sebesar 128.8 gram, dan selanjutnya mengikuti persentase briket MSW yang sudah ditentukan dalam penelitian kali ini. Penelitian ini menggunakan kecepatan udara 9m/s untuk menjaga kualitas pembakaran. Hasil penelitian eksperimental ini menunjukkan penurunan efisiensi pembakaran terjadi seiring bertambahnya jumlah briket MSW. Performansi terbaik terjadi di variasi briket 8% dengan menghasilkan nilai NPHR sebesar 881,7 kcal/kWh.

Kata kunci : *Co-firing*, Briket MSW, *Fluidized Bed*, Insinerator, NPHR

## Abstract

*The co-firing method has emerged as a promising strategy in reducing dependence on fossil fuels in the power generation industry. Co-firing involves co-burning biomass fuel with conventional fossil fuel in an existing combustion furnace Utilizing energy from municipal solid waste (MSW) is a feasible method through various processes, one of which is combustion. This research aims to investigate the combustion performance of co-firing in a fluidized bed incinerator using MSW briquette fuel sourced from the TPST Kertalangu in Denpasar, combined with coal fuel. The study utilizes a temperature of 800°C supplied by a heater that controlled through a control panel. The experiment on burning MSW briquettes and coal was conducted in a fluidized bed incinerator with a combustion chamber volume of 902.75 cm<sup>3</sup>, a fluidization chamber of 451.375 cm<sup>3</sup>, a fuel chamber of 150.46 cm<sup>3</sup>, and a bed material chamber of 300.92 cm<sup>3</sup>. Through the mass fraction conversion process, it was determined that the fuel mass requirement was 140 grams to fill the fuel volume inside the reactor. Thus, the 6% briquette percentage resulted in a mass ratio of 11.2 grams MSW briquettes and 128.8 grams coal, following the predetermined percentage of MSW briquettes in this study. The research utilized an air velocity of 9m/s to maintain combustion quality. The results of this experimental study indicate a decrease in combustion efficiency with an increase in the amount of MSW briquettes. The best performance occurred at the 8% briquette variation, producing an NPHR value of 881.7 kcal/kWh.*

Keywords: *Co-firing*, MSW briquette, *fluidized bed*, incinerator, NPHR

## 1. Pendahuluan

Negara Indonesia dapat menghasilkan *municipal solid waste* (MSW) sebanyak lebih dari 38,5 ton dengan potensi meningkat 2-3% di setiap tahunnya [1]. Banyaknya sampah yang dapat dihasilkan serta kurangnya penanganan yang baik dapat menumbuhkan pencemaran lingkungan.

Salah satu cara agar MSW dapat digunakan secara maksimal adalah dengan mengubah MSW menjadi bahan bakar briket yang merupakan produk hasil pengolahan sampah organik maupun non organik dengan proses pencacahan, pengeringan, pemadatan MSW hingga kandungan air dari limbah berkurang dan dapat meningkatkan nilai kalor yang cukup tinggi.

*Co-firing* briket biomassa (briket MSW) dengan batubara memperkenalkan biofuel sebagai sumber energi tambahan dalam penggunaan boiler efisiensi tinggi. Berdasarkan jenis reaktornya, metode *fluidized bed* terdiri atas tiga jenis, salah satunya adalah *Bubbling Fluidized Bed Combustion* (BFBC). Metode BFBC memiliki kelebihan di antaranya mampu berfungsi pada beberapa tekanan, kontrol termal yang relatif lebih mudah, kandungan metana yang tinggi dalam *syngas*, serta mampu berfungsi dengan ukuran partikel yang bervariasi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi persentase briket MSW terhadap performansi *co-firing* menggunakan insinerator *fluidized bed*. Untuk mendapatkan hasil

yang diinginkan dari luasnya permasalahan yang ada, maka perlu dilakukan pembatasan masalah antara lain:

1. Variasi bahan bakar yang digunakan briket MSW 8% + Batubara 92%, briket MSW 10% + Batubara 90%, dan briket MSW 12% + Batubara 88%
2. *Bed material* yang digunakan adalah pasir silika dengan *mesh* 0.5 – 0.8 mm.
3. Uji penelitian ini meliputi, *Net Plant Heat Rate* (NPHR).

## 2. Dasar Teori

Sampah merupakan salah satu permasalahan yang paling sering didiskusikan agar dapat digunakan ataupun dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi baru terbarukan. Kebijakan energi baru terbarukan di Indonesia diatur dalam Peraturan Pemerintah No.79 Tahun 2014 . Pada tahun 2025 energi baru terbarukan ditargetkan mencapai 23%, serta minimal mencapai 31% pada tahun. Negara Indonesia dapat menghasilkan *municipal solid waste* (MSW) sebanyak lebih dari 38,5 ton dengan potensi meningkat 2-3% di setiap tahunnya [1], [2]. MSW secara umum sulit untuk dimanfaatkan karena masih memiliki kandungan air yang tinggi, nilai kalor yang rendah, ukuran yang beragam dan memiliki kandungan debu yang tinggi. Salah satu cara agar MSW dapat digunakan secara maksimal adalah dengan mengubah MSW menjadi bahan bakar briket yang merupakan produk hasil pengolahan sampah organik maupun non organik dengan proses pencacahan, pengeringan, pemadatan MSW hingga kandungan air dari limbah berkurang dan dapat meningkatkan nilai kalor yang cukup tinggi.

Teknologi *co-firing* briket MSW dengan batubara memperkenalkan biofuel sebagai sumber energi tambahan dalam penggunaan boiler efisiensi tinggi. Dewasa ini, telah ada teknologi yang mendukung *co-firing* batubara menggunakan MSW menjadi energi alternatif yaitu teknologi Fluidized Bed Combustion (FBC) [3]. Berdasarkan pada jenis reaktor-nya, metode fluidized bed combustion (FBC) terdiri atas tiga jenis yaitu Bubbling Fluidized Bed Combustion (BFBC), Rotating Fluidized Bed Combustion (RFBC), dan Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)[4]. BFBC memiliki kelebihan di antaranya mampu berfungsi pada beberapa tekanan, kontrol termal yang relatif lebih mudah, kandungan metana yang tinggi dalam *syngas*, serta mampu berfungsi dengan ukuran partikel yang bervariasi [5]

Dalam insinerator BFBC, partikel padat yang berada di bagian bawah ruang bakar terfluidasi oleh aliran udara primer melalui suatu sistem distributor. ketika digunakan dalam aplikasi insinerasi BFBC, sangat penting untuk mempertimbangkan dengan cermat distribusi ukuran feedstock agar menghindari ketidaksempurnaan dalam proses fluidisasi. Insinerasi BFBC umumnya digunakan untuk membakar berbagai jenis bahan seperti batubara, bahan organik padat, limbah plastik padat, dan lumpur dari pengolahan air limbah [6]

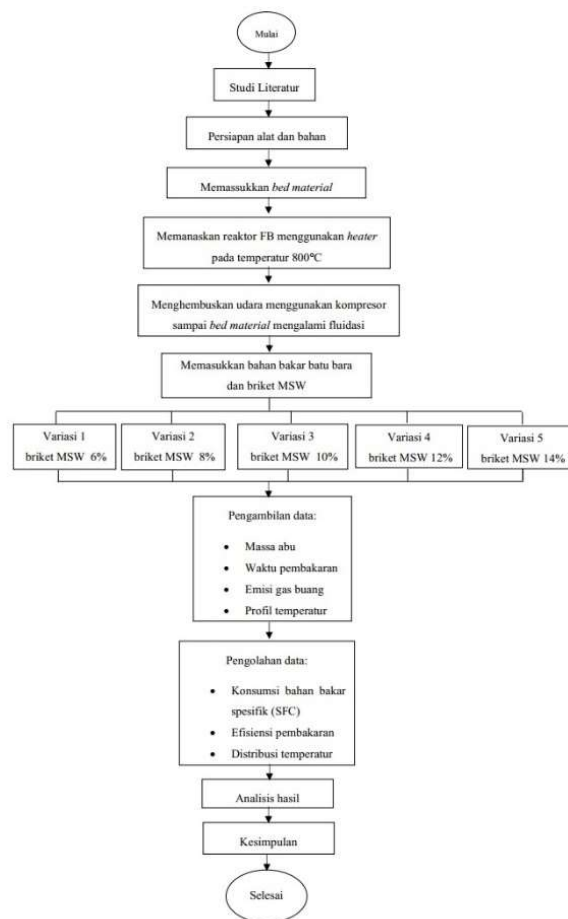
## 3. Metode Penelitian

### 3.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

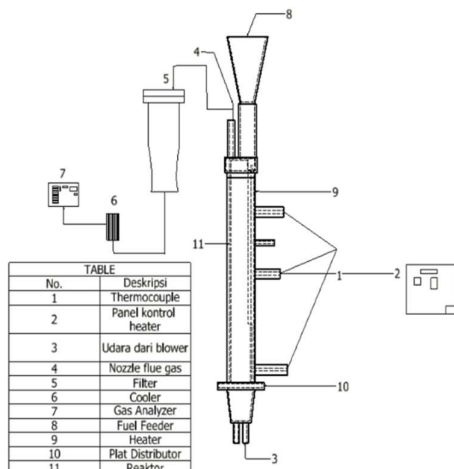
1. Reaktor
2. *Heater*
3. *Thermocouple*
4. *Data logger*
5. *Gas analyzer*
6. Kompresor
7. Kontrol Panel
8. Batubara
9. Briket MSW

### 3.2 Diagram alir penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### 3.3 Skematik Alat



Gambar 2 Skematik Alat

### 3.4 Net Plant Heat Rate (NPHR)

NPHR didefinisikan sebagai perbandingan input energi panas dengan daya yang dihasilkan, atau secara matematika dapat didefinisikan dengan:

$$NPHR = \frac{Q_{in}}{P} \quad (1)$$

NPHR = Net Plant Heat Rate (kcal/kWh)

Q<sub>in</sub> = Energi yang masuk (kcal)

P = Daya yang dihasilkan (kWh)

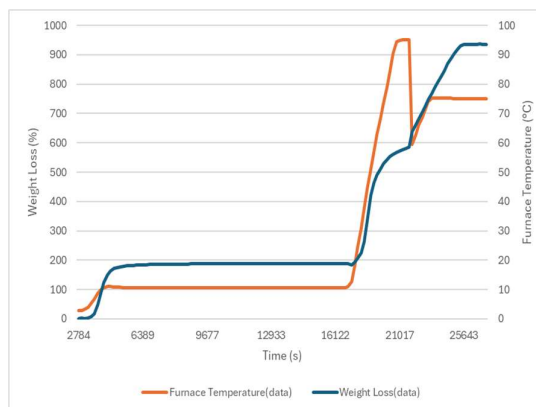
## 4 Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Karakterisasi Bahan Bakar

Karakterisasi bahan bakar dilakukan untuk mengetahui kandungan bahan yang digunakan sebelum dan sesudah penelitian. Karakterisasi bahan bakar yang akan digunakan dilakukan menggunakan pengujian uji *proximate* menggunakan alat Thermogravimetri Analyst 701 yang dilakukan menggunakan metode ASTM D-7582 MVA BIOMA.

Tabel 1. Hasil Uji Proximate Bahan Bakar

| Bahan Bakar                   | Kadar Air (%) | Bahan Menguap (%) | Karbon Tetap (%) | Abu (%) |
|-------------------------------|---------------|-------------------|------------------|---------|
| Briket MSW 8% + Batubara 92%  | 18.43         | 40.32             | 34.93            | 6.32    |
| Briket MSW 10% + Batubara 90% | 18.92         | 39.48             | 35.40            | 6.21    |
| Briket MSW 12% + Batubara 88% | 18.55         | 39.97             | 35.09            | 6.39    |



Gambar 3 Grafik TGA Briket MSW 12% + Batubara 88%

Gambar 3 menunjukkan grafik peningkatan *weight loss* terhadap kenaikan temperatur pada bahan bakar.

### 4.2 Karakterisasi Nilai Kalor Bahan Bakar

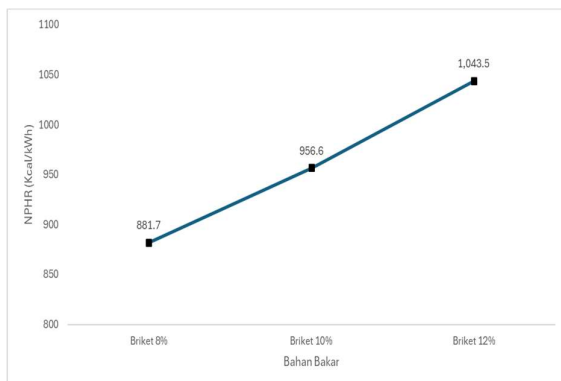
Analisis nilai kalor digunakan untuk mengetahui jumlah energi panas yang terlepas untuk tiap satuan massa bahan bakar. Berikut adalah tabel hasil pengujian nilai kalor bahan bakar batu bara dengan briket MSW. Pengujian nilai kalor dilakukan menggunakan alat Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter dengan standar ASTM *Standard Test Method* D5865. Berikut adalah hasil pengujian nilai kalor dari bahan bakar.

Tabel 2. Analisis Nilai Kalor Bahan Bakar

| Bahan Bakar                   | Berat Sampel (gram) | Nilai Kalor Sampel Bahan Bakar |                |                    |         |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------|--------------------|---------|
|                               |                     | Temperatur                     |                | Nilai Kalor        |         |
|                               |                     | T <sub>1</sub>                 | T <sub>2</sub> | Rata-rata (Cal/gr) | (Mj/Kg) |
| Batubara 100%                 | 1                   | 26.39                          | 29.32          | 4837.785           | 20.255  |
| Briket MSW 100%               | 1                   | 27.017                         | 29.571         | 4356.174           | 18.238  |
| Briket MSW 8% + Batubara 94%  | 1                   | 26.636                         | 29.172         | 4686.911           | 19.623  |
| Briket MSW 10% + Batubara 94% | 1                   | 26.934                         | 29.172         | 4665.162           | 19.532  |
| Briket MSW 12% + Batubara 94% | 1                   | 28.442                         | 29.55          | 4638.933           | 19.422  |

### 4.3 Net Plant Heat Rate (NPHR)

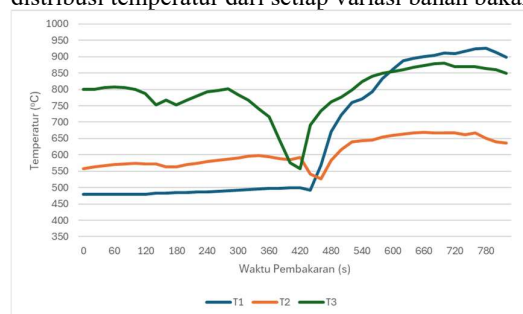
Uji NPHR dilakukan untuk mengetahui besarnya input energi panas dari bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan daya. Adapun hasil dari nilai NPHR variasi briket MSW 8% + batubara 92%, briket MSW 10% + batubara 90%, dan briket MSW 12% + batubara 88% berdasarkan gambar 3. secara berturut-turut adalah 881.7 kcal/kWh, 956 kcal/kWh, dan 1043.5 kcal/kWh..



Gambar 4. NPHR Bahan Bakar

#### 4.4 Profil Temperatur

Profil temperatur digunakan untuk mengetahui persebaran panas yang terjadi di dalam reaktor. Hasil pada gambar 5 menunjukkan bahwa turunnya temperatur dikarenakan ruang bahan bakar dibuka melalui *fuel feeder* untuk memasukkan bahan bakar. Ketika bahan bakar sudah masuk secara keseluruhan, maka *fuel feeder* ditutup kembali dan dilakukan fluidisasi dengan kecepatan udara 9 m/s. Berikut distribusi temperatur dari setiap variasi bahan bakar.



Gambar 5 Profil Temperatur Briket MSW 12 % + Batubara 88 %

Pada gambar di atas menunjukkan distribusi temperature pada pembakaran briket MSW 12% + Batubara 88%. *Thermocouple* 3 (T3) merupakan *thermocouple* yang tersambung dengan panel kontrol untuk menjaga temperatur hingga mencapai temperatur operasi. Ketika T3 sudah mencapai 800°C, maka bahan bakar dimasukkan melalui *fuel feeder* sehingga terjadi penurunan temperatur yang cukup signifikan dikarenakan udara yang masuk melalui *fuel feeder*. Setelah bahan bakar masuk secara keseluruhan, *fuel feeder* ditutup kembali dan kompresor menyuplai udara sebesar 9 m/s yang mengakibatkan pembakaran terjadi sehingga temperatur di setiap *thermocouple* naik.

#### 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai performansi *co-firing* batubara dengan briket MSW

menggunakan incinerator *fluidized bed*, maka dapat disimpulkan

1. Performansi terbaik terjadi pada variasi bahan bakar briket MSW 8% + batubara 92% dengan nilai NPHR 881.7 kcal/kWh.
2. Nilai kalor bahan bakar batu bara 100%, briket MSW 100%, dan nilai kalor variasi bahan bakar terbaik yaitu briket MSW 8% + batubara 92%, secara berturut-turut 4837.785 cal/gr, 4356.174 cal/gr, dan 4686.911 cal/g

#### Daftar Pustaka

- [1] F. D. Qonitan, I. Wayan Koko Suryawan, and A. Rahman, "Overview of Municipal Solid Waste Generation and Energy Utilization Potential in Major Cities of Indonesia," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Apr. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1858/1/012064.
- [2] N. I. Pratiwi. S. H. P. J. L. W. F. D. A. A. Sauqi. J. T. Damanik. D. B. T. P. N. K. Surhayati, "Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional Energi Indonesia 2 0 2 2," 2022.
- [3] I. Nyoman, S. Winaya, I. B. Agung, and D. Susila, "Co-Firing Sistem Fluidized Bed Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu," 2010.
- [4] S. De Gisi, A. Chiarelli, L. Tagliente, and M. Notarnicola, "Energy, environmental and operation aspects of a SRF-fired fluidized bed waste-to-energy plant," *Waste Management*, vol. 73, pp. 271–286, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.04.044.
- [5] A. Molino *et al.*, "Power production by biomass gasification technologies," in *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Renewable Energy Integrated with Membrane Operations*, Elsevier, 2018, pp. 293–318. doi: 10.1016/B978-0-12-813545-7.00012-X.
- [6] J. Van Caneghem *et al.*, "Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 551–582, 2012. doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.001.



|   |  |
|---|--|
|  | <p>Prof. I Nyoman Suprapta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Dalhousie University pada tahun 2000, dan S3 di Niigata University pada tahun 2008. Prof. I Nyoman Suprapta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|---|--|

|   |  |
|---|--|
|  | <p>Dr. I Gede Putu Agus Suryawan, S.T., M.T. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2001, dan S3 di Universitas Udayana pada tahun 2020. I Gede Putu Agus Suryawan memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang komposit.</p> |
|---|--|

|  |  |
|--|--|
|    | <p><b>Bryan Steve Immanuel</b><br/>                 menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p> |
| <p>Judul tugas akhir Pengaruh Persentase Briket MSW Pada <i>Co-Firing</i> Batubara Terhadap Performansi Insinertaor <i>Fluidized Bed</i></p> |  |

# ANALISIS PERFORMA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR DENGAN SIRIP MELINTANG BERONGGA DISUSUN *STAGGERED*

Agil Yanuar Juliarto, Ketut Astawa, Made Sucipta\*

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Letak geografis yang memengaruhi jalannya matahari membuat Indonesia mengalami iklim tropis yang menghasilkan penerimaan radiasi surya hampir sepanjang tahun. Salah satu tujuan dari pemanfaatan energi surya adalah untuk pengeringan. Meskipun pengeringan alami sering digunakan, namun hasil penjemuran alami kurang efektif karena terjadi di lahan terbuka dan terpengaruh oleh perubahan cuaca yang dapat menghambat pengeringan hasil panen dan meningkatkan risiko kontaminasi dengan zat kimia, debu, dan kotoran. Oleh karena itu, ada kepentingan untuk memanfaatkan potensi energi surya dengan menggunakan alat kolektor surya yang bertujuan untuk mengumpulkan panas dengan menjaga kebersihan udara panas selama proses pengeringan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan unjuk kerja dari kolektor surya pelat datar menggunakan aliran bawah *absorber* dengan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *staggered* dengan metode eksperimental. Eksperimen ini dilakukan untuk mengamati fenomena aliran fluida dan perpindahan panas yang terjadi di dalam kolektor surya. Untuk meningkatkan unjuk kerja kolektor surya akan diberikan variasi dengan variasi laju aliran massa sebesar 0,0009; 0,0019; dan 0,0023 kg/s pada suhu 32°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kolektor surya pelat surya pelat datar dengan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *staggered* terdapat distribusi suhu dari pantulan kaca hingga pelat bawah kolektor. Fenomena distribusi suhu yang terjadi pada kolektor surya didapatkan bahwa rendahnya laju aliran massa membuat suhu pada bagian kolektor lebih tinggi dibandingkan dengan tingginya laju aliran massa. Energi berguna tertinggi diperoleh pada variasi  $m_3$  dengan energi berguna sebesar 50,45 W dan efisiensi tertinggi sebesar 8,93%. Energi berguna rata-rata dan efisiensi rata-rata berada pada variasi  $m_3$  sebesar 33,47 W dan 5,76%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi laju aliran massa memiliki perbedaan nilai yang signifikan terhadap distribusi suhu pada bagian kolektor, energi berguna, dan efisiensi terhadap unjuk kerja kolektor surya.

Kata kunci: Sirip melintang berongga, Rongga bujur sangkar, *Staggered*, Distribusi suhu, Energi berguna, Efisiensi.

## Abstract

The geographical location that affects the course of the sun makes Indonesia experience a tropical climate that results in receiving solar radiation almost all year round. One of the purposes of utilizing solar energy is for drying. Although natural drying is often used, it is less effective as it takes place in open fields and is affected by weather changes that can hinder the drying of crops and increase the risk of contamination with chemicals, dust, and dirt. Therefore, there is an interest to utilize the potential of solar energy by using a solar collector device that aims to collect heat by keeping the hot air clean during the drying process. This study aims to improve the performance of a flat plate solar collector using an underflow absorber with hollow transverse fins of square shape arranged staggered by experimental method. This experiment was conducted to observe the fluid flow and heat transfer phenomena occurring in the solar collector. To improve the performance of the solar collector, variations will be given with a mass flow rate variation of 0.0009; 0.0019; and 0.0023 kg/s at a temperature of 32°C. The results showed that in a flat plate solar collector with hollow transverse fins in the shape of a square arranged staggered there is a temperature distribution from the reflection of the glass to the bottom plate of the collector. The temperature distribution phenomenon that occurs in solar collectors is found that the low mass flow rate makes the temperature in the collector section higher than the high mass flow rate. The highest useful energy was obtained in the  $m_3$  variation with useful energy of 50.45 W and the highest efficiency of 8.93%. The average useful energy and average efficiency are in the  $m_3$  variation of 33.47 W and 5.76%. This shows that the variation in mass flow rate has a significant difference in value to the temperature distribution in the collector section, useful energy, and efficiency of the solar collector performance.

Keywords: Hollow transverse fin, Square cavity, *Staggered*, Temperature distribution, Useful energy, Efficiency.

## 1. Pendahuluan

Dengan posisi geografis yang mengikuti perjalanan matahari, Indonesia mengalami iklim tropis yang menguntungkan dengan penerimaan radiasi surya hampir sepanjang tahun. Menurut data yang ada, Indonesia memiliki rata-rata intensitas radiasi matahari yang diterima setiap harinya adalah sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> [1]. Penggunaan dan pengembangan energi surya belum mencapai

potensinya jika dibandingkan dengan energi fosil. Maka perlu penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan pemanfaatan energi surya secara maksimal. Energi surya memiliki keunggulan berupa tanpa emisi yang merugikan lingkungan, non-politif, tak terbatas, dan tidak memerlukan pembelian bahan bakar. [2].

Salah satu tujuan dari pemanfaatan energi surya adalah untuk proses pengeringan. Pengeringan adalah

upaya untuk mengurangi kadar air suatu bahan dengan menggunakan energi panas untuk menguapkan kelembaban dari permukaannya [3]. Proses pengeringan dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori. Pertama, pengeringan alami yang terjadi melalui penjemuran langsung di bawah sinar matahari tanpa alat tambahan, yang merupakan metode paling sederhana dengan menggunakan alas sebagai tempat penjemuran. Kedua, pengeringan buatan yang melibatkan penggunaan perangkat untuk mengatur udara yang dipanaskan atau kontak langsung dengan produk yang akan dikeringkan [4]. Metode pengeringan alami umumnya digunakan dalam sektor pertanian atau perkebunan pasca panen. Namun, hasil dari proses penjemuran alami tersebut seringkali tidak optimal karena terbatasnya lahan terbuka dan fluktuasi kondisi cuaca, yang dapat menghambat pengeringan hasil panen serta meningkatkan risiko kontaminasi dengan zat kimia, debu, dan kotoran di area penjemuran yang sederhana.

Oleh sebab itu, pemanfaatan potensi energi surya melalui perangkat seperti kolektor surya menjadi sangat signifikan. Kolektor surya adalah sebuah perangkat yang dirancang untuk menyerap panas dari sinar matahari dan mengalirkannya ke dalam fluida kerja. Saat radiasi matahari mencapai pelat absorber di kolektor surya, sebagian dari energi itu dipantulkan kembali ke lingkungan, sementara sebagian besar diabsorpsi dan diubah menjadi panas. Panas tersebut kemudian dialirkan ke fluida kerja yang mengalir di dalam kolektor surya [3].

Menggunakan sirip pada kolektor surya dapat secara nyata meningkatkan kinerja termalnya, namun desain dan penerapan sirip yang optimal bergantung pada beberapa faktor yang harus dipertimbangkan [5]. Sirip yang disusun secara melintang sepanjang arah aliran fluida dapat mengurangi kecepatan aliran karena adanya tabrakan antara sirip-sirip, sehingga aliran fluida memiliki lebih banyak waktu untuk menyerap panas dari pelat absorber. Sirip dengan susunan melintang ini biasanya dilengkapi dengan lubang sebagai jalur bagi aliran fluida. Susunan sirip memiliki dampak signifikan terhadap kinerja kolektor surya pelat datar, dan dapat dibagi menjadi dua jenis: *aligned* dan *staggered*. Posisi sirip yang disusun secara *staggered* menyebabkan aliran fluida di dalam kolektor menjadi lebih merata saat melewati sirip-sirip, sehingga jumlah panas yang diserap oleh aliran fluida dalam kolektor menjadi lebih tinggi. Hal ini mengakibatkan peningkatan suhu keluaran dari kolektor tersebut [6].

Dari penjelasan sebelumnya, modifikasi desain kolektor surya ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi transfer panas dari pelat penyerap ke fluida kerja dengan memanfaatkan sirip melintang berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun secara *staggered*. Hal ini dilakukan untuk meratakan distribusi radiasi surya pada pelat *absorber*. Perbedaan dalam kecepatan udara yang masuk serta

modifikasi ini mempengaruhi pencapaian suhu optimal dan meningkatkan kinerja kolektor surya.

Rumusan masalah dalam penelitian ini mencakup distribusi, laju perpindahan panas, dan efisiensi kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga yang disusun secara *staggered*.

## 2. Dasar Teori

Intensitas radiasi matahari diukur dengan menggunakan *pyranometer* yang memiliki sensitivitas sebesar  $13,68 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$ . Data diambil dengan menggunakan *multimeter*. Berdasarkan data yang terukur ini, intensitas radiasi matahari dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_T = \frac{U_{emf}}{S} \quad (1)$$

$I_T$  = Intensitas Radiasi ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $U_{emf}$  = Tegangan Keluaran (V)  
 $S$  = Sensitivitas ( $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$ )

Massa jenis dan kapasitas jenis panas pada laju aliran massa harus ditentukan dengan menggunakan  $\rho$  dan  $c_p$  yang diinterpolasi dari suhu  $T_{film}$  yang berasal dari  $T_o$  dan  $T_i$ , serta dengan memperhatikan tabel sifat-sifat udara pada tekanan atmosfer. Hal ini karena suhu memiliki pengaruh terhadap sifat-sifat suatu zat, dan untuk menghitungnya digunakan rumus sebagai berikut:

$$y = y_1 \frac{x-x_1}{x_2-x_1} (y_2 - y_1) \quad (2)$$

Laju aliran massa adalah parameter untuk mengukur jumlah massa yang melewati suatu titik dalam periode waktu tertentu. Penghitungan laju aliran massa bertujuan untuk menetapkan jumlah massa yang bergerak setiap detiknya, dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kecepatan aliran, jenis aliran, dan area penampang yang dilalui oleh fluida [7]. Laju aliran massa menjadi salah satu parameter penting dalam pengaruh distribusi suhu, perhitungan energi yang berguna dan efisiensi kolektor surya pelat datar. Persamaan laju aliran massa sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \quad (3)$$

$\dot{m}$  = Laju aliran massa ( $\text{kg}/\text{s}$ )  
 $\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $V$  = Kecepatan udara ( $\text{m}/\text{s}$ )  
 $A$  = Luas permukaan ( $\text{m}^2$ )

Dalam mengevaluasi energi yang diserap atau energi yang berguna bagi kolektor perangkat pemanas air tenaga surya [8], persamaan dapat diaplikasikan.:

$$Q_{(u,a)} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_0 - T_1) \quad (4)$$

$Q_{(u,a)}$  = Energi Berguna (W)  
 $c_p$  = Kapasitas jenis kalor ( $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )  
 $T_0$  = Suhu masuk ( $^\circ\text{C}$ )  
 $T_1$  = Suhu keluar ( $^\circ\text{C}$ )

Efisiensi kolektor merujuk pada perbandingan antara panas yang diserap oleh fluida dan intensitas matahari yang diterima oleh kolektor. Sedangkan efisiensi pengumpulan, yang merupakan rasio antara energi yang berguna yang dihasilkan selama periode waktu tertentu terhadap energi matahari yang

diterima selama periode waktu yang sama, disebut sebagai kinerja kolektor [8] dengan persamaan sebagai berikut:

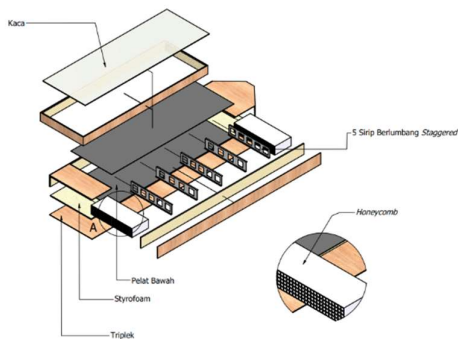
$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{I_T A_c} \quad (5)$$

$\eta$  = Efisiensi (%)  
 $A_c$  = Luas penampang kolektor (m<sup>2</sup>)

### 3. Metode Penelitian

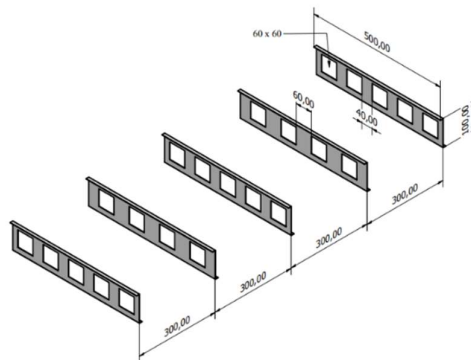
Penelitian ini akan menggunakan metode eksperimental, Rancangan dan produksi kolektor surya pelat datar yang telah dimodifikasi dengan penambahan sirip melintang berongga berbentuk yang ditempatkan secara bergantian di bawah pelat penyerap. Kemudian, alat pengukuran akan dipasang pada titik-titik tertentu pada kolektor untuk mengumpulkan data.

Kolektor surya ini terbagi menjadi dua bagian. Bagian atas berfungsi untuk menyerap radiasi matahari yang masuk melalui kaca dan mengarahkan ke pelat absorber. Sedangkan bagian bawah merupakan ruang aliran fluida, yang terdiri dari pelat absorber atas, pelat bawah, dan sirip berongga yang tersusun secara staggered melintang pada jalur aliran fluida. Konstruksi tersebut dilapisi dengan triplek dan styrofoam. Kolektor yang dirancang terdapat pada Gambar 1 memiliki volume sebesar 0,15 x 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> dengan dimensi lebar 0,5 m, panjang 1,5 m, dan tinggi 0,2 m. Bagian pelat absorber, pelat bawah, dan sirip berlubang menggunakan pelat besi berketebalan 0,2x10<sup>-2</sup> m. Kaca yang digunakan adalah kaca transparan dengan ketebalan 0,5x10<sup>-2</sup> m. Semua bagian kolektor kecuali kaca dilapisi dengan insulasi yang terdiri dari styrofoam dengan ketebalan 0,1x10<sup>-1</sup> m dan triplek dengan ketebalan 0,4x10<sup>-2</sup> m.



**Gambar 1. Konstruksi kolektor surya pelat datar**

Dalam penelitian ini, Panjang setiap sirip adalah 0.5 m dan lebarnya adalah 0,1 m. Setiap sirip bujur sangkar memiliki rongga dengan diameter yang sama, terdiri dari 5 baris dengan ukuran 0,6x10<sup>-1</sup> m. Terdapat jarak 0,4 x 10<sup>-1</sup> m antara rongga untuk 3 sirip yang memiliki 5 rongga, dan jarak 0,6 x 10<sup>-1</sup> m untuk 2 sirip yang memiliki 4 rongga. Konstruksi dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2. Konstruksi sirip berongga berbentuk bujur sangkar**

Dalam penelitian ini, variasi kecepatan udara disesuaikan dengan laju aliran massa yang memiliki korelasi dengan suhu awal yang tetap pada 32 °C. Perhitungan kecepatan udara dapat dilakukan menggunakan persamaan (3) dengan mempertimbangkan beberapa parameter, antara lain massa jenis udara sebesar 1,2 kg/m<sup>3</sup> pada suhu 32 °C, luas penampang yang dilalui oleh fluida pada pipa sebesar 0,0020258 m<sup>2</sup>, dan laju aliran massa seperti yang tercantum dalam Tabel 1.

**Tabel 1. Perhitungan Kecepatan Udara**

| Luas penampang           | Massa Jenis           | $\dot{m}$   | V        |
|--------------------------|-----------------------|-------------|----------|
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0009 kg/s | 0,4 m/s  |
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0019 kg/s | 0,8 m/s  |
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0023 kg/s | 1,00 m/s |

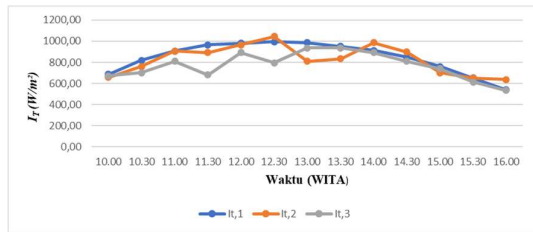
Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan udara di saluran udara keluar kolektor. Untuk mengukur temperatur keseluruhan kolektor surya, Sensor DS18B20 dipasang pada tiga titik pengujian, yakni pada jarak 0,15 m, 0,75 m, dan 1,35 m dari awal.

### 4. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan penelitian dan mengumpulkan data yang dibutuhkan, data tersebut kemudian diolah agar dapat disajikan dalam bentuk grafik dan tabel yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

#### 4.1. Intensitas Radiasi Matahari

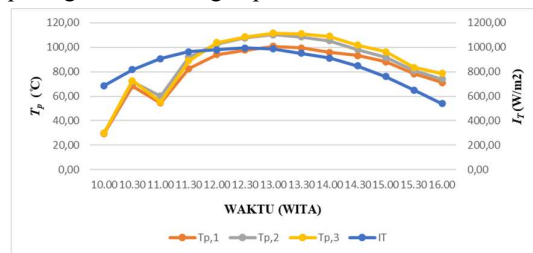
Pengambilan data intensitas radiasi matahari dilakukan pada setiap tahap pengambilan data dari setiap variasi pada kolektor surya. Pada Gambar 4 terdapat  $I_{T,1}-I_{T,3}$  dimana  $I_{T,1}$  adalah intensitas radiasi matahari di tanggal 19 Maret 2024 dengan variasi laju aliran massa sebesar 0,0009 kg/s,  $I_{T,2}$  adalah intensitas radiasi matahari pada tanggal 20 Maret 2024 dengan laju aliran massa sebesar 0,0019 kg/s, dan  $I_{T,3}$  adalah intensitas radiasi matahari pada tanggal 22 Maret 2024 dengan variasi laju aliran massa sebesar 0,0023 kg/s.



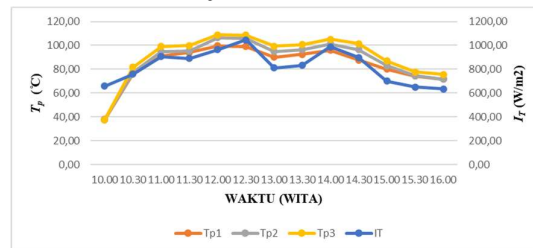
Gambar 4. Perbandingan  $I_T$  dengan waktu pada setiap variasi

#### 4.2. Distribusi Suhu pada Pelat Absorber

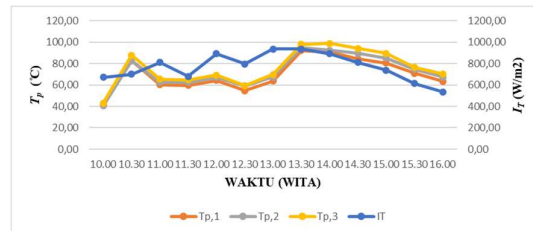
Pelat absorber berfungsi sebagai penyerap dan mengumpulkan panas energi surya. Dalam pengambilan data pada temperatur pelat absorber ( $T_p$ ). Terdapat sensor temperatur pelat absorber titik masuk ( $T_{p,1}$ ) yang bertempat di depan kolektor surya tempat masuk fluida, lalu ada sensor temperatur pelat absorber titik tengah ( $T_{p,2}$ ) pada kolektor, dan sensor temperatur pelat absorber keluar ( $T_{p,3}$ ) berada dekat saluran keluar fluida. Menurut hasil analisa bahwa laju aliran massa terlalu tinggi, maka efisiensi termal kolektor surya dapat menurun karena peningkatan kehilangan panas melalui konveksi.



Distribusi  $T_p$  variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_p$  variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s



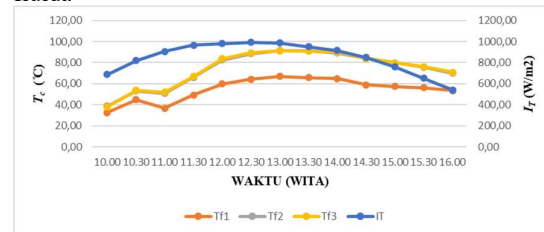
Distribusi  $T_p$  variasi  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

Gambar 5. Distribusi Suhu pada Pelat Absorber

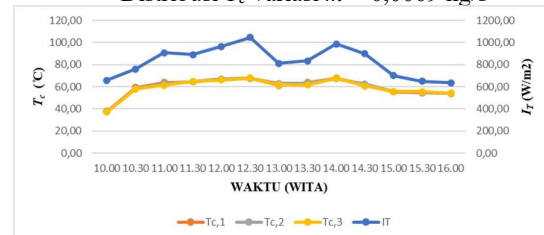
#### 4.3. Distribusi Suhu pada Kaca

Kaca berfungsi sebagai penahan dan meminimalkan kehilangan radiasi ke lingkungan pada pelat absorber. Saat mengambil data pada temperatur kaca ( $T_c$ ). Terdapat tiga sensor temperatur

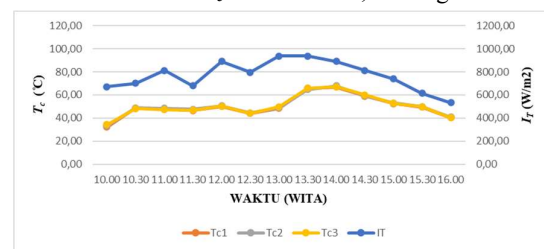
kaca yang digunakan: sensor temperatur kaca pada titik masuk ( $T_{c,1}$ ) yang sejajar dengan saluran masuk, sensor temperatur kaca titik tengah ( $T_{c,2}$ ) yang terletak di tengah kaca, dan sensor temperatur kaca titik keluar ( $T_{c,3}$ ) yang sejajar dengan saluran keluar fluida



Distribusi  $T_c$  variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_c$  variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

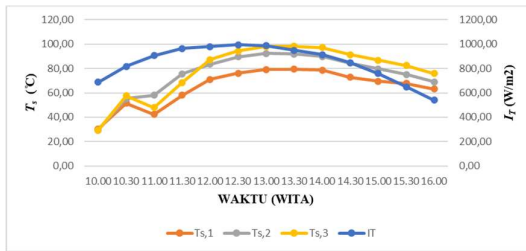


Distribusi  $T_c$  variasi  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

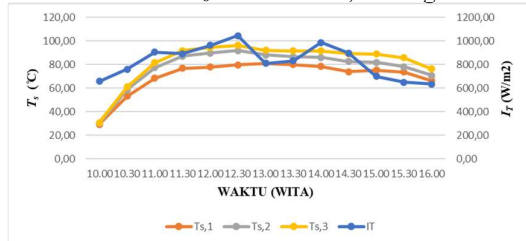
Gambar 6. Distribusi Suhu pada Kaca

#### 4.4. Distribusi Suhu pada Sirip

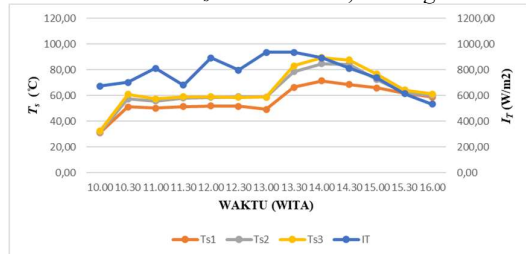
Distribusi panas pada sirip terjadi melalui konduksi dari pelat absorber hingga ke pelat bawah dan Sirip berfungsi sebagai tempat penghambat aliran fluida agar memaksimalkan perpindahan panas konveksi. Dalam pengambilan data pada temperatur sirip ( $T_s$ ) terdapat sensor temperatur sirip titik masuk ( $T_{s,1}$ ) yang bertempat di sirip pertama dari saluran masuk, lalu ada sensor temperatur sirip titik tengah ( $T_{s,2}$ ) yang berada di sirip ketiga, dan sensor temperature titik keluar ( $T_{s,3}$ ) berada di sirip kelima dekat saluran keluar fluida.



Distribusi  $T_s$  variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_s$  variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

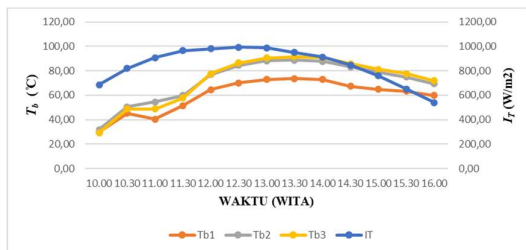


Distribusi  $T_s$  variasi  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

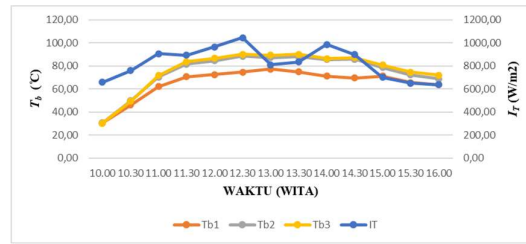
**Gambar 7. Distribusi Suhu pada Sirip**

#### 4.5 Distribusi Suhu pada Pelat Bawah

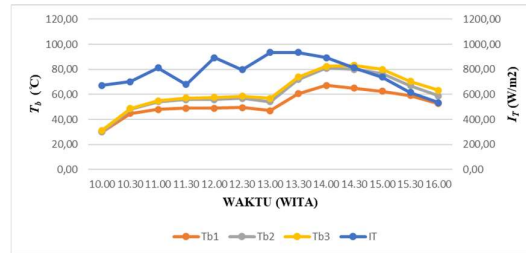
Suhu pada pelat sirip akan mengalami konduksi hingga mencapai bagian pelat bawah. Dalam proses pengambilan data pada temperatur pelat bawah ( $T_b$ ), terdapat tiga sensor temperatur yang digunakan: sensor temperatur pelat bawah pada titik masuk ( $T_{b,1}$ ) yang terletak di depan kolektor surya di tempat masuk fluida, sensor temperatur pelat bawah pada titik tengah ( $T_{b,2}$ ) yang tepat berada di tengah kolektor, dan sensor temperatur pelat bawah pada titik keluar ( $T_{b,3}$ ) yang dekat dengan saluran keluar fluida.



Distribusi  $T_b$  variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_b$  variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

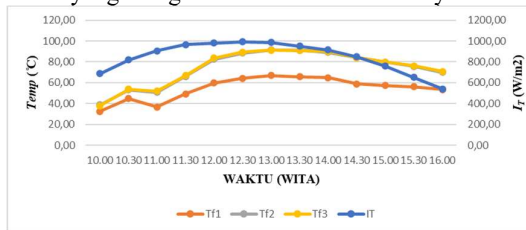


Distribusi  $T_b$  variasi  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

**Gambar 8. Distribusi Suhu pada Pelat Bawah**

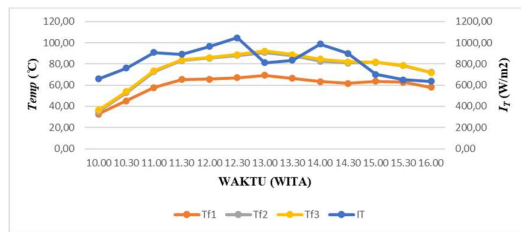
#### 4.6 Distribusi Suhu pada Aliran Fluida

Ada tiga sensor suhu fluida yang digunakan dalam sistem ini. Sensor suhu fluida pada titik masuk ( $T_{f,1}$ ) terletak di saluran masuk fluida di antara *honeycomb* dan sirip pertama. Kemudian, sensor suhu fluida pada titik tengah ( $T_{f,2}$ ) berada di antara sirip kedua dan ketiga, tepat di tengah kolektor. Terakhir, sensor suhu fluida pada titik keluar ( $T_{f,3}$ ) terletak di saluran keluar fluida. Suhu fluida di saluran keluar cenderung lebih tinggi daripada suhu fluida yang memasuki kolektor surya karena adanya perpindahan panas melalui konduksi melalui pelat absorber, sirip, dan pelat bawah. Proses ini diikuti dengan perpindahan panas secara konveksi dengan fluida yang mengalir di dalam kolektor surya.

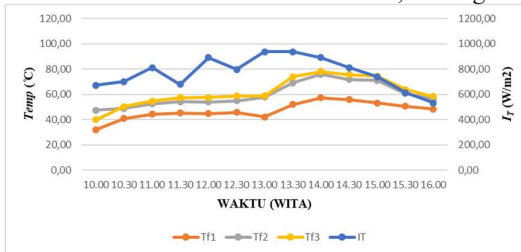


Distribusi aliran fluida variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s





Distribusi aliran fluida variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s



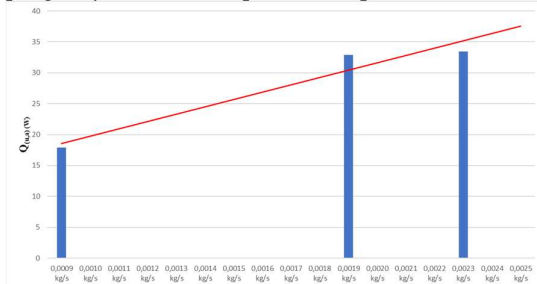
Distribusi aliran fluida variasi  $\dot{m} = 0,0023$  kg/sberben

**Gambar 9. Distribusi Suhu pada Aliran Fluida**

#### 4.7 Unjuk Kerja Kolektor Surya

##### 4.7.1 Energi Berguna

Dari data yang diukur, dilakukan perhitungan dan ditemukan bahwa energi berguna ( $Q_{(u,a)}$ ) dari kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun secara staggered lebih tinggi saat laju aliran massa sebesar 0,0023 kg/s dibandingkan dengan laju aliran massa sebesar 0,0009 kg/s dan 0,0019 kg/s. Penyebabnya adalah faktor pengali yang terkait dengan rumus energi berguna ( $Q_{(u,a)}$ ), di mana semakin besar laju aliran massa ( $\dot{m}$ ), semakin besar juga faktor pengalinya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 10.

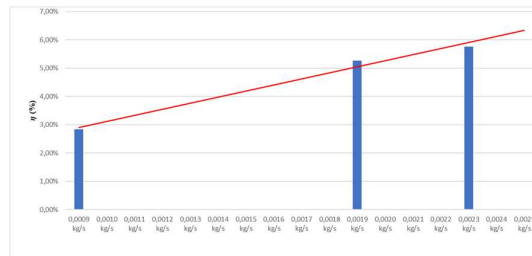


**Gambar 10. Grafik Rata-Rata  $Q_{(u,a)}$  dengan Variasi Laju Aliran Massa**

##### 4.7.2 Efisiensi

Dari data yang diukur dan energi berguna pada setiap waktu, dilakukan perhitungan efisiensi kolektor surya. Ditemukan bahwa efisiensi kolektor surya pada laju aliran massa 0,0023 kg/s lebih tinggi daripada pada laju aliran massa total 0,0009 kg/s dan 0,0019 kg/s. Penyebabnya adalah faktor energi berguna ( $Q_{(u,a)}$ ) yang terkait dengan rumus efisiensi ( $\eta$ ), di mana energi berguna memiliki hubungan langsung dengan efisiensi; semakin besar laju aliran massa ( $\dot{m}$ ), semakin besar pula efisiensinya. Selain itu, efisiensi juga berbanding terbalik dengan intensitas matahari ( $I_T$ ), di mana semakin besar

intensitas matahari, semakin kecil efisiensinya. Ini dapat diamati pada Gambar 11.



**Gambar 10. Grafik Rata-Rata  $\eta$  dengan Variasi Laju Aliran Massa**

#### 5. Kesimpulan

Dari temuan penelitian tentang kolektor surya pelat datar yang diperkuat dengan sirip melintang berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun secara *staggered*, beberapa kesimpulan dapat ditarik, antara lain:

1. Dalam pengujian kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *staggered* ditemukan adanya peningkatan intensitas radiasi matahari yang mempengaruhi peningkatan dan penyebaran temperatur di setiap komponen kolektor surya. Intensitas radiasi matahari tertinggi diperoleh pada variasi  $\dot{m}_2$  di pukul 12:30 yaitu 1045,32 W/m<sup>2</sup> dan intensitas radiasi matahari terendah diperoleh pada variasi  $\dot{m}_3$  di pukul 16:00 yaitu 533,63 W/m<sup>2</sup>.
2. Energi berguna tertinggi diperoleh pada variasi  $\dot{m}_3$  dengan energi berguna sebesar 50,45 W di pukul 13.30 dan efisiensi tertinggi di variasi  $\dot{m}_3$  sebesar 8,93% di pukul 15.00. Sedangkan energi berguna dan efisiensi terendah diperoleh pada variasi  $\dot{m}_1$  sebesar 4,93 W di pukul 10.00 dan 0,96% di pukul 10.00.
3. Rata-rata energi berguna dan efisiensi terbesar tercatat pada variasi  $\dot{m}_3$ , dengan nilai masing-masing sebesar 33,47 W dan 5,76.

#### Daftar Pustaka

- [1] Sitorus, T. B., Napitupulu, F. H., & Ambarita, D. H. (2014). **Korelasi Temperatur Udara dan Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Performansi Mesin Pendingin Siklus Adsorpsi Tenaga Matahari** (Vol. 1, Issue 1).
- [2] Maharani, M., & Febrina, L. (2022). **PEMANFAATAN TEKNOLOGI FOTHOVOLTAIC SURYA PADA KAWASAN AGRO-WISATA-HALAL (STUDI KASUS: MULYAHARJA & RANCAMAYA, BOGOR)**. Seminar Nasional Pariwisata Dan Kewirausahaan (SNPK), 1.
- [3] Arikundo, F. R., & Hazwi, M. (2014b). **Rancang Bangun Prototype Kolektor**

**Surya Tipe Plat Datar Untuk Penghasil Panas Pada Pengerinan Produk Pertanian dan Perkebunan.** In Jurnal Dinamis (Vol. 8, Issue 4).

- [4] Rahayoe, S. (2017, October 28). **Teknik Pengerinan.** Departemen Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada.
- [5] Kansara, R., Pathak, M., & Patel, V. K. (2021). **Performance assessment of flat-plate solar collector with internal fins and porous media through an integrated approach of CFD and experimentation.** International Journal of Thermal Sciences, 165. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106932>
- [6] Astawa, K. (2015). 22789-1-44440-1-10-20160728. **Pengaruh Penempatan Sirip Berbentuk Segitiga Yang Dipasang Secara Aligned Dan Staggered Terhadap Performansi Kolektor Surya Pelat Datar.**
- [7] Bergman, T. L., Lavine, Adrienne., & Incropera, F. P. (2017). **Fundamentals of heat and mass transfer.**
- [8] Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, Nate. (2020). **Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind.**

|  |   |
|--|---|
|               | <p><b>Agil Yanuar Juliarto,</b> Menempuh studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, mulai pada tahun 2020, dan telah menyelesaikannya pada tahun 2024.</p>   |
| <p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan konversi energi.</p> |   |
|               | <p><b>Ketut Astawa,</b> menyelesaikan studi S1 di Universitas udayana, dan melanjutkan pendidikan S2 di Universitas Brawijaya dan memperoleh gelar magister di bidang konversi energi pada tahun 2006.</p>  |
|               | <p><b>Made Sucipta,</b> menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 1998, melanjutkan pendidikan S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan menyelesaikan studi pada tahun 2001, dan melanjutkan studi S3 di Shibaura Institute of Technology. Made Sucipta memiliki konsentrasi ilmu dalam teknologi hidrogen.</p> |

# ANALISIS PERFORMA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR DENGAN SIRIP MELINTANG BERONGGA DISUSUN *ALIGNED* MENGGUNAKAN ALIRAN *IMPINGING JET*

Zefanya Farel Tulak, Ketut Astawa, Made Sucipta\*

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Peran yang sangat vital dari energi terbarukan, khususnya energi surya, dalam kehidupan manusia tidak dapat dipandang remeh. Salah satu aplikasi yang mencolok adalah dalam sektor pertanian sebagai sumber tenaga untuk proses pengeringan hasil panen. Untuk meningkatkan efektivitas pengeringan menggunakan energi surya, diperlukan alat yang dikenal sebagai kolektor surya. Kolektor ini berfungsi sebagai penyerap radiasi matahari yang kemudian diubah menjadi energi panas dan disalurkan ke fluida kerja. Untuk memaksimalkan transfer panas ke fluida kerja, dilengkapi dengan sirip pada kolektor surya untuk meningkatkan kapasitasnya dalam menyerap panas yang terperangkap di dalamnya. Penelitian mengenai kolektor surya ini melibatkan penambahan sirip berongga berbentuk bujur sangkar dengan diameter yang lebih kecil, yang ditempatkan di dalamnya, yang memiliki lubang-lubang berbentuk bujur sangkar dan disusun secara sejajar menggunakan aliran impinging jet. Untuk meningkatkan performa kolektor surya, dilakukan variasi laju aliran massa pada suhu 32 °C sebesar 0,0009; 0,0019; dan 0,0023 kg/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kolektor surya dengan sirip berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun secara sejajar menggunakan aliran impinging jet menghasilkan peningkatan dan penyebaran suhu di setiap bagian kolektor surya. Energi berguna tertinggi dicapai pada variasi laju aliran massa sebesar 0,0023 kg/s, dengan jumlah mencapai 67,58 W pada pukul 13.30 dan efisiensi tertinggi tercatat pada pukul 14.00 sebesar 10,02%. Sementara itu, energi berguna terendah terjadi pada variasi laju aliran massa sebesar 0,0009 kg/s sebesar 3,23 W pada pukul 10.00, dan efisiensi terendah terjadi pada variasi laju aliran massa sebesar 0,0019 kg/s pada pukul 10.00 sebesar 1,70%.

Kata kunci: Energi berguna, Efisiensi, Sirip berongga, *Aligned*, *Impinging Jet*, Berongga diameter mengecil.

## Abstract

*The crucial role of renewable energy, particularly solar energy, in human life cannot be underestimated. One notable application is in the agricultural sector as a source of power for crop drying processes. To enhance the effectiveness of solar drying, a device known as a solar collector is required. This collector functions as an absorber of solar radiation, which is then converted into heat energy and transferred to a working fluid. To maximize heat transfer to the working fluid, fins are added to the solar collector to increase its capacity in absorbing trapped heat. Research on these solar collectors involves the addition of hollow fins in the form of square-shaped triangles with smaller diameters, placed inside, arranged in parallel using an impinging jet flow. To enhance the performance of the solar collector, variations in mass flow rates at a temperature of 32 °C are applied, namely 0.0009; 0.0019; and 0.0023 kg/s. The research results indicate that the use of solar collectors with hollow square-shaped fins arranged in parallel using an impinging jet flow leads to an increase and distribution of temperature across each component of the solar collector. The highest useful energy is achieved at a mass flow rate variation of 0.0023 kg/s, with a value of 67.58 W at 13:30, and the highest efficiency is recorded at 14:00 at 10.02%. Meanwhile, the lowest useful energy is observed at a mass flow rate variation of 0.0009 kg/s, with a value of 3.23 W at 10:00, and the lowest efficiency is observed at a mass flow rate variation of 0.0019 kg/s at 10:00, at 1.70%.*

Keywords: Useful energy, Efficiency, Hollow fin, *Aligned*, *Impinging Jet*, Hollow reduced diameter.

## 1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, energi terbarukan, terutama energi surya, telah menjadi sangat penting dalam kehidupan manusia. Salah satu manfaatnya adalah dalam mengurangi dampak pemanasan global dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Contoh pemanfaatannya dapat ditemukan dalam sektor pertanian. Proses pengolahan hasil pertanian pascapanen memiliki peran sentral dalam kehidupan masyarakat Indonesia dan juga memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian negara. Dalam sektor pertanian, energi surya dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk pengeringan hasil panen.

Penggunaan energi surya dalam pengeringan pascapanen bertujuan untuk mengurangi kadar air produk sampai mencapai batas aman agar dapat

disimpan dengan baik. Proses pengeringan produk pertanian ini melibatkan kontak langsung dengan udara hangat pada suhu yang relatif rendah, berkisar antara 35 hingga 80 °C, dengan target penurunan kadar air sebesar 6-10% [1]. Namun, dalam praktiknya, pengeringan dengan metode ini masih memiliki kekurangan karena cenderung mengurangi kualitas hasil panen akibat pencampuran dengan debu dan kotoran [2]. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efektivitas pengeringan pascapanen dengan menggunakan energi matahari, diperlukan pengembangan alat yang mampu mempercepat proses pengeringan sambil menjaga kualitas hasil panen. Salah satu solusi yang diharapkan adalah melalui penggunaan pengumpul panas atau kolektor surya.

Kolektor surya adalah sebuah perangkat perpindahan panas yang menghasilkan energi termal

dengan menggunakan radiasi matahari sebagai sumber energi utama [3]. Secara keseluruhan, kolektor surya umumnya tersedia dalam berbagai jenis, tetapi yang paling umum yaitu jenis pelat datar.

Fungsi dasar kolektor surya dimulai dengan proses penyerapan radiasi matahari oleh absorber. Selanjutnya, panas yang dihasilkan dialirkan ke fluida kerja untuk penggunaan lebih lanjut [4]. Absorber digunakan untuk menyerap energi radiasi surya yang telah mencapai permukaan absorber dengan efisiensi maksimum, kemudian energi tersebut dipindahkan ke fluida. Kolektor surya pelat datar memiliki dua aliran fluida, yaitu aliran di atas absorber dan aliran di bawah absorber. Aliran fluida di atas absorber memiliki kekurangan yaitu dapat menyebabkan kehilangan panas konvektif ke lingkungan melalui kaca. Sedangkan aliran di bawah absorber belum maksimal karena panas yang terserap tidak merata ke fluida [5]. Untuk meminimalisir kekurangan aliran di bawah absorber tersebut, maka perlu ditambahkan sirip.

Penggunaan sirip berbentuk segitiga yang dipasang secara sejajar pada penelitian sebelumnya telah memengaruhi kinerja kolektor surya pelat datar [6]. Tetapi pada penelitian tersebut belum maksimal dikarenakan sirip berbentuk segitiga belum bisa mendistribusikan kalor dari pelat absorber ke bagian bawah kolektor surya.

Penambahan sirip pada kolektor surya berfungsi untuk memaksimalkan dalam menangkap panas yang terjebak dalam kolektor surya (Astawa & Tenaya, 2022). Terdapat dua posisi dalam peletakan sirip pada kolektor surya yaitu searah dengan fluida dan secara melintang. Penggunaan sirip dengan posisi searah dengan fluida menyebabkan konveksi tidak sempurna karena fluida akan mudah lewat atau tidak terhambat sehingga panas yang diserap fluida tidak maksimal untuk kolektor yang pendek. Sedangkan dengan posisi melintang, fluida yang lewat akan terhambat dan panas yang terperangkap dapat diserap dengan maksimal [7].

Sirip melintang pada aliran bawah absorber dapat ditambahkan sampai menyentuh pelat bawah, sehingga disamping panas dari absorber dipindahkan ke fluida juga akan terjadi konduksi panas ke pelat bawah. Untuk aliran fluida, maka sirip itu diberikan laluan untuk aliran fluida yang berbentuk bujur sangkar. Model laluan ini dapat dibuat dengan diameter yang mengecil berfungsi sebagai nosel sehingga aliran fluida mengenai permukaan sirip, menghasilkan aliran *impinging jet*. *Impinging jet* itu sendiri adalah proses perpindahan panas di mana aliran fluida dialirkan melalui lubang menuju permukaan datar dengan sudut tertentu yang memiliki perbedaan temperatur [8].

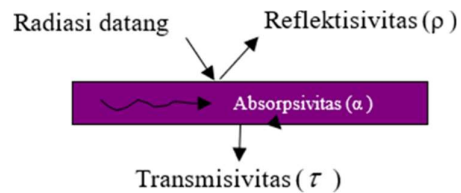
Dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian kali ini akan memodifikasi sirip dengan posisi melintang dan bentuk lubang yang bertujuan mengetahui pengaruh penambahan sirip berongga berbentuk bujur sangkar secara *aligned* yang diharapkan pemanfaatan dan perpindahan panas yang

terjadi di dalam kolektor surya bisa lebih maksimal dan juga dapat meningkatkan unjuk kerja yang dihasilkan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana penyebaran suhu, transfer panas, dan kinerja efisiensi pada kolektor surya pelat datar yang diperbaiki dengan sirip berongga berbentuk bujur sangkar, yang diposisikan secara sejajar menggunakan aliran *impinging jet*.

## 2. Dasar Teori

Radiasi matahari merupakan energi yang dipancarkan oleh matahari dalam bentuk sinar dan panas, yang telah ada sejak awal terbentuknya kehidupan. Kehidupan di Bumi tidak dapat terjadi tanpa kehadiran energi surya ini. Pada radiasi surya akan mengalami tiga proses radiasi ketika mengenai permukaan, yaitu pemantulan (*reflection*), penyerapan (*absorption*), dan transmisi (*transmission*), seperti yang ditunjukkan pada gambar.



Gambar 1. Radiasi Surya

Radiasi matahari diukur menggunakan *pyranometer* dengan *sensitivity* sebesar  $13,68 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$  dan dibaca menggunakan *Multimeter*. Dari data tersebut bisa dihitung intensitas radiasi matahari sebagai berikut.

$$I_T = \frac{U_{emf}}{s} = \frac{\mu\text{V}}{\text{W}/\text{m}^2} \quad (1)$$

*Impinging jet* adalah proses perpindahan panas di mana aliran fluida dialirkan melalui lubang menuju permukaan datar dengan sudut tertentu yang memiliki perbedaan temperatur [8]. Aliran ini dapat memaksimalkan perpindahan panas konveksi antara fluida dengan permukaan karena turbulensi yang terjadi karena benturan dengan permukaan. *Impinging jet* dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kinerja kolektor surya pelat datar, yaitu alat yang menyerap panas radiasi dan memindahkan panas yang terserap ke fluida kerja.

Laju aliran massa adalah konsep penting dalam berbagai aplikasi teknik dan ilmu pengetahuan, dan dapat mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem [9]. Laju aliran massa merupakan parameter penting dalam mekanika fluida yang menggambarkan seberapa cepat massa fluida bergerak melalui suatu penampang lintasan. Persamaan laju aliran massa yang dipakai adalah [9] :

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

Perhitungan energi yang terserap atau energi yang bermanfaat bagi kolektor surya [10] dapat digunakan persamaan :

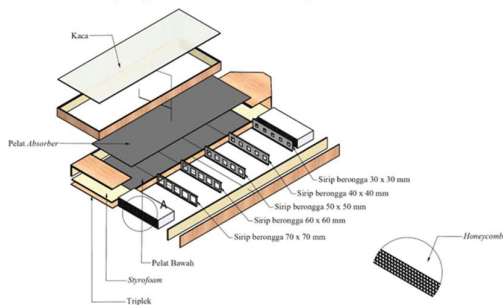
$$q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i) \quad (3)$$

Efisiensi kolektor adalah perbandingan antara jumlah panas yang diserap oleh fluida kerja dengan intensitas matahari yang mencapai kolektor. Lebih lanjut, efisiensi ini juga bisa dijelaskan sebagai rasio antara manfaat yang diperoleh dalam jangka waktu tertentu dengan energi matahari yang diterima dalam rentang waktu yang sama [10] dengan persamaan :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \times 100 = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{I_T A_c} \times 100 \quad (4)$$

**3. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang melibatkan proses penyusunan dan evaluasi berbagai jenis bahan yang terlibat. Eksperimental dimulai dengan tahap perancangan dan produksi kolektor surya pelat datar yang menggunakan sirip melintang dengan lubang berbentuk bujur sangkar berdiameter mengecil dengan aliran *impinging jet* secara aligned dibawah pelat *absorber*. Kemudian dipasang alat ukur pada titik-titik tertentu kolektor, lalu divariasikan kecepatan udara sebesar 0,4; 0,8; 1,0 m/s yang masing-masing berkorelasi dengan laju aliran massa 0,0009; 0,0019; 0,0023 kg/s pada suhu 32 °C. Untuk konstruksi dari kolektor surya pelat datar sebagai berikut.

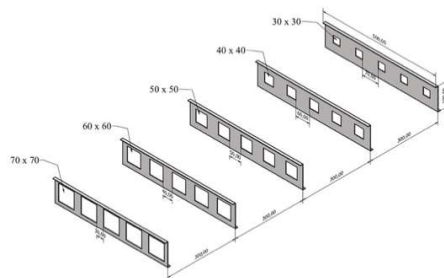


**Gambar 2. Konstruksi Kolektor Surya Pelat Datar**

Prinsip kerja dalam penelitian ini melibatkan beberapa komponen, dimulai dengan penghisapan udara lingkungan menggunakan blower, yang kemudian akan masuk dan disebar oleh honeycomb. Aliran udara ini akan bertabrakan dengan sirip-sirip yang menghalangi arah aliran. Penambahan sirip melintang berongga disusun *aligned* bertujuan untuk meningkatkan luas bidang penyerapan, sehingga aliran fluida akan mengalami perpindahan panas baik melalui konveksi maupun konduksi. Hal ini membuat aliran fluida yang keluar dari kolektor menjadi lebih panas. Dengan ukuran lubang yang mengecil akan berfungsi sebagai nosel yang menghasilkan aliran *impinging jet* diharapkan fluida yang melewati lubang sirip dengan diameter besar ke kecil menyerap panas lebih lama agar suhu yang dihasilkan akan lebih tinggi.

Menggunakan sirip berbentuk bujur sangkar yang melintang ditambahkan pada Kolektor surya pelat datar yang disusun dengan aliran yang sejajar. sebanyak lima baris. Panjang sirip adalah 500 mm dan lebarnya adalah 100 mm. Lubang pada masing-masing sirip berbentuk bujur sangkar dengan diameter yang

bervariasi, yaitu 70 x 70 mm, 60 x 60 mm, 50 x 50 mm, 40 x 40 mm, dan 30 x 30 mm. Desain ini dapat dilihat pada gambar.



**Gambar 3. Konstruksi sirip berongga dengan lubang berbentuk bujur sangkar**

Penentuan kecepatan udara bisa didapatkan dari beberapa parameter, yaitu massa jenis udara sebesar 1,2 kg/m<sup>3</sup> pada suhu 32 °C, luas penampang dilalui fluida pada pipa sebesar 0,0020258 m<sup>2</sup>, dan laju aliran massa.

**Tabel 1. Perhitungan Kecepatan Udara**

| Luas penampang           | Massa Jenis           | m           | V       |
|--------------------------|-----------------------|-------------|---------|
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0009 kg/s | 0,4 m/s |
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0019 kg/s | 0,8 m/s |
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0023 kg/s | 1,0 m/s |

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan udara saat memasuki kolektor. Pengukuran suhu dilakukan pada bagian pelat *absorber*, pelat bawah, sirip berongga, kaca, lingkungan, dan udara yang mengalir menggunakan *thermocouple*, yang dipasang pada tiga titik pengujian masing-masing, yaitu mulai dari jarak 0,15 m, 0,75 m, dan 1,35 m. Pemasangan alat ukur tersebut dapat dilihat di gambar.

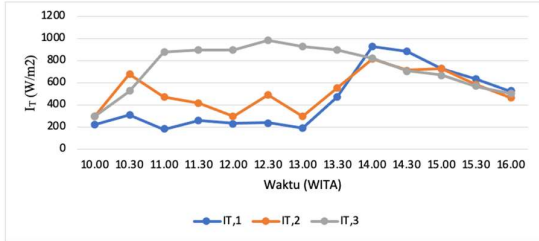
**4. Hasil dan Pembahasan**

Pada pengujian kolektor surya pelat, telah diamati peningkatan intensitas radiasi matahari. Hal ini berdampak pada peningkatan dan penyebaran suhu di semua titik pemasangan sensor suhu.

**4.1. Intensitas Radiasi Matahari**

Pengambilan data Intensitas radiasi matahari dilakukan setiap kali data diambil dari masing-masing variasi pada kolektor surya. Pada gambar dibawah, terdapat  $I_{T,1}$  hingga  $I_{T,3}$  di mana  $I_{T,1}$  mewakili intensitas matahari pada tanggal 23 Maret 2024 pada variasi laju aliran massa 0,0009 kg/s,  $I_{T,2}$  yang mewakili intensitas radiasi matahari pada tanggal 25 Maret 2024 pada variasi laju aliran massa sebesar 0,0019 kg/s, dan  $I_{T,3}$  mewakili intensitas radiasi matahari pada tanggal 26 Maret 2024 pada variasi laju aliran massa sebesar 0,0023 kg/s.

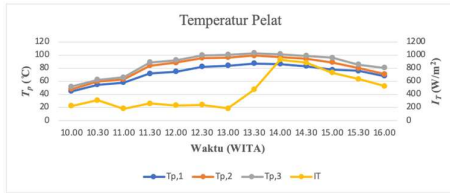




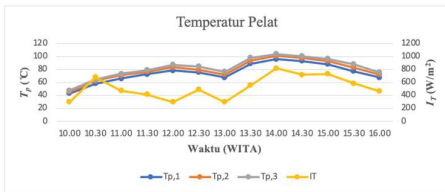
Gambar 4. Perbandingan  $I_r$  Dengan Waktu Pada Setiap Variasi

4.2. Distribusi Suhu Pada Pelat Absorber

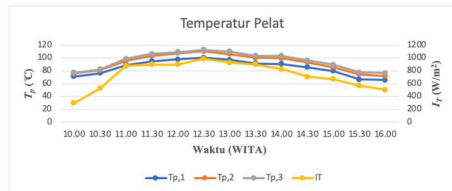
Dalam pengambilan data pada temperatur pelat atas ( $T_p$ ) suhu akan mengikuti dengan grafik dari intensitas radiasi. Sensor  $T_{p,1}$  terletak di depan kolektor surya dimana fluida masuk, kemudian ada sensor  $T_{p,2}$  yang berada di tengah kolektor, dan sensor  $T_{p,3}$  dekat saluran keluar fluida. Temperatur pelat atas cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di tempat lain karena pelat tersebut langsung terpapar radiasi matahari.



Distribusi  $T_p$  dengan  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_p$  dengan  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

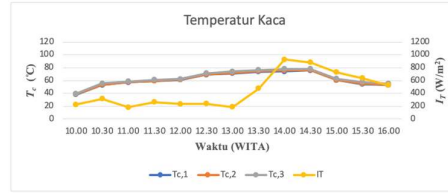


Distribusi  $T_p$  dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

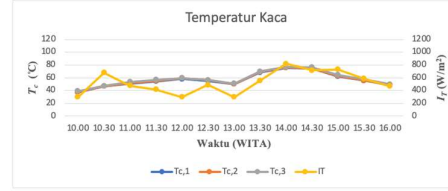
Gambar 5. Distribusi Suhu Pada Pelat Absorber

4.3. Distribusi Suhu Pada Kaca

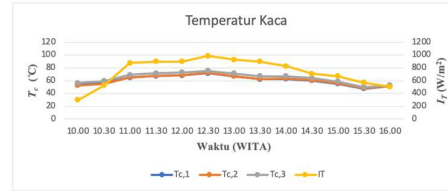
Radiasi matahari akan melewati kaca terlebih dahulu sebelum ditangkap oleh pelat absorber. Terdapat sensor  $T_{c,1}$  yang bertempat sejajar dengan saluran masuk, lalu ada sensor  $T_{c,2}$  yang berada di tengah kaca, dan sensor  $T_{c,3}$  berada sejajar dengan saluran keluar fluida



Distribusi  $T_c$  dengan  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_c$  dengan variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

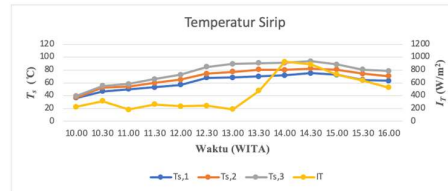


Distribusi  $T_c$  dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

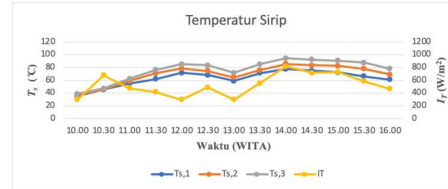
Gambar 6. Distribusi Suhu Pada Kaca

4.4. Distribusi Suhu Pada Sirip

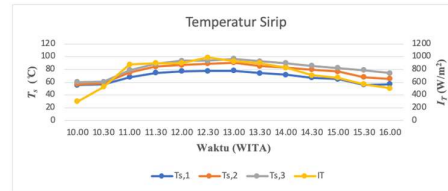
Distribusi suhu pada sirip terjadi secara konduksi dari pelat absorber sampai ke pelat bawah dan juga sirip mengalami perpindahan panas secara konveksi dari aliran fluida di dalam kolektor surya. terdapat sensor  $T_{s,1}$  yang berada di sirip pertama dari saluran masuk, lalu terdapat sensor  $T_{s,2}$  yang berada di sirip ketiga, dan sensor  $T_{s,3}$  berada di sirip kelima dekat saluran keluar fluida.



Distribusi  $T_s$  dengan variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_s$  dengan  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s



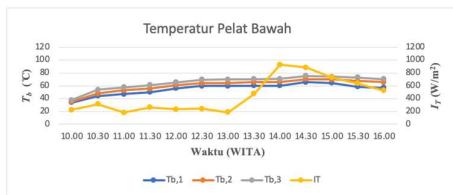
Distribusi  $T_s$  dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

Gambar 7. Distribusi Suhu Pada Sirip

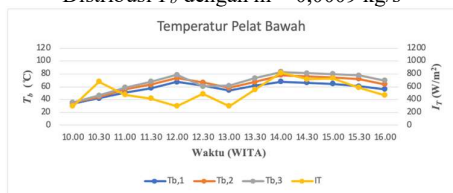


#### 4.5. Distribusi Suhu Pada Pelat Bawah

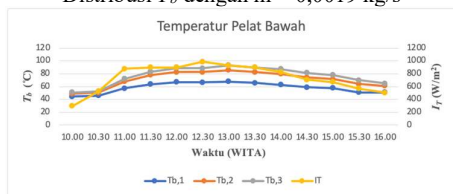
Pada pelat bawah terjadi perpindahan panas konduksi dari sirip dan konveksi dari aliran fluida dalam kolektor. Terdapat sensor  $T_{b,1}$  yang bertempat di depan kolektor surya tempat masuk fluida, lalu ada sensor  $T_{b,2}$  yang tepat berada di tengah kolektor, dan sensor  $T_{b,3}$  berada dekat saluran keluar fluida.



Distribusi  $T_b$  dengan  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_b$  dengan  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

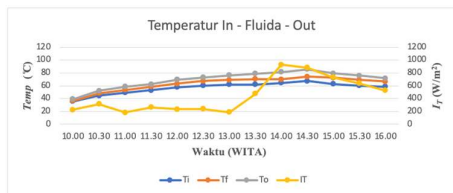


Distribusi  $T_b$  dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

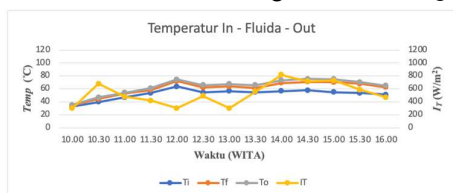
Gambar 8. Distribusi Suhu Pada Pelat Bawah

#### 4.7. Distribusi Suhu Pada Aliran Fluida

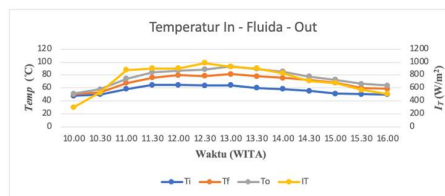
Dalam kolektor surya, aliran fluida mengalami perpindahan panas konveksi dari sirip, pelat absorber, dan pelat bawah. Terdapat sensor *temperature in* ( $T_i$ ) yang bertempat di saluran masuk fluida dekat *honeycomb*, lalu ada sensor temperatur fluida ( $T_j$ ) yang berada di antara sirip kedua dan ketiga tepat di tengah kolektor, dan sensor *temperature out* ( $T_o$ ) berada di saluran keluar fluida.



Distribusi aliran fluida dengan  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi aliran fluida dengan  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

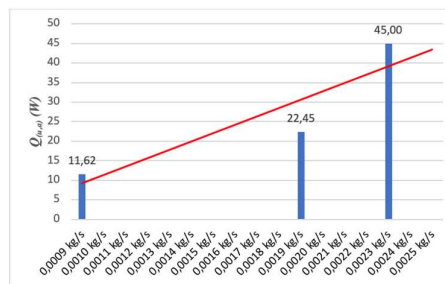


Distribusi aliran fluida dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

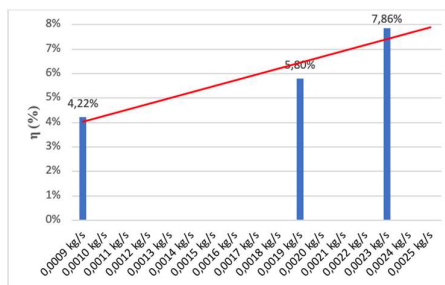
Gambar 9. Distribusi Suhu Pada Aliran Fluida

#### 4.8. Rata-Rata Perhitungan Energi Berguna dan Efisiensi Pada Kolektor

Dengan perhitungan dari data pada pengujian di  $\dot{m} = 0.0009$  kg/s; 0.0019 kg/s; 0.0023 kg/s didapat rata-rata energi berguna dan efisiensi sebagai berikut.



Gambar 10. Grafik rata-rata  $Q_{(u,a)}$  dengan variasi laju aliran massa



Gambar 11. Grafik rata-rata efisiensi dengan variasi laju aliran massa

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi berguna dan efisiensi yang diperoleh dari kolektor surya pelat datar dengan sirip berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun secara sejajar menggunakan aliran impinging jet, dengan variasi laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) sebesar 0,0023 kg/s, lebih tinggi dibandingkan dengan variasi laju aliran massa 0,0009 kg/s, dan 0,0019 kg/s. Kenaikan ini disebabkan oleh korelasi yang sebanding lurus antara energi berguna ( $Q_{(u,a)}$ ) dan efisiensi ( $\eta$ ), di mana semakin tinggi laju aliran massa, semakin tinggi juga energi berguna dan efisiensi kolektor surya. Sebagai hasilnya, efisiensinya meningkat. Efisiensi juga berbanding terbalik dengan Intensitas Matahari ( $I_T$ ), semakin besar intensitas matahari maka semakin kecil efisiensinya.

#### 5. Kesimpulan

Hasil evaluasi dari pengujian kolektor surya pelat datar yang dilengkapi dengan sirip berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun sejajar

menggunakan aliran impinging jet menunjukkan bahwa terjadi peningkatan dalam penyebaran suhu temperatur di setiap bagian kolektor surya sebagai akibat dari peningkatan intensitas radiasi matahari. Intensitas radiasi matahari mencapai puncaknya pada variasi  $\dot{m}_3$  pada pukul 12.30 WITA, mencapai 986,84 W/m<sup>2</sup>, sementara intensitas terendah tercatat pada variasi  $\dot{m}_1$  pada pukul 13.00 WITA, sebesar 190,06 W/m<sup>2</sup>. Energi berguna tertinggi dicapai pada variasi  $\dot{m}_3$ , dengan jumlah mencapai 67,58 W pada pukul 13.30 WITA, sementara efisiensi tertinggi tercatat pada variasi  $\dot{m}_3$ , mencapai 10,02% pada pukul 14.00 WITA. Di sisi lain, pada variasi  $\dot{m}_1$  tercatat energi berguna terendah sebesar 3,23 W pada pukul 10.00 WITA, dan efisiensi terendah terjadi pada variasi  $\dot{m}_2$  sebesar 1,70% pada pukul 10.00 WITA. Rata-rata energi berguna dan efisiensi keseluruhan ditemukan pada variasi  $\dot{m}_3$ , dengan nilai masing-masing sebesar 45,00 W dan 7,86%.

#### Daftar Pustaka

- [1] Popovska, S. (2011). **Drying of Agricultural Products With Geothermal Energy**. Geothermal Direct Used, 1(1), 11,
- [2] Tando, A., Himran, S., Magister, M., Mesin, T., Pascasarjana, P., Mesin, D. T., Teknik, F., & Indonesia, U. M. (2021). **Analisis Unjuk Kerja Alat Pengereng Gabah Menggunakan Kolektor Surya Pelat Datar dan Pelat Bergelombang**. Jurnal Teknik Mesin, 3(2), 1–7.
- [3] Sucipta, M., Astawa, K., & Dharmawan, A. A. K. A. (2012). **Performansi Kolektor Surya Tubular Terkonsentrasi Dengan Pipa Penyerap Dibentuk Anulus Dengan Variasi Posisi Pipa Penyerap**. Jurnal Energi Dan Manufaktur, 5(1), 1–6.
- [4] Yonanda, A., & Amrizal, D. (2021). **Karakteristik Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Spiral Menggunakan Metode Simulasi CFD Characteristics a Spiral Flat Plate Solar Collectors Using CFD Simulation Method**. Open Science and Technology, 01(01), 2776–169.
- [5] Mone, K., Jafri, M., & Tarigan, B. V. (2014). **Analisis Efisiensi Kolektor Surya Pelat Gelombang V Terhadap Variasi Tinggi Gelombang dan Tipe Aliran Udara**. LONTAR Jurnal Teknik Mesin ..., 01(01), 51–54.
- [6] Astawa, K., & Suarnadwipa, I. N. (2016). **Pengaruh Penempatan Sirip Berbentuk Segitiga Yang Dipasang Secara Aligned Dan Staggered Terhadap Performansi Kolektor Surya Pelat Datar**. Jurnal Energi Dan Manufaktur, 8(2), 189–196.
- [7] Al-Aloosi, W., Alaiwi, Y., & Hamzah, H. (2023). **Thermal performance analysis in a parabolic trough solar collector with a**

**novel design of inserted fins**. Case Studies in Thermal Engineering, 49(August), 103378.

- [8] Astawa, K., & Tenaya, I. G. N. P. (2022). **Analisis performansi kolektor surya pelat datar dengan diameter lubang sirip berbeda sebagai impinging jet**. Jurnal Energi Dan Manufaktur, 14(2), 49.
- [9] Dewantara, D. (2019). **Analisa Dan Perhitungan Laju Aliran Massa Air**. 08(2), 25–30.
- [10] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). **Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind Emeritus 5th edt (Vol. 5)**.

|  |   |
|--|---|
|                | <p><b>Zefanya Farel Tulak</b><br/>Menempuh studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, mulai pada tahun 2020, dan telah menyelesaikannya pada tahun 2024.</p> |
| <p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan konversi energi.</p> |   |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>Ketut Astawa, menyelesaikan studi S1 di Universitas udayana, dan melanjutkan pendidikan S2 di Universitas Brawijaya dan memperoleh gelar magister di bidang konversi energi pada tahun 2006.</p> |
|--|---|

|  |   |
|--|---|
|  | <p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 1998, melanjutkan pendidikan S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan menyelesaikan studi pada tahun 2001, dan melanjutkan studi S3 di Shibaura Institute of Technology. Made Sucipta memiliki konsentrasi ilmu dalam teknologi hidrogen.</p> |
|--|---|

# ANALISIS PERFORMA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR DENGAN SIRIP MELINTANG BERONGGA DISUSUN *STAGGERED* MENGGUNAKAN ALIRAN *IMPINGING JET*

Hunafa Arya Purnama, Ketut Astawa, Made Sucipta\*

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Mayoritas penduduk Indonesia bekerja di sektor pertanian karena Indonesia adalah negara agraris yang memiliki keunggulan berupa lahan yang subur. Dalam sektor ini, salah satu metode pengeringan yang paling kuno dan masih sering digunakan adalah pengeringan langsung. Namun, metode ini memiliki kelemahan, seperti perlu lahan yang luas, hasil pengeringan yang tidak konsisten karena intensitas radiasi matahari yang bervariasi, serta risiko kontaminasi dari mikroorganisme, debu, dan kotoran. Kondisi ini mendorong manusia untuk mencari cara pemanfaatan energi matahari yang lebih efisien untuk pengeringan, seperti penggunaan kolektor surya. Sebuah perangkat kolektor surya memiliki kemampuan untuk menyerap energi panas dari sinar matahari dan mengalirkannya ke fluida kerja. Eksperimen ini dilakukan mengamati perpindahan panas yang terjadi didalam kolektor surya. Untuk meningkatkan unjuk kerja kolektor surya diberikan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *staggered* menggunakan aliran *impinging jet* dengan variasi laju aliran massa 0,0009 ( $\dot{m}_1$ ); 0,0019 ( $\dot{m}_2$ ); dan 0,0023 ( $\dot{m}_3$ ) kg/s pada suhu 32 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kolektor surya tersebut terdapat distribusi suhu dan energi berguna tertinggi pada variasi  $\dot{m}_3$  dengan energi berguna sebesar 39,44 W dan efisiensi tertinggi di variasi  $\dot{m}_2$  sebesar 14,40%. Tetapi energi berguna rata-rata dan efisiensi rata-rata berada pada variasi  $\dot{m}_3$  sebesar 26,53 W dan 5,69%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi laju aliran massa berpengaruh terhadap performa kolektor surya.

Kata kunci: Energi Surya, *Staggered*, *Impinging jet*, Sirip Berongga, Energi Berguna, Efisiensi.

## Abstract

The majority of Indonesians work in the agricultural sector as Indonesia is an agrarian country that has the advantage of fertile land. In this sector, one of the most ancient and frequently used drying methods is direct drying. However, this method has disadvantages, such as the need for large areas of land, inconsistent drying results due to varying solar radiation intensity, as well as the risk of contamination from microorganisms, dust, and dirt. These conditions encourage humans to look for more efficient ways of utilizing solar energy for drying, such as the use of solar collectors. A solar collector device has the ability to absorb heat energy from sunlight and flow it into the working fluid. This experiment was conducted to observe the heat transfer that occurs inside the solar collector. To improve the performance of the solar collector, hollow transverse fins in the shape of a square are arranged *staggered* using *impinging jet* flow with a mass flow rate variation of 0.0009 ( $\dot{m}_1$ ); 0.0019 ( $\dot{m}_2$ ); and 0.0023 ( $\dot{m}_3$ ) kg/s at a temperature of 32 °C. The results showed that in the solar collector, there was the highest temperature distribution and useful energy in the variation of ( $\dot{m}_3$ ) with useful energy of 39.44 W and the highest efficiency in the variation of ( $\dot{m}_2$ ) of 14.40%. But the average useful energy and average efficiency were at kg/s variation ( $\dot{m}_3$ ) of 26.53 W and 5.69%. This shows that the variation of mass flow rate affects the performance of the solar collector.

Keywords: Solar Energy, *Staggered*, *Impinging jet*, Hollow Fin, Useful Energy, Efficiency.

## 1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara agraris sehingga mempunyai keunggulan lahan yang subur. Dengan memanfaatkan lahan-lahan subur tersebut, tak heran jika sejak dahulu kala mayoritas penduduk Indonesia bermatapencaharian dari sektor pertanian. Pengeringan merupakan salah satu teknik pengawetan makanan yang sudah lama ada dan sering digunakan dalam industri ini. Metode pengeringan yang paling umum digunakan hingga kini adalah dengan memanfaatkan sinar matahari secara langsung, yang dikenal sebagai proses penjemuran [1].

Saat ini, pengeringan produk pertanian dan perkebunan masih sering dilakukan dengan memanfaatkan sinar matahari secara langsung. Metode ini melibatkan penempatan objek yang akan dikeringkan di tanah atau lantai di bawah sinar matahari yang terik. Walaupun metode penjemuran ini relatif murah dan gampang dilakukan, tetapi tetap

memiliki kekurangan yaitu kebutuhan lahan yang luas, hasil pengeringan yang tidak sempurna karena intensitas radiasi matahari yang berubah-ubah, adanya kontaminasi dari mikroorganisme, debu, dan kotoran. Hal tersebut mengarahkan manusia untuk pencarian pemanfaatan energi surya untuk pengeringan secara efisien, salah satu contohnya adalah penggunaan kolektor surya [2].

Kolektor surya biasanya dirancang dengan aliran udara sejajar dengan pelat penyerap untuk meningkatkan efisiensi pemanasan. Udara memasuki inlet akan melewati pelat penyerap yang terkena sinar matahari, dan kemudian keluar melalui outlet setelah dipanaskan [3]. Salah satu jenis kolektor surya yang dikenal adalah kolektor surya pelat datar. Kolektor ini menggunakan pelat absorber yang berfungsi menyerap radiasi matahari dan mentransfer panas yang diserap tersebut ke fluida kerja. Penambahan sirip pada kolektor surya berfungsi untuk memaksimalkan dalam menangkap panas yang terjebak dalam kolektor surya

[4]. Untuk sirip melintang diperlukan laluan fluida dengan bentuk tertentu. Kolektor surya pelat datar dengan variasi rongga laluan pada sirip memiliki potensi untuk menyebabkan aliran udara yang memasuki kolektor surya terperangkap lebih lama. Hal ini dapat mengakibatkan penyerapan panas yang lebih besar oleh udara yang beredar di dalam kolektor, sehingga temperatur udara yang keluar dari kolektor akan lebih tinggi [5].

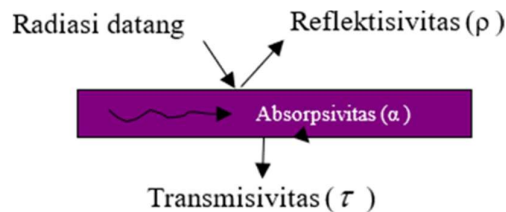
[6] menganalisis kinerja kolektor surya pelat datar dengan penempatan sirip segitiga yang disusun secara sejajar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan sirip segitiga dapat meningkatkan kemampuan penyerapan dan perpindahan panas ke fluida kerja. Namun, sirip berbentuk segitiga yang disusun sejajar ini belum dapat dianggap optimal karena panas belum terserap secara maksimal oleh aliran fluida. Oleh karena itu, diperlukan perubahan bentuk sirip dan lubang untuk meningkatkan efisiensinya.

Berbekal dari penelitian sebelumnya maka pada penelitian ini telah dilakukan modifikasi dengan penambahan sirip berongga bentuk bujur sangkar posisi *staggered* dimana sirip ini berfungsi untuk menambah luas bidang penyerapan dan aliran fluida akan menabrak sirip-sirip mengakibatkan perpindahan panas konveksi dan konduksi yang membuat aliran fluida keluar kolektor akan menjadi lebih panas. Dengan ukuran lubang bervariasi (besar ke kecil) akan berfungsi sebagai nosel yang menghasilkan aliran *impinging jet* dalam kolektor surya dengan lubang sirip yang menyempit dari diameter besar kecil, fluida yang mengalir akan mengalami peningkatan waktu kontak dengan permukaan *absorber*. Ini menyebabkan penyerapan panas yang lebih lama oleh fluida tersebut, sehingga temperatur yang dihasilkan cenderung lebih tinggi. Dengan demikian, energi yang berguna yang dapat dikumpulkan oleh kolektor surya juga meningkat. [7].

Dalam penelitian ini memiliki rumusan masalah sebagai berikut, bagaimana laju perpindahan panas pada kolektor surya, bagaimana efisiensi kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *staggered* menggunakan aliran *impinging jet*.

## 2. Dasar Teori

Radiasi matahari merujuk pada energi yang dipancarkan oleh matahari berupa sinar dan panas. Radiasi matahari sudah berusia setua kehidupan itu sendiri, Kehidupan di permukaan Bumi tidak mungkin terjadi tanpa adanya energi surya. Ketika radiasi surya mencapai permukaan suatu benda, energi radiasi tersebut akan mengalami tiga proses, yaitu pemantulan (reflection), penyerapan (absorption), dan transmisi (transmission), seperti yang ditunjukkan dalam gambar.



Gambar 1. Radiasi Surya

Intensitas radiasi matahari diukur menggunakan *pyranometer* yang memiliki sensitivity sebesar  $13,68 \mu V/Wm^2$  dan di baca menggunakan *Multimeter*. Dari data tersebut bisa dihitung intensitas radiasi matahari sebagai berikut.

$$I_T = \frac{U_{emf}}{S} = \frac{\mu V}{W/m^2} \quad (1)$$

Laju aliran massa adalah salah satu parameter penting dalam perhitungan energi berguna dan efisiensi dari kolektor surya pelat datar. Konsep ini sangat penting dalam berbagai aplikasi teknik dan ilmu pengetahuan, karena dapat mempengaruhi efisiensi dan kinerja system [8]. Laju aliran massa merupakan parameter penting dalam mekanika fluida yang menggambarkan seberapa cepat massa fluida bergerak melalui suatu penampang lintasan. Persamaan laju aliran massa yang dipakai adalah [9] :

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

Pada penelitian ini Kolektor surya menggunakan aliran *impinging jet*, dimana aliran fluida yang mengenai permukaan datar atau melengkung dengan sudut tertentu. Aliran ini dapat meningkatkan perpindahan panas konveksi antara fluida dan permukaan karena adanya turbulensi yang dihasilkan oleh benturan fluida. *Impinging jet* dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan performansi kolektor surya pelat datar, yaitu alat yang menyerap dan memindahkan panas dari energi matahari ke fluida kerja [10].

Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung energi yang dapat diserap atau energi berguna oleh kolektor surya pelat datar adalah.

$$q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

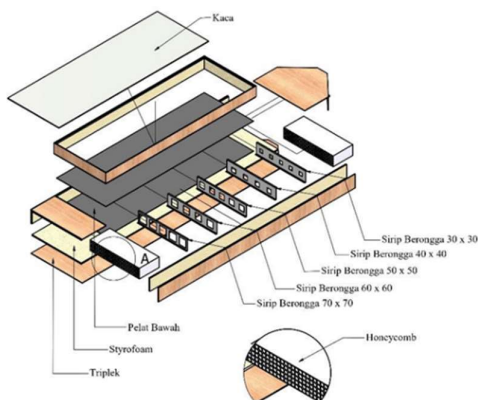
Dalam konteks kolektor surya, energi berguna merujuk pada jumlah energi panas yang dapat digunakan atau dialirkan oleh fluida kerja dari kolektor surya. Hal yang penting dalam menghitung efisiensi kolektor surya adalah membandingkan energi panas yang diserap oleh fluida kerja dengan total radiasi matahari yang diterima oleh kolektor surya [11] :

$$\frac{Q_u}{I_T A_c} \times 100 = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i)}{I_T A_c} \times 100 \quad (4)$$

## 3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, dilakukan pendekatan eksperimental yang melibatkan penyusunan dan evaluasi bahan. Pendekatan eksperimental dimulai dengan merancang dan memproduksi kolektor surya pelat datar yang dilengkapi dengan sirip berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun secara

bergantian menggunakan aliran jet yang menimpa, lalu alat ukur dipasang pada titik-titik tertentu pada kolektor. lalu divariasikan kecepatan udara sebesar 0,4; 0,8; 1,0 m/s yang masing-masing berkorelasi dengan laju aliran massa 0,0009; 0,0019; 0,0023 kg/s pada suhu 32 °C. Untuk konstruksi dari kolektor surya pelat datar sebagai berikut.

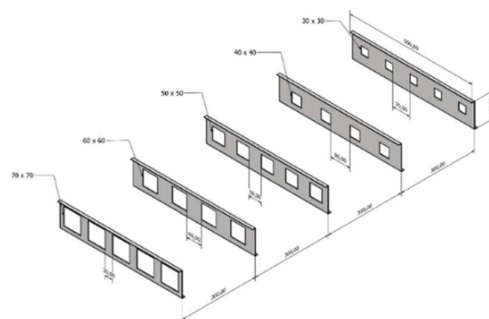


Gambar 2. Konstruksi Kolektor Surya Pelat Datar

Prinsip kerja pada penelitian ini melibatkan beberapa komponen seperti udara lingkungan yang dihisap dari blower akan masuk lalu disebar oleh honeycomb. Aliran udara yang masuk akan bertabrakan dengan sirip yang menghalangi arah aliran. Penambahan sirip melintang berongga disusun staggered ini berfungsi untuk menambah luas bidang penyerapan dan aliran fluida akan menabrak sirip-sirip mengakibatkan perpindahan panas konveksi dan konduksi yang membuat aliran fluida keluar kolektor akan menjadi lebih panas. Dengan ukuran lubang bervariasi (besar ke kecil) akan berfungsi sebagai nosel yang menghasilkan aliran impinging jet diharapkan fluida yang melewati lubang sirip dengan diameter besar ke kecil menyerap panas lebih lama agar suhu yang dihasilkan akan lebih tinggi.

Penentuan kecepatan udara bisa didapatkan dari beberapa parameter, yaitu massa jenis udara sebesar 1,2 kg/m<sup>3</sup> pada suhu 32 °C, luas penampang dilalui fluida pada pipa sebesar 0,0020258 m<sup>2</sup>, dan laju aliran massa.

Sirip berbentuk bujur sangkar yang melintang ditambahkan pada kolektor surya pelat datar disusun secara staggered. Panjang sirip adalah 500 mm dan lebar adalah 100 mm. Lubang pada masing-masing sirip bujur sangkar memiliki diameter yang bervariasi dalam 5 baris, yaitu 70 x 70 mm, 60 x 60 mm, 50 x 50 mm, 40 x 40 mm, dan 30 x 30 mm. Desain ini dapat dilihat pada gambar.



Gambar 3. Konstruksi sirip berongga dengan lubang berbentuk bujur sangkar

Tabel 1. Perhitungan Kecepatan Udara

| Luas penampang           | Massa Jenis           | m           | V        |
|--------------------------|-----------------------|-------------|----------|
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0009 kg/s | 0,4 m/s  |
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0019 kg/s | 0,8 m/s  |
| 0,0020258 m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0023 kg/s | 1,00 m/s |

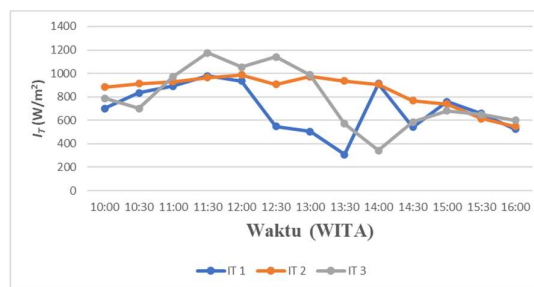
Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan udara saat masuk ke dalam kolektor. Pengukuran suhu pada bagian atas dan bawah pelat absorber, sirip berongga, kaca, lingkungan, dan udara yang mengalir dilakukan menggunakan thermocouple, yang dipasang pada tiga titik pengujian masing-masing, yaitu mulai dari jarak 0,15 m, 0,75 m, dan 1,35 m.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Pada pengujian kolektor surya pelat, telah diamati peningkatan intensitas radiasi matahari. Hal ini berdampak pada peningkatan dan penyebaran suhu di semua titik pemasangan sensor suhu.

##### 4.1. Intensitas Radiasi Matahari

Pengambilan data Intensitas radiasi matahari dilakukan setiap kali data diambil dari masing-masing variasi pada kolektor surya. Pada gambar 4, terdapat  $I_{T,1}$ - $I_{T,3}$  di mana  $I_{T,1}$  mewakili intensitas matahari pada varian laju aliran massa 0,0009 kg/s,  $I_{T,2}$  yang mencerminkan intensitas radiasi matahari pada varian laju aliran massa sebesar 0,0019 kg/s, dan  $I_{T,3}$  mewakili intensitas radiasi matahari variasi m sebesar 0,0023 kg/s.

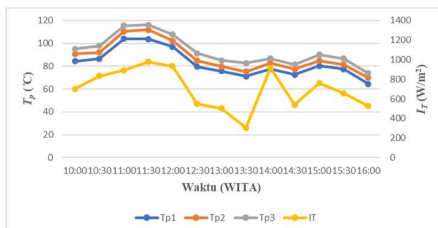


Gambar 4. Perbandingan IT Dengan Waktu Pada Setiap Variasi

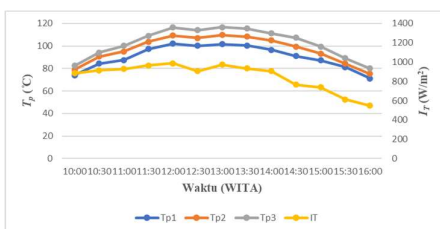


#### 4.2. Distribusi Suhu Pada Pelat Absorber

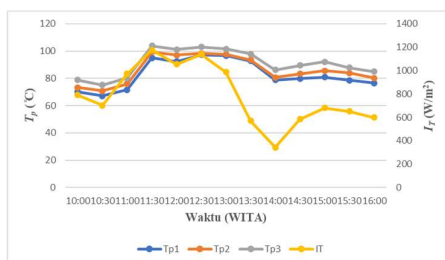
Dalam pengambilan data pada temperatur pelat atas ( $T_p$ ) suhu akan mengikuti dengan grafik dari intensitas radiasi. sensor  $T_{p,1}$  yang berada di depan kolektor surya tempat masuk fluida, lalu ada sensor  $T_{p,2}$  yang berada di tengah kolektor, dan sensor  $T_{p,3}$  berada dekat saluran keluar fluida. Temperatur pelat atas memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan suhu selain temperatur pelat atas dikarenakan pelat ini yang langsung terpapar radiasi matahari.



Distribusi  $T_p$  dengan  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_p$  dengan  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

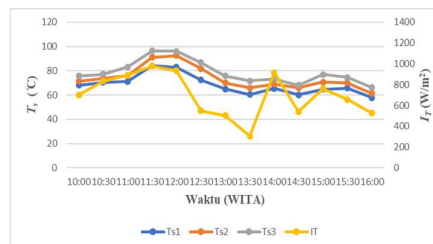


Distribusi  $T_p$  dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

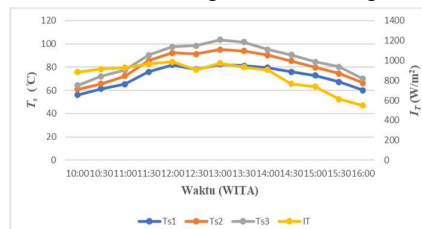
Gambar 5. Distribusi Suhu Pada Pelat Absorber

#### 4.3. Distribusi Suhu Pada Sirip

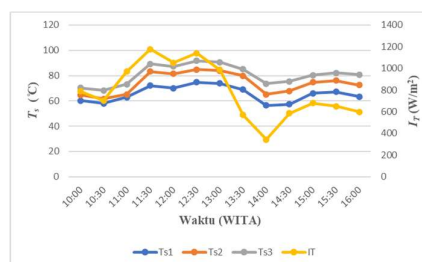
Panas yang didapat oleh pelat absorber akan merambat ke dalam sirip karena adanya perpindahan panas konduksi. Dapat diperhatikan dari gambar bahwa sirip terakhir di saluran keluar memiliki suhu yang lebih tinggi daripada sirip pertama di saluran masuk.



Distribusi  $T_s$  dengan  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_s$  dengan variasi  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s

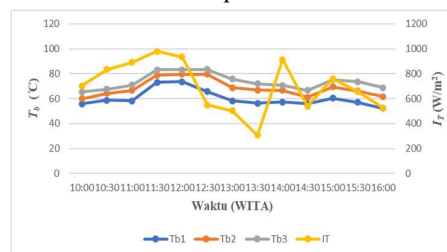


Distribusi  $T_s$  dengan  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

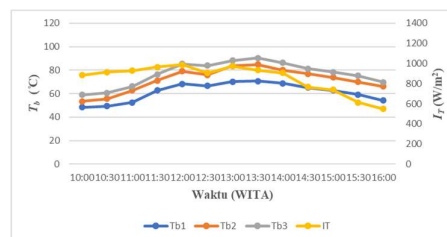
Gambar 6. Distribusi Suhu Pada Sirip

#### 4.4. Distribusi Suhu Pada Pelat Bawah

Pengumpulan data pada suhu pelat bawah ( $T_b$ ) akan dilakukan dengan memonitor grafik intensitas radiasi pada hari itu. Pelat Bawah mendapatkan panas melalui konduksi dari sirip.

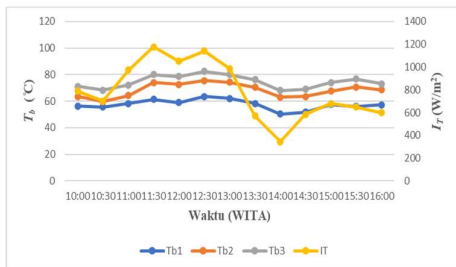


Distribusi  $T_b$  dengan variasi  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s



Distribusi  $T_b$  dengan  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s



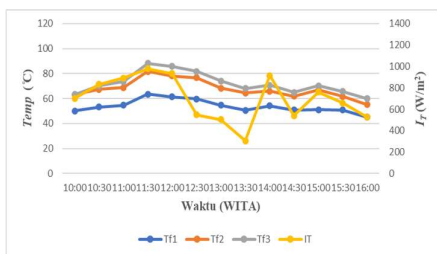


Distribusi Tb dengan  $\dot{m} = 0,0023 \text{ kg/s}$

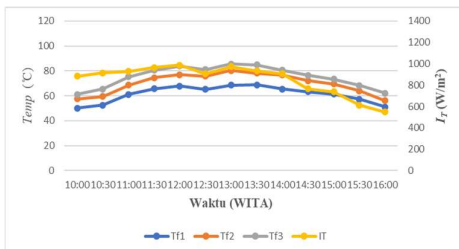
Gambar 7. Distribusi Suhu Pada Pelat Bawah

#### 4.5. Distribusi Suhu Pada Aliran Fluida

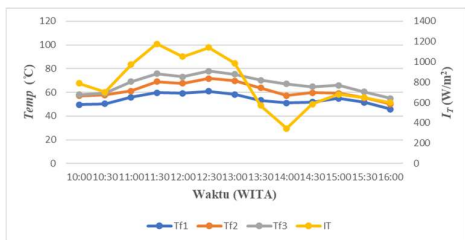
Dalam pengambilan data pada temperatur di aliran fluida suhu akan mengikuti dengan grafik dari intensitas radiasi pada hari itu. Pelat yang sudah mengalami konduksi pada pelat atas, sirip, dan bawah akan mengalami perpindahan panas secara konveksi dengan fluida mengalir di dalam kolektor surya.



Distribusi Tf dengan  $\dot{m} = 0,0009 \text{ kg/s}$



Distribusi Tf dengan  $\dot{m} = 0,0019 \text{ kg/s}$

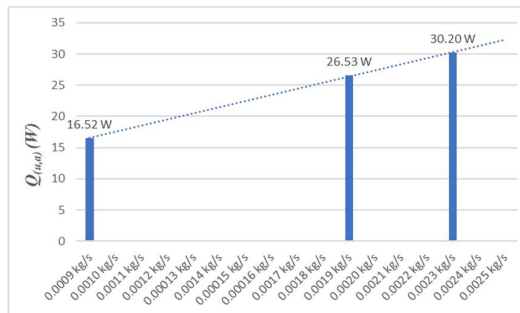


Distribusi Tf dengan  $\dot{m} = 0,0023 \text{ kg/s}$

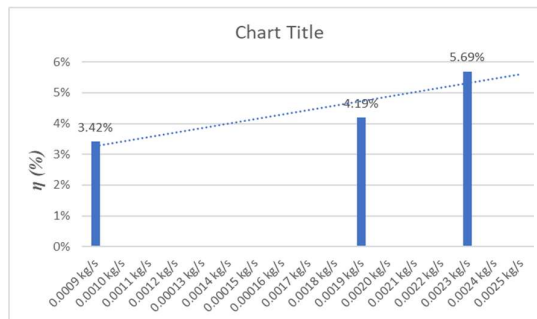
Gambar 8. Distribusi Suhu Pada Aliran Fluida

#### 4.7. Rata-Rata Perhitungan Energi Berguna dan Efisiensi Pada Kolektor

Dari data pada pengujian di  $\dot{m} = 0.0009 \text{ kg/s}$ ;  $0.0019 \text{ kg/s}$ ;  $0,0023 \text{ kg/s}$  didapat rata-rata energi berguna dan efisiensi sebagai berikut.



Gambar 9. Grafik  $Q_{(u,a)}$  rata-rata dengan variasi laju aliran massa



Gambar 10. Grafik efisiensi rata-rata terhadap variasi laju aliran massa

Hasil perhitungan menyimpulkan bahwa energi yang berhasil dimanfaatkan dan efisiensi sebenarnya dari kolektor surya pelat datar dengan variasi aliran massa ( $\dot{m}$ ) sebesar  $0,0023 \text{ kg/s}$  lebih tinggi dari pada variasi laju aliran massa  $0,0009 \text{ kg/s}$ , dan  $0,0019 \text{ kg/s}$ . Hal ini diakibatkan oleh faktor energi berguna ( $Q_{(u,a)}$ ) yang sesuai dengan rumus efisiensi ( $\eta$ ) yaitu energi berguna berbanding lurus dengan efisiensi, semakin tinggi laju aliran massa nya, maka efisiensinya akan meningkat. Efisiensi juga berbanding terbalik dengan Intensitas Matahari ( $I_T$ ), semakin besar intensitas matahari maka semakin kecil efisiensinya.

#### 5. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa, pengujian menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari berpengaruh pada peningkatan dan penyebaran temperatur pada setiap komponen kolektor surya tersebut. Intensitas radiasi matahari tertinggi diperoleh pada variasi  $\dot{m}_3$  di pukul 11:30 yaitu  $1176,90 \text{ W/m}^2$  dan intensitas radiasi matahari terendah diperoleh pada variasi  $\dot{m}_1$  di pukul 13:30 yaitu  $307,02 \text{ W/m}^2$ . Untuk energi berguna tertinggi diperoleh pada variasi  $\dot{m}_3$  dengan energi berguna sebesar  $39,44 \text{ W}$  di pukul 12.30 dan efisiensi tertinggi di variasi  $\dot{m}_3$  sebesar  $14,40\%$  di pukul 14.00. Sedangkan energi berguna dan efisiensi terendah diperoleh pada variasi  $\dot{m}_1$  sebesar  $11,80 \text{ W}$  di pukul 10.00 dan  $2,19\%$  di pukul 14.00, dan energi berguna rata-rata dan efisiensi rata-rata berada pada variasi  $\dot{m}_3$  sebesar  $26.53 \text{ W}$  dan  $5.69\%$ .

## Daftar Pustaka

- [1] Khalil, F., Nelwan, L., & Subrata, I. D. (2016). *Design of Control System for Grain Drying with Solar Collector and Heat Storage*. Jurnal Keteknikan Pertanian, 04(1),
- [2] Aziz, A. (2008). **Seminar Nasional Teknik Kimia Oleo & Petrokimia Indonesia**.
- [3] Astawa, K., & Ngurah Putu Tenaya, I. G. (2022). **Analisis performansi kolektor surya pelat datar dengan diameter lubang sirip berbeda sebagai *impinging jet***. Jurnal Energi Dan Manufaktur.
- [4] Ambara, I. P. R., Tenaya, I. G. N. P., & Suarnadwipa, I. N. (2016). *Performance Analysis of Flat Plate Solar Collector With Ten Fin Same Diameter Arranged in Staggered*.
- [5] Suirya, I. W., Kusuma, I. G. B. W., & Widiyarta, M. (2017). **Analisis Performansi Kolektor Surya Pelat Datar Sirip Berongga**. METTEK, 3.
- [6] Astawa, K., Suarnadwipa, I. N., Gn, I., Dan, T., & Junianto, A. **analisis unjuk kerja kolektor surya pelat datar dengan penambahan sirip berongga berdiameter beda sebagai nosel yang disusun secara *staggered***.
- [7] Astawa, K., & Suarnadwipa, I. N. (2015). **analisa performansi kolektor surya pelat datar dengan aliran *impinging jet* melalui sirip berongga dengan diameter berbeda**. Jurnal Energi dan Manufaktur.
- [8] Dewantara, D. (2019). **Analisa Dan Perhitungan Laju Aliran Massa Air**. 08(2), 25-30.
- [9] Bergman, T. L., Lavine, Adrienne., & Incropera, F. P. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer*.
- [10] Putra. (2015). **Analisis Performansi Kolektor Surya Pelat Datar Dengan Variasi Sirip Berongga**.
- [11] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley.



# ANALISIS PERFORMA KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR DENGAN SIRIP MELINTANG BERONGGA DISUSUN *ALIGNED*

Ahmad Husein Alhafidz, Ketut Astawa, Made Sucipta\*

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Kolektor surya adalah teknologi yang layak dikembangkan di Indonesia karena Indonesia berada pada letak geografis yang sangat mendukung dalam pemanfaatan dan pengembangan energi surya. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengamati perpindahan panas yang terjadi di dalam kolektor surya. Kolektor surya yang diteliti mendapatkan tambahan sirip berongga yang berada dalam kolektor surya dan sirip tersebut diberi lubang berbentuk bujur sangkar dan disusun *aligned* melintang dari arah aliran fluida. Untuk meningkatkan unjuk kerja kolektor surya diberikan variasi berupa laju aliran massa  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$ , dan  $\dot{m}_3$  sebesar 0,0009; 0,0019; dan 0,0023 kg/s pada suhu 32 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kolektor surya tersebut terdapat distribusi suhu dan energi berguna tertinggi pada variasi  $\dot{m}_3$  sebesar 0,0023 kg/s dengan energi berguna sebesar 102,81 W dan efisiensi tertinggi di variasi  $\dot{m}_2$  sebesar 0,0019 kg/s di angka 26,55%. Tetapi energi berguna rata-rata dan efisiensi rata-rata tertinggi berada pada variasi  $\dot{m}_3$  sebesar 0,0023 kg/s di 77,15 W dan 19,78%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi  $\dot{m}$  berpengaruh terhadap peningkatan performa kolektor surya.

Kata kunci: Sirip berongga melintang, Rongga bujur sangkar, *Aligned*, Energi berguna, Efisiensi.

## Abstract

*The solar collector is a decent technology developed in Indonesia because Indonesia is in the global-speaking groundwork in the utilization and development of solar energy. This research uses experimental methods to observe hot transplaces that occur in the solar collector. The solar collector studied earning extra hollow fins that were in the solar collector and the fins were given a long-term hole and washed aligned transverse from the direction of the fluid flow. To increase the solar collector's performance is given a variation in the flow rate of mass  $\dot{m}_1$ ,  $\dot{m}_2$ , and  $\dot{m}_3$  of 0,0009; 0,0019; and 0,0023 kg/s at 32 °C. The results showed that in the solar collector there was a temperature of the highest temperature and energy use in the variation of  $\dot{m}_3$  of 0.0023 kg/s with useful energy of 102,81 w and the highest efficiency in variation  $\dot{m}_2$  of 0.0019 kg/s in number 26,55%. But the average useful energy and highest average efficiency is in variation  $\dot{m}_3$  of 0,0023 kg/s in 77,15 W and 19,78%. This shows that variation  $\dot{m}$  has an effect on improving solar collector performance.*

*Keywords: Transverse hollow finns, Square-shaped holes, Aligned, Usable energy, Efficiency.*

## 1. Pendahuluan

Peran energi dalam kehidupan manusia sangat penting. Dengan pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia, penggunaan energi juga semakin meningkat. Ini memiliki dampak positif dalam berbagai sektor kehidupan manusia, termasuk teknologi pengeringan pertanian [1]. Proses pengeringan produk pertanian umumnya melibatkan udara hangat dengan penurunan kadar air sebesar 6-10% [2]. Walau begitu, penggunaan energi masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil, meskipun persediaannya semakin terbatas di bumi ini.

Dengan peningkatan penggunaan energi dan semakin terbatasnya bahan bakar fosil, manusia terdorong untuk meningkatkan produksi dan teknologi dalam menggunakan sumber energi baru dan terbarukan (EBT). EBT memiliki ketersediaan yang melimpah di alam dan bermanfaat dari perkotaan hingga daerah terpencil. Energi surya merupakan salah satu EBT yang pantas dikembangkan di Indonesia karena kondisi geografisnya sangat mendukung, meskipun penggunaannya masih di bawah 1% dari potensi yang tersedia. [3].

Energi surya dapat dimanfaatkan dan diperluas melalui berbagai teknik, termasuk penggunaan kolektor surya. Kolektor surya beroperasi dengan cara menyerap radiasi matahari oleh bagian penyerapnya, yang kemudian mengubahnya menjadi panas. Panas ini kemudian dialirkan ke fluida kerja untuk digunakan lebih lanjut [4]. Ketika sinar matahari menyentuh kolektor surya, sebagian dipantulkan kembali ke lingkungan, namun sebagian besar diserap oleh *absorber* dan diubah menjadi panas. Panas tersebut kemudian dialirkan ke fluida yang mengalir dalam kolektor surya.

Penambahan sirip pada fluida kerja di bawah pelat absorber dapat memaksimalkan kinerja pengumpulan panas dan distribusi suhu. Permukaan perpindahan panas yang lebih luas akibat penggunaan sirip pada kolektor memungkinkan penyerapan energi surya yang lebih besar dan transfer panas yang lebih efisien ke fluida kerja [5]. Meskipun kinerja perpindahan panas pada kolektor surya meningkat dengan adanya sirip pada aliran fluida, penting untuk memperhatikan bentuk dan posisi sirip yang tepat [6]. Sirip yang melintang terhadap aliran fluida dapat menghambat laju fluida

kerja karena interaksi dengan sirip-sirip lainnya, yang memberikan waktu lebih lama bagi fluida kerja untuk menyerap panas dari *absorber*. Agar sirip yang melintang ini tidak menghalangi aliran fluida, biasanya diberi lubang untuk memungkinkan laluan fluida.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, modifikasi pada kolektor surya ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi distribusi suhu dari pelat absorber ke fluida kerja. Ini dilakukan dengan menggunakan sirip berongga bentuk bujur sangkar meratakan distribusi radiasi surya pada pelat absorber. Perbedaan dalam kecepatan udara yang masuk dan modifikasi mempengaruhi suhu yang optimal dan peningkatan unjuk kerja kolektor surya. Maka dari itu ada beberapa permasalahan yang diteliti, yaitu bagaimana distribusi suhu, laju perpindahan panas, dan efisiensi pada kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *aligned*.

## 2. Dasar Teori

Energi surya energi yang diterima dari matahari dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Selain itu, pemanfaatan energi surya juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara, karena tidak ada proses pembakaran bahan bakar fosil dalam produksi listrik [7]. Pemanfaatan energi surya dapat dilakukan secara lebih efisien dan berkelanjutan dengan teknologi kolektor surya.

Intensitas radiasi matahari diukur menggunakan *pyranometer* dengan sensitivitas sebesar  $13,68 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ . memperoleh data dengan menggunakan *Multimeter*. Berdasarkan data terukur ini, intensitas radiasi matahari dapat dihitung seperti berikut.

$$I_T = \frac{U_{emf}}{S} \quad (1)$$

$I_T$  = Intensitas Radiasi ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $U_{emf}$  = Tegangan Keluaran (V)  
 $S$  = Sensitifitas ( $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ )

Laju aliran massa merupakan parameter penting dalam penentuan seberapa cepat fluida bergerak melalui suatu penampang lintasan menggunakan rumus sebagai berikut [8]:

$$\dot{m} = \rho V A \quad (3)$$

$\dot{m}$  = Laju aliran massa ( $\text{kg}/\text{s}$ )  
 $\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $V$  = Kecepatan udara ( $\text{m}/\text{s}$ )  
 $A$  = Luas permukaan ( $\text{m}^2$ )

Untuk menghitung energi yang diserap atau yang berguna oleh kolektor alat pemanas air tenaga surya, dapat digunakan suatu persamaan :

$$Q_{(u,a)} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (4)$$

$Q_{(u,a)}$  = Energi Berguna (W)  
 $C_p$  = Kapasitas jenis kalor ( $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ )  
 $T_o$  = Suhu masuk ( $^\circ\text{C}$ )  
 $T_i$  = Suhu keluar ( $^\circ\text{C}$ )

Perasamaan (4) ini penting untuk menentukan efisiensi kolektor Surya. Efisiensi merupakan pengukuran rasio energi yang berguna yang

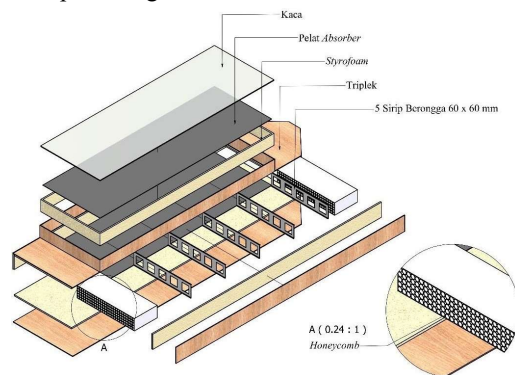
diperoleh selama periode tertentu terhadap energi matahari yang diterima selama periode yang sama [9].

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i)}{I_T A_c} \quad (5)$$

$\eta$  = Efisiensi (%)  
 $A_c$  = Luas penampang kolektor ( $\text{m}^2$ )

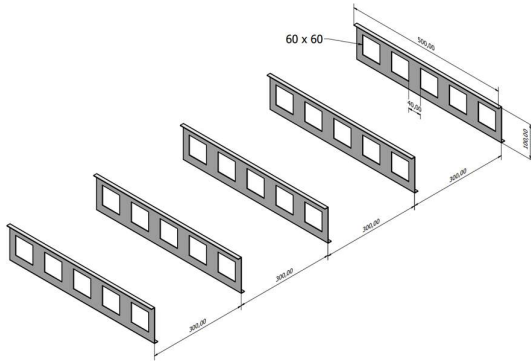
## 3. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja kolektor surya pelat datar guna mengoptimalkan penggunaan energi surya. Dilakukan melalui metode eksperimental, dimulai dari perancangan dan pembuatan kolektor surya dengan penambahan sirip berongga melintang dengan rongga berbentuk bujur sangkar dan susunan yang sejajar di bawah pelat absorber. Alat pengukur kemudian ditempatkan pada beberapa titik pada kolektor. Konstruksi kolektor surya terlihat pada Gambar 1. Volume kolektor yang dirancang sebesar  $0,15 \times 10^3 \text{ m}^3$  dengan lebar kolektor 0,5 m, panjang kolektor 1,5 m, dan tinggi kolektor 0,2 m. Pelat *absorber*, pelat bawah, dan sirip berlubang menggunakan pelat besi dengan ketebalan  $0,2 \times 10^{-2}$  m. Kaca yang dipakai adalah kaca bening dengan ketebalan sebesar  $0,5 \times 10^{-2}$  m. Seluruh bagian kolektor kecuali bagian kaca diberi insulasi yang terdiri dari *styrofoam* dengan ketebalan  $0,1 \times 10^{-1}$  m dan triplek dengan ketebalan  $0,4 \times 10^{-2}$  m.



Gambar 1. Konstruksi kolektor surya pelat datar

Sirip sebanyak 5 buah diantara pelat absorber dan pelat besi bawah memiliki dimensi yang sama persis. Dengan panjang sirip sebesar 0,5 m dan tinggi sirip sebesar 0,1 m. Masing-masing sirip memiliki lubang berbentuk bujur sangkar sebanyak 5 buah dengan jarak antar lubang  $0,4 \times 10^{-1}$  dan dimensi lubang sebesar  $0,6 \times 10^{-1}$  setiap sisi bujur sangkar. Konstruksi lengkap bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Konstruksi sirip berongga berbentuk bujur sangkar

Penelitian ini memvariasikan laju aliran massa dengan suhu awal tetap 32°C. Perhitungan kecepatan udara bisa dilakukan menggunakan persamaan (3) dari beberapa parameter, yaitu massa jenis udara sebesar 1,2 kg/m<sup>3</sup> pada suhu 32°C, luas penampang dilalui fluida pada pipa sebesar 0,0020258 m<sup>2</sup>, dan laju aliran massa seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan Kecepatan Udara

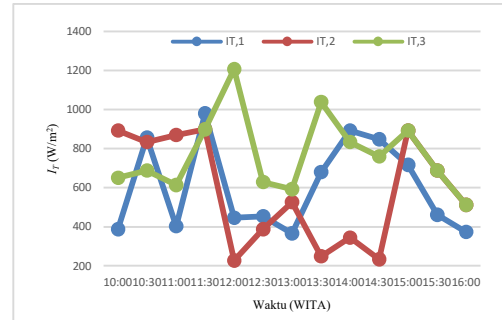
| Luas Penampang                          | Massa Jenis           | $\dot{m}$   | Kecepatan Udara |
|---|-----------------------|-------------|-----------------|
| 0,20258x10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0009 kg/s | 0,4 m/s         |
| 0,20258x10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0019 kg/s | 0,8 m/s         |
| 0,20258x10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> | 1,2 kg/m <sup>3</sup> | 0,0023 kg/s | 1,0 m/s         |

Kecepatan udara diukur pada saluran keluaran udara kolektor dengan *anemometer*. Untuk pengukuran temperatur keseluruhan kolektor surya digunakan Sensor DS18B20, yang dipasang masing-masing pada tiga titik pengujian, yaitu mulai dari jarak 0,15 m, 0,75 m, dan 1,35 m.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### 4.1. Intensitas Radiasi Matahari

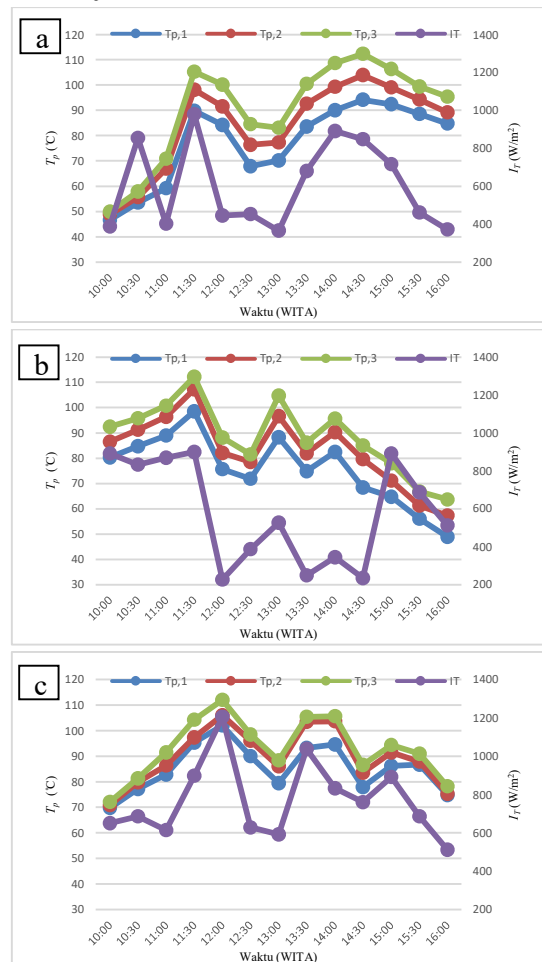
Pengambilan data Intensitas radiasi matahari dilakukan setiap pengambilan data dari masing-masing variasi pada kolektor surya. Pada Gambar 3 terdapat  $I_{T,1}$  yang merupakan intensitas radiasi matahari di tanggal 7 Maret 2024 dengan  $\dot{m}$  sebesar 0,0009 kg/s,  $I_{T,2}$  adalah intensitas radiasi matahari pada tanggal 6 Maret 2024 dengan  $\dot{m}$  sebesar 0,0019 kg/s, dan  $I_{T,3}$  adalah intensitas radiasi matahari pada tanggal 13 Maret 2024 dengan variasi  $\dot{m}$  sebesar 0,0023 kg/s.



Gambar 3. Perbandingan  $I_T$  dengan waktu pada setiap variasi

##### 4.2. Distribusi Suhu pada Pelat Absorber

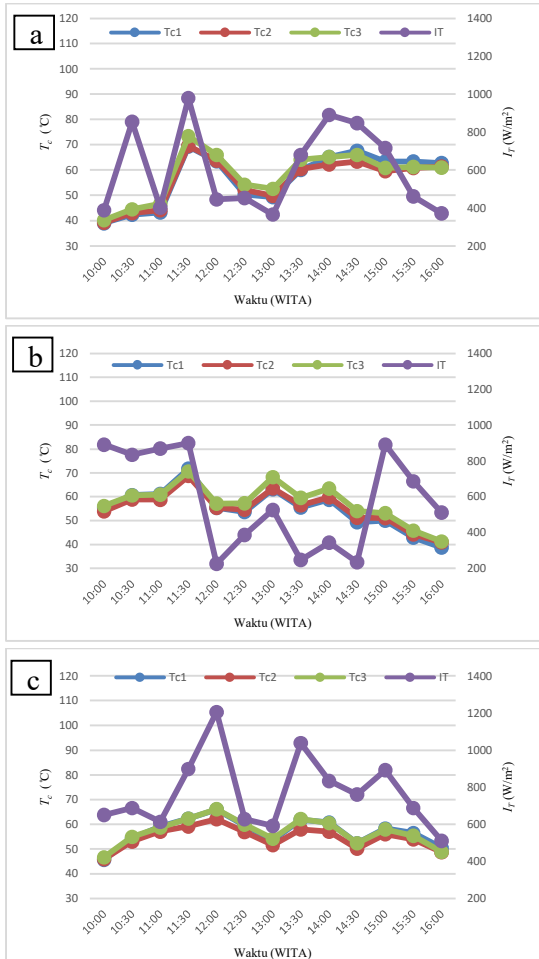
Pelat absorber memiliki kemampuan menerima radiasi matahari dan konduksi dari permukaan atas hingga permukaan Bawah pelat absorber. Pada Gambar 4. terdapat sensor  $T_{p,1}$  yang bertempat di depan kolektor surya tempat masuk fluida, lalu ada sensor  $T_{p,2}$  yang tepat berada di tengah kolektor, dan sensor  $T_{p,3}$  berada dekat saluran keluar fluida.



Gambar 4. Distribusi  $T_p$  dengan variasi (a)  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s (b)  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s (c)  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

### 4.3. Distribusi Suhu pada Kaca

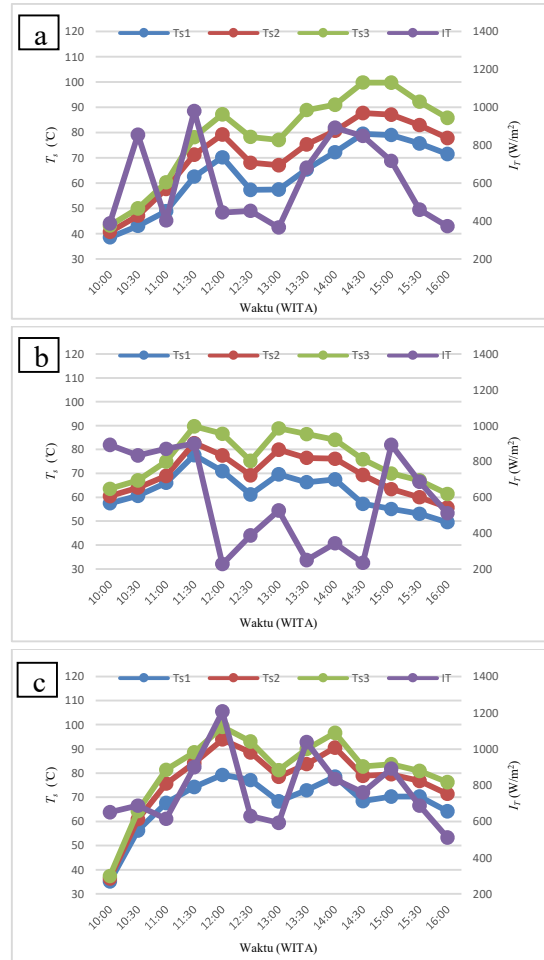
Sebelum radiasi matahari ditangkap langsung oleh pelat *absorber* kaca akan memaksimalkan pemantulan dan meminimalkan hilangnya radiasi ke lingkungan. Pada Gambar 5. terdapat sensor  $T_{c,1}$  yang bertempat sejajar dengan saluran masuk, lalu ada sensor  $T_{c,2}$  yang berada di tengah kaca, dan sensor  $T_{c,3}$  berada sejajar dengan saluran keluar fluida.



Gambar 5. Distribusi  $T_c$  dengan variasi (a)  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s (b)  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s (c)  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

### 4.4. Distribusi Suhu pada Sirip

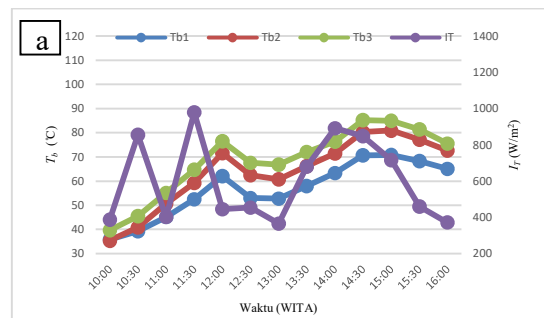
Distribusi pada sirip terjadi secara konduksi dari pelat *absorber* hingga ke pelat Bawah. Sirip juga terjadi konveksi dengan aliran fluida di dalam kolektor surya. Pada Gambar 6. terdapat sensor  $T_{s,1}$  yang bertempat di sirip pertama dari saluran masuk, lalu ada sensor  $T_{s,2}$  yang berada di sirip ketiga, dan sensor  $T_{s,3}$  berada di sirip kelima dekat saluran keluar fluida.



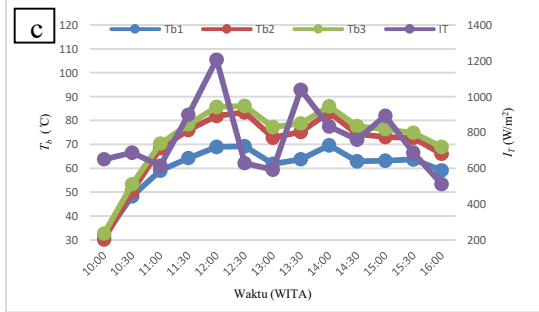
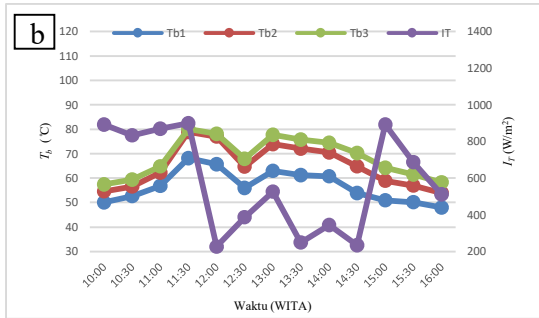
Gambar 6. Distribusi  $T_s$  dengan variasi (a)  $\dot{m} = 0,0009$  kg/s (b)  $\dot{m} = 0,0019$  kg/s (c)  $\dot{m} = 0,0023$  kg/s

### 4.5. Distribusi Suhu pada Pelat Bawah

Pada pelat bawah menerima distribusi suhu secara konduksi dari sirip dan terdapat konveksi dari aliran fluida. Pada Gambar 7. terdapat sensor  $T_{b,1}$  yang bertempat di depan kolektor surya tempat masuk fluida, lalu ada sensor  $T_{b,2}$  yang tepat berada di tengah kolektor, dan sensor  $T_{b,3}$  berada dekat saluran keluar fluida.



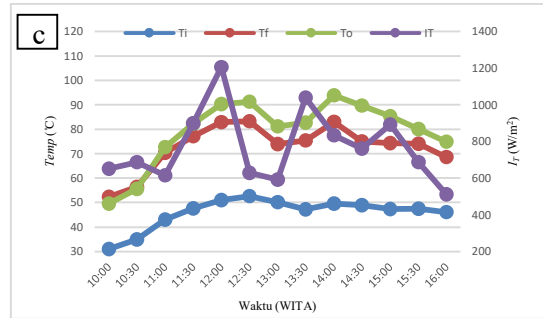
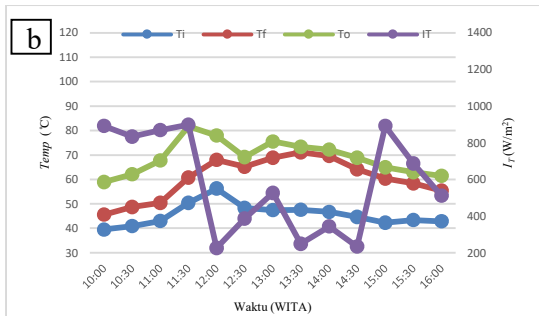
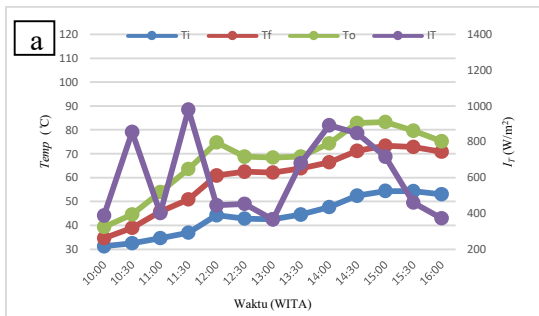




Gambar 7. Distribusi  $T_b$  dengan variasi (a)  $\dot{m} = 0,0009 \text{ kg/s}$  (b)  $\dot{m} = 0,0019 \text{ kg/s}$  (c)  $\dot{m} = 0,0023 \text{ kg/s}$

#### 4.6. Distribusi Suhu di Aliran Fluida

Aliran fluida yang terdapat dalam kolektor surya menerima suhu secara konveksi dari pelat absorber, pelat bawah, dan sirip. Pada Gambar 8. terdapat sensor temperatur masuk ( $T_i$ ) yang bertempat di saluran masuk fluida dekat honeycomb, lalu ada sensor temperatur fluida ( $T_f$ ) yang berada di antara sirip kedua dan ketiga tepat di tengah kolektor, dan sensor temperatur keluar ( $T_o$ ) berada di saluran keluar fluida.

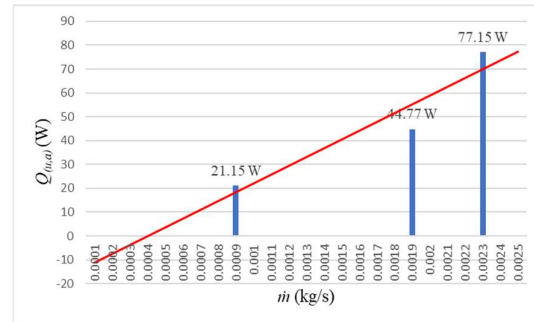


Gambar 8. Distribusi suhu pada aliran fluida dengan variasi (a)  $\dot{m} = 0,0009 \text{ kg/s}$  (b)  $\dot{m} = 0,0019 \text{ kg/s}$  (c)  $\dot{m} = 0,0023 \text{ kg/s}$

#### 4.7. Unjuk Kerja Kolektor Surya

##### 4.7.1. Energi Berguna

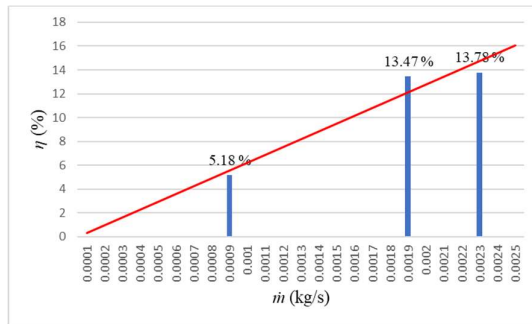
Dari seluruh data terukur dilakukan perhitungan data, didapat bahwa energi berguna ( $Q_{(u,a)}$ ) kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga bentuk bujur sangkar disusun *aligned* dengan  $\dot{m}$  sebesar  $0,0023 \text{ kg/s}$  lebih besar dibandingkan dengan  $\dot{m}$  sebesar  $0,0009 \text{ kg/s}$  dan  $0,0019 \text{ kg/s}$ . Ini disebabkan oleh peningkatan faktor pengali sesuai dengan rumus energi berguna, yang berarti semakin besar  $\dot{m}$ , maka faktor pengali akan semakin besar. Hal ini terdapat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Rata-Rata  $Q_{(u,a)}$  dengan Variasi Laju Aliran Massa

##### 4.7.2. Efisiensi

Dari data terukur dan energi berguna setiap waktu maka dilakukan perhitungan efisiensi. Terdapat bahwa efisiensi kolektor surya dengan laju aliran massa  $0,0023 \text{ kg/s}$  lebih besar dibandingkan dengan laju aliran massa total  $0,0009 \text{ kg/s}$ , dan  $0,0019 \text{ kg/s}$ . Ini disebabkan oleh hubungan yang sesuai antara faktor energi berguna dan efisiensi sesuai dengan rumus ( $\eta$ ), yang menunjukkan bahwa energi berguna meningkat seiring dengan efisiensi. Semakin besar laju aliran massa, maka efisiensinya juga meningkat. Namun, efisiensi akan berkurang seiring dengan peningkatan intensitas radiasi matahari. Grafik ini dapat dilihat di Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Rata-Rata  $\eta$  dengan Variasi Laju Aliran Massa

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tentang kolektor surya pelat datar dengan sirip melintang berongga berbentuk bujur sangkar yang disusun sejajar, ditemukan bahwa intensitas radiasi matahari meningkat, memengaruhi peningkatan dan penyebaran temperatur di setiap bagian kolektor surya. Intensitas radiasi matahari tertinggi tercatat pada variasi  $\dot{m}_3$  pada pukul 12:00, mencapai 1206,14 W/m<sup>2</sup>, sementara intensitas terendah terjadi pada variasi  $\dot{m}_2$  pada pukul 12:00, yakni 226,60 W/m<sup>2</sup>. Energi berguna paling tinggi dicapai pada variasi  $\dot{m}_3$  pada pukul 14.00, mencapai 102,81 W, dengan efisiensi tertinggi pada variasi  $\dot{m}_2$  pada pukul 14.30, mencapai 26,55%. Sebaliknya, energi berguna dan efisiensi terendah terjadi pada variasi  $\dot{m}_1$  pada pukul 10.00, hanya 7,23 W dan 1,68%. Rata-rata energi berguna dan efisiensi tertinggi tercatat pada variasi  $\dot{m}_3$ , masing-masing sebesar 77,15 W dan 13,78%.

## Daftar Pustaka

- [1] Haslinda, Mahmuddin, & Syafrun, M. (2022). **Peningkatan Efisiensi Thermal Kolektor Surya Pelat Datar Dengan Penutup Kaca Bersusun Pada Alat Pengering Jagung.** Jurnal Teknik AMATA, 3(2), 105–112. <https://doi.org/10.55334/jtam.v3i2.315>.
- [2] Popovska, S. (2011). **Drying of Agricultural Products With Geothermal Energy.** Geothermal Direct Used, 1(1), 11.
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). **Indonesia Kaya Energi Surya, Pemanfaatan Listrik Tenaga Surya oleh Masyarakat Tidak Boleh Ditunda.** Siaran Pers. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/06/18/2560/jadi.satu-satunya.negara.asean.di.g20.indonesia.komitmen.wujudkan.pembangunan.ekonomi.berkelanjutan%0Ahttps://ebtke.esdm.go.id/post/2021/06/02/2871/indonesia.berkomitmen.capai.net.zero.emission>

- [4] Yonanda, A., & Amrizal, D. (2021). **Karakteristik Kolektor Surya Pelat Datar Aliran Spiral Menggunakan Metode Simulasi CFD Characteristics a Spiral Flat Plate Solar Collectors Using CFD Simulation Method.** Open Science and Technology, 01(01), 2776–169. <https://opscitech.com/journal>.
- [5] Sucipta, M., Suardamana, I. M., & Astawa, K. (2010). **Analisis Performa Kolektor Surya Pelat Bersirip Dengan Variasi Luasan Permukaan Sirip.** 4(2), 88–92.
- [6] Al-Aloosi, W., Alaiwi, Y., & Hamzah, H. (2023). **Thermal performance analysis in a parabolic trough solar collector with a novel design of inserted fins.** Case Studies in Thermal Engineering, 49(August). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103378>.
- [7] Ahmad, A., Prakash, O., Kausher, R., Kumar, G., Pandey, S., & Hasnain, S. M. M. (2024). **Parabolic trough solar collectors: A sustainable and efficient energy source.** Materials Science for Energy Technologies, 7(July 2023), 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.08.002>.
- [8] Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). **Fundamental of Heat and Mass Transfer 8th Edition.**

|   |  |
|---|--|
|       | <b>Ahmad Husein Alhafidz</b><br>Menempuh studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, mulai pada tahun 2020, dan telah menyelesaikannya pada tahun 2024.  |
| Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan konversi energi. |  |
|       | Ketut Astawa, menyelesaikan studi S1 di Universitas udayana, dan melanjutkan pendidikan S2 di Universitas Brawijaya dan memperoleh gelar magister di bidang konversi energi pada tahun 2006.   |
|       | Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 1998, melanjutkan pendidikan S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan menyelesaikan studi pada tahun 2001, dan melanjutkan studi S3 di Shibaura Institute of Technology. Made Sucipta memiliki konsentrasi ilmu dalam teknologi hidrogen. |

# Sistem Monitoring *Electric-Powered Wheelchair* (EPW) Berbasis Sensor Accelerometer Terintegrasi Kalman Filter Dan Auto-Encoder Machine Learning

Jalasecca Wya Dewaruci, I Wayan Widhiada, I Gusti Komang Dwijana  
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Penyandang disabilitas pada kehidupan sehari-harinya membutuhkan kursi roda sebagai alat bantu dalam mobilisasi, seiring berjalannya waktu dan perkembangan teknologi peningkatan kursi roda sebagai alat bantu mobilitas bagi penyandang disabilitas tidak hanya terfokus pada kuantitas, tetapi juga pada peningkatan fungsionalitas. Pengembangan sistem kontrol mencakup penggunaan kontrol langsung berbasis joystick dan modifikasi sistem penggerak pada kursi roda manual menjadi elektrik. Penggunaan kursi roda elektrik atau *Electric Powered Wheelchair* (EPW) harus diawasi oleh pihak ketiga agar keamanan penyandang disabilitas lebih terjamin, tetapi pada kondisi tertentu para penyandang disabilitas membutuhkan ruang untuk sendiri dan terkadang pengawasan oleh pihak ketiga tidak bisa dilakukan terus menerus secara langsung. Sistem monitoring dapat menjadi sistem yang membantu dalam pengawasan penyandang disabilitas namun harus ada hal yang harus diperhatikan yakni keakuratan sinyal dari sensor accelerometer sebagai dasar dari sistem monitoring. Hal ini dapat diatasi dengan mengintegrasikan algoritma Kalman Filter dan Autoencoder, untuk mengevaluasi algoritma tersebut pada penelitian ini EPW dilakukan pengujian pada pola lintasan 1 dan pola lintasan 2 dan didapatkan besar nilai akurasi (1) tanpa integrasi Kalman Filter dan auto-encoder machine learning sebesar 16,84 %, (2) dengan integrasi Kalman Filter 93,06 %, (3) dengan integrasi auto-encoder machine learning didapatkan sebesar 95,59 %, dan (4) dengan integrasi Kalman Filter dan auto-encoder machine learning 98%. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma yang digunakan dalam upaya pengurangan noise dari output data sensor accelerometer memiliki kapabilitas yang baik dalam mereduksi noise output data dari sensor accelerometer yang digunakan.

Kata kunci: Kursi roda listrik, sistem monitoring, sensor MPU6050, Kalman Filter, autoencoder

## Abstract

In their daily lives, people with disabilities require a wheelchair as a mobility aid. Over time and with technological advancements, the improvement of wheelchairs for people with disabilities has not only focused on quantity but also on enhancing functionality. The development of control systems includes the use of direct joystick-based controls and the modification of manual wheelchair propulsion systems to electric. The use of *Electric Powered Wheelchairs* (EPW) needs to be supervised by a third party to ensure the safety of people with disabilities. However, in certain conditions, individuals with disabilities require personal space, and continuous direct supervision by a third party may not be feasible. Monitoring systems can assist in supervising people with disabilities, but the accuracy of signals from the accelerometer sensor, the foundation of the monitoring system, needs careful consideration. This can be addressed by integrating Kalman Filter and Autoencoder algorithms. To evaluate these algorithms in this study, EPW testing was conducted on track patterns 1 and 2. The obtained accuracy values were (1) without integrating Kalman Filter and Autoencoder Machine Learning, 16.84%, (2) with Kalman Filter integration, 93.06%, (3) with Autoencoder Machine Learning integration, 95.59%, and (4) with Kalman Filter and Autoencoder Machine Learning integration, 98%. This indicates that the algorithms used to reduce noise from the output data of the accelerometer sensor have good capabilities in reducing noise from the accelerometer sensor's output data.

Keywords: electric powered wheelchair, monitoring system, sensor MPU6050, kalman filter, autoencoder

## 1. Pendahuluan

Penyandang disabilitas adalah setiap orang yang mengalami keterbatasan fisik, intelektual, mental, dan sensorik [1]. Karena keterbatasan ini para penyandang disabilitas memiliki kesulitan dalam menjalani aktivitas sosial, pada kehidupan sehari-harinya dalam hal mobilitas penyandang disabilitas memerlukan kursi roda sebagai alat mobilisasi di kehidupannya. kursi roda digunakan agar pengguna bisa bergerak bebas mengatur pergerakan sesuai yang di kehendakinya, Seiring berjalannya waktu dan berkembangnya teknologi, kursi roda sendiri mengalami pengembangan. Penambahan sistem penggerak motor listrik hal ini sangat memudahkan bagi para penyandang disabilitas.

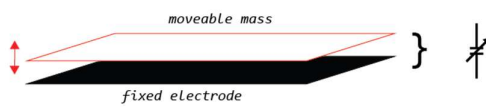
Penggunaan kursi roda elektrik tanpa pengawasan dapat membahayakan penyandang disabilitas, sementara itu pengawasan tidak dapat dilakukan secara terus menerus oleh pihak yang mengawasi. Sistem monitoring jarak jauh dapat diaplikasikan sebagai solusi dalam pengawasan penggunaan kursi roda oleh penyandang disabilitas [2]. Namun, yang menjadi titik baliknya adalah pemanfaatan teknologi sensor yang terjangkau untuk sistem ini masih memiliki kekurangan akurasi yang tepat pada keadaan sebenarnya, merujuk pada permasalahan tersebut, upaya yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan algoritma statistik maupun filter yang mampu mengoreksi error dari data diskrit seperti hasil pada sensor ini. Algoritma Kalman Filter dan model auto-encoder machine learning memiliki

karakteristik ini dan dapat diaplikasikan pada permasalahan ini. Dengan demikian, pengguna kursi roda dapat ter-monitoring dengan akurat dan mitigasi terhadap mobilisasinya dapat terawasi.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Sensor Accelerometer

Sensor *accelerometer* merupakan alat ukur yang umumnya memiliki data untuk 3D spasial. Pendekatan metode yang umum digunakan pada sensor accelerometer adalah dengan menggunakan *capacitance sensing*, yang berhubungan dengan perubahan posisi dari *mass capacitance* [3]. Dengan kata lain, bahwa sensor *accelerometer* ini dapat dijadikan sebagai variabel kapasitor, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Visual dari Pendekatan yang digunakan pada Accelerometer

### 2.2 Kalman Filter

Secara sederhana, Kalman Filter sebagai algoritma penyedia perkiraan berbagai variabel yang didapat berdasarkan dari pengukuran dengan mengikuti iterasi. *Output* data dari algoritma yang diestimasi ini sama dengan proses mereduksi *noise* pada sinyal [3]. Kalman Filter memiliki dua bagian pada algoritmanya, prediksi dan *update* (pembaruan) [4]. Berikut persamaan dari Kalman filter yang ditunjukkan pada (1)-(5)

#### Bagian Prediksi:

$$\hat{x}_{t|t-1} = F_t \hat{x}_{t-1|t-1} + B_t u_t \quad (1)$$

$$P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t \quad (2)$$

#### Bagian Update:

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t (y_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}) \quad (4)$$

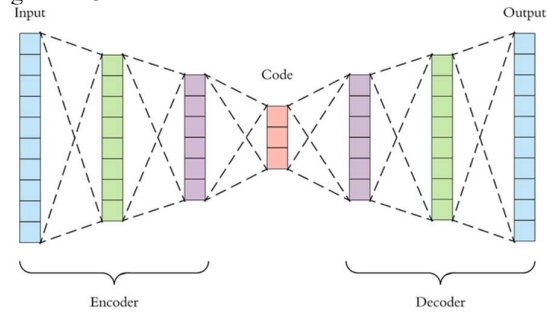
$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1} \quad (5)$$

Keterangan:

|           |                            |
|-----------|----------------------------|
| $x$       | : Perkiraan kondisi        |
| $F$       | : Matriks kondisi          |
| $u$       | : Variabel kontrol         |
| $B$       | : Matriks kontrol          |
| $P$       | : Matriks varians kondisi  |
| $Q$       | : Matriks varians proses   |
| $y$       | : Variabel pengukuran      |
| $H$       | : Matriks pengukuran       |
| $K$       | : Gain Kalman              |
| $R$       | : Matriks pengukuran       |
| $t t$     | : Periode waktu sekarang   |
| $t-1 t-1$ | : Periode waktu sebelumnya |
| $t t-1$   | : Tahap peralihan          |

### 2.3 Autoencoder

Model *autoencoder* merupakan turunan model ANN dengan karakteristik yang dimiliki adalah mereduksi dan mengembalikan *feature extraction* dari *input* di awal [5]. Terdapat dua bagian pada model ini, yaitu *encoder* dan *decoder*. *Encoder* merupakan tahapan dari model untuk melakukan *feature extraction*, yaitu menentukan nilai dari beberapa parameter *input* berdasarkan *weight* yang bersesuaian melalui metode *backpropagation* hingga bagian menjadi *bottleneck* dari model. Bagian kedua adalah *decoder*, yaitu bagian *layer* yang mengembalikan ke bentuk semula namun tetap menyesuaikan *weight* melalui metode *backpropagation*. Secara visual dapat dilihat pada gambar 3



Gambar 2. Rancangan Model Peramalan Autoencoder

Beberapa hyperparameter utama yang dilakukan proses tuning ini adalah loss function, optimizer, dan learning rate. Untuk proses loss function menggunakan mean squared error, serta optimizer yang digunakan adalah Stochastic Gradient Descent dengan learning rate  $\alpha = 10^{-4}$ . Berikut merupakan persamaan yang mendukung hyperparameter yang disebutkan.

$$\text{mean squared error} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

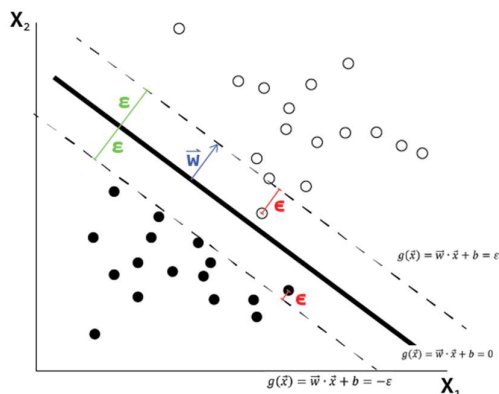
$$w_i = w_{i-1} - \alpha$$

Keterangan:

|             |   |
|-------------|---|
| $y_i$       | : data sesungguhnya                                       |
| $\hat{y}_i$ | : data prediksi   |
| $n$         | : jumlah data pada dataset                                |
| $w$         | : parameter-parameter yang dimuat oleh model autoencoder. |

### 2.4 Support Vector Machine

*Support vector machine* (SVM) adalah konsep *machine learning* dengan jenis supervised learning, yaitu membutuhkan dataset awal sebelum akhirnya menjadi model fungsional [6]. Secara praktikal, SVM menggunakan beberapa parameter dalam pembangunan modelnya. Hal pertama adalah dataset yang sudah menjadi karakteristik algoritmanya sebagai *machine learning* selain itu, kernel trick turut dilakukan untuk menyesuaikan kebutuhan *classifier*. Untuk memudahkannya, akan ditinjau dengan menggunakan sistem persamaan linear.



**Gambar 3. Ilustrasi Vektor pada Support Vector Machine**

$$g(\vec{x}) = \vec{w} \cdot \vec{x} + b \quad (6)$$

$$g^*(\vec{x}) = \vec{w} \cdot \vec{x} + b \pm \epsilon \quad (7)$$

Pada persamaan 6 Asumsikan bahwa suatu nilai yang menjadi pembatas antara dua kelas disini juga dibangun margin sebagai *support vector* yang secara *state-of-the-art* mampu mengoptimalkan dari nilai luaran model, ditunjukkan pada Persamaan 7. Dari persamaan ini, yang dapat kita tentukan adalah mengoptimalkan dari nilai  $g(\vec{x})$  yang terpengaruh pada vektor  $\vec{w}$

$$\min \left( \frac{1}{2} \|\vec{w}\|^2 + C \sum \epsilon_i \right) \quad (8)$$

Sehingga diperoleh Persamaan 8 sebagai normalisasi dari Persamaan 6 untuk nilai optimum yang diperoleh, dengan  $C$  dan  $\epsilon$  sebagai konstanta *trade-off*. Namun tentunya terdapat *constraint* yang harus dipenuhi dikarenakan penerapan margin ini, yang ditunjukkan oleh Persamaan 9.

$$g(\vec{x}) = \vec{w} \cdot \vec{x} + b \geq 1 - \epsilon_i \quad (9)$$

### 3. Metode Penelitian

#### 3.1 Metode Rancangan

Sistem kontrol yang hendak dikembangkan pada *wheelchair* ini akan dimanfaatkan sebagai media monitoring terhadap keselamatan pengguna saat melakukan mobilisasi secara mandiri. Pengembangan *wheelchair* dilakukan dengan menggunakan konsep *electrical-power wheelchair (EPW)* yang menggunakan tenaga elektrikal sebagai penggerak. EPW dirancang dengan berbasis Arduino dengan alasan memberikan efektivitas dalam integrasi sistem penggerak dan sistem monitoring, dalam merealisasikan prototipe *electric-powered wheelchair* yang hendak dibuat, dilakukan kajian sederhana terhadap pemilihan sistem penggerak yang dipasangkan pada prototipe. dengan mengabaikan efek sentripetal dan gangguan sekitar, maka kebutuhan torsi dapat dinyatakan dalam hubungannya dengan inersia dari sistem kursi roda. Simplifikasi bentuk Persamaan tersebut, maka diperoleh Persamaan

$$T = \mu_s M g r \quad (10)$$

#### Analisis kebutuhan torsi tanpa beban

$$T_{\text{tanpa beban}} = \mu_s g r M_{\text{tanpa beban}}$$

$$T_{\text{tanpa beban}} = (0,566) \left( 9,8 \frac{m}{s^2} \right) (0,3 m) (15,8 kg)$$

$$T_{\text{tanpa beban}} = 26,29 N.m$$

#### Analisis kebutuhan torsi dengan beban

$$T_{\text{dengan beban}} = \mu_s g r M_{\text{dengan beban}}$$

$$T_{\text{dengan beban}} = (0,566) (9,8 m/s^2) (0,3 m) (115,8 kg)$$

$$T_{\text{dengan beban}} = 191,37 N.m$$

Agar tidak terjadi kegagalan pada sistem penggerak. Transmisi ini dilakukan dengan sistem rantai *sprocket* dengan *pitch of chain* ( $p$ ) sebesar 6 mm, Hal ini ditunjukkan pada dua bagian gear yang dihitung berdasarkan *pitch circle diameter* ( $D$ ) serta jumlah giginya ( $t$ ).

$$p = D \sin \frac{180^\circ}{t} \quad (11)$$

$$D_{\text{besar}} = 102 \text{ mm}$$

$$t_{\text{besar}} = 50T$$

$$D_{\text{kecil}} = 22 \text{ mm}$$

$$t_{\text{kecil}} = 11T$$

| Sprocket gear yang besar                                       | Sprocket gear yang kecil                                       |
|--|--|
| $p = D_{\text{besar}} \sin \frac{180^\circ}{t_{\text{besar}}}$ | $p = D_{\text{kecil}} \sin \frac{180^\circ}{t_{\text{kecil}}}$ |
| $p = (102 \text{ mm}) \sin \frac{180^\circ}{50}$               | $p = (22 \text{ mm}) \sin \frac{180^\circ}{11}$                |
| $p = 6,405 \text{ mm}$   | $p = 6,198 \text{ mm}$   |
| $p \approx 6 \text{ mm}$                                       | $p \approx 6 \text{ mm}$                                       |

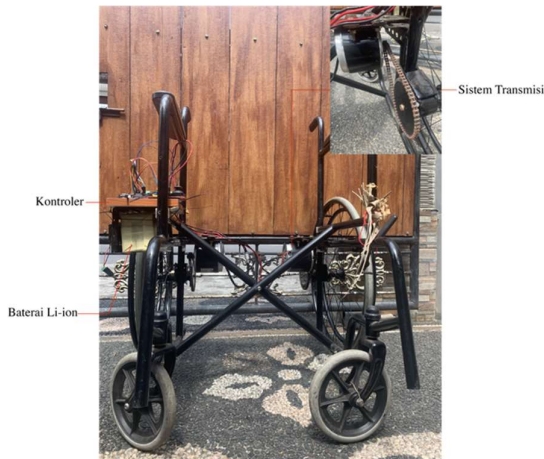
Dengan demikian, adapun rasio torsi ( $T$ ) *input* serta *output* pada sistem transmisi ini ditunjukkan pada Persamaan

$$\text{Torque ratio} = \frac{t_{\text{besar}}}{t_{\text{kecil}}} = 4,5 \quad (12)$$

$$\therefore T_{\text{output}} = 4,5 T_{\text{input}}$$

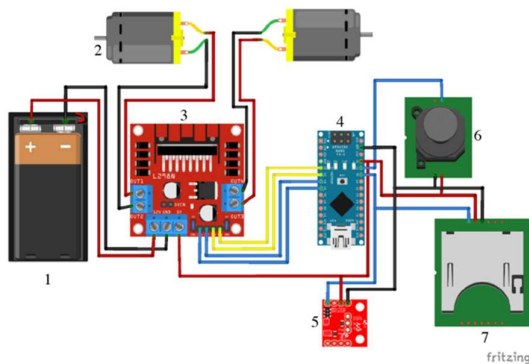
Sehingga, merujuk pada kebutuhan torsi serta Persamaan 3.3, dengan *torque ratio* ini, motor DC (24V/350W) dengan torsi 45 N.m akan memperoleh torsi output sebesar 202,5 N.m, yang memiliki nilai lebih besar dari analisis kebutuhan torsi yaitu 191,37 N.m.





**Gambar 4. Electric-Powered Wheelchair**

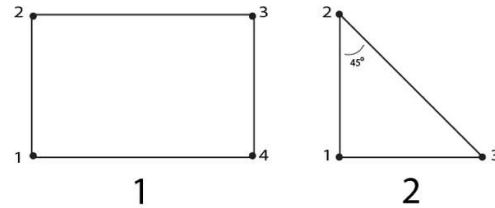
Sistem kontrol berbasis mikrokontroler digunakan dalam upaya efisiensi rancangan dan maintenance. Sistem diawali dengan rangkaian motor driver dengan motor dan power supply. Dirangkai sedemikian rupa sehingga seluruh motor memperoleh daya yang sesuai. Selanjutnya, mikrokontroler dipasangkan dengan driver motor ini sekaligus pada kontrol joystick untuk memberikan interface kontrol ke motor. Serta poin terakhir adalah pembacaan data sensor accelerometer dilakukan oleh sensor MPU6050 serta untuk perekaman secara real-time dilakukan melalui SD Card Reader. Rangkaian yang disampaikan, divisualisasi pada Gambar 5.



**Gambar 5. Rangkaian Sistem Kontrol**

### 3.2 Metode Eksperimental

Merujuk pada tujuan penelitian, Secara lebih lanjut, terdapat dua buah pengujian yang akan dilakukan. Pengujian pertama adalah evaluasi terhadap akurasi posisi dari sensor perekaman data secara real-time akan dilakukan. Pengumpulan ini dilakukan dengan mencoba prototipe EPW secara langsung dengan mengikuti beberapa pola lintasan. Pola lintasan ini akan diarahkan untuk menguji bagaimana perilaku hasil algoritma sistem kontrol pada berbagai arah di semua spasial/sumbu. Visualisasi lintasan ini dapat dilihat pada Gambar 6.



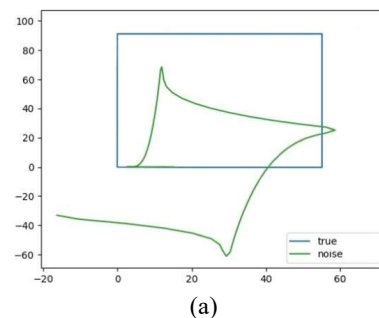
**Gambar 6. Lintasan Pengujian Prototipe EPW**

Hasil pengujian ini akan dipetakan setiap 10 milisekon pada hasil algoritma: (1) tanpa integrasi Kalman Filter dan *auto-encoder machine learning*, (2) dengan integrasi Kalman Filter, (3) dengan integrasi *auto-encoder machine learning*, dan (4) dengan integrasi Kalman Filter dan *auto-encoder machine learning*. Pemetaan dilakukan dengan visualisasi posisi. Pada pengujian kedua, yaitu evaluasi akurasi kondisi kursi roda berdasarkan posisi *roll*, *yaw*, dan *pitch*, akan dilakukan pada berbagai medan yang diberikan label sebagai keadaan aman dan keadaan bahaya. Metode pengambilan *dataset* sama seperti pengujian pertama yaitu pengambilan secara *real-time*. Sementara, evaluasi algoritmanya akan divalidasi dengan *cross-validation*.

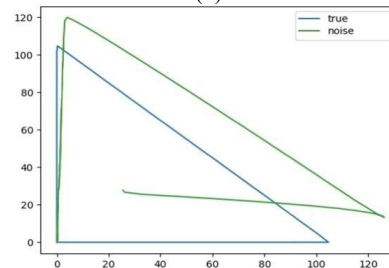
## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Hasil Pengambilan Data Set Sistem Monitoring Kursi Roda

Pada penelitian ini pengambilan data mengalami gangguan dari noise yang ada sehingga interpretasi posisi dari data yang diambil dengan masih adanya gangguan dari Noise dapat dilihat pada plot grafik pada Gambar 7.



(a)



(b)

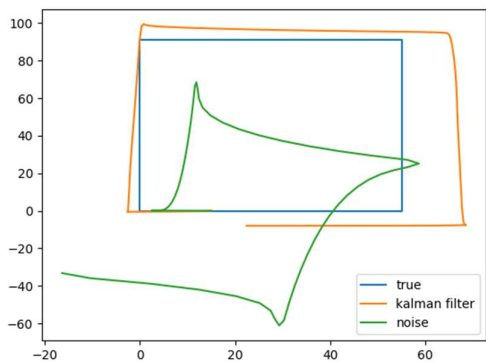
**Gambar 7. Grafik Plot Interpretasi Output Data Tanpa Integrasi Algoritma Pola Lintasan 1(a) & Pola lintasan 2(b)**



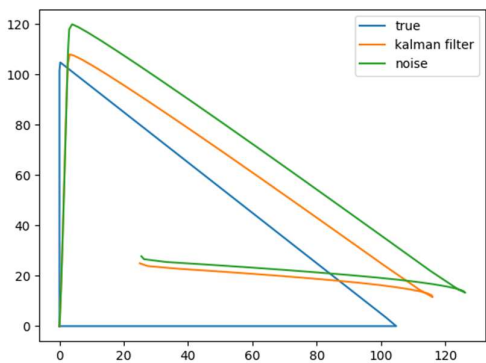
Dapat dilihat pada gambar 7 bahwa hasil plot output data dengan adanya gangguan dari noise mengakibatkan eror posisi perpindahan dari EPW yang didapatkan sangat jauh dari keadaan sebenarnya.

#### 4.2. Kalman Filter Pada Sistem Monitoring Kursi Roda

Dengan implementasi pada data sensor yang diterapkan, diperoleh nilai sinyal yang lebih baik dibandingkan pada data sebelum implementasi extended kalman filter. algoritma ini telah berhasil menunjukkan koreksi terhadap sinyal dalam mereduksi noise yang terjadi. Bagan plot berikut menunjukkan perbandingan antara sinyal noise dan sinyal setelah algoritma Kalman Filter (Gambar 8.).



(a)



(b)

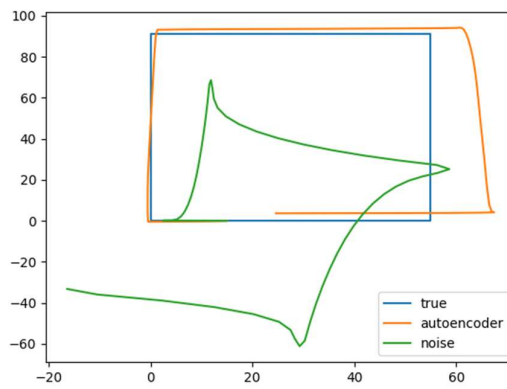
**Gambar 8. Grafik Plot Posisi Hasil Reduksi Noise oleh Integrasi Model Kalman Filter Pada Pola Lintasan 1(a) dan Pola Lintasan 2 (b)**

Kalman filter secara menyeluruh dapat mereduksi noise dengan sangat baik pada pola lintasan 1 maupun pada pola lintasan 2, pada titik 1-2 pola lintasan 1 dapat dilihat Kalman filter mampu mereduksi noise dengan baik, tetapi apabila dilihat dari posisi titik 1 pada pola lintasan prediksi model Kalman filter mengalami kesalahan hal ini mempengaruhi prediksi model kalman filter ke titik berikutnya (pola lintasan 1 titik 2-3, titik 3-4, dan 4-1) dilihat pada grafik semakin menuju titik akhir akurasi dari prediksi model Kalman filter mengalami kesalahan prediksi yang cukup signifikan dikarenakan

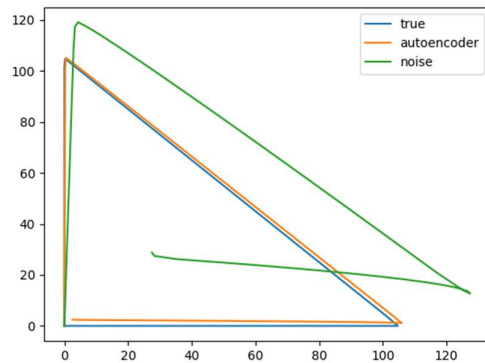
adanya eror prediksi yang dilakukan dari titik pertama pola lintasan 1. Begitu pun hal yang sama terjadi pada pola lintasan 2.

#### 4.3. Autoencoder pada Sistem Monitoring Kursi Roda

Melalui beberapa proses epoch, model autoencoder menunjukkan penurunan loss function diikuti oleh peningkatan metrics *coefficient of determination* (Gambar 10.). Hal ini mengindikasikan bahwa model telah berhasil untuk melakukan proses training terhadap dataset yang dikumpulkan. Berikut adalah tampilan visualisasi plot posisi hasil reduksi noise oleh autoencoder (Gambar 9.).



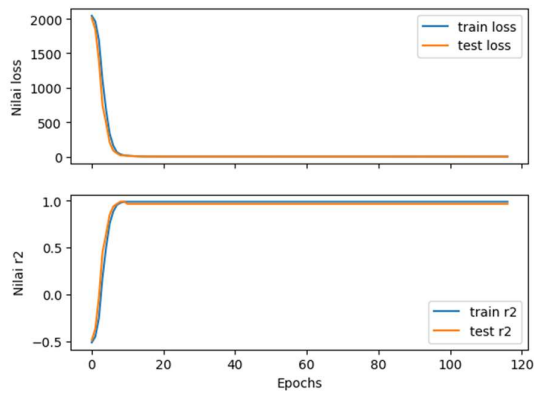
(a)



(b)

**Gambar 9. Grafik Plot Posisi Hasil Reduksi Noise oleh Integrasi Model Autoencoder (a) Pola Lintasan 1 dan (b) Pola Lintasan 2**

Model auto encoder memiliki hal yang serupa dengan apa yang terjadi pada model Kalman filter, dimana eror prediksi posisi perpindahan yang terjadi dari titik 1 ke titik 2 mempengaruhi hasil prediksi posisi perpindahan EPW sampai ke titik akhir.



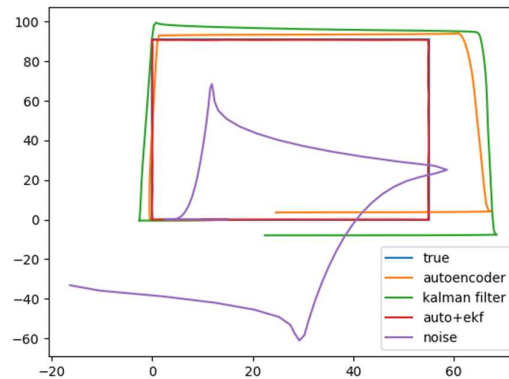
**Gambar 10. Grafik Metrics pada Saat Proses Training Autoencoder**

Model menunjukkan nilai mean squared error yang diperoleh pada akhir training sebesar 0,2982 m serta coefficient of determination  $r\_squared$  sebesar 98,66%. Nilai *metrics* ini menunjukkan bahwa model telah mampu melakukan reduksi noise yang muncul pada dataset.

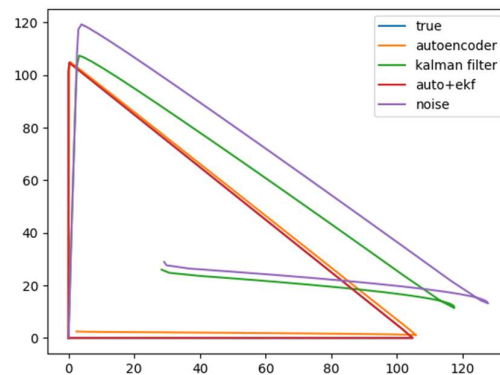
#### 4.4. Analisis Integrasi Autoencoder dan Kalman Filter pada Sistem Monitoring Kursi Roda

Pada penelitian ini melalui integrasi autoencoder dan Kalman Filter pada algoritma sistem kontrol. Sistem ini diintegrasikan dengan tujuan mendapatkan improvement dari hasil algoritma hanya dengan autoencoder. Beberapa metode yang dilakukan adalah dengan melakukan analisis error yang dihasilkan dari 4 algoritma, algoritma tanpa intervensi, algoritma Kalman Filter, algoritma Autoencoder, dan algoritma integrasi Kalman Filter dan Autoencoder. Analisis error akan diterapkan dengan membandingkan (mencari selisih) setiap algoritma dengan nilai ground truth. Nilai ground truth ditentukan dari jalur lintasan yang telah ditetapkan. Sebagai pembanding yang lebih visual, grafik plot untuk lintasan dengan spasial x-y turut ditampilkan untuk mengamati proses yang dapat teramati baik masing-masing sumbu maupun

keseluruhannya. Tabel 1 menunjukkan hasil analisis error pada tiap algoritma dan Gambar 11. menunjukkan plot posisinya.



(a)



(b)

**Gambar 11 Plot Posisi Untuk Hasil Reduksi Noise oleh Integrasi Kalman Filter Dan Auto Encoder (a) Pola Lintasan I dan (b) Pola Lintasan II**

Pada Gambar 11 dapat dilihat integrasi autoencoder dan Kalman filter memiliki hasil pengurangan noise yang sangat baik dengan tingkat akurasi sebesar 97,9 %.

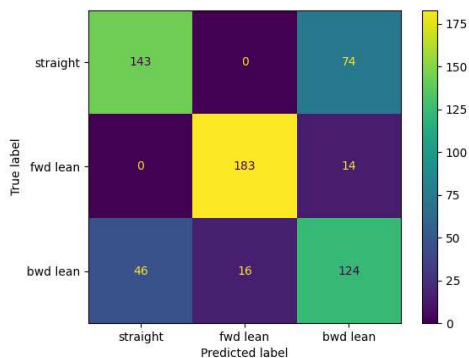
**Tabel 1. Analisis Error Hasil Reduksi Noise terhadap Ground Truth**

| Algoritma                    | Root Mean Squared Error (m) – sumbu-x | Root Mean Squared Error (m) – sumbu-y | Root Mean Squared Error (m) – overall | Accuracy (%)   |
|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Tanpa algoritma (controlled) | 11.39647                              | 36.41151                              | 23.90399                              | 16.8495        |
| Hanya Kalman Filter (KF)     | 5.98001                               | 3.92260                               | 4.95130                               | 93.0619        |
| Hanya Autoencoder            | 4.92788                               | 2.39877                               | 3.66332                               | 95.5948        |
| Autoencoder dengan KF        | <b>0.04482</b>                        | <b>0.09713</b>                        | <b>0.07097</b>                        | <b>97.9993</b> |

Pada Tabel 1. Seluruh hasil optimal ditunjukkan pada bagian yang dicetak tebal. Integrasi autoencoder dan Kalman Filter memberikan hasil yang paling optimal pada seluruh aspek pengujian. Ketika meninjau secara spesifik, tidak ada signifikansi pengaruh sumbu pada analisis error, sehingga dapat dinyatakan bahwa mode spasial tidak mempengaruhi performa algoritma nantinya. Peningkatan performa (penurunan error) terjadi pada implementasi tunggal algoritma KF dan Autoencoder. Terlebih lagi, penurunan error secara signifikan terjadi pada model integrasi kedua algoritma tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa jenis algoritma ini memiliki kapabilitas dalam mereduksi noise dengan baik. Secara lebih dalam, accuracy mendominasi sebesar lebih dari 90% pada seluruh algoritma, yang mengindikasikan model ini telah mampu dan siap untuk diimplementasikan nantinya.

#### 4.5 Cross Validation Algoritma

Algoritma support vector machine (SVM) digunakan untuk evaluasi ini dengan mengklasifikasikan posisi realtime pada hasil sinyal sensor. Sinyal sensor diklasifikasikan berdasarkan tiga posisi: mendatar, miring ke depan, dan miring ke belakang. Adapun hasil dari evaluasi algoritma ini menghasilkan confusion matrix sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11. Hasil menunjukkan didominasi pada true positive untuk semua posisi. Secara sekilas, hal ini mengindikasikan akurasi yang relative tinggi. Hal ini diperkuat dengan penghitungan skor akurasi sebesar 75% untuk model SVM dalam mengklasifikasikan posisi. Sehingga dapat disimpulkan keseluruhan model telah mampu memberikan gambaran keadaan kursi roda untuk sistem monitoring walaupun dengan sensor yang memberikan sinyal noise.



**Gambar 11 Grafik confusion matrix model SVM pada sistem monitoring kursi roda**

#### 5. Kesimpulan

1. Sistem monitoring berhasil diterapkan untuk proses reduksi noise pada sinyal sensor accelerometer MPU6050 untuk memantau posisi dan perubahannya tiap waktu. Sistem ini akan mampu dengan baik diimplementasikan pada

model monitoring sebagai sistem odometry dari alat untuk memberikan data real-time.

2. Hasil analisis komparasi mengindikasikan integrasi Autoencoder dan Kalman Filter memberikan hasil yang optimal dalam fungsinya untuk mereduksi noise. Hal ini telah dilakukan dengan melakukan komparasi terhadap masing-masing dan algoritma kontrol (tanpa algoritma apapun) yang menyatakan hasil paling optimal ada pada model terintegrasi.

#### Daftar Pustaka

- [1] Nanda, A. R., & Herawati, R. (2021). Kendala dan Solusi Bagi Penyandang Disabilitas Kota Semarang dalam Mengakses Pekerjaan. *Jurnal Pembangunan Hukum Indonesia*, 3(3), 325–336.
- [2] Teodorescu, C. S., Zhang, B., & Carlson, T. (2020). A stochastic control strategy for safely driving a powered wheelchair. *IFAC-PapersOnLine*, 53, 10148–10153. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2741>
- [3] Dadafshar, M. (2014). Accelerometer and Gyroscopes Sensors: Operation, Sensing, and Applications. *Maxim Integrated*, 1–11.
- [4] Ma'arif, A., Iswanto, I., Nuryono, A. A., & Alfian, R. I. (2019). Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings. *Signal and Image Processing Letters*, 1(2), 11–22. <https://doi.org/10.31763/simple.v1i2.2>
- [5] Edla, D. R., Ansari, M. F., Chaudhary, N., & Dodia, S. (2018). Classification of Facial Expressions from EEG signals using Wavelet Packet Transform and SVM for Wheelchair Control Operations. *Procedia Computer Science*, 132, 1467–1476. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.081>
- [6] Shao, H., Zhao, H., Sun, Y., Zhang, J., & Xu, Y. (2016). QoE-Aware Downlink User-Cell Association in Small Cell Networks: A Transfer-matching Game Theoretic Solution with Peer Effects. *IEEE Access*, 4, 10029–10041. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2628382>



**Jalasecca Wya Dewaruci** menyelesaikan studi program sarjana di jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2019 sampai 2024. Bidang penelitian yang diminati adalah sistem kontrol dan sistem monitoring dengan konsentrasi Rekayasa Manufaktur.

# EFEKTIVITAS *WASTE MOTOR OIL* PADA *PLAT INTERCEPTOR* SEBAGAI MEDIA PENURUNAN KEPEKATAN *FLUE GAS* VARIASI *MOISTURE CONTENT* MSW

I Wayan Andrayuga, I Nyoman Suprpta Winaya, I Wayan Arya Darma, I Gusti Ngurah Putu Tenaya, I Putu Angga Yuda Pratama

*Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan alat penangkap *flue gas* dengan *plat interceptor* bermedia *waste motor oil* (WMO) untuk menurunkan kepekatan *flue gas* dan bau yang timbul dari proses pengeringan *municipal solid waste* (MSW) dengan variasi MC. Asap dan uap air yang dihasilkan dari proses pengeringan MSW diakibatkan oleh penguapan MC pada suhu 110°C. Produk sampingan yang dihasilkan dari proses pengeringan berupa gas pencemar tidak berbau seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan metana (CH<sub>4</sub>), serta gas berbau seperti ammonia (NH<sub>3</sub>), dan hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), yang sangat bergantung pada fraksi penyusun MSW yang dikeringkan dan MC yang terkandung di dalamnya. *Plat interceptor* dibuat dalam bentuk balok berukuran panjang 1 m, lebar 0.12 m dan tinggi 0.13 m dimana *plat* disusun secara *zig-zag* untuk menghambat aliran asap gas sehingga partikel pencemar menjadi tertangkap dan menempel pada media WMO yang dilapiskan pada permukaan *plat* tersebut. MC pada MSW divariasikan dari 50% sampai 10% untuk melihat tingkat pembentukan *flue gas* yang dihasilkan serta efektivitas penangkapan gas-gas tercemar selama durasi waktu pengujian 5 menit. Hasil investigasi menunjukkan bahwa penurunan persentase *flue gas* terjadi pada setiap variasi *moisture content* yang diberikan yakni pada 50% MC, yaitu NH<sub>3</sub> dari 56.50 ppm menjadi 22.61 ppm, H<sub>2</sub>S dari 6.9 ppm menjadi 2.5 ppm. Keefektifan dan efisiensi penangkapan media WMO diukur paling optimal pada variasi 50% MC dengan 13.6% penangkapan *ash* dari *flue gas* yang dihasilkan.

Kata kunci: *plat interceptor*, asap dan bau, *waste motor oil*, efektivitas dan efisiensi

## Abstract

*This study aims to develop a flue gas capture device with an interceptor plate with waste motor oil (WMO) media to reduce the flue gas density and odor arising from the drying process of municipal solid waste (MSW) with varying moisture content. Smoke and water vapor generated from the drying process of MSW are caused by the evaporation of MC at 110°C. By-products generated from the drying process are odorless polluting gases such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and methane (CH<sub>4</sub>), as well as odorous gases such as ammonia (NH<sub>3</sub>), and hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S), which are highly dependent on the fraction of MSW being dried and the MC contained therein. The interceptor plate is made in the form of a block measuring 1 m long, 0.12 m wide and 0.13 m high where the plate is arranged in a zigzag manner to inhibit the flow of gas fumes so that pollutant particles are captured and attached to the WMO media coated on the surface of the plate. MC in MSW was varied from 50% to 10% to see the level of flue gas formation produced and the effectiveness of capturing polluted gases for a test time duration of 5 minutes. The results of the investigation showed that a decrease in the percentage of flue gas occurred in each variation of moisture content given at 50% MC, namely NH<sub>3</sub> from 56.50 ppm to 22.61 ppm, H<sub>2</sub>S from 6.9 ppm to 2.5 ppm. The effectiveness and efficiency of WMO media capture was measured to be most optimal in the 50% MC variation with 13.6% ash capture from the flue gas produced.*

Keywords: *interceptor plate*, smoke, odor, *waste motor oil* (WMO), effectiveness, efficiency

## 1. Pendahuluan

Lima negara berkembang seperti, Tiongkok, Indonesia, India, Brazil, dan Mexico termasuk dalam sepuluh besar negara

penghasil *municipal solid waste* (MSW) yang signifikan dan terus meningkat pesat setiap tahunnya. Hal tersebut dapat disebabkan oleh

tingkat kesejahteraan ekonomi dan sosial dari masyarakat serta pengelolaan limbah padat yang belum beroperasi secara maksimal baik dari sumber limbah tersebut maupun hasil lanjutan dari pengelolaan sampah perkotaan [2].

Berdasarkan data Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup tahun 2023, Kota Denpasar merupakan salah satu produsen sampah terbesar di provinsi Bali yang mencapai 29.4% pada tahun 2022. Meskipun pemerintah telah berhasil mengurangi 14.51% sampah, nyatanya penumpukan sampah di TPA Suwung telah mencapai ketinggian 25 m dari permukaan laut sehingga mengganggu efektivitas penanganan sampah dan berakibat pada lahan pembuangan yang terbatas serta biaya operasional yang tinggi. TPST Kesiman Kertalangu merupakan salah satu TPST di Kota Denpasar yang telah beroperasi dengan menerapkan prinsip *Reduce, Reuse*, dan *Recycle* sehingga menghasilkan produk berupa, *Recycle product* 45 tpd, *RDF Product* 350 tpd, dan *RDF Briket* yang mampu meningkatkan *streaming revenue* dan potensi serapan pasar (Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup, 2023).

Pengelolaan sampah dengan kadar air yang tinggi memberikan pengaruh terhadap penurunan efisiensi pengeringan dikarenakan sebagian energi panas digunakan untuk penguapan air sehingga suhu pada ruang bakar akan menurun. Hal tersebut memerlukan perlakuan awal berupa pengeringan yang digambarkan sebagai proses perpindahan panas dengan penghilangan zat volatil (kadar air) secara termal [1].

Sampah padat kota (MSW) yang melalui proses pengeringan berpotensi menghasilkan gas buang berupa  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , serta kandungan volatil seperti

*ethyl benzene*, *toluene*, *styrene* yang berpotensi menurunkan kualitas udara [3]. Perubahan kondisi udara disebabkan oleh keberadaan zat pencemar, baik dalam bentuk gas-gas maupun partikel kecil atau aerosol yang terdapat di atmosfer. Partikel dengan ukuran antara 0,01 hingga 5  $\mu\text{m}$  adalah penyumbang utama pencemar udara karena keberadaannya yang tidak dapat terlihat dengan jelas serta mampu bertahan dalam atmosfer pada jangka waktu yang cukup lama [5].

Partikel-partikel tersebut terbentuk dari sisa-sisa bahan bakar yang mengalami perlakuan panas di dalam ruang bakar dan dikeluarkan melalui saluran pembuangan gas. Pengaruh kekuatan medan magnet dan konsentrasi *ferrofluid* menghasilkan peningkatan persentase penghilangan *flue gas* berupa  $\text{CO}_2$  sejumlah 32%, 36.6%, 41.2% dibandingkan dengan penggunaan air murni karena deformasi permukaan *ferrofluid* di bawah medan magnet memengaruhi bentuk tetesan. Medan magnet dapat menginduksi gaya dan tekanan permukaan pada tetesan sehingga memengaruhi terjadinya kontak dengan partikel *flue gas*. Salah satu pemanfaatan yang dihasilkan adalah konversi *waste motor oil* (WMO) menjadi bahan bakar bernilai tinggi dengan teknik pirolisis. Kepekatan *flue gas* MSW sangat dipengaruhi oleh proses berjalannya pengeringan, sedangkan efektivitas *moisture content* (MC) sangat bergantung dengan kandungan *moisture content* pada pengeringan MSW. Referensi kandungan *moisture content* akan sangat memengaruhi nilai kalor dan nilai karbon yang berdampak ketika MSW mengalami proses perlakuan panas yang akan menghasilkan lebih banyak emisi polutan udara karena setiap komponen MSW memiliki kemampuan dalam mengikat air yang berbeda-beda. *Moisture content* yang

tinggi pada MSW menyediakan lingkungan yang lebih baik untuk pertumbuhan bakteri, jamur, dan mikroorganisme yang dapat menghasilkan senyawa penyebab bau yang terbawa pada aliran *flue gas* [4,6]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi *moisture content* MSW terhadap proses penurunan kepekatan *flue gas* keluaran mesin pengering MSW dengan pengaplikasian WMO sebagai media pelumas *plat interceptor*.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Tempat, Waktu, Variabel, Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium *New Renewable-Conservation of Energy*, Fakultas Teknik, Universitas Udayana selama 6 bulan menggunakan pendekatan eksperimental. Variabel bebas berupa *Moisture Content* MSW dengan persentase 50%, 40%, 30%, 20%, 10%. Variabel terikat berupa kandungan  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , efektivitas WMO, dan pemurnian kandungan  $\text{NH}_3$  serta  $\text{H}_2\text{S}$ . Variabel kontrol adalah WMO sisa kendaraan bermotor, kecepatan laju aliran asap 2 m/s, massa MSW 1 kg/variasi, *wood chip* 1 kg/variasi, dan waktu pengambilan data setiap 30 detik selama 5 menit.

Alat yang digunakan, diantaranya meteran, busur, penggaris, mesin bor, gerinda, gunting, spidol, kuas, gergaji kayu, lem aibon, lem *ethyl cyanoacrylate*, *water pump*, *blower*, *fan*, cat pelapis clear anti bocor, martil, paku kecil, *coiled hose*, *thermocouple*, anemometer, *plat interceptor*. Bahan yang digunakan, diantaranya *municipal solid waste* (MSW) dan *waste motor oil* (WMO). MSW dengan *moisture content* yang mengalami proses *drying* berfungsi sebagai bahan baku utama pembentukan *Refused Derived Fuel* (RDF).

Pembentukan RDF mengakibatkan *moisture content* sampah menguap menghasilkan *flue gas* yang terbawa *blower* menuju cerobong asap. Kesesuaian *moisture content* MSW dengan variabel bebas dapat diketahui dengan beberap tahapan, yakni: 1) pengeringan MSW dengan panas matahari pada persentase 50%, 40%, 30%, 20% dan 10%, 2) MSW yang telah dikeringkan dapat ditambahkan persentase air sesuai persentase massa MSW, 3) MSW yang telah dikondisikan diuji dengan metode gravimetri pada suhu  $110^\circ\text{C}$  dalam waktu  $\pm 5$  jam untuk memastikan nilai *moisture content* dari MSW yang digunakan. Nilai *moisture content* didapatkan berdasarkan persamaan berikut:

$$\frac{\text{Berat Awal} - \text{Berat Akhir}}{\text{Berat Awal}} \times 100\%$$

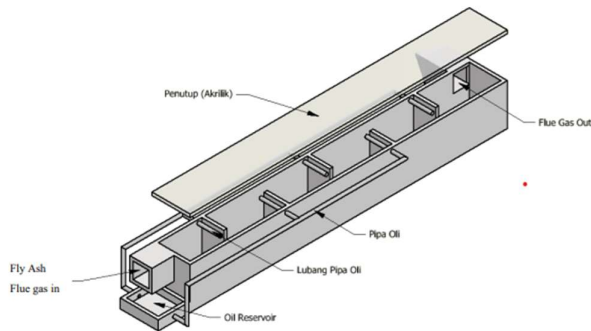
WMO hasil kendaraan bermotor yang tidak terpakai lagi memiliki tingkat viskositas yang tinggi dan tahan terhadap panas sehingga tidak mudah menguap pada suhu tinggi serta dapat menangkap *fly ash* dan *flue gas* lebih baik dari air dan meningkatkan proses pengelolaan limbah B3.

Sistem penangkap asap *interceptor* memiliki beberapa komponen, seperti alat pengering MSW yang berfungsi dalam proses pengeringan, alat penangkap asap *interceptor* untuk membersihkan *flue gas* yang terkontaminasi hasil pengeringan, *plat interceptor* sebagai wadah pengaliran oli bekas sehingga *fly ash* yang teralir ke dalam *scrubber* tertangkap dan udara di dalam *scrubber* tertubulens, *pump* untuk memompa WMO dan dialirkan pada *plat interceptor*, *coiled hose* untuk mengalirkan WMO dari *reservoir* menuju *plat interceptor*, *reservoir* sebagai penampung WMO ketika *scrubber* beroperasi, *fan* sebagai penyalur *fly ash* ke dalam *scrubber*, *blower* sebagai pendorong

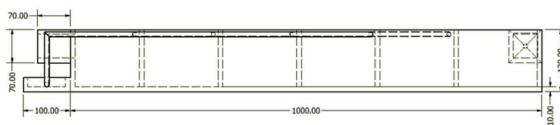


*fly ash* dalam *scrubber* sehingga terjadi turbulens, dan alat ukur berupa *gas detector* dan anemometer untuk mengukur proporsi, kecepatan aliran gas masuk, dan komposisi campuran gas buang ( $\text{NH}_3$  dan  $\text{H}_2\text{S}$ ) yang dihasilkan dari proses pengeringan MSW.

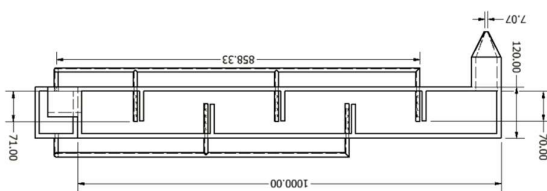
## 2.2 Alat Penangkap Asap *Interceptor* dan Alat Sistem Pengering



**Gambar 1.** Skematik Rancangan Sistem Alat Penangkap Asap *Plat Interceptor*



**Gambar 2.** Skematik Sistem Alat Penangkap Asap *Plat Interceptor* Tampak Samping



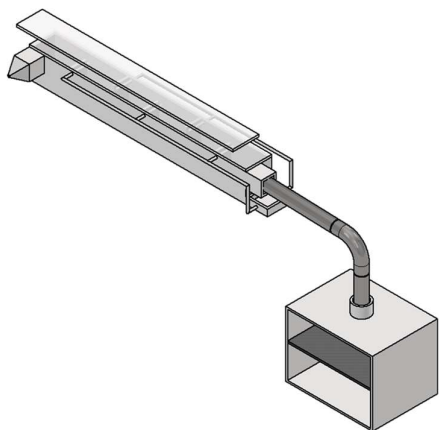
**Gambar 3.** Skematik Sistem Alat Penangkap Asap *Plat Interceptor* Tampak Atas

Sistem alat penangkap asap *interceptor* merupakan alat penyaring *flue gas* hasil pembakaran dan pengeringan dari MSW. Alat alat penangkap asap *interceptor* yang dirancang menggunakan material berbahan kayu dengan tingkat kemiringan  $45^\circ$ . Pada bagian dalam alat penangkap asap *interceptor*

dilapisi dengan cairan anti bocor untuk menghindari kebocoran pada material, dan memiliki jumlah *plat interceptor* 5 bagian dengan disusun secara berkelu-liku yang berfungsi untuk mengatur aliran udara pada alat penangkap asap *interceptor*, sehingga aliran gas yang masuk pada sistem mengalami turbulens. Pada *plat interceptor* di aliri WMO yang berfungsi untuk menangkap partikel-partikel pada *flue gas* yang masuk ke dalam alat ini dengan menggunakan *blower* dan *fan*.

Alat penangkap asap *interceptor* akan menangkap *flue gas* hasil proses pengeringan dan menurunkan kepekatan *flue gas* hasil pengeringan MSW yang dilakukan pada alat pengering dengan *blower* untuk mengalirkan *flue gas* yang dihasilkan. Alat penangkap asap *interceptor* akan menggunakan *plat* berlapis dengan dialiri WMO untuk memulihkan konsentrasi abu terbang, ammonia dan asap. Cara kerja alat penangkap asap *interceptor* untuk membersihkan gas buang hasil proses pengeringan MSW dengan kecepatan yang telah ditentukan dan timbulnya turbulensi akibat *plat interceptor* yang disusun secara *zig-zag*. Cara ini menimbulkan turbulensi dalam fluida, sehingga gas yang disuplai akan terperangkap pada media WMO dan kepekatan asap dapat dikurangi. Pompa yang bekerja akan mengalirkan WMO ke *plat interceptor* menggunakan selang bening, sedangkan *flue gas* hasil pengeringan yang mencapai *plat interceptor* terakhir melalui *filter* akan keluar melalui saluran gas buang dan mengalami proses pengukuran kandungan.

## 2.3 Alat Pengering



**Gambar 4.** Skematik Sistem Pengering *Moisture Content* MSW

Alat pengering merupakan tempat berlangsungnya proses pengeringan MSW dengan memanaskan MSW pada *chamber* pengeringan dengan menggunakan energi panas dari briket yang telah dipanaskan, hal ini bertujuan untuk menguapkan *moisture content* yang terdapat pada MSW. Kelembapan MSW akan menguap menjadi *flue gas* yang selanjutnya dialirkan menggunakan selang menuju alat penangkap asap *interceptor*. Sistem pengeringan ini menggunakan konsep seperti mesin pengering *rotary dryer* di TPST Kertalangu dengan memodifikasi sistem dalam skala kecil dan penggunaan bahan bakar penghasil sumber panas untuk proses pengeringan. Sistem pengering ini dirancang menggunakan besi plat dan dibagi menjadi dua bagian *chamber*, yaitu *chamber* pengeringan MSW pada bagian atas dan *chamber* penghasil energi panas pada bagian bawah.

*Municipal Solid Waste* (MSW) dengan *moisture content* yang akan mengalami proses pengeringan, diletakan di panel pembatas menggunakan besi polos pada *chamber* pengeringan dengan posisi berada diatas panel pembatas proses pembakaran. Sedangkan gas panas yang digunakan untuk

menguapkan *moisture content*, didapat dari hasil briket yang telah dipanaskan secara eksternal supaya tidak mempengaruhi hasil *flue gas* ketika dipanaskan didalam *chamber*. Energi panas dari bahan bakar padat briket tidak mengalami kontak langsung dengan MSW yang akan dikeringkan karena terdapat panel pembatas menggunakan jaring besi untuk mengaliri gas panas dan menjaga MSW tidak jatuh ke dalam *chamber* penghasil energi panas pada proses pengeringan berlangsung.

## 2.4 Pengujian Penelitian

Langkah pengujian diawali dengan seluruh alat dan bahan dipersiapkan dan dipastikan dalam kondisi siap pakai, bahan bakar *wood chip* dipanaskan pada *chamber* pembakaran, MSW dengan satu variasi MC dalam satu kali *running* (50%; 40%; 30%; 20%; 10%) dimasukkan pada *chamber* pengeringan, *flue gas* dikeluarkan melalui saluran pembuangan, *pump* dihidupkan untuk mengalirkan WMO pada sistem *scrubber*, kecepatan *flue gas* yang masuk diatur dengan *blower* dan *fan* mencapai 2 m/s, *timer* disiapkan pada setiap pengujian variasi untuk mengukur waktu proses beroperasinya alat penangkap asap *interceptor* dan penurunan kepekatan *flue gas* ketika pengambilan sampel menggunakan alat ukur, sampel kandungan  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , kepekatan *flue gas* dan volume gas pada proses pemurnian *flue gas* diambil menggunakan alat ukur. Seluruh tahapan diulangi pada seluruh variasi MC MSW. Hasil data yang didapatkan berupa kandungan  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , kepekatan *flue gas* dan volume gas sebelum dan setelah perlakuan berlangsung dicatat dan dilakukan olah data.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Karakteristik *Waste Motor Oil* (WMO)

Kandungan WMO perlu diketahui untuk melihat karakteristik WMO sebelum dan sesudah pada penggunaan alat penangkap asap *interceptor*. Karakteristik WMO diketahui melalui pengujian *proximate* menggunakan *thermo gravimetric analysis* (TGA).

#### 3.1.1 Pengujian *Proximate*

*Thermogravimetric analysis* (TGA) adalah alat untuk mengetahui parameter *proximate* berupa senyawa fisika, yakni *moisture content* (kadar air), *volatile matter* (zat terbang), *fixed carbon* (karbon padat), dan *ash* (kadar abu). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh WMO dalam menangkap kandungan dan partikel-partikel pada *flue gas* yang dihasilkan dari proses pengeringan MSW.

**Tabel 1.** Tabel Uji *Proximate Waste Motor Oil* (WMO)

| <i>Weight Loss (%)</i> |                 |            |                     |
|------------------------|-----------------|------------|---------------------|
| <i>Moisture</i>        | <i>Volatile</i> | <i>Ash</i> | <i>Fixed Carbon</i> |
| 0.12                   | 99.35           | 0.05       | 0.48                |

### 3.2 Pengondisian *Municipal Solid Waste* (MSW)

Pengondisian MSW dilakukan untuk mengetahui persentase kadar air (*moisture content*) sebagai penentu kandungan *flue gas* yang dihasilkan pada proses pengeringan. Persentase kadar air (*moisture content*) MSW bersifat fluktuatif yang dapat dipengaruhi oleh komposisi MSW, frekuensi pengumpulan, musim atau cuaca, sistem penyimpanan serta temperatur lingkungan. Oleh karena itu, MSW memerlukan beberapa tahapan pengondisian sebelum menjadi bahan penelitian.

#### 3.2.1 *Treatment Awal Municipal Solid Waste* (MSW)

Perlakuan awal yang dilakukan terhadap MSW bertujuan untuk

menstabilisasi *moisture content* sebelum penelitian. Hal ini dilakukan karena kondisi fluktuatif MC yang terdapat pada MSW dari TPST Kertalangu. MSW dikeringkan menggunakan energi panas matahari selama  $\pm 5$  jam dimulai dari pukul 10.00 s.d 15.00 WITA, kemudian sampel tersebut dibagi-bagi menjadi 1 sebanyak jumlah variasi MC penelitian dan dilakukan penambahan kandungan air sesuai dengan persentase MC dan massa MSW yang digunakan pada penelitian. Hal ini bertujuan untuk membentuk MC yang stabil dan akurat, sehingga kandungan *flue gas* yang dihasilkan dari proses pengeringan MSW maksimal.

#### 3.2.2 Pengujian Gravimetri

Pengujian metode gravimetri menggunakan alat *thermogravimetri analysis* (TGA) dan *furnace* dengan tujuan membuktikan variasi MC pada MSW yang telah mengalami pengondisian melalui perubahan massa yang terjadi akibat dari perubahan temperatur serta mengetahui kandungan *volatile matter* (zat terbang), *fixed carbon* (karbon padat), dan *ash* (kadar abu). Pada pengujian *proximate* menggunakan TGA, MSW hanya mengalami kontak dengan energi panas tanpa memasuki proses pembakaran.

**Tabel 2.** Data Uji *Proximate Municipal Solid Waste* (MSW) dengan Variasi *Moisture Content*

| <i>Weight Loss (%)</i> |     |                 |                 |            |                     |
|------------------------|-----|-----------------|-----------------|------------|---------------------|
| <i>Komposisi (%)</i>   |     | <i>Moisture</i> | <i>Volatile</i> | <i>Ash</i> | <i>Fixed Carbon</i> |
| MSW                    | MC  |                 |                 |            |                     |
| 100%                   | 0%  | 7.80            | 70.91           | 6.24       | 7.92                |
| 50%                    | 50% | 54.80           | 38.59           | 2.77       | 5.85                |
| 60%                    | 40% | 45.43           | 45.08           | 3.74       | 6.75                |
| 70%                    | 30% | 35.23           | 51.61           | 4.25       | 9.03                |
| 80%                    | 20% | 27.21           | 54.95           | 5.06       | 10.77               |
| 90%                    | 10% | 12.83           | 60.22           | 5.79       | 11.71               |

### 3.3 Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian diambil sejak proses *treatment sample* MSW di TPST Kertalangu yang dilanjutkan dengan proses gravimetri MSW untuk mendapatkan variasi 50 % MC, 40% MC, 30% MC, 20% MC, dan 10% MC hingga dilakukan proses pengeringan menggunakan chamber pengering untuk menghasilkan *flue gas* yang kemudian dimurnikan menggunakan alat penangkap asap *interceptor* hingga pengukuran kandungan MSW dengan masing-masing variasi MC menggunakan alat ukur. Berikut adalah data-data yang diperoleh setelah pengujian dilakukan.

#### 3.3.1 H<sub>2</sub>S (Hidrogen Sulfida)

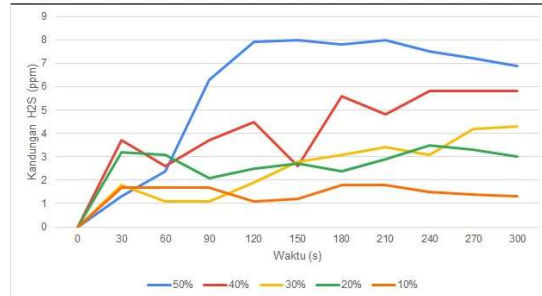
Pembentukan H<sub>2</sub>S pada proses pengeringan MSW sangat dipengaruhi oleh MC yang terkandung di dalamnya. Kandungan MC yang tinggi pada MSW dapat meningkatkan ketersediaan sulfur seperti asam amino dan protein yang merupakan substrat bagi mikroorganisme anaerobik melakukan metabolisme yang menghasilkan produk sampingan berupa H<sub>2</sub>S. Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4 semakin tinggi MC maka kandungan H<sub>2</sub>S akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh MC yang mengandung mikroorganisme pada bahan organik pada MSW terurai dalam kondisi kurang teroksidasi. Mikroorganisme anaerobik mendegradasi bahan organik dan MC yang tinggi mempengaruhi pH pada MSW sehingga mempengaruhi aktivitas mikroorganisme dan menghasilkan produk sampingan berupa H<sub>2</sub>S. Tingginya kandungan H<sub>2</sub>S pada *flue gas* ketika berada pada udara ambien memberikan dampak pada kesehatan manusia serta kondusifitas dari lingkungan, oleh karena itu perlu dilakukan pemurnian kandungan H<sub>2</sub>S setelah proses pengeringan MSW.

**Tabel 3.** Data Kandungan H<sub>2</sub>S Sebelum Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor*

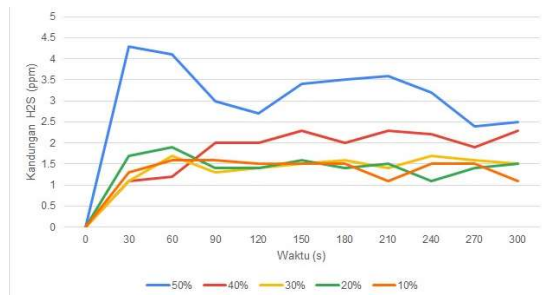
|                  |           | Data Kandungan H <sub>2</sub> S (ppm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|-----------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Moisture Content | Waktu (s) | Waktu (s)                             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                  |           | 0                                     | 30  | 60  | 90  | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 |
| 50%              | 0         | 1.3                                   | 2.4 | 6.3 | 7.9 | 8.0 | 7.8 | 8.0 | 7.5 | 7.2 | 6.9 |
| 40%              | 0         | 3.7                                   | 2.6 | 3.7 | 4.5 | 2.6 | 5.6 | 4.8 | 5.8 | 5.8 | 5.8 |
| 30%              | 0         | 1.8                                   | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 2.8 | 3.1 | 3.4 | 3.1 | 4.2 | 4.3 |
| 20%              | 0         | 3.2                                   | 3.1 | 2.1 | 2.5 | 2.7 | 2.4 | 2.9 | 3.5 | 3.3 | 3.0 |
| 10%              | 0         | 1.7                                   | 1.7 | 1.7 | 1.1 | 1.2 | 1.8 | 1.8 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |

**Tabel 4.** Data Kandungan H<sub>2</sub>S Setelah Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor*

|                  |           | Data Kandungan H <sub>2</sub> S (ppm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|-----------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Moisture Content | Waktu (s) | Waktu (s)                             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                  |           | 0                                     | 30  | 60  | 90  | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 |
| 50%              | 0         | 4.3                                   | 4.1 | 3.0 | 2.7 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.2 | 2.4 | 2.5 |
| 40%              | 0         | 1.1                                   | 1.2 | 2.0 | 2.0 | 2.3 | 2.0 | 2.3 | 2.2 | 1.9 | 2.3 |
| 30%              | 0         | 1.1                                   | 1.7 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.4 | 1.7 | 1.6 | 1.5 |
| 20%              | 0         | 1.7                                   | 1.9 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 1.4 | 1.5 | 1.1 | 1.4 | 1.5 |
| 10%              | 0         | 1.3                                   | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.1 | 1.5 | 1.5 | 1.1 |



**Gambar 5.** Grafik Pengukuran Kandungan H<sub>2</sub>S Sebelum Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor* Terhadap Waktu



**Gambar 6.** Grafik Pengukuran Kandungan H<sub>2</sub>S Setelah Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor* Terhadap Waktu

Dapat dilihat pada tren grafik pengukuran kandungan H<sub>2</sub>S sebelum penggunaan alat penangkap asap *interceptor*, grafik menunjukkan peningkatan kadar H<sub>2</sub>S secara bertahap selama 300 detik. Peningkatan ini terbagi menjadi dua fase dengan kecepatan yang berbeda. Fase 1

menunjukkan kenaikan yang lebih cepat, sedangkan fase 2 menunjukkan kenaikan yang lebih lambat. Pada 270 detik, kadar H<sub>2</sub>S mencapai nilai puncaknya yaitu 8 ppm. Pada **Gambar 6** bahwa terjadi perubahan kandungan H<sub>2</sub>S setelah menggunakan alat penangkap asap *interceptor*. Grafik menunjukkan tren kandungan H<sub>2</sub>S pada detik awal meningkat pada seluruh variasi MC, namun tidak konsisten pada beberapa fluktuasi yang diakibatkan oleh faktor kondisi fluktuatif udara pada saat proses pengujian. Namun, pada detik 150 kandungan H<sub>2</sub>S mencapai nilai puncaknya yaitu 4.5 ppm, hal ini menunjukkan terjadinya penurunan pada kandungan H<sub>2</sub>S dari nilai puncak grafik sebelum penggunaan alat penangkap *interceptor*.

### 3.3.2 NH<sub>3</sub> (Amonia)

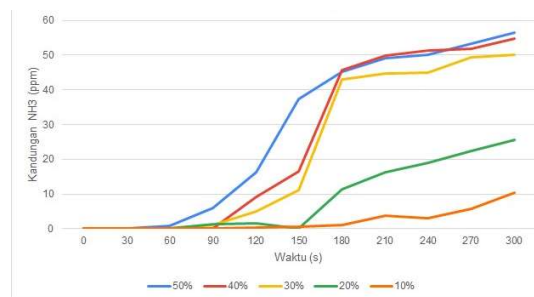
Berdasarkan tabel dibawah, kandungan NH<sub>3</sub> yang diukur menggunakan *gas detector*, sangat dipengaruhi oleh seberapa besar MC yang terdapat pada MSW. Tingginya kandungan MC pada *municipal solid waste*, akan sangat memengaruhi proses dekomposisi bahan organik dan reaksi kimia komposisi lainnya pada MSW, sehingga pembentukan amonia dalam bentuk ammonium akan semakin tinggi dan terlarut pada kandungan MC. Kadar amonia yang terikat pada MSW ketika dalam proses pengeringan dapat terlepas ke udara menjadi *flue gas* sebagai gas amonia (NH<sub>3</sub>).

**Tabel 5.** Data Kandungan NH<sub>3</sub> Sebelum Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor*

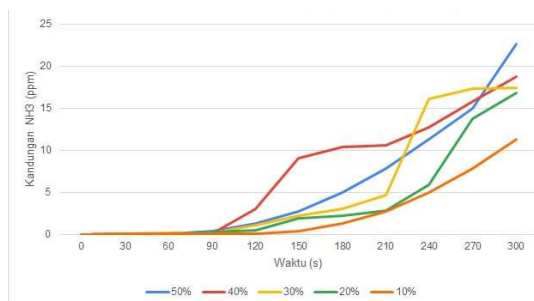
| Data Kandungan NH <sub>3</sub> (ppm) |  |
|--------------------------------------|--|
| Moisture Content                     | Waktu (s)  |
|                                      | 0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300                     |
| 50%                                  | 0 0.02 0.93 5.91 16.39 37.41 45.30 49.25 50.10 53.20 56.50 |
| 40%                                  | 0 0.01 0.01 0.12 9.20 16.57 45.74 49.98 51.30 51.76 54.82  |
| 30%                                  | 0 0.03 0.01 1.13 5.01 11.11 43.06 44.63 45.07 49.26 50.00  |
| 20%                                  | 0 0.01 0.02 1.35 1.68 7.37 11.49 16.23 18.87 22.48 25.58   |
| 10%                                  | 0 0.01 0.01 0.20 0.34 0.64 1.09 3.68 3.15 5.67 10.43       |

**Tabel 6.** Data Kandungan NH<sub>3</sub> Setelah Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor*

| Data Kandungan NH <sub>3</sub> (ppm) |  |
|--------------------------------------|--|
| Moisture Content                     | Waktu (s)  |
|                                      | 0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300                   |
| 50%                                  | 0 0.01 0.01 0.39 1.26 2.71 4.93 7.83 11.28 15.00 22.61   |
| 40%                                  | 0 0.01 0.01 0.11 3.05 9.05 10.34 10.55 12.72 15.75 18.73 |
| 30%                                  | 0 0.01 0.12 0.20 1.11 2.19 3.00 4.68 16.11 17.28 17.45   |
| 20%                                  | 0 0.01 0.01 0.23 0.45 1.93 2.22 2.78 5.91 13.73 16.78    |
| 10%                                  | 0 0.01 0.02 0.03 0.08 0.39 1.26 2.71 4.93 7.83 11.28     |



**Gambar 7.** Grafik Pengukuran Kandungan NH<sub>3</sub> Sebelum Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor* Terhadap Waktu



**Gambar 8.** Grafik Pengukuran Kandungan NH<sub>3</sub> Setelah Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor* Terhadap Waktu

**Gambar 7.** menunjukkan tren peningkatan konsentrasi NH<sub>3</sub> selama periode 300 detik, pada fase awal (0-90 detik) dengan kenaikan moderat dan stabil yang mencerminkan laju peningkatan secara bertahap. Pada fase kedua (90-210 detik), peningkatan konsentrasi NH<sub>3</sub> semakin tinggi. Terefleksikan oleh kemiringan grafik yang curam, peningkatan tersebut diakibatkan oleh faktor intensifikasi dari aktivitas pengeringan MSW yang menghasilkan kandungan NH<sub>3</sub>. Pada fase ketiga (210-300 detik), terjadi perlambatan laju peningkatan namun kandungan NH<sub>3</sub> yang di ukur masih meningkat. Sedangkan pada **Gambar 8**, tren



grafik selama periode 300 detik menunjukkan tren kenaikan kandungan NH<sub>3</sub> yang sama dengan grafik pada **Gambar 7**, karena *flue gas* yang dihasilkan berasal dari MSW dan suhu pengeringan yang sama antara sebelum penggunaan alat penangkap asap *interceptor* dan sesudah penggunaan alat, namun pada tren grafik **Gambar 8**, kandungan NH<sub>3</sub> lebih rendah, hal ini disebabkan *flue gas* telah mengalami pemurnian oleh WMO pada alat penangkap *interceptor*.

### 3.4 Efektivitas *Waste Motor Oil* (WMO)

Pengukuran nilai efektivitas dari WMO diukur menggunakan parameter *ash* yang telah ditangkap pada proses penangkapan asap menggunakan alat penangkap asap *interceptor*. Pengukuran sebelum menggunakan alat penangkap asap *interceptor* dapat dilihat pada **Tabel 1**, sedangkan pengukuran setelah menggunakan alat penangkap asap *interceptor* dapat dilihat pada **Tabel 7**. Contoh perhitungan efektivitas WMO menggunakan persamaan sebagai berikut:

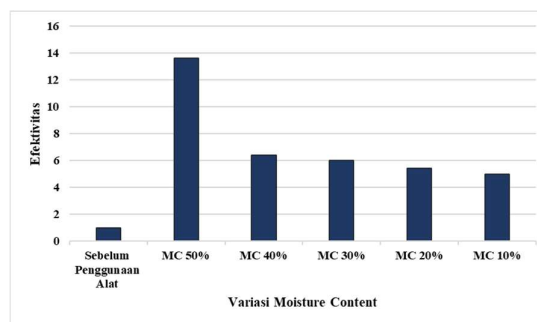
$$E = \frac{\text{Kandungan Ash Akhir}}{\text{Kandungan Ash Awal}} = \frac{0.68}{0.05} = 13,6$$

**Tabel 7.** Nilai Kandungan *Waste Motor Oil* (WMO) Setelah Pengujian

| Variasi | Weight Loss (%) |          |          |      |              | Efektivitas |
|---------|-----------------|----------|----------|------|--------------|-------------|
|         | Initial Mass    | Moisture | Volatile | Ash  | Fixed Carbon |             |
| MC 50%  | 1.0684          | 1.07     | 99.47    | 0.68 | 0.13         | 13,6        |
| MC 40%  | 1.0434          | 0.13     | 99.49    | 0.32 | 0.05         | 6,4         |
| MC 30%  | 1.1227          | 1.51     | 100.7    | 0.30 | 0.08         | 6           |
| MC 20%  | 1.0795          | 3.51     | 96.16    | 0.27 | 0.07         | 5,4         |
| MC 10%  | 1.0892          | 0.50     | 99.18    | 0.25 | 0.06         | 5           |

Berdasarkan tabel diatas penggunaan WMO jika dilihat dari parameter *ash* yang berhasil di ukur, mengalami peningkatan performa efektivitas penurunan kepekatan *flue gas* pada setiap variasi MC MSW. Performa efektivitas WMO pada penelitian ini menunjukkan terjadinya peningkatan kandungan *ash* pada WMO yang sebelum digunakan pada media alat penangkap asap

*interceptor* mencapai 0.26, kemudian meningkat seperti pada **Tabel 7**. Pada **Gambar 9** menunjukkan peningkatan efektivitas WMO dalam menangkap ash dari proses pengeringan MSW dengan variasi MC 50% memperoleh efektivitas paling tinggi jika dibandingkan dengan kandungan awal WMO.



**Gambar 9.** Perbandingan Efektivitas WMO pada Setiap Variasi MC

### 3.5 Efisiensi Pemurnian Kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S

Nilai efisiensi kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S pada setiap variasi MC ditampilkan pada tabel, dan dapat dilihat bahwa pada tabel menunjukkan jumlah total kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S sebelum menggunakan alat penangkap asap *interceptor* dan setelah penggunaan alat penangkap asap *interceptor* yang kemudian dihitung nilai efisiensinya menggunakan persamaan. Efisiensi NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S sebelum menggunakan alat penangkap asap *interceptor* sebesar 37.831 ppm, setelah dilakukan pengujian menggunakan alat penangkap asap *interceptor* terjadi penurunan pada nilai kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S hingga menjadi 9.873 pada variasi MC 50%. Nilai efisiensi terbaik di dapatkan pada variasi 50% MC dengan efisiensi sebesar 73.902 %. MC akan sangat mempengaruhi pada performa penurunan kepekatan *flue gas* oleh alat penangkap asap *interceptor*. Contoh perhitungan efisiensi penurunan kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S hasil proses pengeringan MSW



adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{Kandungan Polutan} - \text{Kandungan Polutan Akhir}}{\text{Kandungan Polutan Awal}} \times 100\%$$

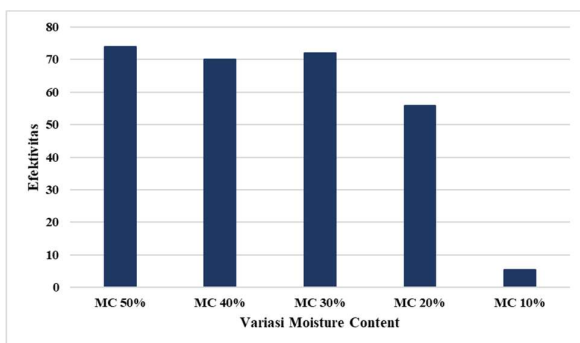
$$= \frac{37.831 - 9.873}{37.831} \times 100\% = 73.902$$

**Tabel 8.** Data Total Kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S Sebelum Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor*

| Data Total Kandungan NH <sub>3</sub> dan H <sub>2</sub> S Sebelum Penggunaan Alat Penangkap Asap <i>Interceptor</i> |                  |               |               |               |              |
|---|------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Variabel  | Moisture Content |               |               |               |              |
|   | 50%              | 40%           | 30%           | 20%           | 10%          |
| NH <sub>3</sub>   | 31.501           | 27.951        | 24.931        | 10.508        | 2.522        |
| H <sub>2</sub> S  | 6.33             | 4.49          | 2.68          | 2.87          | 1.52         |
| <b>Total</b>  | <b>37.831</b>    | <b>32.441</b> | <b>27.611</b> | <b>13.378</b> | <b>4.274</b> |

**Tabel 9.** Data Total Kandungan NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S Setelah Penggunaan Alat Penangkap Asap *Interceptor*

| Data Total Kandungan dan Efisiensi NH <sub>3</sub> dan H <sub>2</sub> S Setelah Penggunaan Alat Penangkap Asap <i>Interceptor</i> |                  |               |               |               |              |
|---|------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Variabel  | Moisture Content |               |               |               |              |
|   | 50%              | 40%           | 30%           | 20%           | 10%          |
| NH <sub>3</sub>   | 6.603            | 8.032         | 6.224         | 4.405         | 2.854        |
| H <sub>2</sub> S  | 3.27             | 1.70          | 1.48          | 1.49          | 1.42         |
| <b>Total</b>  | <b>9.873</b>     | <b>9.732</b>  | <b>7.704</b>  | <b>5.895</b>  | <b>4.042</b> |
| <b>Efisiensi</b>  | <b>73.902</b>    | <b>70.000</b> | <b>72.098</b> | <b>55.935</b> | <b>5.428</b> |



**Gambar 10.** Perbandingan Efisiensi Pemurnian NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S pada Setiap Variasi MC

Berdasarkan **Gambar 10**, variasi MC

50% menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 73.902%, 40% MC sebesar 70.000%, 30% MC sebesar 72.098%, 20% MC sebesar 55.935%, dan 10% MC sebesar 5.428%.

#### 4. Kesimpulan

Tingginya MC pada MSW sangat memengaruhi nilai kandungan *flue gas* (NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S) yang dihasilkan dari proses pengeringan MSW sangat dipengaruhi oleh kandungan MC dan komposisi kimia bereaksi ketika pemanasan. Semakin tinggi MC yang dimiliki MSW maka komposisi kimia yang terkandung juga semakin tinggi. Tidak hanya itu, fraksi sampah MSW juga mempengaruhi komposisi kimia pada MC. Tingginya MC dapat mengurangi efisiensi pengeringan karena sebagian besar energi panas dibebankan untuk menguapkan MC pada MSW sehingga produk sampingan dari penguapan MC yang tinggi pada *flue gas* terbentuk.

Namun, meningkatnya MC pada MSW akan mengurangi pembentukan kandungan CO<sub>2</sub> dan meningkatkan pembentukan CO akibat suhu pada proses pengeringan belum mencapai titik pembakaran sempurna karena tingginya kelembapan MSW akibat persentase MC yang tinggi. Sebaliknya, rendahnya MC akan lebih mengoptimalkan pembentukan CO<sub>2</sub> karena mampu meningkatkan laju energi panas dan memungkinkan oksigen untuk berinteraksi lebih efisien dengan bahan bakar. Kemampuan WMO menangkap partikel dipengaruhi oleh banyaknya partikel yang dihasilkan pada proses pengeringan MSW. Hasil efisiensi WMO terjadi pada variasi 50% MC dengan nilai 13,6% dan 0.68 *ash*.

#### Daftar Pustaka

[1] Kereh, R.L., Riza, A. dan Tanujaya, H. (2022) 'Analisis Karakteristik

- Pengering Sampah Organik Tipe Tray Dryer dengan Pendekatan CFD’, *Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(7), pp. 9804–9815.
- [2] Nanda, S. and Berruti, F. (2021) ‘Municipal Solid Waste Management and Landfilling Technologies: A Review’, *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), pp. 1433–1456. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>.
- [3] Naryono, E. (2013) ‘Perancangan Sistem Pemilahan, Pengeringan dan Pembakaran Sampah Organik Rumah Tangga’, *Indonesian Green Technology Journal*, pp. 27–36.
- [4] Santosa, S. (2012) ‘Peningkatan Nilai Kalor Produk pada Produk Proses Bio-Drying Sampah Organik Improved Calor Value on Biodrying Production of Organic Waste’.
- [5] Siti Nuryani, Sigid Sudaryonto, H Sardjito Eko Windarso, J.M.S. (2021) ‘MODIFICATION OF THE WET SCRUBBER TO REDUCE DUST LEVELS AND SMOKE CONCLUSIONS AT IMMOVABLE EMISSION SOURCES’, 7(02), pp. 1-7.
- [6] Triyadi, D. and Gandidi, I.M. (2019) ‘Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan Software Aspen Plus’, 10(1).

|   |   |
|---|---|
|    | <p><b>I Wayan Andrayuga</b> menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024</p> |
| <p>Efektifitas <i>Waste Motor Oil</i> Pada <i>Plat Interceptor</i> Sebagai Media Penurunan Kepekatan <i>Fuel Gas</i> Pada Variasi <i>Moisture</i></p> |   |

Content MSW

|  |  |
|--|--|
|    | <p>Prof, I Nyoman Suprapta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Dalhousie University pada tahun 2000, dan S3 di Niigata University pada tahun 2008. Prof, I Nyoman Suprapta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|  | <p>I Wayan Arya Darma, S.T., M.T. menyelesaikan program S1 di Universitas Udayana pada tahun 2013 dan S2 di Universitas Udayana pada tahun 2018.</p>   |
|  | <p>I Gusti Ngurah Putu Tenaya S.T, MT. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994 dan S2 di Universitas Udayan tahun 2007 memiliki konsentrasi ilmu dalam konversi energi.</p>  |
|  | <p>I Putu Angga Yuda Pratama S.T, MT. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun</p>   |



2019 dan S2 di  
Universitas Udayan  
tahun 2021 memiliki  
konsentrasi ilmu  
dalam bidang  
konversi energi.

# Karakteristik Kekerasan Perunggu Sebagai Material Gambelan Pada Proses *Casting* Pembuatan Gambelan Bali

Dewa Nyoman Tri Astawa Putra, I.K.G Sugita, DNK Putra Negara  
*Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

*Perunggu merupakan material paduan dari tembaga (Cu) dengan timah (Sn), umumnya perunggu merupakan material yang digunakan pada pembuatan gambelan. Pembuatan gambelan melalui beberapa tahapan proses yaitu casting, forging dan heat treatment. Proses manufacturing gambelan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis yang dihasilkan. Casting merupakan salah satu proses manufaktur pada material logam yang dicairkan dan dicetak untuk menghasilkan sebuah produk dengan mendekati bentuk geometri produk. Penelitian ini menggunakan pengujian sifat mekanis khususnya kekerasan pada proses casting. Tahapan pada proses manufaktur casting, memiliki nilai yang hampir sama di ketiga nada, nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada nada dang dengan nilai 138,33 VHN dan pada nada dong memperoleh nilai kekerasan sebesar 137,23 VHN, pada nada ding memperoleh nilai kekerasan sebesar 138,40 VHN.*

*Kata Kunci : perunggu, casting, kekerasan*

## Abstract

*Bronze is an alloy material of copper (Cu) with tin (Sn), generally bronze is the material used in making gambelan. Making gambelan goes through several process stages, namely casting, forging and heat treatment. The gambelan manufacturing process greatly influences the mechanical properties produced. Casting is a manufacturing process in which metal materials are melted and molded to produce a product that approximates the geometric shape of the product. This research uses testing of mechanical properties, especially hardness in the casting process. Stages in the process casting manufacturing, has almost the same value in all three tones, the highest hardness value is obtained in the dang tone with a value of 138.33 VHN and in the dong tone it obtains a hardness value of 137.23 VHN, in the ding tone it obtains a hardness value of 138.40 VHN.*

*Keywords: bronze, casting, hardness*

## 1. Pendahuluan

Gambelan merupakan sebuah alat musik tradisional yang merupakan warisan budaya dari Bali, Jawa, dan Sunda, yang dalam sistem tangga nada slendro dan pelog menggunakan tangga nada pentatonis. Gambelan sangat berperan penting dalam pelaksanaan kegiatan budaya maupun upacara yang ada di Indonesia. Gambelan pada umumnya dibuat dengan cara pengecoran, penempaan dan heat treatment dengan menggunakan material perunggu [1].

Perunggu merupakan material paduan dari tembaga (Cu) dengan timah (Sn), pada material paduan perunggu komposisi timah sangat berpengaruh dalam menentukan sifat fisis yang akan dihasilkan dari perunggu tersebut [2]. Instrumen musik seperti gambelan dan lonceng sering menggunakan perunggu dengan komposisi 80%Cu dan 20%Sn. Paduan ini memiliki suara yang panjang dan sifat mekanis yang baik (low dumping vibration) [3].

Proses pembuatan gambelan melalui beberapa tahapan yaitu proses casting material perunggu kemudian lanjut pada proses forging gambelan yang bertujuan untuk pemadatan dan membuat profil pada bilah gambelan, terakhir melalui proses heat treatment yang bertujuan untuk melepaskan tegangan sisa [4].

*Casting* merupakan salah satu proses manufaktur pada material logam yang dicairkan dan dicetak untuk

menghasilkan sebuah produk dengan mendekati bentuk geometri produk [5]. Tujuan pengecoran adalah untuk menghasilkan produk yang baik, bebas cacat dan memiliki sifat-sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan, kekerasan dan ketelitian dimensi [6]. Material perunggu memerlukan temperature lebur yaitu 950°C sampai dengan 1050°C. Temperatur tuang adalah salah satu faktor yang mempengaruhi sifat material selama proses pengecoran. Temperatur tuang pada proses pengecoran logam sangat berdampak pada sifat mekanis dan fisis material, sehingga material yang dihasilkan memiliki sifat mekanis dan fisis yang baik [6].

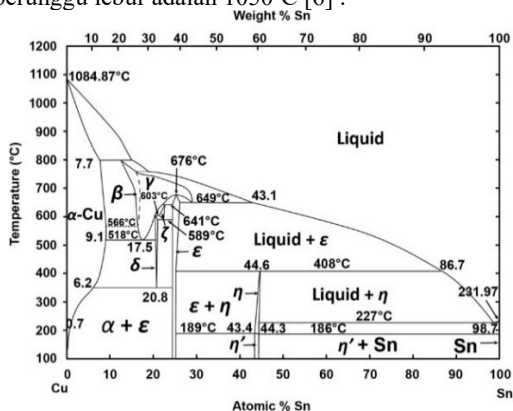
Berdasarkan latar belakang, dari penelitian sebelumnya belum terdapat penelitian sifat mekanis pada proses *casting* pembuatan gambelan, karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui sifat mekanik material gambelan, khususnya kekerasan material gambelan.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Perunggu

Perunggu adalah material paduan dari tembaga (Cu) dengan Timah (Sn), dimana pada material paduan perunggu komposisi timah sangat berpengaruh dalam menentukan sifat fisis yang akan dihasilkan dari perunggu [2]. Paduan tembaga dan timah yang ditambahkan dengan logam lain seperti seng, aluminium, silikon, fosfor, atau mangan. Memberikan perunggu sifat tertentu, elemen seperti

mangan, timah, dan fosfor yang ditambahkan. Misalnya, fosfor dan timbal ditambahkan untuk membuat perunggu lebih keras untuk tabung dan bagian mesin, sementara timbal ditambahkan untuk membuat cetakan lebih mudah. Suhu dimana perunggu lebur adalah 1050°C [6].



Gambar 1. Diagram Fasa Cu-Sn

### 2.1 Pengecoran

Pengecoran merupakan salah satu proses manufaktur melibatkan peleburan dan pencetakan logam untuk menghasilkan produk dengan bentuk geometri tertentu [4]. Tujuan pengecoran adalah untuk menghasilkan produk yang baik, bebas cacat dan memiliki sifat-sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan, kekerasan dan ketelitian dimensi [6]. Proses Pengecoran menghasilkan struktur dendrit yang terbentuk ketika logam cair membeku. Struktur dendrit terbentuk karena logam cair mendingin dan membeku dari luar ke dalam. Struktur dendrit pada Cu-Sn memiliki beberapa pengaruh sifat-sifat pada logam yang dicor. Struktur dendrit yang halus akan menghasilkan logam yang lebih kuat dan tahan lama. Struktur dendrit kasar akan menghasilkan logam yang rapuh atau getas.

### 2.2 Kekerasan

Kekerasan merupakan karakteristik mekanik material. Kekerasan suatu bahan terutama untuk bahan yang mengalami deformasi plastis dan gesekan akibat tekanan, adalah ketika suatu material diberikan gaya sehingga tidak dapat kembali ke bentuk semula. Kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi disebut kekerasan.

#### 2.4.1 Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan vickers menggunakan penumbuk piramida intan, yang pada dasarnya berbentuk bujur sangkar, digunakan untuk menguji kekerasan vickers. Sudut yang membentuk jarak antara dua permukaan piramida adalah 136°, yang dipilih karena nilai ini hampir sama dengan nilai perbandingan yang diinginkan antara diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan Brinell [7].



Gambar 2. Identor Vickers dan Bentuk Identasi

Angka kekerasan vickers dihitung dengan mengukur panjang diagonal jejak secara mikroskopik. Ini dihitung dengan persamaan berikut:

$$VHN = \frac{1,854 P}{D^2} \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

P = beban yang bekerja, kg

D = panjang diagonal rata-rata, mm

Karena jejak dibuat dengan penumbuk piramida geometris, uji Vickers tidak bergantung pada beban. Beban yang biasa digunakan untuk menguji kekerasan logam berkisar antara 1 hingga 120 kilogram.

### 3. Metode Penelitian

Adapun alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

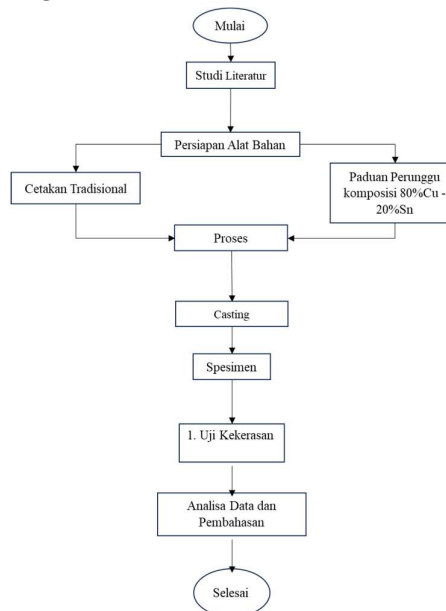
#### 3.1 Alat

1. Dengan menggunakan bahan bakar arang, tungku krusibel memanaskan logam hingga mencair.
2. Termokopel Type K berfungsi untuk mengukur temperature peleburan.
3. Alat ukur untuk mengukur dimensi dan lebar.
4. Kowi untuk penuangan hasil peleburan kedalam cetakan

#### 3.2 Bahan

Material perunggu dengan massa 1200 gram.

#### 3.3 Diagram Penelitian



Gambar 3. Diagram Alir

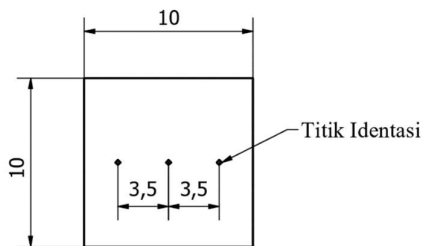
### 3.4 Metode Uji

Pengujian kekerasan vickers dilakukan dengan indenter piramida intan, besar sudut antar permukaannya adalah 136°. Proses pemeriksaan ini menggunakan standar ASTM E-92.

Adapun langkah – langkah dalam melakukan pengujian kekerasan vickers sebagai berikut :

1. Siapkan alat uji kekerasan vickers
2. Pasang indenter vickers
3. Letakkan spesimen di landasan dan atur tepat pada titik penetrasi
4. Putar handle beban, atur pada pembebanan 10 kgf pada posisi siap penetrasi
5. Putar sehingga permukaan spesimen menyentuh ujung indenter
6. Tarik handle beban dan lakukan pembebanan selama 15 detik
7. Atur posisi spesimen dan fokus lensa sehingga bekas indentasi muncul di layar
8. Hitung diagonal indentasi pada posisi datar dan tegak dengan mikroskop pengukur.
9. Masukkan data- data tersebut ke rumus pada persamaan
10. Ulangi proses pengujian pada spesimen lainnya.

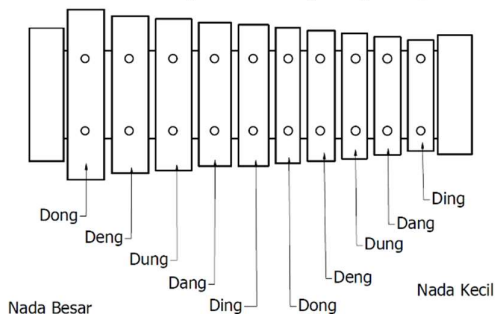
Proses pengujian kekerasan pada setiap spesimen hasil coran dilakukan pengujian sebanyak 3 titik indentasi, selanjutnya nilai kekerasan yang diambil pada satu spesimen merupakan rata – rata dari nilai hasil pengujian pada ketiga titik tersebut.



Gambar 4. Titik Identasi Uji Kekerasan

### 3.5 Proses Pembuatan Bilah Gambelan

Bilah gambelan didesain menggunakan autodesk inventor seperti dilihat pada pada gambar 5.



Gambar 5. Desain Bilah Gambelan Bali

Pada penelitian ini spesimen uji Kekerasan dilakukan pengambilan sampel di 3 nada yaitu dong, ding pada nada besar dan dang pada nada kecil di gambelan gangsa bali, yang memiliki ukuran berbeda disetiap nada. Pembuatan specimen menggunakan metode casting dengan cetakan tradisional. Paduan perunggu yang digunakan yaitu 80%Cu-20%Sn dan di cetak pada tiga nada yang berbeda yaitu nada dong,ding, dan dang.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Uji Kekerasan Vickers

Selanjutnya, data dari pengujian Hardness Vickers diolah untuk menghasilkan nilai kekerasan spesimen menggunakan persamaan berikut :

$$VHN = \frac{1,854 P}{D^2} \dots \dots \dots (2)$$

Perhitungan data kekerasan vickers pada spesimen pengecoran dicontohkan sebagai berikut.

Diketahui :

- P = 10 kg
- d1 = 0,24mm
- d2 = 0,48 mm
- Ditanya : VHN = .....?

Penyelesain :

Menghitung diagonal rata-rata d

$$D = \frac{d1+d2}{2}$$

$$= \frac{0,24+0,48}{2}$$

$$= 0,36$$

Menghitung HVN :

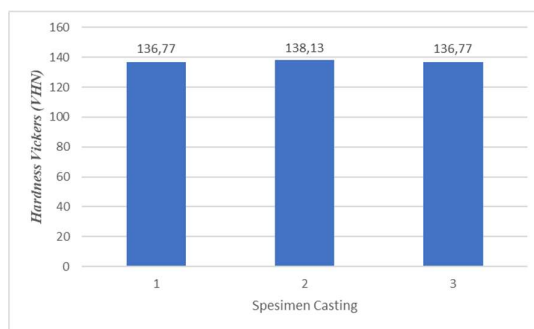
$$HVN = \frac{1,854 P}{D^2}$$

$$HVN = \frac{1,854 \times 10 \text{ kg}}{(0,36 \text{ mm})^2}$$

$$HVN = 143,06 \text{ kg/mm}^2$$

### 4.2 Hasil Data Pengujian Vickers

#### 4.2.1 Hasil Data pengujian Vickers Pada Nada Dong

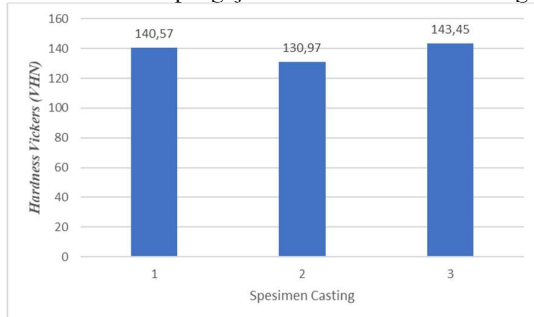


Gambar 6. Grafik Pengujian Kekerasan Vickers Spesimen Nada Dong

Pada gambar 6 menunjukkan nilai kekerasan spesimen 2 lebih tinggi dengan nilai 138,13 kg/mm<sup>2</sup> dari pada spesimen 1 dengan nilai 136,77 kg/mm<sup>2</sup> dan 136,77 kg/mm<sup>2</sup> pada spesimen 3



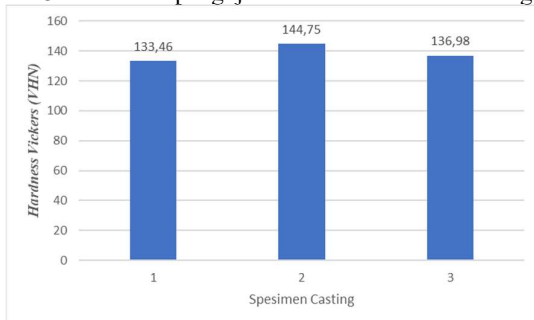
#### 4.2.2 Hasil Data pengujian Vickers Pada Nada Ding



Gambar 7. Grafik Pengujian Kekerasan Vickers Spesimen Nada Ding

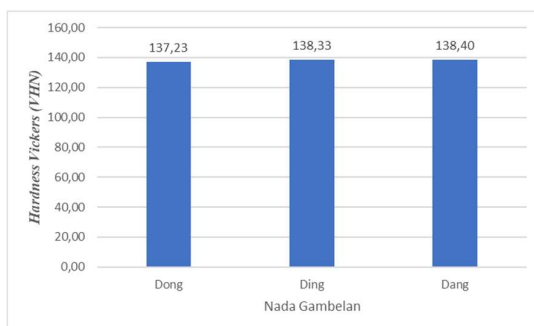
Pada gambar 7 menunjukkan nilai kekerasan spesimen 3 lebih tinggi dengan nilai 143,45 kg/mm<sup>2</sup> dari pada specimen 2 dengan nilai 130,97 kg/mm<sup>2</sup> dan 140,57 kg/mm<sup>2</sup> pada specimen 1

#### 4.2.3 Hasil Data pengujian Vickers Pada Nada Dang



Gambar 8. Grafik Pengujian Kekerasan Vickers Spesimen Nada Dang

Pada gambar 8 menunjukkan nilai kekerasan spesimen 2 lebih tinggi dengan nilai 144,75 kg/mm<sup>2</sup> dari pada specimen 1 dengan nilai 133,46 kg/mm<sup>2</sup> dan 136,98 kg/mm<sup>2</sup> pada specimen 3.



Gambar 9. Grafik Rata-Rata Pengujian Kekerasan Vickers

Berdasarkan data dari pengujian kekerasan Vickers pada specimen bilah gambelan di tiga nada, nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada nada dang dengan nilai 138,40 kg/mm<sup>2</sup> dan kekerasan terkecil diperoleh pada nada dong dengan nilai 137,23 kg/mm<sup>2</sup>. Peningkatan nilai kekerasan ini diakibatkan

spesimen memiliki ukuran cetakan yang berbeda dari ke tiga nada yang diuji.

#### 5. Kesimpulan

Hasil penelitian menghasilkan kesimpulan berikut:

Tahapan pada proses manufaktur casting, memiliki nilai yang hampir sama di ketiga nada, nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada nada dang dengan nilai 138,40 VHN dan pada nada dong memperoleh nilai kekerasan sebesar 137,23 VHN, pada nada ding memperoleh nilai kekerasan sebesar 138,33 VHN.

#### Daftar Pustaka

- [1] Kristanto, A. (2010). Studi kuantitatif urutan proses pembuatan gamelan jenis bonang pelog nada 1 (siji).
- [2] Slamet, S., & Suyitno, S. (2017). Pengaruh Komposisi dan Temperatur Ruang terhadap Fluiditas Paduan Perunggu Timah Melalui Investment Casting. Prosiding SNATIF, 655–660.
- [3] Sugita, I., & Astawa, K. (2016). Studi Dendrite Arm Spacing (Das) Dan Akustik Pada Pengecoran Perunggu 20% Sn Sebagai Bahan Gamelan. Buletin Udayana Mengabdikan, 15(1), 44–49.
- [4] Azhar, O. F., Kurniawan, A., & Radhitanti, A. (2018). Perancangan Buku Pengetahuan Populer Mengenai Proses Pembuatan Gamelan Sunda Bah Omo di Wilayah Cimahi, Jawa Barat. Jurnal Rekamakta Institut Teknologi Nasional.
- [5] Hermawan, P. S., Purwanto, H., & Respati, S. M. B. (2013). Analisa Pengaruh Variasi Temperatur Tuang Pada Pengecoran Squeeze Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Produk Sepatu Kampas Rem Dengan Bahan Aluminium (Al) Silikon (Si) Daur Ulang. Majalah Ilmiah Momentum, 9(2).
- [6] Wigangga, M. S. S., Sugita, I. K. G., & Priambadi, I. G. N. (2015). Karakteristik porositas paduan perunggu timah putih (80% Cu-20% Sn) dan perunggu silikon (95% Cu-5% Si) dengan variasi laju pendinginan pada pengecoran cetakan pasir. Jurnal Ilmiah TEKNIK DESAIN MEKANIKA Vol. No. 1, 7.
- [7] Shomad, M. A., Wisnujati, A., & Mudjijana, M. (2022). Karakterisasi Pengecoran Paduan Al-Si-TiB dengan Variabel Suhu Die Casting. Rekayasa, 15(3), 300–307

|   |   |
|---|---|
|  | <p><b>Dewa Nyoman Tri Astawa Putra</b><br/>menyelesaikan studi S1 di<br/>Universitas Udayana, program<br/>studi Teknik Mesin.</p> |
| <p>Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi adalah<br/>Sistem Manufaktur.</p>   |   |

# Pengaruh Penambahan Timah Hitam (Pb) Pada Paduan *High-Tin Bronze* Terhadap Kekerasan

I Gede Suarjaya, I Ketut Gede Sugita, dan DNK Putra Negara  
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

## Abstrak

*High-tin bronze, mengandung 80% tembaga (Cu) dan 20% timah putih (Sn), digunakan pada alat music yaitu lonceng dan gamelan. Paduan ini stabil pada suhu ruangan dan mempunyai sifat akustik yang baik, artinya dapat menghasilkan suara bernada tinggi namun bersifat getas. Upaya yang dapat diberikan untuk meningkatkan kekerasan pada paduan high-tin bronze diberikan melalui penambahan timah hitam (Pb). Pada penelitian ini dilakukan proses pengecoran paduan High-Tin Bronze dengan penambahan timah hitam (Pb) dengan variasi 10%, 15%, dan 20% pada temperatur tuang 950 °C. Hasil pengujian Vickers menunjukkan bahwa kekerasan high-tin bronze meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi timah hitam (Pb). Nilai terkuat terdapat pada paduan high-tin bronze 80% + paduan Pb 20% dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 224,19 VHN. Sedangkan nilai terendah didapat pada paduan high-tin bronze tanpa penambahan timah hitam (Pb) dengan rata-rata nilai kekerasan sebesar 202,42 VHN.*

*Kata kunci : high-tin bronze, timah hitam, kekerasan*

## Abstract

*High-tin bronze, containing 80% copper (Cu) and 20% tin (Sn), is used in musical instruments such as bells and gamelan. This alloy is stable at room temperature and has good acoustic properties, meaning it can produce a high-pitched but brittle sound. The effort that can be exerted to increase the hardness of high-tin bronze alloys is given through the addition of lead (Pb). In this study, the casting process of High-Tin Bronze alloy was carried out with the addition of lead (Pb) with variations of 10%, 15%, and 20% at a pour temperature of 950 °C. The results of the Vickers test showed that the hardness of high-tin bronze increased with increasing concentrations of lead (Pb). The strongest value is found in high-tin bronze alloy 80% + Pb alloy 20% with an average hardness value of 224.19 VHN. While the lowest value was obtained in high-tin bronze alloy without the addition of lead (Pb) with an average hardness value of 202.42 VHN.*

*Keywords : high-tin bronze, lead, hardness*

## 1. Pendahuluan

Tembaga adalah salah satu logam terpenting di dunia dan dapat diolah dalam bentuk murni, sebagai paduan, atau sebagai bahan tambahan untuk mengubah sifat logam lainnya. Tembaga pertama kali digunakan pada abad ke-9 dan ke-10 ketika ilmu metalurgi diperkenalkan kepada masyarakat. Paduan tembaga (Cu) dan timah (Sn) disebut paduan tembaga (CuSn). Perunggu yang mengandung timah (Sn) 10%, 14% dan 20% digunakan untuk patung, senjata militer dan lonceng, lonceng, gamelan, gendang merica, dll. Perunggu dibagi menjadi dua kategori: perunggu timah yang kandungan timahnya <17%, dan perunggu timah yang kandungan timahnya >17% [1].

High-tin bronze, terdiri dari 80% tembaga dan 20% timah putih, digunakan pada alat musik seperti genta dan gamelan bali. Paduan ini stabil pada suhu ruangan dan mempunyai sifat akustik yang menghasilkan nada tinggi [2]. Gambelan umumnya menggunakan perunggu timah putih dengan perbandingan tembaga dan timah putih 10:3.

Salah satu kelemahan perunggu pada komposisi ini adalah getas dan menyebabkan kegagalan produk. Kegetasan tembaga jenis ini sangat beresiko karena dapat menimbulkan keretakan atau patah seperti yang terjadi pada genta, gamelan jawa, dan gamelan bali.

Keretakan pada *High-Tin Bronze* terjadi akibat adanya porositas yang tinggi selama proses pengecoran dan diperparah oleh sifat materialnya cenderung getas. Semakin tinggi nilai porositas pada perunggu maka akustik perunggu tersebut akan semakin buruk. Cacat porositas ini terjadi pada proses pengecoran akibat adanya pelarutan dan terperangkapnya uap di udara pada saat proses pengerasan, dan penurunan temperatur juga menyebabkan pengerasan hidrogen pada perunggu menurun. Hal ini menyebabkan hidrogen lepas dan membentuk gelembung-gelembung yang sebagian tidak dapat lepas ke atmosfer dan tetap berada di dalam logam sehingga menimbulkan porositas [3].

Selain banyak cacatnya, timah putih (Sn) merupakan komponen utama paduan tembaga yang harganya mahal sehingga berdampak pada peningkatan harga produk

gambelan. Salah satu cara untuk meningkatkan sifat paduan *high-tin bronze* adalah dengan menambahkan unsur lain seperti timah hitam (Pb); Hal ini membuat harga jenis perunggu lebih murah karena harga timah putih (Sn) lebih mahal dibandingkan timah hitam. (Pb) [4].

*High-tin bronze* dengan kandungan timah hitam (Pb) banyak digunakan dalam industri seperti *bushing pin piston*, *bushing rocker arm*, *wear plate* dan *ring piston* [5]. Paduan perunggu dan timah hitam (Pb) memiliki ketahanan aus yang tinggi serta kekuatan dan daya tahan yang tinggi [6]. Ketahanan aus perunggu erat kaitannya dengan kekuatan, kekerasan, kecepatan dan kelembapannya [7]. Menambahkan unsur timah hitam (Pb) pada paduan juga dapat meningkatkan kekerasan produk. Timbal (Pb) dapat menurunkan porositas logam, sehingga produk yang dibuat dengan paduan timah hitam (Pb) mempunyai kekuatan yang lebih baik dibandingkan produk tanpa paduan timah hitam (Pb). Produk yang dibuat tanpa paduan timbal (Pb) mengandung partikel kecil seperti lubang sehingga mempengaruhi kekuatan produk [3].

Berdasarkan latar belakang di atas, penulis menyelidiki dampak penambahan timah hitam (Pb) pada pengecoran *high-tin bronze* terhadap kekerasan paduan.

Dengan demikian, beberapa masalah akan dibahas, yaitu:

1. Pengaruh penambahan timah hitam (Pb) pada paduan *high-tin bronze* terhadap kekerasan.

Beberapa batasan yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Metode pengecoran yaitu sand casting.
2. Komposisi timah hitam (Pb) yang digunakan adalah 10%, 15%, dan 20%.
3. Pasir yang digunakan adalah tanah lempung, bahan homogen.
4. Temperatur yang digunakan adalah 950°C
5. Pendinginan menggunakan temperature ruang.

## 2. Dasar Teori

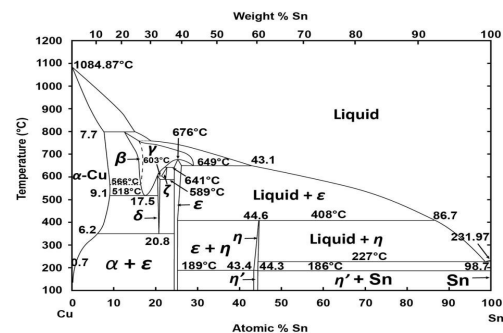
### 2.1. Logam Paduan (*non-ferro*)

Logam paduan tidak mengandung zat besi atau besi (Fe), sehingga logam ini disebut dengan logam bukan besi. Baja tahan karat banyak digunakan dan sering digunakan bersamaan dengan paduan. Baja tahan karat ini tersedia dalam tingkatan yang berbeda dan masing-masing memiliki karakteristik dan sifat yang berbeda, terutama dari satu baja ke baja lainnya, tetapi juga dalam hal pengiriman, pemrosesan, pengangkutan, dan penggunaan. Beragamnya sifat dan karakteristik logam

*nonferrous* membuatnya banyak digunakan sendiri atau dikombinasikan dengan logam nonferrous dan logam *ferrous* untuk memperoleh sifat baru yang berbeda dari aslinya.

### 2.2. *High-tin bronze* (80%Cu-20%Sn)

*High-tin bronze* terdiri dari paduan 80% tembaga (Cu) dan 20% timah (Sn) dengan massa jenis 8,63 g/cm<sup>3</sup>. Dimana pada material paduan perunggu komposisi timah sangat berpengaruh dalam menentukan sifat fisis yang akan dihasilkan dari perunggu tersebut [8]. *High-tin bronze* terdiri dari 80% tembaga (Cu) dan 20% timah putih (Sn), digunakan pada alat musik seperti genta dan gamelan. Paduan ini mempunyai sifat mekanik yang baik dan stabil pada suhu ruangan, mempunyai sifat akustik yang baik. Timah (Sn) merupakan unsur utama perunggu yang harganya sangat tinggi sehingga menyebabkan harga produk Gambelan meningkat [4]. Salah satu cara untuk meningkatkan sifat paduan *high-tin bronze* adalah dengan cara menambahkan unsur lain seperti timah hitam (Pb) [9].



Gambar 1. Diagram Fasa Cu-Sn

### 2.3. Timah Hitam (Pb)

Timah hitam (Pb), nomor atom 82, dan massa jenis 11,34 g/cm<sup>3</sup>, adalah logam berat dengan massa jenis lebih besar dari *high-tin bronze*. Timah hitam bersifat lunak, fleksibel dan memiliki titik leleh. Karena peluru terdiri dari atom karbon yang terpisah, peluru memiliki kemampuan untuk mengeluarkan gas yang berpotensi berbahaya. Jika dipotong, pelurunya berwarna biru. Sistem Penguatan perunggu timah putih dan timah hitam diperkuat dengan larutan padat substitusi. Dalam sistem ini, atom (Pb) menggantikan atom (Sn) dalam bentuk perunggu. Hal ini menyebabkan cacat kisi dan distorsi pada struktur kristal, yang meningkatkan kekuatan dan daya tahan material. Timah hitam memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan tembaga (Cu), komponen utama perunggu. Ketika timah hitam (Pb) ditambahkan ke lelehan Perunggu

Timah Tinggi, kualitas paduan secara keseluruhan akan meningkat. Hal ini menyebabkan logam mengalir perlahan dan mengisi rongga-rongga cetakan lebih sempurna.

## 2.4. Pengecoran Logam

Dalam metode pengecoran, logam dipanaskan hingga mencair dalam tungku peleburan, kemudian Logam cair dimasukkan ke dalam rongga cetakan yang telah dibentuk, membentuk bentuk benda yang akan dibuat. Teknik ini dikenal sebagai pengecoran. Tahapan-tahapan dalam proses pengecoran yaitu mulai dari pembuatan pola cetakan, pembuatan pasir cetak, pembuatan rongga cetakan pasir dengan pola yang sudah disiapkan, peleburan, penuangan logam ke dalam cetakan, pembekuan logam cor hingga padat, dan pembongkaran serta pembersihan produk benda hasil pengecoran. Pengecoran banyak sekali jenisnya yaitu dari pengecoran cetakan pasir (*sand casting*), *centrifugal casting*, *die casting*, *investment casting*, dan lain-lainnya.

## 2.5. Pengecoran Sand Casting

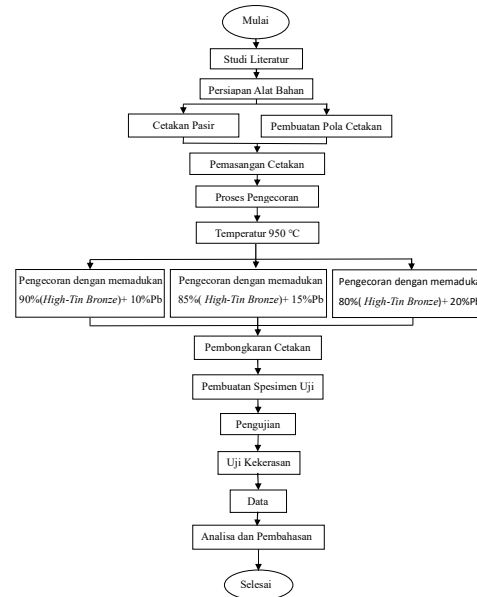
Karena mudah dibuat dan memiliki kapasitas tonase yang besar, pengecoran pasir adalah salah satu bentuk pengecoran yang menggunakan cetakan pasir. Cetakan ada tiga jenis yaitu cetakan green sand, cetakan *cold-box*, dan *no-bake mold* [10]. Untuk mendapatkan coran yang sempurna dari pengecoran pasir, beberapa persyaratan harus dipenuhi, antara lain:

1. Memiliki sifat yang mudah dibentuk, sehingga cetakan mudah dibuat dengan kekuatan yang tepat saat dibuat. Ketika logam cair dimasukkan ke dalam cetakan, cetakan harus kuat dan dapat menahan suhu tinggi.
2. Permeabilitas yang sesuai dan efektif, supaya oksigen yang terjebak di dalam rongga cetak bisa keluar dari celah butiran pasir.
3. Distribusi luas butir pasir yang sesuai.
4. Mampu digunakan kembali, yang menghemat uang dan ekonomis.
5. Tahan logam terhadap panas tinggi selama proses penuangan ke cetakan.

## 2.6. Pengujian Kekerasan Vickers

Penumbuk piramida intan dalam bentuk bujur sangkar digunakan untuk melakukan pengujian kekerasan *vickers*. Dipilihnya nilai  $136^\circ$  sebagai perbandingan yang diinginkan antara bola penumbuk dan diameter lekukan pada uji kekerasan Brinell.

## 2.7. Diagram alir penelitian



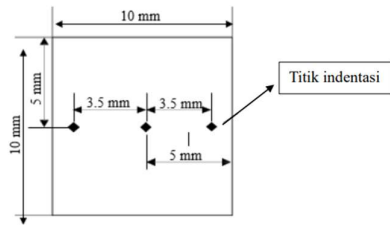
Gambar 2. Diagram alir penelitian

## 2.8. Metode Uji

Pengujian kekerasan *vickers* dilakukan dengan indenter piramida intan, besar sudut antar permukaannya adalah  $136^\circ$ . Proses pemeriksaan ini menggunakan standar ASTM E-92. Ini adalah prosedur pengujian kekerasan Vickers:

1. Mempersiapkan alat uji kekerasan
2. Memasang indenter *vickers*
3. Letakkan sampel di landasan dan atur tepat pada titik penetrasi
4. Putar tuas beban, atur pada pembebanan 10 kgf pada posisi siap penetrasi
5. Putar permukaan spesimen sampai ujung indenter.
6. Tarik *tuas* beban dan lakukan pembebanan selama 15 detik
7. Tempatkan spesimen dan fokus lensa sehingga tanda-tanda dapat dilihat di layar.
8. Hitung diagonal indentasi dengan mikroskop pengukur pada posisi datar dan tegak.
9. Masukkan data- data tersebut ke rumus pada persamaan
10. Ulangi proses pengujian pada spesimen lainnya.

Proses pengujian kekerasan pada setiap spesimen hasil coran dilakukan pengujian sebanyak 3 titik indentasi, selanjutnya nilai kekerasan yang diambil pada satu spesimen merupakan rata – rata dari nilai hasil pengujian pada ketiga titik tersebut.



Gambar 3. Titik indentasi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Uji Kekerasan Vickers

Selanjutnya, data dari pengujian Vickers diolah untuk menghasilkan angka kekerasan sampel uji menggunakan persamaan berikut :

$$VHN = \frac{1,854 P}{d^2} \dots\dots\dots(1)$$

Perhitungan data kekerasan vickers pada spesimen pengecoran dicontohkan sebagai berikut.

Diketahui :

P = 10 kg

d1 = 0,20 mm

d2 = 0,42 mm

Ditanya : VHN = .....?

Penyelesaian:

Mencari diagonal rata-rata d

$$d = \frac{d1+d2}{2}$$

$$= \frac{0,20 \text{ mm} + 0,42 \text{ mm}}{2} = 0,31 \text{ mm}$$

Menghitung HVN

$$HVN = \frac{1,854 P}{d^2}$$

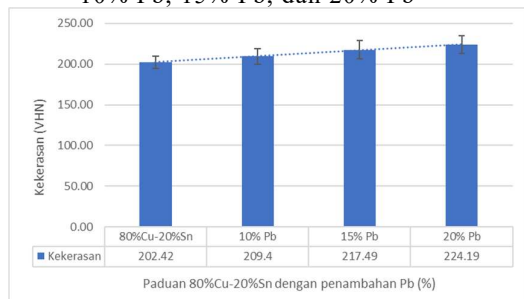
$$HVN = \frac{1,854 \times 10 \text{ kgf}}{(0,31 \text{ mm})^2}$$

$$= \frac{18,54 \text{ kgf}}{0,0961 \text{ mm}}$$

$$HVN = 192,92 \text{ kg/mm}^2$$

4.2 Hasil Data Pengujian Vickers

4.2.1 Hasil data rata-rata pengujian Vickers high-tin bronze dengan penambahan 10% Pb, 15% Pb, dan 20% Pb



Gambar 4. Grafik Pengujian Vickers

Nilai kekerasan spesimen paduan High-Tin Bronze meningkat dengan penambahan timah hitam (Pb) 10%, 15%, dan 20% pada temperatur 950 °C. Nilai kekerasan tertinggi didapatkan pada spesimen paduan high-tin bronze dengan penambahan timah hitam sebesar 20% yaitu 224,19 VHN, sedangkan nilai kekerasan terendah didapatkan pada spesimen paduan high-tin bronze tanpa penambahan timah hitam (Pb) sebesar 202,42 VHN. Peningkatan kekerasan disebabkan oleh pengaruh penambahan timah hitam karena terjadi kekuatan larutan substitusi padat. Atom timah hitam (Pb) digunakan dalam sistem ini untuk menggantikan atom timah putih (Sn) dalam struktur kristal perunggu. Kekuatan dan kekerasan material meningkat sebagai hasil dari cacat kisi dan distorsi struktur kristal.

4. Kesimpulan

Penambahan timah hitam (Pb) dapat meningkatkan nilai kekerasaan pada paduan High-Tin Bronze. Nilai kekerasan pada paduan High-Tin Bronze tanpa penambahan timah hitam (Pb) lebih kecil dibandingkan pada paduan High-Tin Bronze dengan penambahan timah hitam (Pb). Nilai kekerasan tertinggi didapat pada paduan 80% High-Tin Bronze + 20% Pb dengan nilai kekerasan yaitu 224,19 VHN, sedangkan nilai kekerasan terendah didapatkan pada paduan paduan High-Tin Bronze tanpa penambahan timah hitam (Pb) dengan nilai rata-rata yaitu 202,42 VHN.

Daftar Pustaka

[1] Republic, C.,2012. A Microstructural Study On Cusn10 Bronze Produced By Sand And Investment Casting Techniques Zeynep Taşlıçukur, Gözde S. Altuğ, Şeyda Polat, Ş. Hakan Atapek, Enbiya.

[2] Sugita, I., dan Astawa, K. (2016). Studi Dendrite Arm Spacing (DAS) Dan Akustik Pada Pengecoran Perunggu 20% Sn Sebagai Bahan Gamelan.Buletin Udayana Mengabdi, 15(1), 44–49.

[3] Hermawan,Rian Candra, dan Agus Yulianto, St, Mt (2019) Pengaruh Penambahan Timah Hitam (Pb) Sebesar 20% Pada Pengecoran Menggunakan Bahan Aluminium Ukuran 10x10 Cm Dengan Media Cetak Pasir Merah. Skripsi Thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta.

[4] Sugita, I. K. G., Priambadi, I. G. N., & Lokantara, I. P. (N.D.).2013 Investigasi Kuantitatif Sifat Akustik Produk Gamelan Bali Berbahan Dasar



- Perunggu Silikon Quantitative Investigation On Acoustic Properties Of Silicon\_Bronze Gamelan Bali.
- [5] Namini, As; Azadbeh, M.; Mohammadzadeh, A.; Shadpour, S. 2016 Sintering Fase Cair Dari Bubuk Paduan Perunggu Timah Bertimbal. Trans. Inst. India.
- [6] Huttunen-Saarivirta, E.; Isotahdon, E.; Metsäjoki, J.; Salminen, T.; Ronkainen, H.;Karperytun, L.2019. Perilaku Perunggu Timah Bertimbal Dalam Simulasi Air Laut Dengan Tidak Adanya Dan Adanya Kontak Tribologis Dengan Alumina Counterbody: Korosi, Keausan DanTribocorrosion.Suku. Int. 2019, 129, 257–271.
- [7] Kurzawa, A.; Roik, T.; Gavrysh, O.; Vitsiuk, I.; Bocian, M.; Pyka, D.; Zajac, P.; Jamroziak, K. 2020 Fitur Mekanisme Gesekan Bahan Antigesekan Komposit Berbasis Nikel Pada Suhu Tinggi. Pelapis 2020, 10, 454.
- [8] Slamet, S., & Suyitno, S. 2017. Pengaruh Komposisi Dan Temperatur Ruang Terhadap Fluiditas Paduan Perunggu Timah Melalui Investment Casting. Prosiding Snatif, 655–660.
- [9] Wigangga, M. S. S., Sugita, I. K. G., & Priambadi, I. G. N. 2015. Karakteristik Porositas Paduan Perunggu Timah Putih (80% Cu-20% Sn) Dan Perunggu Silikon (95% Cu–5% Si) Dengan Variasi Laju Pendinginan Pada Pengecoran Cetakan Pasir. Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika Vol. No, 1, 7.
- [10] Bhirawa. 2013. Proses Pengecoran Logam Dengan Menggunakan Sand Casting. Jurnal Teknik Industri, 31–41.



**I Gede Suarjaya**  
menyelesaikan studi S1 di  
Universitas Udayana,  
program studi Teknik Mesin.

Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi adalah Sistem Manufaktur.

# Karakteristik Fluiditas Hasil Pengecoran Al-7Si Metode *Sand Casting* Akibat Variasi Temperatur Tuang dan Tebal Saluran

I Kadek Agus Juniarta, I Ketut Gede Sugita, Ni Made Dwidiani  
*Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

*Paduan Al-7Si adalah paduan yang banyak digunakan dalam komponen otomotif dan mesin. Paduan Al-Si sangat baik sifat mampu cornya terutama pada kadar silikon 5-13%. Metode pengecoran sand casting dilakukan dengan cara logam cair dituangkan kedalam cetakan pasir yang telah disiapkan. Temperatur tuang sangat berpengaruh dalam proses pengecoran. Fluiditas merupakan mampu alir logam cair dalam rongga cetakan. Penelitian ini menggunakan pengujian fluiditas metode fluidity test piece dengan variasi ketebalan rongga saluran cetakan 1,5; 2; 3; 4 dan 5 mm. Variasi temperatur tuang 750; 850 dan 950°C. Fluiditas mengalami peningkatan panjang aliran pada setiap peningkatan tebal saluran dan temperatur tuang. Fluiditas terendah terjadi pada ketebalan rongga saluran 1,5 mm dengan panjang aliran 10,6 mm pada temperatur tuang 750°C dan fluiditas tertinggi terjadi pada ketebalan rongga saluran 5 mm dengan panjang aliran 470 mm pada temperatur tuang 950°C.*

*Kata kunci: Al-7Si, temperatur tuang, tebal saluran, fluiditas*

## Abstract

*Al-7Si alloy is a widely used alloy in automotive and engine components. Al-Si alloys have excellent castability especially at 5-13% silicon content. The sand casting method is carried out by pouring liquid metal into a prepared sand mold. Pouring temperature is very influential in the casting process. Fluidity is the ability to flow liquid metal in the mold cavity. This research uses the fluidity test piece method with variations in mold channel cavity thickness of 1.5; 2; 3; 4 and 5 mm. Pouring temperature variations of 750; 850 and 950°C. Fluidity increases in flow length with each increase in channel thickness and pouring temperature. The lowest fluidity occurs at a channel cavity thickness of 1.5 mm with a flow length of 10.6 mm at a casting temperature of 750°C and the highest fluidity occurs at a channel cavity thickness of 5 mm with a flow length of 470 mm at a casting temperature of 950°C.*

*Keywords: Al-7Si, casting temperature, channel thickness, fluidity*

## 1. Pendahuluan

Pada zaman sekarang dalam perkembangan teknologi, pemanfaatan sumber daya atau bahan dituntut agar dapat mengoptimalkan suatu produk yang dihasilkan agar memiliki kualitas yang tinggi, aluminium adalah salah satu bahan yang sering digunakan. Aluminium banyak digunakan dan telah diakui sebagai material terbaik dalam berbagai sektor penggunaan. Dimana untuk proses pembuatannya dapat menggunakan teknik pengecoran.

Salah satu jenis logam yang banyak digunakan adalah aluminium, yang ditemukan dalam peralatan rumah tangga hingga konstruksi. Aluminium sering dipadukan dengan logam lain untuk dijadikan logam paduan salah satunya paduan Al-Si. Paduan Al-Si sering digunakan terutama pada bidang otomotif dikarenakan kelebihan sifatnya dibandingkan paduan lainnya. Adapun kelebihan dari paduan ini yaitu berat yang ringan, memiliki sifat tahan terhadap korosi yang baik, kemampuan tahan terhadap retak panas (*hot tearing*), serta mampu las dan mesin yang baik [1].

Paduan Al-7Si adalah paduan yang banyak digunakan dalam komponen otomotif seperti blok silinder, cylinder head, serta komponen mesin lainnya. Sifat mampu cor dari paduan Al-Si sangat baik, terutama ketika kadar silikon pada paduan antara 5% sampai 13%. Silikon dapat meningkatkan fluiditas dan

ketahanan terhadap retak akibat panas. Bila kadar silikon lebih besar dari 12% maka akan meningkatkan sifat keras paduan, rendah terhadap ekspansi termal, tahan terhadap aus yang baik sehingga cocok untuk diaplikasikan pada komponen mesin seperti piston. Jika kadar silikon terlalu tinggi akan menyebabkan hasil coran menjadi rapuh [2].

Pengecoran adalah teknik pembuatan atau pembentukan yang menggunakan bahan logam cair dan cetakan untuk membuat benda dengan bentuk geometri yang mirip dengan benda yang akan dibuat. Logam cair dituangkan ke dalam cetakan pasir yang telah dibuat sebelumnya dalam metode pengecoran pasir (*sand casting*), yang merupakan teknik pengecoran yang paling umum. Metode ini memiliki keunggulan dalam mencetak logam dengan titik lebur yang tinggi serta berbagai dimensi ukuran dan bentuk hasil coran. Salah satu kekurangan metode ini adalah kemungkinan cacat porositas dan penyusutan pada hasil coran [3].

Temperatur tuang merupakan unsur yang sangat penting dan harus diperhatikan dalam proses pengecoran untuk menghasilkan produk yang berkualitas tinggi. Temperatur tuang ini sangat mempengaruhi kualitas coran yang dihasilkan untuk memiliki sifat fisik yang baik, yang mencakup mikrostruktur dan sifat mekanisnya. Selain itu,

temperatur tuang yang terlalu rendah dapat menyebabkan logam cair membeku di saluran masuk, sehingga rongga cetakan tidak dapat terisi sepenuhnya. Sebaliknya, temperatur tuang yang terlalu tinggi dapat menyebabkan hasil coran menjadi cacat dan dimensi coran menjadi kurang akurat [4].

Kemampuan logam cair untuk mengalir dalam rongga cetakan uji sampai berhenti karena pembekuan atau solidifikasi dikenal sebagai fluiditas. Jika fluiditas pengecoran logam rendah, produk yang dihasilkan dari pengecoran akan menjadi cacat. Ini terutama berlaku untuk pengecoran dengan ketebalan saluran tipis karena fluiditas ini tidak dapat mengisi seluruh rongga cetakan. Fluiditas pengecoran logam atau kemampuan alir sangat mempengaruhi kualitas produk cor yang dihasilkan. Temperatur tuang, viskositas, perpindahan panas, inklusi logam, dan tegangan permukaan adalah faktor yang sangat mempengaruhi fluiditas [5].

Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui bagaimana karakteristik fluiditas pada pengecoran material Al-7Si dengan metode *sand casting* akibat variasi temperatur tuang dan tebal saluran cetakan coran.

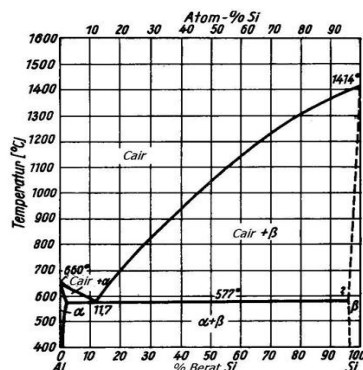
Agar mendapatkan hasil penelitian yang diinginkan, dirumuskan beberapa batasan masalah yang didapatkan dalam melaksanakan penelitian ini, sebagai berikut :

1. Komposisi bahan yang digunakan adalah paduan homogen Al93% - Si7%.
2. Cetakan yang terbuat dari campuran tanah lempung dan pasir silika.
3. Tinggi penuangan dari kowi ke cetakan adalah 5 cm.
4. Pendinginan menggunakan temperatur lingkungan dengan didiamkan.
5. Pengaruh permeabilitas pasir cetak.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Paduan Al-Si

Paduan Al-Si adalah paduan dengan sifat sebagai penghantar panas dan listrik yang sangat baik, memiliki koefisien pemuaian yang rendah, berat yang sangat ringan, dan memiliki permukaan yang sangat bagus, serta tanpa kegetasan panas. Selain itu, paduan Al-Si sangat baik digunakan sebagai bahan untuk paduan coran.



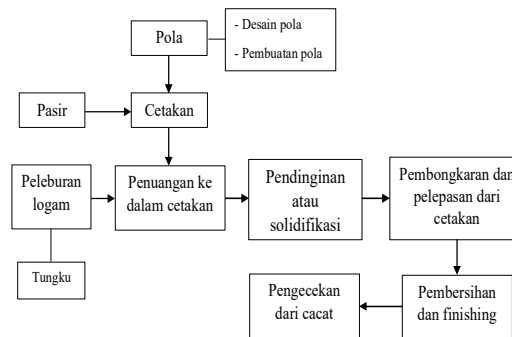
Gambar 1. Diagram fasa Al-Si

Pada diagram fasa Al-Si, kandungan silikon terdiri dari tiga macam yaitu :

1. *Hypoeutectic*
2. *Eutectic*
3. *Hypereutectic*

### 2.2 Pengecoran Sand Casting

Pengecoran pasir, juga dikenal sebagai *sand casting* (cetakan pasir) adalah jenis pengecoran yang dalam prosesnya menggunakan cetakan pasir. Dalam pengecoran pasir ada tiga jenis cetakan pasir yaitu *cold-box*, *green sand*, dan *no-bake mold*. Pengecoran cetakan pasir paling banyak digunakan prosesnya dikarenakan murah dalam biaya produksinya dan dapat membuat benda hasil coran dengan kapasitas besar hingga berton-ton [6].

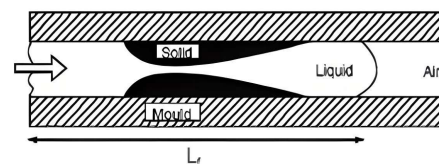


Gambar 2. Tahapan pengecoran sand casting

### 2.3 Fluiditas

Kemampuan logam cair untuk mengalir mengisi rongga pola cetakan sebelum membeku selama proses pengecoran dikenal sebagai fluiditas. Dalam proses pengecoran, fluiditas logam cair sangat penting untuk mencegah cacat yang tidak diinginkan terjadi. Hal ini yang menyebabkan fluiditas menjadi faktor yang sangat penting dalam proses pengecoran logam [7].

- a. Jarak (*range*) pembekuan pendek  
Pembekuan atau solidifikasi coran berlangsung dari bagian dinding ke bagian tengah coran pada jarak (*range*) pembekuan pendek.



Gambar 3. Jarak pembekuan pendek

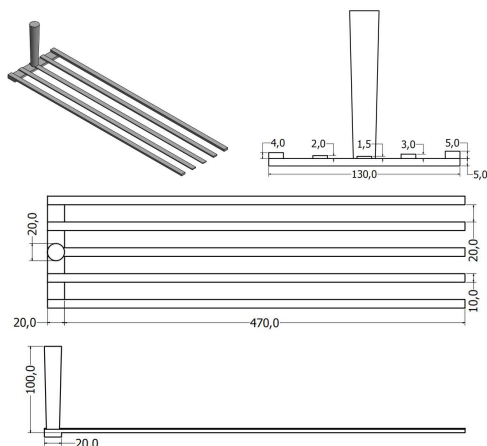
- b. Jarak (*range*) pembekuan panjang  
Pembekuan atau solidifikasi coran berlangsung pada bagian depan coran dan berbentuk dendritik, tidak dalam bentuk planar pada jarak (*range*) pembekuan panjang.



Gambar 4. Jarak pembekuan panjang

### 3. Metodologi Penelitian

#### 3.1 Pembuatan Pola Cetakan



Gambar 5. Desain pola cetakan

Pengujian fluiditas menggunakan metode Birmingham (*fluidity test piece*). Pendesainan dengan *software Autodesk Inventor*. Dengan variasi ketebalan rongga saluran cetakan 1,5; 2; 3; 4 dan 5 mm. Cetakan dibuat dari kayu dan dihaluskan, dan disesuaikan dengan ukuran yang ditentukan. Selanjutnya dibenamkan ke pasir cetak untuk membuat saluran cetakan coran.

#### 3.2 Pembuatan Pola Cetakan

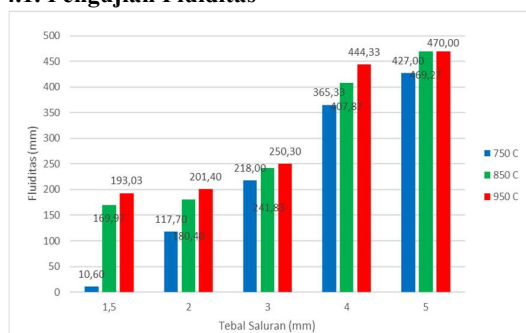
Pengecoran menggunakan metode *sand casting*, dan untuk cetakan menggunakan cetakan yang telah dipersiapkan. Peleburan paduan Al-7Si menggunakan tungku krusibel tradisional. Selanjutnya paduan yang sudah cair diukur temperatur penuangannya yaitu 750 850 dan 950°C. Setelah mencapai temperatur tuang, paduan dituangkan ke dalam cetakan yang telah dipersiapkan, dan didiamkan hingga membeku lalu dibongkar. Pengecoran dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali setiap variasi temperatur tuang.

#### 3.3 Pengujian Fluiditas

Pengujian fluiditas dilakukan setelah hasil coran paduan Al-7Si dibersihkan. Pengujian dilakukan dengan mengukur panjang aliran pada hasil coran dari titik pangkal titik ujung pembekuan dengan menggunakan penggaris dan jangka sorong. Pengujian dilakukan berulang pada semua hasil coran disetiap variasi ketebalan dan temperatur tuang.

### 4. Hasil dan Pembahasan

#### 4.1. Pengujian Fluiditas



Gambar 6. Grafik rata-rata pengujian fluiditas

Hasil pengujian fluiditas pada pengecoran Al-7Si dengan metode pengecoran *sand casting* pada setiap hasil coran yang telah dirata-ratakan pada setiap variasi ketebalan rongga saluran. Pada gambar 5 menunjukkan rata-rata hasil fluiditas berdasarkan seluruh hasil pengujian. Fluiditas terendah terjadi pada variasi ketebalan rongga saluran 1,5 mm dengan rata-rata panjang aliran 10,60 mm pada temperatur tuang 750°C, sedangkan rata-rata fluiditas tertinggi terjadi pada variasi ketebalan rongga saluran 5 mm dengan rata-rata panjang aliran 470,00 mm pada temperatur penuangan 950°C.

Berdasarkan data uji fluiditas yang didapatkan, Peningkatan fluiditas terjadi setiap peningkatan ketebalan saluran dan temperatur tuang. Temperatur tuang yang semakin tinggi menyebabkan viskositas dari logam cair semakin rendah, jika viskositas semakin rendah maka gerakan logam cair akan semakin cepat mengalir di saluran cetakan dan dapat mengisi rongga cetakan sebelum logam cair membeku. Fluiditas meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur penuangan, karena temperatur tuang sangat mempengaruhi mampu alirnya [8]. Pada ketebalan saluran yang tipis tegangan permukaan lebih tinggi, hal ini menyebabkan logam cair lebih sulit mengalir di saluran cetakan. Tegangan permukaan terjadi karena adanya gaya antar molekul yang bekerja kedalam pada logam dalam kondisi cair, pada saluran cetakan yang tipis gerakan molekul pada logam cair lebih sulit sehingga cenderung mempertahankan keadaan atau posisinya yang kaku (*rigid*), inilah yang menyebabkan pada saluran cetakan yang tipis fluiditas lebih rendah daripada saluran cetakan yang lebih tebal. Fluiditas terendah yang terjadi pada ketebalan terkecil disebabkan oleh meningkatnya tegangan permukaan [5].

### 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa karakteristik fluiditas hasil pengecoran Al-7Si metode *sand casting* akibat variasi temperatur tuang dan tebal saluran meningkatkan seiring dengan meningkatnya temperatur tuang dan ketebalan rongga saluran. Berdasarkan rata-rata hasil pengujian panjang aliran terendah terjadi pada ketebalan rongga saluran 1,5 mm dengan panjang aliran 10,6 mm pada temperatur penuangan 750°C dan panjang aliran tertinggi terjadi pada ketebalan rongga saluran 5 mm dengan panjang aliran 470 mm pada temperatur penuangan 950°C. Fluiditas terbaik didapatkan pada temperatur 950°C terutama pada ketebalan rongga saluran 5 mm. Temperatur tuang mempengaruhi viskositas dan ketebalan saluran mempengaruhi tegangan permukaan, hal ini yang mempengaruhi fluiditas pada setiap variasi temperatur tuang dan tebal saluran pada pengecoran logam terutama paduan Al-7Si.

## Daftar Pustaka

- [1] Suherman, "Pengaruh Penambahan Cu Pada Paduan Al-7Si Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Hasil Coran Kepala Silinder Motor 2 Tak Dengan Metode Pengecoran Lost Foam Casting," 2014.
- [2] Damisih, "Pengaruh Penambahan Modifier Strontium Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC8A Hipereutektik," 2008. [Online]. Available: <http://www.foxitsoftware.com>
- [3] I. D. Pratika, A. H. A. R. Rasyid, and M. A. Irfani, "Perbandingan Metode Sand Casting dengan Metode Centrifugal Casting Terhadap Kekuatan Bending dan Porositas Paduan Aluminium Silikon," 2021.
- [4] M. T. Wijaya, "Pengaruh Variasi Temperatur Tuang Terhadap Ketangguhan Impak dan Struktur Mikro pada Pengecoran Aluminium," *Jurnal Simetris*, vol. 8, 2017.
- [5] Slamet. S and Suyitno, *Pengaruh Komposisi dan Temperatur Ruang Terhadap Fluiditas Paduan Perunggu Timah Melalui Investment Casting*, vol. 4. 2017.
- [6] W. T. Bhirawa, "Proses Pengecoran Logam dengan Menggunakan Sand Casting," 2021.
- [7] I. N. Nanda and A. Gibran, "Modifikasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum Menggunakan Tungku Induksi," Yogyakarta, Oct. 2012.
- [8] I. Priambadi, I. Ketut Gede Sugita, I. Bagus Giri Asmara, A. Komala Dewi, J. Teknik Mesin, and U. Udayana Kampus Bukit Jimbaran, "Pengaruh temperatur penuangan terhadap fluiditas dan struktur mikro logam Kuningan pada metode evaporative casting," *Jurnal Energi dan Manufaktur*, vol. 10, no. 2, pp. 71–75, 2017, [Online]. Available: <http://ojs.unud.ac.id/index.php/jem>:Tel./Fax.: 081337610065/0361703321



# PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP HASIL UJI SEM AGLOMERASI *CO-FIRING* RDF MSW DAN BATUBARA PADA *FLUIDIZED BED COMBUSTOR*

Eli Sebastian, I Nyoman Suprpta Winaya, Ketut Astawa, I Putu Angga Yuda  
Pratama, I Gusti Ngurah Putu Tenaya  
*Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Salah satu cara untuk mengubah sampah menjadi bahan bakar adalah dengan mengubah nya menjadi RDF. Metode *co-firing* adalah pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda dalam perbandingan tertentu. *Co-firing* dapat digunakan dalam teknologi pembakaran insenerasi *fluidized bed* dengan menggunakan udara untuk membuat *bed material* memiliki sifat seperti fluida, sehingga proses pembakaran menjadi lebih baik. Dalam pengujian ini, *co-firing* digunakan untuk pembakaran 95% batubara dan 5% RDF MSW. Untuk mengamati fenomena aglomerasi, digunakan variasi suhu 750 °C, 850 °C, dan 950 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu sangat memengaruhi pembentukan aglomerasi dalam abu yang dihasilkan dari pembakaran pada *Fluidized Bed* RDF MSW dengan batubara. Pada percobaan dengan variasi 750°C aglomerasi yang terbentuk kecil dan memiliki struktur yang lebih padat. Pada percobaan dengan variasi 850°C dan 950°C, terbentuk aglomerat yang lebih besar dan struktur mikro aglomerat terlihat seperti abu yang mencair kemudian memadat sehingga membentuk gumpalan.

Kata kunci : *Co-firing*, *Fluidized Bed Combustor*, RDF MSW, Aglomerasi

## Abstract

*One way to convert waste into fuel is to convert it into RDF. The co-firing method is the combustion of two different types of fuel in a certain ratio. Co-firing can be used in fluidized bed combustion technology by using air to make the bed material have fluid-like properties, so that the combustion process becomes better. In this test, co-firing was used for combustion of 95% coal and 5% MSW RDF. To observe the agglomeration phenomenon, temperature variations of 750 °C, 850 °C, and 950 °C were used. The results show that temperature greatly influences the formation of agglomeration in the ash produced from the combustion of Fluidized Bed RDF MSW with coal. In the experiment with 750°C variation, the agglomerations formed were small and had a denser structure. In the 850°C and 950°C experiments, larger agglomerates were formed and the microstructure of the agglomerates looked like ash that melted and then solidified to form lumps.*

Keywords: *Co-firing*, *Fluidized Bed Combustor*, RDF MSW, Agglomeration

## 1. Pendahuluan

Energi merupakan hal yang sangat dibutuhkan dan tidak bisa dilepaskan dalam kehidupan manusia. Energi dibutuhkan dalam berbagai bidang seperti bidang industri ekonomi, transportasi, rumah tangga, dll. Penggunaan energi yang paling umum saat ini berasal dari energi fosil seperti energi batubara yang merupakan sumber energi yang suatu saat akan habis dan tidak dapat terbarukan [1]

Bali dikenal dengan sebagai salah satu destinasi wisata di Indonesia. Hal itu menyebabkan jumlah wisatawan yang ada semakin meningkat dan menyebabkan sampah yang dihasilkan semakin banyak [2] RDF adalah pengolahan sampah menjadi bahan bakar dengan cara dikeringkan untuk dikonversi menjadi energi termal Dengan pemanfaatan kembali sampah kota menjadi bahan bakar RDF diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan sampah dan energi yang ada secara bersamaan. [3]

*Co-firing* merupakan pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda dengan perbandingan rasioa bahan bakar yang berbeda dan dapat mengatasi permasalahan CO<sub>2</sub> pada pembakaran (Ilham and Sinaga, 2022) [4]. Teknologi *co-firing* dapat dilakukan pada metode pembakaran *Bubling Fluidized Bed Combustion* (BFBC) dengan menggunakan suhu pembakaran yang tinggi memiliki kelebihan dalam mengubah sampah menjadi energi.[5]

Namun FBC memiliki permasalahan utama seperti *slagging*, *fouling*, *corosion*, dan *agglomeration*. Aglomerasi adalah pengikatan partikel-partikel yang disebabkan oleh proses sintering abu yang ada pada bahan bakar sehingga menjadi partikel yang lebih keras dan padat .

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap aglomerasi pada pembakaran RDF MSW dengan batubara pada *Fluidized Bed Combustor*. Untuk mendapatkan hasil



yang diharapkan, terdapat Batasan masalah yang ada pada penelitian ini antara lain:

- *Bed material* yang digunakan adalah pasir silika dengan ukuran mesh pasir 0,5-0,8 mm
- Bahan bakar yang digunakan adalah batubara dan RDF MSW produk olahan TPST kertalangu
- Proses *Direct Co-firing* yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan insinerator *Fluidized Bed* tipe *bubbling*
- Presentasi RDF MSW yang digunakan sebesar 5%

## 2. Dasar Teori

Sampah merupakan permasalahan yang tidak akan habis jika dibahas. Permasalahan ini dirasakan oleh semua masyarakat di dunia. Kenaikan jumlah sampah berbanding lurus dengan jumlah masyarakat yang ada. Sampah dapat dibagi menjadi tiga jenis seperti sampah organik, Sampah organik, dan sampah B3 [6].

Upaya dalam pengolahan sampah kota adalah dengan memanfaatkan kemabli menjadi sumber energi terbarukan dengan pengolahan anaerobil, insenerasi, dan *Refused Derived Fuel* (RDF) (Qonitan et al, 2021) [7]

Dengan pembakaran dua bahan bakar yang berbeda dengan rasio tertentu atau dapat disebut metode *co-firing*, sampah kota yang sudah diubah menjadi RDF akan digunakan sebagai bahan bakar dengan batubara. Dengan *co-firing* diharapkan dapat mengurangi permasalahan sampah dan penggunaan bahan bakar fosil. *Co-firing* memberikan pengaruh besar dalam emisi gas buang dan dianggap sebagai solusi dalam mengatasi CO<sub>2</sub> [3]

Metode *co-firing* sering digunakan pada teknologi pengolahan sampah insenerator. Insenerator menggunakan temperatur yang tinggi dan terkendali dalam pembakaran untuk mendapatkan panas. Insenerator memiliki banyak jenis tergantung reaktor yang digunakan seperti *brun barrel*, *moving grate*, *fixed hearth*, *rotary kiln*, dan *fluidized bed*. Insenerator *fluidized bed* memiliki keunggulan karena menggunakan bed material berupa pasir untuk menyimpan panas sehingga proses pembakaran menjadi lebih merata [8]

Namun FBC memiliki permasalahan utama seperti *slagging*, *fouling*, *corossion*, dan *agglomeration*. Aglomerasi adalah pengikatan partikel-partikel yang disebabkan oleh proses sintering abu yang ada pada bahan bakar sehingga menjadi partikel yang lebih keras dan padat atau yang disebut aglomerasi seperti silikat alkali yang lengket dengan titik leleh yang rendah melekat dapat melekat pada material bed sehingga membentuk aglomerat. Aglomerasi dapat menyebabkan kehilangan kontrol penting pada parameter operasi seperti penurunan tekanan, kecepatan fluidisasi minimum, perilaku gelembung, dan kasus yang paling parah bisa menyebabkan de-fluidisasi total sehingga sistem harus *shutdown*.

Tingginya kandungan alkali basah seperti Ca, K, Na, dan Mg pada bahan bakar akan berubah menjadi senyawa Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, dan Mg<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang terdapat pada abu hasil pembakaran [9]

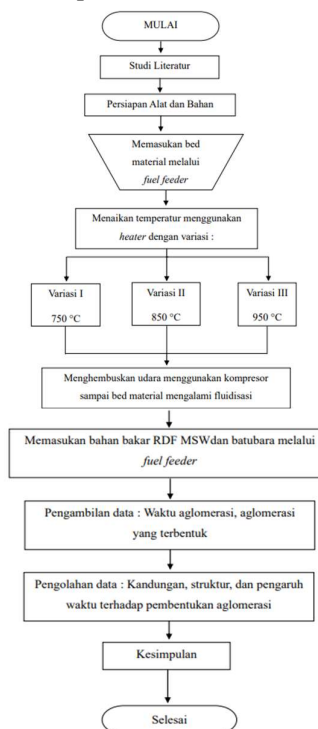
## 3. Metode Penelitian

### 3.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaktor *Fluidized Bed*
2. Plat Distributir
3. *Heater*
4. *Thermo Control*
5. *Isolator Glass Wool*
6. *Fuel Feeder*
7. Filter Gas Buang
8. *Gas Analyzer*
9. *Flow Meter*
10. *Thermokopel*
11. Kompresor
12. *Timer*
13. RDF MSW
14. Batubara
15. Pasir Silika

### 3.2 Diagram alir penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### 3.3 Karakteristik Kandungan Abu RDF MSW Kertalangu

Karakteristik dari bahan bakar RDF MSW Kertalangu adalah sebagai berikut

**Tabel 1. Kandungan Abu RDF MSW**

| Parameter  | %                           |
|--|-----------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (Silicon Dioxide)                     | 32.55                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminium Oxide)       | 10.49                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Iron Trioxide)         | 7.92                        |
| CaO (Calcium Oxide)                                    | 25.15                       |
| MgO (Magnesium Oxide)                                  | 3.62                        |
| Na <sub>2</sub> O (Sodium Oxide)                       | 5.40                        |
| K <sub>2</sub> O (Potassium Oxide)                     | 4.92                        |
| TiO <sub>2</sub> (Titanium Oxide)                      | 0.92                        |
| MnO <sub>2</sub> (Manganese Dioxide)                   | 0.23                        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Diphosphorus Pentoxide) | 3.24                        |
| SO <sub>3</sub> (Sulphur Trioxide)                     | 1.68                        |
| Chloride (CL)  | 0.69                        |
| Bulk Density   | 195.99<br>Kg/m <sup>3</sup> |

### 3.4 Karakteristik Kandungan Abu Batubara

Karakteristik dari abu bahan bakar batubara adalah sebagai berikut

**Table 2. Kandungan Abu Batubara**

| Parameter                      | %    |
|--------------------------------|------|
| SiO <sub>2</sub>               | 44.8 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 36.3 |
| CaO                            | 5.49 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.96 |
| MgO                            | 0.85 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.34 |
| TiO                            | 1.98 |
| SO <sub>3</sub>                | 2.9  |

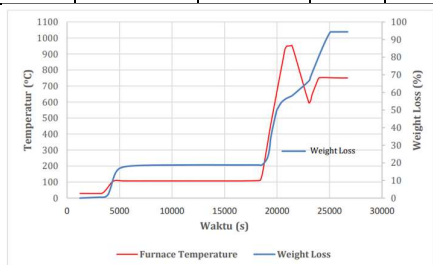
## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Karakterisasi Batubara Dan RDF MSW

Karakterisasi bahan bakar dilakukan untuk mengetahui kandungan bahan bakar yaitu 95% RDF MSW dan 5% batubara yang digunakan sebelum penelitian. Karakterisasi bahan bakar dilakukan menggunakan pengujian uji *proximate* dan uji *Thermo Gravimetric Analysis* (TGA).

**Tabel 3. Hasil Uji Proximate Batubara dan RDF MSW**

| Bahan Bakar         | Moisture (%) | Volatile (%) | Ash (%) | Fixed Carbon (%) |
|---------------------|--------------|--------------|---------|------------------|
| Batubara dan RDF 5% | 18.62        | 39.53        | 5.64    | 36.21            |

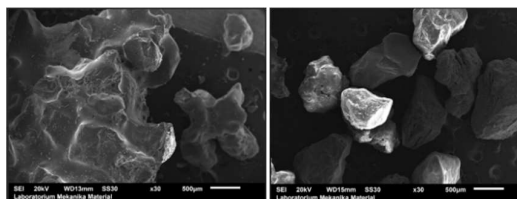


**Gambar 2. Hasil Uji TGA**

Dari hasil uji TGA yang didapatkan, menunjukkan bahwa pengurangan masa bahan bakar terjadi ketika suhu operasi sekitar 700 °C hingga lebih dari 900°C. Uji ini menggunakan metode ASTM-D-7582 MVA BIOMA untuk melihat peningkatan *weight loss* terhadap kenaikan temperatur pada bahan bakar.

### 4.2 Struktur Mikro Aglomerat

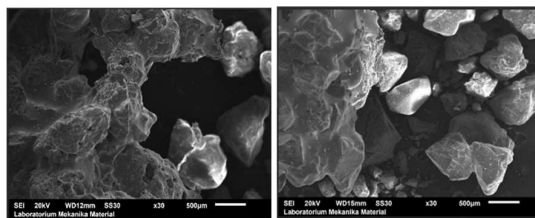
Pada penelitian ini dilakukan uji SEM untuk melihat struktur dari aglomerat. Uji SEM adalah jenis mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindai permukaan dengan sinar elektron yang terfokus dengan perbesaran hingga skala tertentu.. Hasil uji SEM dari aglomerasi oleh abu dengan bahan bakar batubara 95% dan RDF 5% adalah sebagai berikut:



(a)

(b)

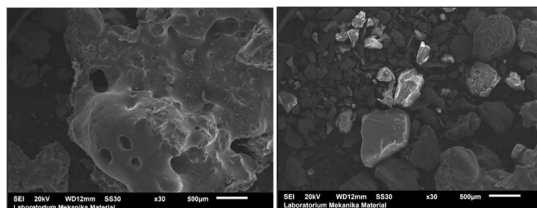
**Gambar 3. Uji SEM Aglomerat Temperatur 750°C**



(a)

(b)

**Gambar 4. Uji Sem Aglomerat Temperatur 850°C**



(a)

(b)

**Gambar 5. Uji Sem Aglomerat Temperatur 950°C**

Gambar 3, gambar 4 dan gambar 5 merupakan hasil uji SEM yang dilakukan dengan pembesaran 500 µm di Laboratorium Mekanika Material Universitas Udayana. Berdasarkan hasil uji SEM dari aglomerat dengan variasi temperatur 750°C

pada gambar 3 (b) memiliki jarak antar partikel tidak terlalu rapat dan struktur permukaan yang tidak terlalu kasar yang ditunjukkan pada gambar 3 (a). Kemudian dapat dilihat pada gambar 4 (b) pada variasi temperatur 850°C jarak antar partikel mulai tersusun rapat dan struktur permukaan dari aglomerat menjadi lebih kasar pada gambar 4 (a). Ketika variasi temperatur 950°C jarak antar partikel tersusun rapat serta struktur dari aglomerat terlihat seperti cairan yang ditunjukkan pada gambar 5 (a) dan (b). Perbedaan struktur pada aglomerat dapat terjadi karena unsur-unsur dalam abu aglomerasi memiliki titik leleh yang berbeda. Dengan meningkatnya suhu, abu bisa meleleh dan mengalami perubahan bentuk dan ukuran.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada pengaruh variasi temperatur terhadap aglomerasi *fluidized bed combustor* dengan bahan bakar 95% batubara dan 5% RDF, dapat disimpulkan bahwa: Variasi temperatur memiliki pengaruh besar pada pembentukan aglomerat yang disebabkan oleh abu hasil pembakaran. Temperatur kerja yang melebihi titik leleh yang terdapat pada unsur abu menyebabkan abu meleleh dan membentuk gumpalan. Aglomerat yang terbentuk pada variasi temperatur 950°C memiliki jarak antar partikel lebih rapat dari aglomerat dengan variasi temperatur 750°C dan 850°C.

## Daftar Pustaka

- [1] Setiawan, A., Puteri, M.K. and Pasalli, Y.R. (2023) 'Peramalan puncak produksi dan umur cadangan batubara di Indonesia', *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 19(2), pp. 83–93. Available at: <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol19.No2.2023.1302>.
- [2] Yuda Pratama, I. P. A., Winaya, I. N. S., & Suryawan, I. G. P. A. (2020). Uji Reaktor Gasifikasi Downdraft Biomassa Sampah Kota. *Jurnal METTEK*, 5(2), 110. <https://doi.org/10.24843/mettek.2019.v05.i02.p08>
- [3] Suryawan, I. W. K., Wijaya, I. M. W., Sari, N. K., Septiariva, I. Y., & Zahra, N. L., 2021, *Potential of Energy Municipal Solid Waste (MSW) to Become Refuse Derived Fuel (RDF) in Bali Province, Indonesia*. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 10(1), 09–15. DOI:10.15294/jbat.v10i1.29804.
- [4] Ilham, M. and Sinaga, N. (2022) 'Cofiring Effect of Using Sawdust on Exhaust

Emissions at the Steam Power Plant', *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 7.

- [5] Nyoman, I., Winaya, S., & Sujana Dan I G N P Tenaya, G. (2010). Formasi Gas Buang Pada Pembakaran Fluidized Bed Sekam Padi. In *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* (Vol. 4, Issue 1).
- [6] Sucipto, C.D. (2012) *Teknologi Pengolahan Daur Ulang Sampah*. Yogyakarta: Gosyem Publishing.
- [7] Qonitan, F.D., Wayan Koko Suryawan, I. and Rahman, A. (2021) 'Overview of Municipal Solid Waste Generation and Energy Utilization Potential in Major Cities of Indonesia', in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012064>.
- [8] Sarkar, D.K. (2015) 'Fluidized-Bed Combustion Boilers', in *Thermal Power Plant*. Elsevier, pp. 159–187. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801575-9.00005-6>.
- [9] Ryabov, G.A. and Litun, D.S. (2019) 'Agglomeration during Fluidized Bed Combustion and Gasification of Fuels', *Thermal Engineering*, 66(9), pp. 635–651. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0040601519090040>.

|  |  |
|--|--|
|    | <p><b>Eli Sebastian</b><br/>menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024. Memiliki ketertarikan pada bidang Konversi Energi dan Energi Terbarukan</p> |
| <p>Judul tugas akhir Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Aglomerasi Pada <i>Co-firing</i> RDF MSW Dengan Batubara Pada <i>Fluidized Bed Combustor</i></p> |  |

|  |  |
|--|--|
|  | <p>Prof, I Nyoman Suprpta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Dalhousie University pada tahun 2000, dan S3 di Niigata University pada tahun 2008. Prof, I Nyoman Suprpta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|--|--|

|   |  |
|---|--|
|  | <p>Ketut Astawa, ST, MT Dosen Program Studi Teknik Mesin. Pendidikan sarjana diselesaikan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana. Diangkat menjadi Dosen pada tahun 1997 dan melanjutkan pendidikan S2 di Universitas Brawijaya dan memperoleh gelar Magister Konversi Energi pada tahun 2006. Memiliki konsentrasi pada bidang konversi energi. A\Perpindahan Panas.</p> |
|---|--|

|   |  |
|---|--|
|  | <p>I Gusti Ngurah Putu Tenaya S.T, MT. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994 dan S2 di Universitas Udayan tahun 2007 memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|---|--|

|  |   |
|--|---|
|  | <p>I Putu Angga Yuda Pratama S.T, MT. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 2019 dan S2 di Universitas Udayan tahun 2021 memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|--|---|

# Pengaruh Rasio RDF MSW Dan Batubara Terhadap Nilai *Net Plant Heat Rate* (NPHR) Pada Co-Firing Insinerator *Fluidized Bed*

Michael Wor Winner, I Nyoman Suprpta Winaya, Ketut Astawa, I Putu Angga Yuda Pratama

*Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Teknologi yang berkembang saat ini dengan memanfaatkan sampah sebagai bahan bakar alternatif campuran adalah teknologi *direct co-firing*. Salah satu teknologi yang sedang berkembang adalah insinerator *fluidized bed* dengan memanfaatkan *Refuse Derived Fuel* (RDF) sebagai bahan bakar alternatif. RDF adalah bahan bakar yang pada dasarnya terbuat dari sampah perkotaan yang telah diproses dengan nilai kalor yang cukup tinggi. Rasio pencampuran bahan bakar memiliki pengaruh terhadap kinerja hasil insinerator *fluidized bed*, maka dalam penelitian ini berfokus pada variasi rasio RDF terhadap batubara sebesar 5%, 10%, dan 15%. Melalui konversi fraksi massa didapati kebutuhan massa bahan bakar sebesar 140 gram, sehingga persentase RDF 5% terhadap batubara yaitu 7 gram RDF dan 133 gram batubara. Dalam penelitian ini temperatur insinerator dijaga stabil pada 850 °C dengan suplai heater yang terkontrol melalui panel kontrol dan menggunakan kecepatan *superficial* sebesar 9m/s untuk menjaga kualitas pembakaran. Hasil penelitian eksperimental ini menunjukkan penambahan RDF terlalu besar kedalam campuran bahan bakar akan mengakibatkan peningkatan nilai NPHR. Semakin besar nilai NPHR mengidentifikasi terjadinya penurunan performansi insinerator. Hal ini ditunjukkan oleh variasi 85% batubara + 15% RDF, dengan nilai *Net Plant Heat Rate* (NPHR) sebesar 935,2 kcal/kWh, dan lama pembakaran 940s.

Kata kunci: *Co-firing*, RDF MSW, *Fluidized Bed*, Insinerator, NPHR

## Abstract

*The technology that is currently developing by utilizing waste as a mixed alternative fuel is direct co-firing technology. One of the emerging technologies is the fluidized bed incinerator utilizing Refuse Derived Fuel (RDF) as an alternative fuel. RDF is a fuel that is basically made from processed municipal waste with a high calorific value. The fuel mixing ratio has an effect on the performance of the fluidized bed incinerator, so this study focuses on variations in the ratio of RDF to coal by 5%, 10%, and 15%. Through the mass fraction conversion process, it was determined that the fuel mass requirement was 140 grams to fill the fuel volume inside the reactor. Thus, the 5% RDF percentage resulted in a mass ratio of 7 grams RDF and 133 grams coal, following the predetermined percentage of RDF MSW in this study. In this study, the incinerator temperature was kept stable at 850 °C with a controlled heater supply through the control panel and used a superficial velocity of 9m/s to maintain combustion quality. The results of this experimental study show that adding too much RDF to the fuel mixture will result in an increase in the NPHR value. As the value of NPHR increases, this indicates the performance of the incinerator decreases. This is shown by the 85% coal + 15% RDF variation, with the Net Plant Heat Rate (NPHR) value of 935.2 kcal/kWh, and burning time 940s.*

Keywords: *Co-firing*, RDF MSW, *Fluidized Bed*, Incinerator, NPHR

## 1. Pendahuluan

Permasalahan sampah di Indonesia sering dibahas untuk dieksplorasi potensi pemanfaatan atau penggunaan kembali sebagai sumber energi yang terbarukan. Dewasa ini, jumlah volume timbunan sampah akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk, urbanisasi, industrialisasi, serta pembangunan ekonomi. Bila laju timbunan sampah terus meningkat dan tidak diikuti dengan sarana dan infrastruktur persampahan yang memadai, ini akan menghasilkan timbunan sampah yang tidak terkelola dan mencemari lingkungan [1]. Data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) menunjukkan bahwa Indonesia

menghasilkan volume sampah 68,5 juta ton pada tahun 2021 dengan sisa 24% atau sekitar 16 juta ton sampah yang tidak terkelola (DPR RI, 2022).

Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan sampah yaitu dengan teknologi *Waste to Energy* (WTE). Sampah perkotaan baik berupa *organic* maupun *non-organic* diolah menjadi bahan bakar padat alternatif atau disebut dengan *Refuse Derived Fuel Municipal Solid Waste* (RDF MSW) dengan nilai kalor cukup tinggi. Dengan penggunaan RDF MSW sebagai bahan bakar alternatif dapat memberikan kontribusi positif dalam usaha mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta menjaga keberlanjutan ekosistem lingkungan

dengan mengurangi volume sampah dan emisi gas rumah kaca [2].

Tujuan dari penelitian ini ialah untuk menganalisis pengaruh dari variasi rasio RDF terhadap performansi *co-firing* menggunakan insinerator *fluidized bed*. Untuk mencapai hasil yang diinginkan dari luasnya permasalahan yang ada, maka diperlukan adanya pembatasan masalah, antara lain:

- Variasi rasio RDF terhadap batubara sebesar 5%, 10%, dan 15%.
- *Bed* material yang digunakan adalah pasir silika dengan ukuran partikel 0,5 – 0,8 mm.
- Uji penelitian ini meliputi perhitungan nilai *Net Plant Heat Rate* (NPHR).

## 2. Dasar Teori

Sampah adalah material sisa yang tidak memiliki kegunaan atau nilai lagi dan dibuang berbentuk padat, cair, maupun gas. Sampah terbagi dua menjadi sampah organik dan anorganik yang berasal dari hewan, manusia, serta tumbuhan. Sampah organik merupakan material sisa yang berasal dari makhluk hidup seperti sampah kayu, daun kering, sisa makanan dan sejenisnya. Sedangkan sampah anorganik merupakan yang tidak berasal dari makhluk hidup seperti plastik jajanan, kaleng, gelas, botol minuman dan sejenisnya. Sampah akan selalu menjadi bagian dalam kehidupan manusia, namun jika tidak ditangani dengan baik, sampah dapat memberikan dampak negatif bagi kesehatan dan lingkungan.

RDF MSW adalah hasil pemisahan fraksi sampah yang mudah terbakar dan tidak mudah terbakar, seperti kaca dan logam, dari sampah padat perkotaan. Dengan teknologi RDF dapat mengurangi jumlah volume timbunan sampah dan sebagai bahan bakar padat alternatif dalam industri pembangkit listrik dan industri semen. Dalam pembuatannya, fraksi sampah yang telah melalui proses pemisahan dilakukan penghancuran untuk mereduksi ukurannya kemudian dikeringkan [3]. RDF MSW memiliki keunggulan dengan nilai kalorinya yang cukup tinggi dan stabil, komposisi kimia dan ukuran yang seragam, mudah disimpan, ditangani dan diangkut, serta menghasilkan emisi polutan yang rendah.

Pembakaran bersama RDF MSW dan batubara dengan konsentrasi tertentu disebut metode *co-firing*. Teknologi *direct co-firing* digunakan karena relatif lebih murah sebab tidak ada biaya investasi untuk peralatan khusus yang dibutuhkan dibandingkan metode *co-firing* lainnya. Dengan *direct co-firing* batubara dan biomassa dapat membantu menurunkan emisi CO<sub>2</sub> dan jumlah polutan NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> dari bahan bakar fosil [4].

Pembakaran *direct co-firing* dilakukapan pada unit insinerator *fluidized bed*. Insinerator jenis ini telah digunakan secara luas untuk berbagai jenis limbah, termasuk sampah kota dan limbah lumpur. Reaktor fluidisasi dapat meningkatkan penyebaran sampah yang masuk sekaligus memberikan proses pemanasan yang relatif cepat hingga mencapai suhu penyalaan

dan meningkatkan waktu kontak yang cukup dan kondisi fusi yang menguntungkan dalam proses pembakaran. Dalam kondisi normal pembakaran terjadi dengan sendirinya, kemudian sampah dihancurkan dengan waktu yang cukup cepat, mengering, dan terbakar dalam hamparan pasir yang ada.

Pada *bubbling fluidized bed*, pada tahap awal hamparan solid berada di posisi bawah insinerator, lalu diperlakukan seperti fluida oleh udara yang masuk dari inlet udara primer. Untuk aplikasinya, distribusi bahan bakar harus diperhatikan dengan hati-hati untuk menghindari *carry-over* yang berlebihan dari partikel halus sebelum terbakar sepenuhnya atau tersegregasi dengan baik. *Bubbling fluidized bed* baik digunakan untuk batubara, biomassa dan limbah padat plastik. Partikel yang dikumpulkan dalam siklon primer *bubbling fluidized bed* biasanya dikembalikan ke hamparan untuk mencapai tingkat pembakaran yang tinggi [5].

## 3. Metode Penelitian

### 3.1. Alat dan Bahan

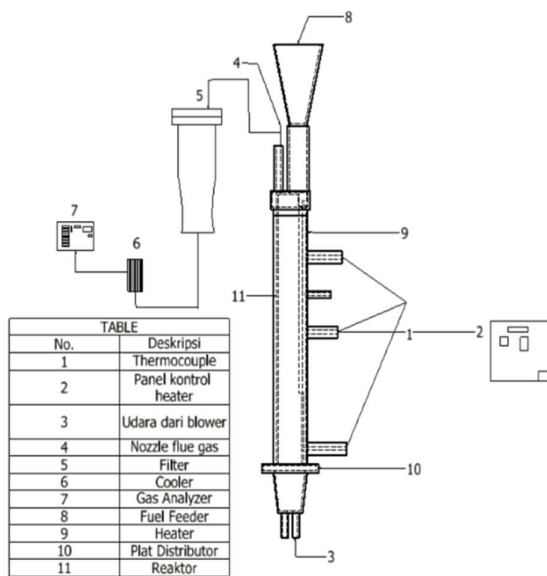
Adapun alat dan bahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaktor
2. *Heater*
3. *Thermocouple*
4. *Data logger*
5. *Gas analyzer*
6. Plat distributor
7. Isolator *glasswool*
8. Kompresor
9. Kontrol Panel
10. Anemometer
11. Timbangan
12. Batubara
13. RDF MSW
14. *Bed* material (pasir silika).

### 3.2. Skematik dan Digram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan pada unit insinerator dalam skala laboratorium. Unit insinerator beserta alat ukur yang digunakan didesain dalam sebuah gambar diagram skematik yang terlihat pada Gambar 1.

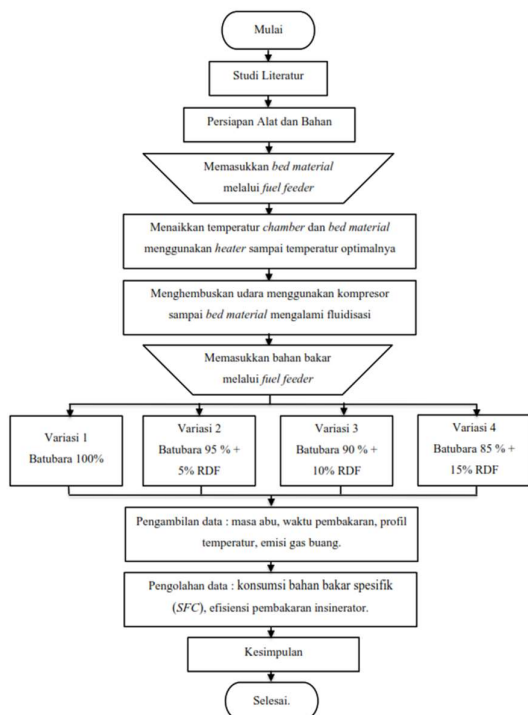




Gambar 1. Skematik Alat

### 3.3. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan bertempat di laboratorium *New Renewable - Conservation of Energy (NRCE)* dengan langkah penelitian yang dapat dilihat pada diagram alir pelaksanaan penelitian pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

### 3.4. Pelaksanaan Penelitian

Proses insinerasi RDF MSW dan batubara dilakukan dengan teknologi insinerator *fluidized bed*. Bahan bakar yang digunakan ialah campuran batubara

dan RDF MSW yang telah mengalami perlakuan berupa proses penghancuran dan pengayakan (Gambar 3) untuk mencapai ukuran yang homogen sebesar 0,5 – 1 mm. Pengkonversian energi dilakukan pada reaktor dengan sumber panas secara eksternal menggunakan *heater* dan terdapat plat distributor pada dasar reaktor. Setelah alat dan bahan penelitian disiapkan dalam kondisi siap pakai, masukkan bahan *bed* material berupa pasir silika ke dalam reaktor. Panaskan reaktor menggunakan alat bantu *heater* hingga mencapai temperatur operasi 850 °C. Setelah temperatur operasi tercapai, variasi bahan bakar batubara dan RDF MSW dimasukkan ke dalam reaktor, kemudian dialirkan udara menggunakan kompresor dengan kecepatan *superficial* 9m/s yang dijaga konstan dan di *setting* menggunakan anemometer sehingga terjadi proses pembakaran. Selama terjadinya proses pembakaran dilakukan pengambilan data melalui alat gas analyzer. Gas sisa pembakaran di buang ke udara bebas setelah melalui filtrasi dan penurunan temperatur menggunakan *cooling box*.



Gambar 3. Proses penghancuran dan pengayakan batubara.

### 3.5. Parameter performansi (NPHR)

Uji heat rate atau disebut juga *Net Plant Heat Rate (NPHR)* adalah pengujian nilai termal yang dilakukan dengan tujuan mengetahui besaran input energi dari bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan 1kWh daya. NPHR didefinisikan juga sebagai perbandingan antara jumlah energi panas masuk terhadap daya yang dihasilkan. Perhitungan NPHR dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$NPHR = \frac{Q_{in}}{P} \quad (1)$$

$$NPHR = \text{Net Plant Heat Rate (kcal/kWh)}$$

$$Q_{in} = \text{Energi yang masuk (kcal)}$$

$$P = \text{Daya yang dihasilkan (kWh)}$$

## 4 Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Karakterisasi Bahan Bakar

Karakterisasi bahan bakar diperlukan guna menganalisis kandungan bahan yang digunakan sebelum dan sesudah dilakukan penelitian. Karakterisasi bahan bakar melalui pengujian uji *proximate* dilakukan menggunakan alat

Termogravimetri Analyst 701 dengan metode ASTM-D-7582 MVA BIOMA.

**Tabel 1. Hasil Uji Proximate Bahan Bakar**

| Bahan Bakar            | Kadar Air (%) | Bahan Menguap (%) | Karbon Tetap (%) | Abu (%) |
|------------------------|---------------|-------------------|------------------|---------|
| 100 % Batubara         | 19,29         | 36,56             | 37,38            | 6,77    |
| 95% Batubara + 5% RDF  | 18,62         | 39,53             | 36,21            | 5,64    |
| 90% Batubara + 10% RDF | 18,02         | 40,35             | 35,61            | 6,02    |
| 85% Batubara + 15% RDF | 17,93         | 43,13             | 33,79            | 5,15    |

#### 4.2 Karakterisasi Nilai Kalor Bahan Bakar

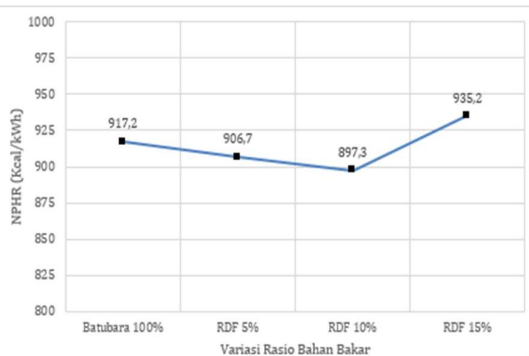
Karakterisasi nilai kalor dilakukan untuk menganalisis jumlah energi panas yang terlepas untuk tiap satuan massa bahan bakar. Dilakukan pengukuran nilai kalor dengan alat Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter menggunakan standar ASTM *Standard Test Method D5865*. Berikut adalah hasil pengujian nilai kalor dari bahan bakar.

**Tabel 2. Analisis Nilai Kalor Bahan Bakar**

| Bahan Bakar            | Massa (gram) | Nilai Kalor Sampel Bahan Bakar |                |             |         |
|------------------------|--------------|--------------------------------|----------------|-------------|---------|
|                        |              | Temperatur                     |                | Nilai Kalor |         |
|                        |              | T <sub>1</sub>                 | T <sub>2</sub> | (Cal/gr)    | (Mj/Kg) |
| Batubara 100%          | 140          | 27,69                          | 30,47          | 4817,44     | 20,156  |
| 95% Batubara + 5% RDF  | 140          | 26,54                          | 29,40          | 4788,11     | 20,033  |
| 90% Batubara + 10% RDF | 140          | 27,47                          | 30,03          | 4658,91     | 19,492  |
| 85% Batubara + 15% RDF | 140          | 26,82                          | 29,40          | 4605,38     | 19,268  |

#### 4.3 NPHR

Perhitungan NPHR dilakukan untuk mengetahui besarnya input energi kalor bahan bakar digunakan untuk menghasilkan satuan daya. Adapun hasil dari perhitungan NPHR yang dilakukan tiap variasi menunjukkan nilai NPHR pada variasi 5% RDF, 10% RDF, dan 15% RDF; secara berurutan adalah 901,53 kcal/kWh, 897,31 kcal/kWh, dan 935,24 kcal/kWh.



**Gambar 4 Grafik NPHR Tiap Variasi**

Berdasarkan gambar 5 nilai NPHR terendah didapatkan pada variasi III yaitu 90% batubara dan

10% RDF yang memiliki nilai NPHR sebesar 897,3 kcal/kWh. Dengan penambahan RDF semakin banyak hingga persentase 10% kedalam campuran bahan bakar mengakibatkan penurunan nilai NPHR. Semakin kecil nilai NPHR maka semakin tinggi efisiensi pembakaran yang terjadi.

#### 5. Kesimpulan


Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dengan tujuan menganalisis pengaruh variasi persentase RDF terhadap performansi *direct co-firing* menggunakan insinerator *fluidized bed*, maka diperoleh kesimpulan bahwa:

- Rasio RDF MSW dan batubara sangat berpengaruh terhadap performansi insinerator *fluidized bed*. Semakin besar rasio RDF terhadap batubara mengakibatkan terjadinya peningkatan nilai NPHR pada insinerator *fluidized bed*. Hal ini ditunjukkan oleh variasi 85% batubara + 15% RDF, dengan nilai *Net Plant Heat Rate* (NPHR) sebesar 935,24 kcal/kWh, lama pembakaran 940s.

#### Daftar Pustaka

- [1] Artiningrum, T., 2017, Potensi Emisi Metana (Ch 4) Dari Timbulan Sampah Kota Bandung, Geoplanart, vol. 1, no. 1, pp. 36–44.
- [2] Atmika I.G.N.A. and Suryawan G.P., 2022, Pengelolaan Limbah Banten sebagai Sumber Energi Terbarukan dengan Teknologi RDF Berkualitas Tinggi, Jurnal Bakti Saraswati, vol. 11, no. 2, pp. 97–106.
- [3] Rania M.F. *et al.*, 2019, Analisis Potensi *Refuse Derived Fuel* (RDF) Dari Sampah Pada Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Di Kabupaten Tegal Sebagai Bahan Bakar Incinerator Pirolisis, Sintek Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, vol. 13, no. 1, pp. 51, doi: 10.24853/sintek.13.1.51-59.
- [4] Winaya I N.S., and Susila I.B.A.D., 2010, Co-Firing Sistem *Fluidized Bed* Berbahan Bakar Batubara dan Ampas Tebu, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, vol. 4, no. 2, pp. 180–188.
- [5] J. Van Caneghem *et al.*, 2012, *Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues*, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, no. 4, pp. 551–582, doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.001.

|  |   |
|--|---|
|   | <p><b>Michael Wor Winner</b> menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p> |
| <p>Judul tugas akhir Pengaruh Rasio RDF MSW Dan Batubara Terhadap Performansi <i>Direct Co-firing</i> Pada Insinerator <i>Fluidized Bed</i>.</p> |   |

|   |  |
|---|--|
|  | <p>Prof. I Nyoman Suprapta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D. menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 1994, S2 di Dalhousie University pada tahun 2000, dan S3 di Niigata University pada tahun 2008. Prof. I Nyoman Suprapta Winaya, S.T., MA.Sc., Ph.D., memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|---|--|

|  |  |
|--|--|
|  | <p>Ketut Astawa, S.T., M.T., menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana, S2 di Universitas Brawijaya pada tahun 2006. Ketut Astawa, S.T., M.T., memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|--|--|

|   |   |
|---|---|
|  | <p>I Putu Angga Yuda Pratama, S.T., M.T., menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana pada tahun 2019 dan S2 di Universitas Udayana pada tahun 2021. I Putu Angga Yuda Pratama, S.T., M.T., memiliki konsentrasi ilmu dalam bidang konversi energi.</p> |
|---|---|

# PENGARUH *EXCESS AIR* TERHADAP *CO-FIRING* BATU BARA DENGAN BRIKET MSW MENGGUNAKAN INSINERATOR *FLUIDIZED BED*

Edgar Reinard Lie, I Nyoman Suprpta Winaya, I Gede Putu Agus Suryawan  
*Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Salah satu cara untuk mengurangi timbunan sampah padat kota atau *Municipal Solid Waste* (MSW) adalah dengan mengolahnya menjadi bahan bakar, salah satu contoh olahannya adalah briket MSW. *Co-firing* merupakan metode pembakaran campuran dua bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan udara (*excess air*) terhadap performansi pembakaran *co-firing* berupa *flue gas* dan efisiensi pembakaran. Pembakaran terjadi pada insinerator *fluidized bed* yang terdiri dari *fuel feeder*, plat distributor dan reaktor dengan ketinggian 1 m, dan diameter 0.64 m, dimana bahan bakar akan dimasukkan dari *fuel feeder* yang terletak diatas reaktor kemudian *excess air* akan dialirkan dari bagian bawah reaktor menggunakan kompresor dan panas disuplai menggunakan *heater* yang terkontrol melalui panel kontrol listrik sebesar 800°C. Bahan bakar terdiri dari briket MSW yang berasal dari Tempat Pengolahan Sampah Terpadu Kertalunggu, Denpasar dan batu bara dengan komposisi campuran batu bara sebanyak 95% dan briket MSW 5% dengan massa total 140 gram. Variasi penambahan udara yang digunakan yaitu, variasi 1 (stoikiometris), variasi 2 (*excess air* 10%), variasi 3 (*excess air* 20%), dan variasi 4 (*excess air* 30%). Hasil penelitian eksperimental ini menunjukkan reaksi pembakaran yang lebih baik ditandai dengan penurunan tingkat kandungan CO dan meningkatnya kandungan CO<sub>2</sub> pada *flue gas* seiring dengan peningkatan *excess air*. Efisiensi pembakaran terbaik diperoleh pada variasi 3 dengan *excess air* 20% diperoleh nilai 89% dan terjadi penurunan pada variasi 4 dengan *excess air* 10% diperoleh nilai 82%, hal ini menunjukkan penambahan *excess air* berlebihan bisa menurunkan efisiensi pembakaran.

Kata kunci : *Co-firing*, Briket MSW, *Fluidized Bed*, Insinerator, Efisiensi, Emisi Gas Buang

## Abstract

*One way to reduce pile of Municipal Solid Waste (MSW) is convert it to fuel, one of the example is MSW briquette. Co-firing is a method of burning two mixture two different fuel. This research is aim to determine effect of excess air on performance of co-firing combustion on the flue gas and combustion efficiency. Combustion occur in a fluidized bed incinerator consisting of fuel feeder, distributor plate, and a reactor with 1 m height and 0.64 m diameter, the fuel will be fed into the reactor through the fuel feeder located above the reactor then excess air will flowed from the bottom of reactor and heat supplied using a controlled heater via an electric control panel at 800°C . The fuel consist of MSW briquette originating from TPST Kertalunggu, Denpasar and coal with composition 95% of coal and 5% of MSW briquette with a total mass of 140 gram. Variations of excess air that used are variaton 1 (stoichiometric), variation 2 (excess air 10%), variation 3 (excess air 20%), and variation 4 (excess air 30%). The result of this experimental show a better combustion reaction characterized by decrease of CO content and increased CO<sub>2</sub> content in flue gas as excess air increased. The best combustion efficiency occurred at third variation with excess air 20% which is 89% and decrease occurred in fourth variation with excess air 30% which is 82%, it is show that adding too much excess air can reduce the combustin efficiency.*

Keywords: *Co-firing*, MSW briquette, *fluidized bed*, incinerator, Efficiency, Flue Gas

## 1. Pendahuluan

Negara Indonesia tercatat menghasilkan *municipal solid waste* (MSW) sebanyak lebih dari 38,5 ton dengan potensi meningkat 2-3% di setiap tahunnya [1]. Apabila sampah yang dihasilkan tidak ditangani dengan tepat, sampah tersebut bisa menyebabkan banyak hal negatif bagi lingkungan. Karena itu, lebih baik lagi sampah-sampah tersebut diolah lagi agar bisa dimanfaatkan untuk kebutuhan yang lebih berguna.

Teknologi yang menjanjikan untuk mengurangi MSW atau bisa juga disebut sampah padat kota yaitu, dengan membakar MSW tersebut untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik seperti batu bara [2]. Untuk mewujudkan itu maka MSW diolah menjadi briket yang memiliki karakteristik mirip dengan batu bara. Briket MSW yang digunakan pada penelitian ini dibuat di TPST Kertalangu dengan campuran 50% bahan organik dan 50% bahan anorganik melewati

beberapa tahapan yang terdiri dari tahapan pemisahan dan produksi.

*Co-firing* briket biomassa (briket MSW) dengan batubara memperkenalkan *biofuel* sebagai sumber energi tambahan dalam penggunaan boiler efisiensi tinggi. Berdasarkan jenis reaktornya, metode *fluidized bed* terdiri atas tiga jenis, salah satunya adalah *Bubbling Fluidized Bed Combustion* (BFBC). Metode BFBC memiliki kelebihan di antaranya mampu berfungsi pada beberapa tekanan, kontrol termal yang relatif lebih mudah, kandungan metana yang tinggi dalam *syngas*, serta mampu berfungsi dengan ukuran partikel yang bervariasi.

Stoikiometri memungkinkan menghitung kebutuhan udara untuk mendapatkan pembakaran sempurna [3]. Sebelumnya telah dilakukan pengujian pembakaran batu bara menggunakan FBC [4] dengan variasi pertama sesuai dengan keadaan stoikiometri, variasi kedua sebesar 24% hanya udara primer, variasi ketiga sebesar 46% udara primer dan sekunder. Dari hasil penelitian tersebut, dijelaskan bahwa semakin banyak *excess air* maka akan menurunkan pembentukan CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub>, tetapi penambahan udara juga menurunkan temperatur di dalam *riser* secara keseluruhan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performansi pembakaran *co-firing* batu bara dan briket MSW dengan insinerator *fluidized bed* tipe *bubbling*.

- Variasi yang digunakan adalah pembakaran stoikiometri, kelebihan udara 10%, kelebihan udara 20% dan kelebihan udara 30%
- *Bed* material yang digunakan adalah pasir silika dengan *mesh* 0.5 – 0.8 mm.
- Uji penelitian ini meliputi efisiensi pembakaran dan emisi gas buang yang dihasilkan.

## 2. Dasar Teori

Pada tahun 2022 tercatat pada Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup terdapat 296.012,41 ton sampah yang dikelola dan terdapat 20.300,24 ton sampah yang tidak dikelola di kota Denpasar. Sampah-sampah tersebut dihasilkan dari berbagai macam kegiatan. Beberapa jenis sampah yang dihasilkan umumnya berupa sisa-sisa makanan, plastik, kaleng, kayu, kertas, sayuran dan buah-buahan busuk. Apabila tidak ada tindakan lanjut terhadap sampah-sampah tersebut, maka akan menimbulkan pengaruh-pengaruh buruk terhadap lingkungan maupun kesehatan manusia. Angka tersebut dapat ditkekan lagi menjadi lebih rendah dengan mengolah sampah-sampah tersebut agar bisa dimanfaatkan sehingga menjadi bernilai. Salah satu contoh pemanfaatan sampah adalah diolah menjadi bahan bakar.

Briket adalah salah satu cara yang digunakan untuk mengkonversi sampah-sampah menjadi bentuk *biofuel* dengan cara dimampatkan sehingga bentuknya lebih teratur, salah satu contohnya adalah briket MSW [5]. Berikut proses pengolahan sampah sampai menjadi briket MSW, pembuatan briket MSW yang dilakukan di TPST Kertalunggu dilakukan dengan cara memilah sampah mulai dari ukuran 20 – 60 cm. Kemudian sampah yang memiliki ukuran diatas 20 cm didistribusikan dengan *Conveyor* menuju *Manual Sorting Table*. Sampah-sampah yang tidak memiliki nilai jual dilanjutkan pada proses pencacahan yaitu dengan mesin *Primary Shredder*. Sampah hasil cacahan dilanjutkan pada mesin *Turbo Separator* yang berfungsi untuk memisahkan partikel organik dan mix partikel. Kemudian sampah diletakan pada Area WIP (*Work in Progress*).

Produksi sampah yang berada di Area WIP diinput ke dalam pada *Box Feeder* yang ada di *Rotary Dryer*. Kemudian dimasukkan ke dalam mesin *Rotary Dryer* yang bertujuan untuk melakukan pengeringan pada material sampah. Setelah itu, sampah hasil pengeringan didistribusikan dengan *Conveyor* menuju *Briquetting Machine*. Sampah diolah dan dibentuk menjadi Briket dengan suhu operasi 120 – 180°C dan didapatkan sehingga menjadi Briket.

*Bubbling fluidized bed* memiliki beberapa tahapan kerja, pada tahap awal *bed material* solid berada di posisi bawah insinerator, lalu pada tahap berikutnya *bed material* diperlakukan seperti fluida oleh udara yang masuk dari inlet udara primer. Untuk aplikasinya, distribusi bahan bakar harus diperhatikan dengan hati-hati untuk menghindari *carry-over* yang berlebihan dari partikel halus sebelum terbakar sepenuhnya atau tersegresi partikel besar yang tidak akan terfluidasi dengan baik. *Bubbling fluidized bed* baik digunakan untuk batu bara, biomassa dan limbah padat plastik [3].

Kelebihan udara atau *excess air* merupakan jumlah udara yang masuk ke dalam proses pembakaran melebihi jumlah teoritis yang diperlukan untuk pembakaran sempurna (stoikiometri) bahan bakar tertentu [6]. Penelitian yang sudah dilakukan [7] menunjukkan ketika pembakaran *biofuel*, emisi CO dan C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> bisa dengan efektif dikurangi dengan meningkat jumlah *excess air* dengan penambahan yang masih dalam jangkauannya. Diketahui *excess air* dapat mengurangi emisi gas buang karena dapat mengurangi waktu tinggal selama partikel diperlakukan sebagai fluida di dalam ruang bakar. Karena kecepatan fluida yang tinggi, *volatile matter* dilepaskan pada *bed material* dan batu bara terangkat dari hamparan tanpa oksidasi.

## 3. Metode Penelitian

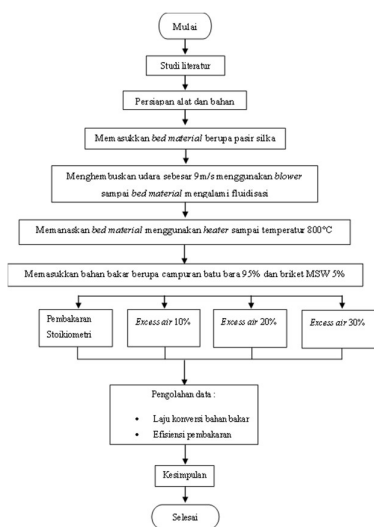
### 3.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Reaktor

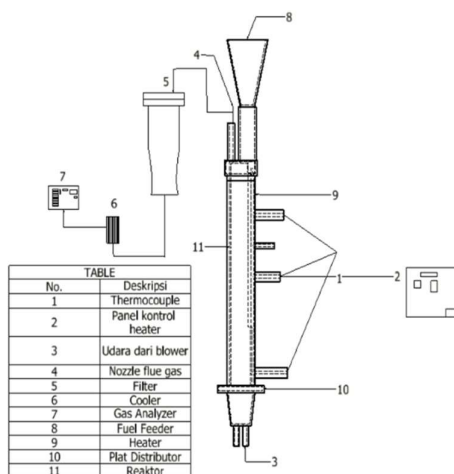
2. Heater
3. Thermocouple
4. Data logger
5. Gas analyzer
6. Kompresor
7. Kontrol Panel Listrik
8. Batubara
9. Briket MSW

### 3.2 Diagram alir penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### 3.3 Skematik Alat



Gambar 2 Skematik Alat

### 3.4 Efisiensi Pembakaran

Efisiensi pembakaran dapat dihitung dengan mengukur jumlah kalor yang masuk dan jumlah kalor yang dilepaskan dalam proses pembakaran. Untuk menghitung efisiensi pembakaran dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \quad (1)$$

$$Q_{in} = m_{bb} \times LHV_{bb} \quad (2)$$

$$Q_{out} = V_{gas} \times LHV_{gas} \quad (3)$$

$\eta$  = Efisiensi (%)

$Q_{in}$  = Energi yang masuk (kkal)

$Q_{out}$  = Kalor yang dilepaskan (kkal)

$m_{bb}$  = massa bahan bakar (kg)

$V_{gas}$  = Volume gas buang ( $m^3$ )

$LHV$  = Nilai kalor rendah (kkal/kg)

## 4 Hasil dan Pembahasan

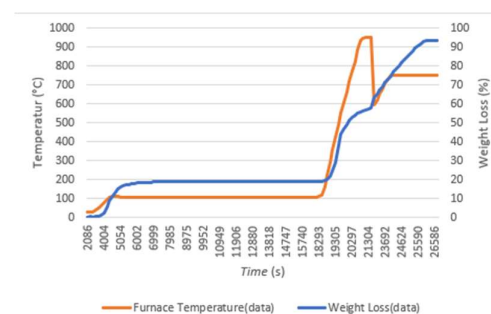
### 4.1 Karakterisasi Bahan Bakar

Karakterisasi bahan bakar dilakukan untuk menganalisis kandungan bahan yang digunakan sebelum dan sesudah penelitian. Karakterisasi bahan bakar dilakukan menggunakan pengujian uji proximate menggunakan alat Thermogravimetri Analyst 701 yang dilakukan menggunakan metode ASTM D-7582 MVA BIOMA.

Tabel 1. Hasil Uji Proximate Bahan Bakar

| Bahan Bakar                  | Kadar Air (%) | Bahan Menguap (%) | Karbon Tetap (%) | Abu (%) |
|------------------------------|---------------|-------------------|------------------|---------|
| Briket MSW 5% + Batubara 95% | 18.82         | 38.89             | 39.10            | 6.73    |

Gambar 3 menunjukkan grafik peningkatan *weight loss* seiring dengan kenaikan temperatur pada bahan bakar.



Gambar 3 Grafik TGA Briket MSW 5% + Batubara 95%

### 4.2 Karakterisasi Nilai Kalor Bahan Bakar

Analisis nilai kalor digunakan untuk mengetahui jumlah energi panas yang terlepas untuk tiap satuan massa bahan bakar. Berikut adalah tabel hasil pengujian nilai kalor bahan bakar berupa batu bara 95% dengan briket MSW 5%. Pengujian nilai kalor dilakukan menggunakan alat Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter dengan standar ASTM *Standard Test Method D5865*. Berikut adalah hasil pengujian



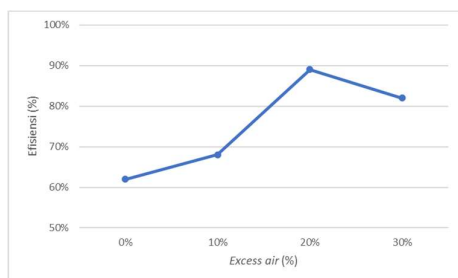
nilai kalor dari bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini.

**Tabel 2. Analisis Nilai Kalor Bahan Bakar**

| Bahan Bakar                  | Berat Sampel (gram) | Nilai Kalor Sampel Bahan Bakar |                |             |         |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------|-------------|---------|
|                              |                     | Temperatur                     |                | Nilai Kalor |         |
|                              |                     | T <sub>1</sub>                 | T <sub>2</sub> | (Cal/gr)    | (Mj/Kg) |
| Briket MSW 5% + Batubara 95% | 1.00164             | 27.545                         | 29.848         | 4275.54     | 17.90   |

### 4.3 Efisiensi

Efisiensi pembakaran merupakan perbandingan antara jumlah kalor dari bahan bakar dan kalor yang lepas selama proses pembakaran. Persentase efisiensi pembakaran nantinya menunjukkan seberapa besar nilai kalor yang berguna saat proses pembakaran. Dapat dilihat pada gambar 4 nilai efisiensi terbaik terdapat pada variasi *excess air* 20%.

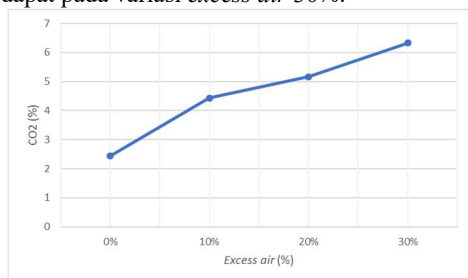


**Gambar 4 Grafik Efisiensi Pembakaran**

Diketahui terjadi penurunan efisiensi pada *excess air* 30% dikarenakan semakin banyak udara yang masuk ke reaktor mengakibatkan menurunnya temperatur pembakaran dikarenakan semakin banyak kalor yang dipelankan ke gas buang karena kecepatan fluidisasi yang ikut meningkat.

### 4.4 Emisi CO<sub>2</sub>

Tingkat emisi CO<sub>2</sub> menunjukkan kualitas dari pembakaran dari *co-firing* batu bara dan briket MSW. Kandungan CO<sub>2</sub> pada gas buang tiap variasi bisa dilihat pada gambar 5 Kandungan CO<sub>2</sub> tertinggi terdapat pada variasi *excess air* 30%.



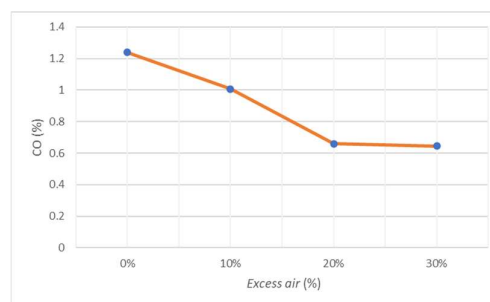
**Gambar 5 Grafik Kandungan CO<sub>2</sub> pada Gas Buang**

Pada gambar di atas menunjukkan kenaikan nilai CO<sub>2</sub>, hal tersebut terjadi karena semakin tinggi *excess air*

mengakibatkan kenaikan kecepatan udara. Semakin banyak udara yang masuk ke reaktor menyebabkan semakin banyak juga jumlah oksigen yang beraksi dengan bahan bakar ketika pembakaran terjadi yang menyebabkan nilai kandungan CO<sub>2</sub> pada gas buang terus meningkat seiring dengan penambahan *excess air* [6].

### 4.5 Emisi CO

Tingkat emisi CO juga menunjukkan kualitas performansi dari pembakaran *co-firing* batu bara dan briket MSW. Kandungan CO pada gas buang dari tiap variasi bisa dilihat pada gambar 6 Kandungan CO tertinggi terdapat pada variasi tanpa *excess air*.



**Gambar 6 Grafik Kandungan CO pada Gas Buang**

Penambahan *excess air* bisa dilihat pada grafik menurunkan kandungan CO dalam gas buang. Hal ini terjadi dikarenakan karena semakin tinggi *excess air* mengakibatkan tingkat fluidisasi yang lebih tinggi, sehingga gas volatil terbakar yang menyebabkan terjadinya oksidasi sebelum mengenai bed material [6].

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penambahan *excess air* berpengaruh terhadap performansi pembakaran *co-firing* batu bara dan briket MSW dari TPST Kertalunggu, Denpasar.

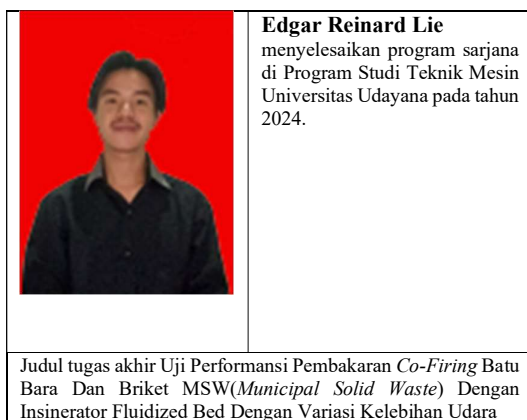
Penambahan *excess air* menyebabkan reaksi pembakaran yang lebih baik ditandai dengan semakin sedikitnya kandungan CO dan meningkatnya kandungan CO<sub>2</sub> pada *flue gas*. Hal ini disebabkan semakin banyak jumlah udara akan menambah oksidator dalam reaksi.

Dari hasil yang diperoleh performansi terbaik terdapat pada variasi *excess air* 20% dengan efisiensi pembakaran tertinggi, diikuti dengan variasi *excess air* 30% dan efisiensi terendah pada pembakaran stoikiometricnya.

### Daftar Pustaka

- [1] F. D. Qonitan, I. Wayan Koko Suryawan, and A. Rahman, "Overview of Municipal Solid Waste Generation and Energy Utilization Potential in Major Cities of Indonesia," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Apr. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1858/1/012064.

- [2] J. I. Gug, D. Cacciola, and M. J. Sobkowicz, "Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics," *Waste Management*, vol. 35, pp. 283–292, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.09.031.
- [3] J. Van Caneghem *et al.*, "Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 38, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 551–582, 2012. doi: 10.1016/j.peccs.2012.03.001.
- [4] S. Ibrahim and T. A. Rohmat, "Pengaruh Udara Lebih dan Udara Sekunder Terhadap Karakteristik Pembakaran Pada Circulating Fluidized Bed Combustor," 2021.
- [5] Arhamsyah, "Pemanfaatan Biomassa Kayu Sebagai Sumber Energi Terbarukan," 2010.
- [6] P. R. Wander, F. M. Bianchi, N. R. Caetano, M. A. Klunk, and M. L. S. Indrusiak, "Cofiring low-rank coal and biomass in a bubbling fluidized bed with varying excess air ratio and fluidization velocity," *Energy*, vol. 203, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117882.
- [7] M. Varol, A. T. Atımtay, H. Olgun, and H. Atakül, "Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 1. Effect of excess air ratio," *Fuel*, vol. 117, no. PART A, pp. 792–800, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.09.051.



# PENGARUH PENGGUNAAN CEROBONG PEMANAS *FUEL SPRAY* TERHADAP ATOMISASI MINYAK JELANTAH SEBAGAI BAHAN BAKAR DENGAN *ATOMIZER* BERBASIS *AIR-ASSIST*

Christopher Kenan Ho, Ainul Ghurri, I Made Parwata

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

*Atomisasi merupakan proses disintegrasi cairan menjadi droplet. Pada pembakaran atomisasi diperlukan untuk meningkatkan efisiensi. Minyak jelantah dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam pembakaran dengan metode fuel spray. Namun, minyak jelantah memiliki kontaminan dan viskositas yang tinggi sehingga membuatnya lebih sulit untuk teratomisasi dan terbakar. Air-assisted atomizer memanfaatkan udara bertekanan untuk menghasilkan spray dengan cairan yang dialirkan dengan kecepatan rendah. Cerobong pemanas digunakan sebagai perlakuan preheating untuk meningkatkan atomisasinya dengan cara memanaskan spray bahan bakar yang keluar dari atomizer. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan cerobong pemanas dan tanpa cerobong pemanas dengan minyak jelantah sebagai bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh dari penggunaan cerobong pemanas terhadap atomisasi bahan bakar. Penggunaan cerobong pemanas meningkatkan persentase atomisasi bahan bakar sebesar 11,7% yang awalnya sebesar 71,2% tanpa cerobong pemanas menjadi 82,9% dengan adanya cerobong pemanas.*

*Kata kunci: Atomisasi, Droplet, Fuel Spray, Atomizer, Air-Assisted Atomizer, Cerobong Pemanas, Preheating*

## Abstract

*Atomization is a disintegration process of liquid into droplet. In combustion atomization is needed to increase the efficiency. Waste cooking oil can be used as fuel in combustion with fuel spray method. However, waste cooking oil have contaminants and high viscosity which make it harder to atomize and combust. Air-assisted atomizer utilise pressurized air to produce sprays with liquid supplied at low flow rate. A heating funnel is used as a preheating treatment to improves the atomization by heating up the fuel spray off the atomizer. In this research, the experiment is conducted with and without heating funnel with waste cooking oil as fuel. The result shows the effects of heating funnel to fuel atomization. The usage of heating funnel increased the atomization percentage by 11.7% from 71.2% without heating funnel to 82.9% with heating funnel.*

*Keywords: Atomization, Droplet, Fuel Spray, Atomizer, Air-Assisted Atomizer, Heating Funnel, Preheating*

## 1. Pendahuluan

Secara global, saat ini terdapat dua buah isu penting yang perlu dipecahkan, yaitu isu Sumber Daya Alam (SDA), terkait dengan sumber daya tak terbarukan yang terus menipis dimana ketergantungan seluruh dunia pada minyak bumi sebagai bahan bakar masih tinggi dan isu lingkungan, terkait dengan pengolahan dan penggunaan kembali limbah dimana salah satu limbah yang paling banyak diproduksi adalah minyak jelantah. Salah satu upaya untuk menanggulangi kedua isu di atas adalah dengan penggunaan kembali minyak atau bahan bakar bekas untuk penyediaan energi melalui pembakaran. Minyak jelantah dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam pembakaran dengan metode *fuel spray*. Namun, bahan bakar tersebut memiliki kontaminan dan viskositas yang tinggi, sehingga dibutuhkan desain burner yang

tepat untuk menghasilkan pembakaran dengan efisiensi tinggi.

*Fuel spray* dalam pembakaran terbentuk melalui proses atomisasi bahan bakar cair menjadi *droplet* dengan ukuran yang bervariasi. Semakin baik proses atomisasi maka semakin kecil ukuran *droplet* yang diperoleh, semakin kecil ukuran *droplet* maka semakin efisien pembakaran. *Air-assisted atomizer* merupakan *atomizer* yang memanfaatkan udara sebagai alat bantu dalam atomisasi, sehingga mampu menghasilkan *spray* dengan bahan bakar yang dialirkan dengan kecepatan rendah. Selain jenis *atomizer* yang digunakan, *preheating* bahan bakar dapat meningkatkan atomisasi. Dengan *preheating*, viskositas dari bahan bakar akan menurun sehingga mempermudah bahan bakar untuk pecah menjadi *droplet*.

Pada penelitian ini dibuat sistem pemanas dalam bentuk cerobong untuk memanaskan awalan dari *fuel*

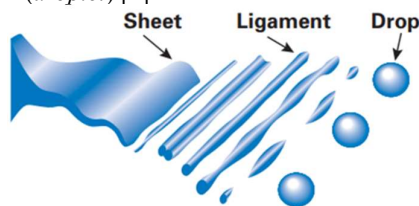
*spray* agar diperolehnya atomisasi yang lebih baik. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh penggunaan cerobong pemanasan awal terhadap atomisasi minyak jelantah sebagai bahan bakar dengan *atomizer* berbasis *air-assist*. Batasan penelitian ditetapkan untuk membatasi lingkup dalam penelitian ini yang meliputi:

1. Bahan bakar minyak jelantah yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dengan random sampling.
2. *Air Fuel Ratio* (AFR) dihitung berdasarkan pengukuran flowmeter udara dan bahan bakar sebelum masuk ke nosel.

## 2. Dasar Teori

### 2.1. Atomisasi

Atomisasi adalah proses disintegrasi cairan menjadi butiran (*droplet*). Atomisasi bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dari cairan. Tahapan atomisasi dapat dilihat pada Gambar 1, prosesnya dimulai dari keluarnya cairan dari ujung nosel dalam bentuk lembaran (*sheet*), kemudian membentuk ikatan (*ligament*) sampai akhirnya terdisintegrasi menjadi butiran (*droplet*) [1].



Gambar 1. Proses Atomisasi [1]

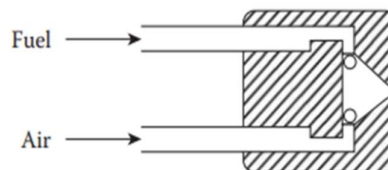
### 2.2. Faktor Yang Mempengaruhi Atomisasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas atomisasi meliputi:

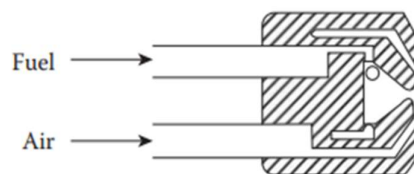
- Properti cairan: meliputi densitas, tegangan permukaan, dan viskositas. Tegangan permukaan dan viskositas yang tinggi cenderung mencegah terjadinya atomisasi. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya kohesi yang menimbulkan ikatan yang rapat antara molekul cairan. Oleh karena itu, cairan dengan tegangan permukaan dan viskositas yang tinggi akan menghasilkan *droplet* berukuran relatif besar. Densitas cairan yang tinggi akan mempertahankan akselerasi cairan yang di mana akan mencegah terjadinya atomisasi. Oleh karena itu, cairan dengan densitas yang tinggi cenderung menghasilkan *droplet* berukuran *droplet* relatif besar [2].
- Kondisi udara ambien
- Dimensi dan geometri *atomizer*
- Parameter operasional (tekanan dan laju alir massa cairan dan gas)

### 2.3. Air-Assisted Atomizers

Pada atomizers jenis ini, cairan dikenakan aliran udara atau gas yang mengalir dengan kecepatan tinggi untuk terjadinya atomisasi. Dalam konfigurasi pencampuran *internal*, seperti pada Gambar 2, gas dan cairan dicampur di dalam nosel terlebih dahulu sebelum dikeluarkan melalui lubang keluar. Pada konfigurasi pencampuran *external*, gas berkecepatan tinggi menimpa cairan di atau di luar lubang pelepasan cairan, seperti pada Gambar 3. Kedua jenis nosel dapat mengatomisasi cairan dengan viskositas tinggi secara efektif.



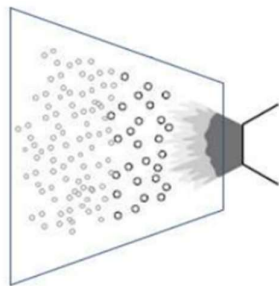
Gambar 2. Air-Assisted Atomizers Tipe Internal [3]



Gambar 3. Air-Assisted Atomizers Tipe External [3]

### 2.4. Cerobong Pemanas Fuel Spray

Cerobong pemanas *fuel spray* yang diusulkan pada penelitian ini memiliki cara kerja yang dapat dilihat pada Gambar 4. Cerobong yang dipanaskan dipasang melingkupi *fuel spray* sehingga membantu pemanasan dan penguapan *fuel spray* di ujung nosel sehingga terbentuknya *droplet* yang lebih halus. Cerobong berfungsi sebagai lintasan *fuel spray* yang diberi perlakuan pemanasan sehingga saat melintas *fuel spray* akan menerima energi panas dari cerobong tersebut. Dengan pemanasan tersebut, diharapkan *droplet* bahan bakar akan mengalami penguapan di bagian luarnya. Akibatnya sebagian *droplet* menguap dan sisanya akan berkurang ukuran *droplet*-nya, sehingga atomisasi menghasilkan *droplet* yang lebih halus. Dengan begitu, pembakaran akan berlangsung lebih baik dan menghasilkan panas dan kinerja pembakaran yang lebih tinggi.

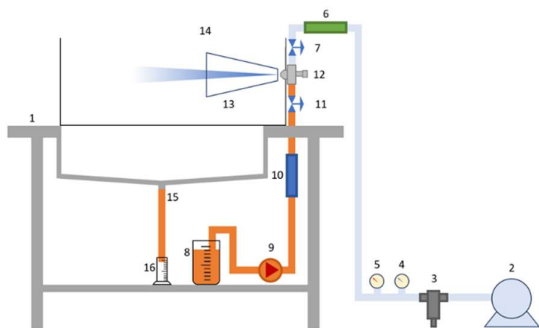


Gambar 4. Cerobong Pemanas Fuel Spray

### 3. Metode Penelitian

#### 3.1. Skematik Pengujian

Skematik pengujian ditunjukkan pada Gambar 5. Pengujian dimulai dengan menghidupkan kompresor kemudian membuka katup pengatur udara untuk menyuplai udara ke nosel yang dilengkapi dengan *flowmeter gas*, *pressure gauge*, dan *temperature gauge*. Bahan Bakar dialirkan dari gelas ukur dengan bantuan pompa, sebelum memasuki nosel, bahan bakar melewati *flowmeter liquid* dan katup pengatur. Di dalam nosel terjadi interaksi antara udara berkecepatan tinggi dengan bahan bakar berkecepatan rendah sehingga terbentuknya *spray*. Pada pengujian tanpa cerobong pemanas, bahan bakar akan disemprotkan tanpa melewati apapun, sedangkan pada pengujian dengan cerobong pemanas semprotan bahan bakar akan melewati cerobong pemanas terlebih dahulu. Pada penelitian ini, meja penelitian dilengkapi dengan *dome* tanpa atap. *Dome* digunakan agar *spray* tidak dipengaruhi oleh udara lingkungan sekitar. Bahan bakar yang teratomisasi dengan sempurna akan menguap dan terbawa udara sekitar melalui bagian atas *dome* yang terbuka, sedangkan yang tidak akan jatuh ke wastafel atau bak kemudian di tampung pada silinder ukur melalui selang penghubung. Bahan bakar yang tertampung pada silinder ukur akan dicatat volumenya sebagai data. Alat uji akan dibiarkan beroperasi hingga bahan bakar pada silinder ukur berkurang sebanyak 50ml.



- |                             |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. Meja Penelitian          | 9. Pompa                       |
| 2. Kompresor                | 10. <i>Flowmeter Liquid</i>    |
| 3. Filter Udara Kompresor   | 11. Katup Pengatur Bahan Bakar |
| 4. <i>Pressure Gauge</i>    | 12. Nosel                      |
| 5. <i>Temperature Gauge</i> | 13. Cerobong Pemanas           |
| 6. <i>Flowmeter Gas</i>     | 14. <i>Dome</i>                |
| 7. Katup Pengatur Udara     | 15. Selang Penghubung          |
| 8. Gelas Ukur               | 16. Silinder Ukur              |

Gambar 5. Skematik Pengujian

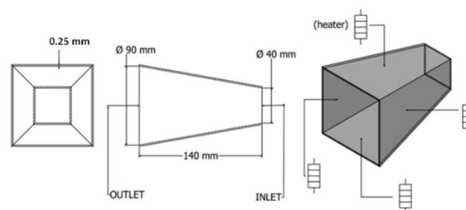
#### 3.3. Variabel Bebas

- Tanpa cerobong pemanas
- Dengan cerobong pemanas

Cerobong pemanas dalam penelitian ini diletakkan di depan ujung nosel dengan jarak 2 cm dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Sisi inlet: 4 cm
- Sisi outlet: 9 cm
- Panjang: 14 cm
- Tebal: 0.25 mm
- Luas permukaan: 739.52 cm<sup>2</sup>
- Material: Aluminium
- Daya: 60 watt

Bentuk dan ukuran cerobong pemanas ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Bentuk Dan Ukuran Cerobong Pemanas

#### 3.4. Variabel Terikat

- Atomisasi bahan bakar

#### 3.5. Variabel Kontrol

- Tipe nosel: nosel *air-assist tipe internal mix*
- Bentuk lubang nosel: bulat
- Diameter lubang nosel: 4 mm
- *Air-Fuel Ratio* (AFR): 15:1
- Temperatur plat cerobong pemanas: 120 ± 1°C
- Bahan bakar: minyak jelantah

### 4. Hasil dan Pembahasan

#### 4.1. Data Hasil Pengujian

Pada pengujian ini atomisasi bahan bakar diperoleh dengan melihat tingkat penguapan dari bahan bakar yang terjadi. Tingkat penguapan diperoleh dengan mencari selisih antara volume bahan bakar sebelum diatomisasi dengan volume bahan bakar sesudah diatomisasi. Pengujian ini dilakukan tanpa cerobong pemanas dan dengan cerobong pemanas dengan minyak jelantah sebagai bahan bakar.

Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali untuk mencari rata-rata dan standar deviasi bahan bakar yang teratomisasi. Berikut merupakan tabel data hasil pengujian analisa atomisasi minyak jelantah.

**Tabel 1. Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Minyak Jelantah Tanpa Cerobong Pemanas**

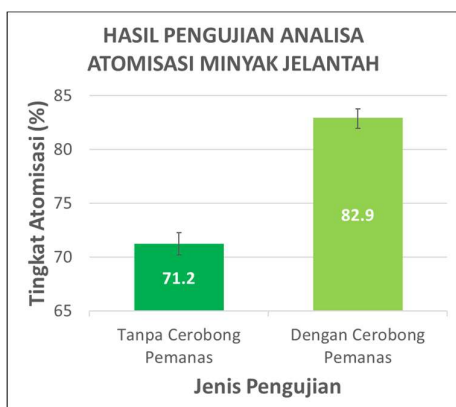
| No                           | Volume Minyak Jelantah Sebelum diatomisasi (ml) | Volume Minyak Jelantah Sesudah diatomisasi (ml) | Volume Minyak Jelantah Yang Teratomisasi dengan Sempurna (ml) | Tingkat Atomisasi Minyak Jelantah (%) |
|------------------------------|---|---|---|---------------------------------------|
| 1                            | 50  | 15  | 35  | 70                                    |
| 2                            | 50  | 14.2  | 35.8  | 71.6                                  |
| 3                            | 50  | 14  | 36  | 72                                    |
| Mean ( $\bar{x}$ )           |   |   |   | 71.2                                  |
| Standar Deviasi ( $\sigma$ ) |   |   |   | 1.058                                 |

**Tabel 2. Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Minyak Jelantah Dengan Cerobong Pemanas**

| No                           | Volume Minyak Jelantah Sebelum diatomisasi (ml) | Volume Minyak Jelantah Sesudah diatomisasi (ml) | Volume Minyak Jelantah Yang Teratomisasi dengan Sempurna (ml) | Tingkat Atomisasi Minyak Jelantah (%) |
|------------------------------|---|---|---|---------------------------------------|
| 1                            | 50  | 8.2   | 41.8  | 83.6                                  |
| 2                            | 50  | 8.4   | 41.6  | 83.2                                  |
| 3                            | 50  | 9   | 41  | 82                                    |
| Mean ( $\bar{x}$ )           |   |   |   | 82.9                                  |
| Standar Deviasi ( $\sigma$ ) |   |   |   | 0.833                                 |

#### 4.2. Pembahasan Hasil Pengujian

Grafik hasil pengujian analisa atomisasi minyak jelantah ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7. Grafik Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Minyak Jelantah**

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa cerobong pemanas *fuel spray* memiliki pengaruh terhadap atomisasi bahan bakar. Di mana pada pengujian menggunakan minyak jelantah yang awalnya memiliki tingkat atomisasi sebesar 71.2% tanpa adanya bantuan cerobong pemanasan awal mengalami peningkatan sebesar 11.7% menjadi 82.9% dengan adanya bantuan cerobong pemanasan awal.

Berdasarkan teori, bahan bakar akan lebih siap untuk terbakar jika tingkat atomisasi yang dimiliki lebih tinggi. Hal tersebut dikarenakan tingkat atomisasi yang tinggi akan menghasilkan *droplet* yang relatif lebih kecil. *Droplet* yang kecil memiliki luas permukaan yang relatif lebih besar sehingga dapat mempercepat proses penguapan bahan bakar cair sebelum terbakar. Dari hasil data yang diperoleh dapat dilihat bahwa dengan adanya bantuan cerobong *fuel spray* tingkat atomisasi yang diperoleh dari minyak jelantah mengalami peningkatan. Hal ini dapat disebabkan karena adanya perubahan sifat fisik dari minyak jelantah yang awalnya memiliki viskositas tertentu yang kemudian mengalami penurunan viskositas karena menerima panas atau energi dari cerobong pemanas. Dikarenakan pemanasan dilakukan pada bahan bakar yang sudah dalam bentuk *spray*, perpindahan panas dari cerobong pemanas ke bahan bakar menjadi lebih efektif karena dengan bentuk *spray* atau kumpulan *droplet* luas permukaan yang dimiliki oleh bahan bakar menjadi lebih besar. Viskositas yang lebih rendah akan mempercepat proses atomisasi karena bahan bakar akan lebih mudah pecah menjadi *droplet*, oleh karena itu proses atomisasi yang terjadi menjadi lebih cepat. Hal ini memungkinkan untuk diperolehnya *droplet* yang lebih kecil sehingga tingkat atomisasi menjadi lebih tinggi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan adanya bantuan cerobong pemanas *fuel spray* minyak jelantah mengalami peningkatan tingkat atomisasi dan lebih siap untuk terbakar.

#### 5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian atomisasi minyak jelantah, diperoleh kesimpulan bahwa pengujian dengan cerobong pemanas menghasilkan tingkat atomisasi yang lebih tinggi sebesar 11.7% dibandingkan pengujian tanpa cerobong pemanas. Adapun beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya, diantara lain:

1. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian penyalaan bahan bakar untuk melihat kinerja pembakarannya.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian dengan bahan bakar berdensitas dan berviskositas tinggi lainnya, seperti oli bekas.

#### Daftar Pustaka

- [1] Schick, R. J. (2008). *Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size Preface*. Spraying Systems Co.
- [2] Graco, I. (1995). *Atomization: Concept and*



**Theory Training.**

- [3] Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions (3rd ed.)*. CRC Press.
- [4] Ghurri, A., Anak Agung Adhi, S., & Bangun Tua, S. (2015). **Pengaruh Jumlah Lilitan Pipa Sebagai Pemanasan Awal Pada Kompor Pembakar Jenazah**. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*, 14.
- [5] Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y., & Wang, C. H. (2016). **Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure**. *Energy Conversion and Management*, 123, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.071>

|  |   |
|--|---|
|    | <p><b>Christopher Kenan Ho</b><br/>menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p> |
| <p>Judul tugas akhir Pengaruh Penggunaan Cerobong Pemanas <i>Fuel Spray</i> Terhadap Atomisasi Minyak Jelantah Sebagai Bahan Bakar Dengan <i>Atomizer</i> Berbasis <i>Air-Assist</i></p> |   |

|   |   |
|---|---|
|  | <p>Ainul Ghurri, Ph.D. menyelesaikan studi S1 di Universitas Brawijaya Malang, dan S2 di Universitas Indonesia. Pendidikan S3 ditempuh di Chonbuk National University Korea Selatan dan selesai pada tahun 2012. Bidang pendidikan dan riset yang didalami meliputi, pembakaran, mesin pembakaran dalam, atomization &amp; spray, mekanika fluida dan komputasi dinamika fluida (CFD)</p> |
|---|---|

|   |  |
|---|--|
|  | <p>Dr. I Made Parwata, ST., MT., menyelesaikan pendidikan S3nya di Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2012, pendidikan S2 diselesaikan di ITS Surabaya pada tahun 2002 dan pendidikan tingkat sarjana juga di selesaikan di ITS pada tahun 1994. Bidang riset yang ditekuni hingga saat ini adalah di bidang tribologi meliputi mekanika kontak, keausan, gesekan, lubrication dan atomization spray. Saat ini bertugas sebagai dosen di PS. Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana</p> |
|---|--|

# RE-DESIGN SISTEM KEMUDI KENDARAAN BIO-HYBRID OBHI-MEC UNUD DENGAN MENGGUNAKAN SINGLE STEERING JOINT

Anugrah Putra Adiansyah, I Made Gatot Karohika, I Made Widiyarta

Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

## Abstrak

Sistem kemudi adalah sebuah mekanisme pada kendaraan yang berguna untuk mengatur dan mengubah arah roda. Perubahan arah gerak roda ini dilakukan dengan cara membelokkan dua buah roda depan kendaraan. Saat ini, mobil biohybrid OBHI-Mec menggunakan sistem kemudi manual dengan mekanisme sederhana tie rod, yang dapat menopang beban saat kendaraan bergerak. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh beban terhadap gaya putar pada desain kemudi kendaraan biohybrid obhi- mec Unud. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua model sistem kemudi, yaitu model kemudi saat ini dengan dua buah steering joint dan modifikasi dengan satu buah steering joint. Hasil dari pengujian menggunakan sistem kemudi single steering joint berhasil mengurangi usaha saat mengubah arah kemudi, yang mana torsi pada kemudi maupun gaya yang diperlukan saat membelokkan roda terjadi pengurangan secara rata rata sebesar 33% dari pada menggunakan kemudi double steering joint, sehingga single steering joint menghasilkan kemudi yang lebih ringan dan lebih mudah saat mengemudi kendaraan Bio-Hybrid Obhi-Mec Unud..

Kata kunci: sistem kemudi single steering joint, gaya, momen

## Abstract

The steering system is a mechanism on a vehicle that is useful for controlling and changing the direction of the wheels. Changing the direction of movement of the wheels is done by turning the two front wheels of the vehicle. Currently, the OBHI-Mec biohybrid car uses a manual steering system with a simple tie rod mechanism, which can support the load when the vehicle is moving. This research aims to examine the effect of load on rotational force in the steering design of Unud's obhimec biohybrid vehicle. This research was carried out by comparing two steering system models, namely the current steering model with two steering joints and a modification with one steering joint. The results of testing using a single steering joint steering system succeeded in reducing effort when changing steering direction, where the torque on the steering wheel and the force required when turning the wheel were reduced on average by 33% compared to using double steering joint steering, so that the single steering joint produces lighter and easier steering when driving the Obhi-Mec Unud Bio-Hybrid vehicle..

Keywords: system steering joint, force, moment

## 1. Pendahuluan

Sistem kemudi adalah sebuah mekanisme pada kendaraan yang berguna untuk mengatur dan mengubah arah roda. Perubahan arah gerak roda ini dilakukan dengan cara membelokkan dua buah roda depan kendaraan. Cara kerja sistem kemudi adalah roda kemudi diputar gaya yang diperoleh akan diteruskan oleh kolom Kemudi ke dalam roda gigi kemudi.

Pada *steering gear* ini terdapat perbesaran momen putar sehingga mendapatkan gaya yang lebih besar untuk meneruskan putaran yang terhubung lewat sambungan kemudi (*steering linkage*). Terdapat dua buah jenis sistem kemudi secara umum, yaitu sistem kemudi manual dan sistem kemudi *power steering*.

Sistem ini lebih murah dan lebih sederhana dibanding dengan sistem kemudi lainnya. Sistem ini terdiri dari beberapa bagian utama meliputi stang kemudi, dua buah batang penghubung, dua buah *tie-rod*, dan sebuah penghubung konfigurasi V, Saat ini, mobil biohybrid OBHI-Mec menggunakan sistem kemudi manual dengan mekanisme sederhana tie rod, yang dapat menopang beban saat kendaraan bergerak.

Maka dari itu Bagaimana perbedaan gaya kemudi antara sistem kemudi OBHI-Mec (*Double steering joint*) dibandingkan dengan gaya kemudi modifikasi yang dimana itu menggunakan (*Single Steering joint*) gaya yang diperlukan untuk membelokkan roda, maka dari itu tujuan peneliti ingin melihat bagaimana pengaruh yang terjadi pada sistem kemudi terhadap gaya yang diperlukan untuk membelokkan roda.

Berdasarkan paragraf di atas, karena untuk mencari kenyamanan dalam membelokkan roda secara ringan untuk menunjang aspek kenyamanan, keamanan, dan kestabilan berkendara. Maka dari itu, peneliti mencoba melihat pengaruh dari pembebanan puntir pada tegangan, deformasi dan factor keamanan struktur kemudi bio-hybrid OBHI-Mec Unud dari *double steering joint* dan *single steering joint*.

Pada penelitian ini ada beberapa variabel yang akan dikontrol yaitu :

1. Pengujian ini menggunakan variasi penggunaan sistem kemudi lama (dengan 2 buah steering joint dan modifikasi dengan 1 buah steering joint)

2. Beban yang digunakan adalah 210 Kg dari adanya 3 penumpang dalam kendaraan OBHI-Mec Unud.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Jenis-Jenis Sistem Kemudi

Ketebalan Pada sistem kemudi secara umum terdapat dua tipe, pertama adalah tipe *manual steering* atau biasa disebut tipe konvensional dimana seluruh tenaga yang disalurkan berasal langsung dari pengemudi yang ditransmisikan oleh system kemudi. Ke dua adalah *power steering* yang menggunakan sebuah sistem *hidrolik* untuk memberi keringanan saat pengemudi memutar kemudinya.

### 2.2 Sistem Kemudi

Sistem kemudi adalah salah satu aspek penting terhadap kendaraan yang memiliki fungsi untuk mengatur serta mengarahkan arah gerak kendaraan dengan mengendalikan roda. Secara umum, sistem kemudi terdiri dari beberapa komponen, seperti steering column, steering gear, dan steering linkage. Steering column berfungsi untuk meneruskan gaya dari kemudi ke roda gigi kemudi. Steering gear bertugas memperbesar momen putar kemudi untuk menghasilkan tenaga yang lebih besar dalam menggerakkan roda. Steering linkage berperan dalam meneruskan gaya dari steering gear ke roda kemudi. Terdapat dua jenis sistem kemudi: sistem kemudi manual dan sistem kemudi power steering.

### 2.3 Steering Gear

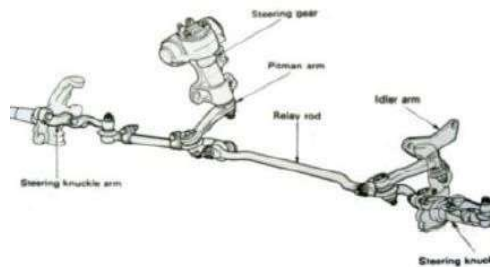
Roda gigi kemudi (Steering gear) berguna untuk memperbesar momen putar untuk memperoleh gaya yang lebih besar untuk disalurkan ke masing-masing roda penggerak melalui steering linkage.



Gambar 1. Steering Column

### 2.4 Steering Linkage

Sambungan kemudi (steering linkage) memiliki dua komponen besar yang berfungsi untuk meneruskan gaya yang terjadi pada steering gear menuju roda depan, yaitu rod dan arm. Walaupun kendaraan bergerak dinamis secara vertikal, tetapi putaran yang berasal dari steering wheel harus tetap diteruskan ke masing-masing roda depan dengan presisi disetiap waktu.



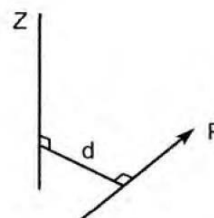
Gambar 2. Konfigurasi Steering

### 2.5 Deformasi

Gaya adalah tindakan suatu objek terhadap objek lainnya. Suatu benda memiliki kecenderungan untuk bergerak sesuai dengan arah gaya. Gaya memiliki titik penerapan, arah, dan magnitudo. Gaya adalah sebuah besaran vektor [1]. Gaya terbagi menjadi dua yaitu gaya terkonsentrasi dan gaya terdistribusi. Karena setiap gaya kontak bekerja pada satuan luas tertentu dan dengan demikian berupa gaya terdistribusi. Apabila ukuran luas kontak akibat gaya jauh lebih kecil dengan ukuran lainnya karena itu gaya dapat disebut sebagai gaya yang terkonsentrasi satu titik. Pada objek yang diberi beban, gaya yang bekerja dapat dibagi menjadi gaya eksternal dan gaya internal. Gaya eksternal adalah gaya yang beraksi pada permukaan objek. Sedangkan gaya internal merupakan gaya yang bekerja di dalam benda.

### 2.6 Momen

Selain sebagai penyebab benda bergerak secara translasi, gaya memiliki kemampuan untuk dapat menyebabkan gerak rotasi yang disebut momen dari gaya yang bekerja terhadap sumbu yang ditentukan. Pada gambar 3 gaya ditunjukkan oleh P dan gaya tersebut menyebabkan kecenderungan benda berputar terhadap sumbu.



Gambar 3. Vektor Momen

Pada gambar 3 bisa dilihat bahwa momen tersebut adalah vektor yang tegak lurus terhadap benda. Pada dasarnya arah momen didefinisikan dengan penggunaan kaidah tangan kanan yang menyatakan bahwa jika ke empat jari tangan kanan diarahkan ke arah sesuai arah, maka arah vektor akan sesuai pada arah yang ditunjuk oleh ibu jari. Aturan tersebut jelas menggambarkan vektor momen pada gambar 3.

## 3. Metode Penelitian

Alat yang digunakan untuk melakukan penelitian ini merupakan perangkat torque gauge Untuk membantu dalam perhitungan gaya pada sistem

kemudi kemudi digunakan alat pengukur torsi “Mxita” dengan model MT2-200Nm yang terpasang pada poros sistem kemudi.

### 3.1 Variabel Bebas

Desain Struktur Kemudi

- Dalam penelitian ini dilakukan perbandingan antara dua desain struktur kemudi antara kemudi existing dengan menggunakan (double steering joint) dan yang kemudi modifikasi menggunakan (single steering joint). Desain struktur kemudi yang digunakan dalam penelitian merupakan desain struktur yang ada pada saat ini dengan konfigurasi dua buah cross joint (double steering joint) dan dua batang tie rod yang langsung menghubungkan ke dua roda depan, model ke dua dengan satu buah cross joint (single steering joint) dan mempunyai dua buah tie rod yang sama dengan model existing. Terhadap sumbu putar pada lengan pitman pada sistem kemudi. Jumlah Beban Pada Roda.
- Jumlah beban di setiap roda dengan menghitung beban pada roda depan pada saat kendaraan diisi dengan pengemudi saja dan dengan pengemudi ditambah dengan 2 orang penumpang.
- Kontak Permukaan Pada Aspal dan Beton Kontak Permukaan pada aspal dan beton saat ban menyentuh permukaan jalan.

### 3.2 Variabel Terikat

- Momen Kopel  
Momen kopel pada sistem kemudi merupakan output yang dihasilkan kemudian dilakukan pengumpulan dan analisis data pada penelitian ini.
- Gaya Maksimum untuk Memutar Kemudi  
Gaya maksimum yang digunakan adalah gaya maksimum untuk memutar kemudi saat keadaan statis.

## 4. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh torsi kemudi seperti pada table dibawah ini.

**Tabel 1. Torsi Maksimal Pada Stang Kemudi Pada Jalan Aspal**

| Torsi Maksimal (Nm) | Lama    | Baru    |
|---------------------|---------|---------|
| Belok Kanan         | 49,5 Nm | 33,9 Nm |
| Belok Kiri          | 29,9 Nm | 25,1 Nm |

Sistem Kemudi lama adalah sistem kemudi yang menggunakan dua buah Steering Joint Sebagai Kemudi sedangkan yang baru merupakan desain modifikasi yang menggunakan single Steering Joint pada bagian Kemudi. Berikut Gambar yang didapat dari alat torque gauge yang dipakai saat melakukan pengujian. Dari data Tabel 1. didapat bahwa penggunaan Single Steering Joint mampu mereduksi torsi maksimal dari sistem kemudi dengan menggunakan dua buah Steering Joint dengan menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 23%.



**Gambar 5. Torsi Maksimal Sistem Kemudi Lama Saat Berbelok Ke Kiri**



**Gambar 6. Torsi Maksimal Sistem Kemudi Lama Saat Berbelok Ke Kanan**



**Gambar 7. Torsi Maksimal Sistem Kemudi Modifikasi Saat Berbelok Ke Kanan**



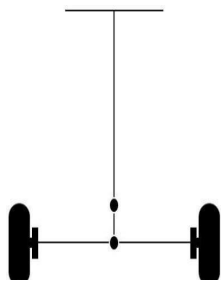
**Gambar 8. Torsi Maksimal Sistem Kemudi Modifikasi Ke Kanan**

**Tabel 2. Gaya Yang Diperlukan Untuk Membelokkan Ban Pada Handle Bar Kemudi**

| Gaya Maksimal (N) | Lama  | Baru |
|-------------------|-------|------|
| Belok Kanan       | 110,2 | 70,4 |
| Belok Kiri        | 70,4  | 58,4 |

Hasil pada Tabel 2. Didapatkan dengan membagi Torsi Pada Tabel 1. Dengan Panjang stang kemudi yang memiliki Panjang sebesar 50cm (0,5m). dimana dari hasil perhitungan didapatkan hasil bahwa dengan penggunaan single steering joint berhasil menghasilkan efisiensi secara rata-rata sebesar 23%.

Dapat dilihat dengan sistem kemudi baru yaitu dengan menggunakan single steering joint pada bagian kemudi kendaraan Bio-Hybrid OBHI-Mec Unud dapat mengurangi Torsi maupun Gaya untuk membelokkan roda. Hal tersebut terjadi akibat adanya perbedaan crossjoint torsi pada crossjoint yang dimana pada single steering joint torsi berada persis langsung menyambung ke adaptor relay kedua Double steering joint sedangkan dengan sistem kemudi baru memiliki 1 buah cross joint dibanding yang sebelumnya karena tumpuan dari 2 Buah Cross joint.



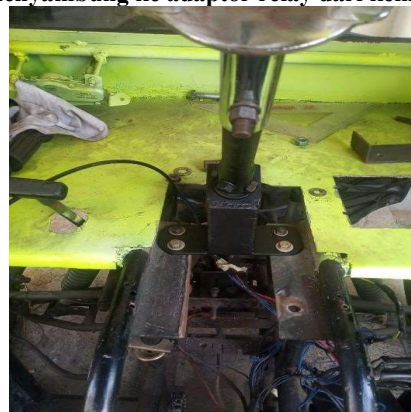
**Gambar 9. Sistem Kemudi Modifikasi (Single Steering Joint)**



**Gambar 10. Desain Sistem Kemudi Modifikasi (Single Steering Joint)**



**Gambar 11. Cross Joint yang langsung menyambung ke adaptor relay dari kemudi**



**Gambar 12. Kemudi Modifikasi (Single Steering joint) dari Handle bar menuju ke crossjoint bawah**

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil Penelitian yang telah dilakukan bahwa dengan Penggunaan sistem kemudi single steering joint mengurangi usaha mengubah arah kemudi yang didapat kemudi yang bisa dilihat pada data hasil torsi pada kemudi maupun gaya yang diperlukan saat membelokkan roda. Terjadi pengurangan secara rata rata sebesar 23% pada jalan beton dan 17% pada jalan aspal yang menghasilkan perasaan lebih ringan dan lebih mudah saat mengemudikan kendaraan Bio-Hybrid Obhi-Mec Unud. Pada penelitian ini masi terdapat perbedaan gaya maupun torsi saat berbelok kanan maupun berbelok ke kiri Maka dari itu untuk selanjutnya penulis menyampaikan saran sebagai berikut:

Pada penelitian selanjutnya melakukan percobaan menggunakan rack and pinion steering gear power steering yang bersamaan juga dengan menggunakan steering wheel mengingat Kendaraan Bio-Hybrid Obhi-Mec Unud memiliki 2 roda di depan.

## Daftar Pustaka

- [1] Amisyam nasution. (2016). *Statika Struktur*. 1–167.



- [2] Artika, K. D., Syahyuniar, R., & Priono, N. (2017). Perancangan Sistem Kemudi Manual Pada Mobil Listrik. *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, 4(1), 01-06.
- [3] Isworo, F. (2018). Mekanika Kekuatan Material I (Hmkk319). *Buku Ajar*, 19–22.
- [4] Ketut Ngurah Tjerita. (2018). Metoda Elemen Hingga. *Makalah*, 2–3.
- [5] Lajqi, Shpetim., Pehan, Stanislav. (2013). *Design of Independent Suspension Mechanism for a Terrain Vehicle with Four Wheels Drive and Four Wheels Steering*. *International Journal of Engineering*, ISSN 1584-2665
- [6] Saputra, D. A., Novanto, H. S., Rindo, N., Wicaksana, D. S., Solikin, M., & Yudianto.A. (2021). Uji pengaruh penggunaan bahan terhadap kekuatan *mounting footstep* menggunakan *finite element method*. 4, 129–133.
- [7] Utomo, G. Y. T. (2017). Perancangan *Wheel Alignment Scissor Lift Kapasitas Angkat 3 Ton* (Doctoral dissertation, University of Muhammadiyah Malang).
- [8] Widiyarta, I. M., Kumara, I. N. S., Parwata, I. M., & Karohika, I. M. G. (2021). *Analisa Kebutuhan Daya Kendaraan Listrik*. *Xxx*, 24–26.

|  |   |
|--|---|
|   | <p><b>Anugrah Putra Adiansyah</b><br/>menyelesaikan program studi teknik mesin pada tahun 2024.</p> |
| <p>Judul Tugas akhir : Re-Design Sistem Kemudi Kendaraan Bio-Hybrid Obhi-Mec Unud Dengan Menggunakan Single Steering Joint</p> |   |



# Pengaruh Dimensi Geometris Cerobong Pemanasan Awal Terhadap Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Dengan *Atomizer* Berbasis *Air-Assist*

Zelfa Graha Aqillah, Ainul Ghurri, I Made Parwata

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

---

## Abstrak

Minyak dan bahan bakar bio memiliki karakteristik viskositas yang tinggi maka desain burner sangat penting untuk menghasilkan hasil yang sempurna. Penggunaan *air-assisted atomizer* memiliki banyak keunggulan yang diharapkan mampu bekerja untuk membantu atomisasi bahan bakar yang akan dilakukan pada penelitian ini. Cerobong pemanas juga ditambahkan dalam penelitian ini untuk memberikan perlakuan panas sehingga dapat mengatasi viskositas bahan bakar yang tinggi sehingga menghasilkan semprotan dengan atomisasi yang lebih ideal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh dimensi cerobong pemanasan awal terhadap atomisasi bahan bakar dengan atomizer berbasis *air-assist*. Pengujian ini dilakukan dengan bahan bakar, biodiesel berbahan dasar minyak jelantah. Pada pengujian, ditemukan bahwa penggunaan *air-assisted atomizer* dengan bantuan cerobong pemanas sangat efisien untuk bahan bakar viskositas tinggi. Pada hasil dari atomisasi sangat baik seiring besarnya dimensi panjang dari cerobong pemanas. Dibuktikan pada penelitian dimana dimensi panjang cerobong pemanas yang memiliki ukuran lebih besar yaitu panjang 14 cm mendapatkan hasil yang lebih baik dibanding dengan cerobong pemanas panjang 12 cm dan 10 cm, dengan hasil atomisasi pada bahan bakar biodiesel sebesar 90,9%

*Kata Kunci:* Atomisasi, Semprotan, *Air-Assist Atomizer*, Nosel, Pemanasan Awal, Cerobong Pemanas

## Abstract

The use of cooking oil produces wastes that we can then reused, that is used as fuels. Oils and biofuels have high viscosity characteristics, and a burner design is very important toward an ideal result. Utilization of an *air-assisted atomizer* with far advantages for spraying fuel, added with heating funnel, could overcome the high viscosity of the fuels to produce finer spray with better atomization result. This research focus on analyzing the effect of heating funnel dimensions on fuel atomization with *air-assist based atomizer*. This study used of fuel biodiesel. The research showed that an *air-assisted atomizer spray* with heating funnel is highly efficient for high viscosity fuels. The atomization result is better as the length dimension of the heating funnel increased. This is because longer funnel dimension result in a greater heat absorbed by the atomized fuel. It was also proven in the study where the long dimension of the heating funnel which has a larger size, a length of 14 cm, has better results than 12 cm and 10 cm long heating funnel, with atomization on biodiesel fuel of 90.9%

*Keywords:* Atomization, Spray, *Air-Assist Atomizer*, Nozzle, preheating, Heating funnel

---

## 1. Pendahuluan

Banyak limbah dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar, seperti minyak goreng bekas, dan biodiesel dari minyak goreng bekas. Minyak dan bahan bakar ini bisa digunakan langsung atau dengan proses pada burner berbasis *fuel spray*. Namun, viskositas tinggi dan kontaminan dalam bahan bakar ini menimbulkan tantangan. Saat ini isu lingkungan terkait penggunaan kembali minyak atau bahan bakar hidro-karbon berat dan bahan bakar substandar (di bawah standar) untuk penyediaan energi melalui pembakaran merupakan isu yang penting dan relevan untuk dipecahkan[1], maka desain *burner* yang baik diperlukan untuk pembakaran efisien, mengingat pentingnya *biofuel* sebagai alternatif bahan bakar masa depan menggantikan fosil.

Untuk memperoleh pembakaran dengan efisiensi tinggi, diperlukan studi mengenai karakteristik *spray*

[2]. Jenis atomizer yang digunakan dengan penambahan penyemprot berbasis *air-assisted atomizer* yaitu alat penyemprot cairan yang menggunakan udara untuk membantu atomisasi bahan bakar cair sehingga meningkatkan performansi pembakaran[3]. Untuk mengoptimalkan atomisasi diperlukan cerobong *preheating* untuk bahan bakar. Penambahan *preheating* dapat mempengaruhi temperatur udara dan bahan bakar terhadap karakteristik semprotan minyak jelantah[4].

Pada penelitian yang akan dilakukan ini, akan mendesain cerobong pemanas semprotan bahan bakar (*fuel spray*) burner berbasis *air-assisted atomizer* untuk bahan bakar berkualitas rendah yang berviskositas tinggi (minyak goreng bekas, dan biodiesel dari minyak goreng bekas). Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh dimensi geometris cerobong pemanasan awal terhadap

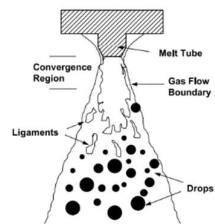
atomisasi bahan bakar dengan *atomizer* berbasis *air-assist*. Batasan penelitian ditetapkan untuk membatasi lingkup dalam penelitian ini yang meliputi:

1. Bahan bakar biodiesel yang digunakan dalam penelitian ini berbahan dasar minyak jelantah yang diproduksi oleh Yayasan Lengis Hijau
2. AFR dihitung berdasarkan pengukuran flowmeter udara dan bahan bakar sebelum masuk ke nosel

## 2. Dasar Teori

### 2.1. Atomisasi

Atomisasi adalah proses pemecahan cairan menjadi semburan halus; pengatoman. Atomisasi penyemprotan bahan bakar adalah proses di mana cairan bahan bakar diubah menjadi partikel-partikel kecil yang sangat halus, mirip dengan kabut atau kabut halus. Dalam aplikasi pembakaran, atomisasi bahan bakar adalah langkah kritis karena partikel-partikel bahan bakar yang sangat kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar dan lebih mudah untuk tercampur dengan udara atau oksigen[5]. Ini meningkatkan efisiensi pembakaran dan menghasilkan reaksi kimia yang lebih efektif, yang pada gilirannya menghasilkan energi yang lebih tinggi atau efisiensi yang lebih baik. Seperti pada Gambar 1 contoh proses terbentuknya atomisasi.



Gambar 1. Proses Atomisasi [6]

### 2.3. Faktor Yang Mempengaruhi Atomisasi

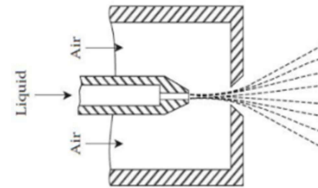
Kinerja setiap jenis nosel tergantung pada ukuran, bentuk, dan propertinya. Parameter penting lainnya adalah efek pada atomisasi dijaga konstan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas atomisasi meliputi:

- Properti cairan: Meliputi densitas, tegangan permukaan, dan viskositas.
- Kondisi udara ambien
- Dimensi dan geometri *atomizer*
- Parameter operasional (tekanan dan laju alir massa cairan dan gas)

### 2.2. Alat Penyemprot (*Atomizer*)

Alat penyemprot umumnya digunakan untuk menghasilkan semprotan. Pada dasarnya, yang dibutuhkan hanyalah kecepatan relatif yang tinggi antara cairan yang akan diatomisasi dan udara atau gas di sekitarnya. Dari beberapa alat penyemprot dalam penelitian ini menggunakan *Air-Assist Atomizers* dalam jenis nosel ini, cairan terkena aliran udara atau

uap yang mengalir dengan kecepatan tinggi. Dalam konfigurasi pencampuran *internal*, gas dan cairan dicampur di dalam nosel sebelum dikeluarkan melalui lubang keluar, seperti pada Gambar 2 contoh bentuk *nozzle air-assist atomizer*.

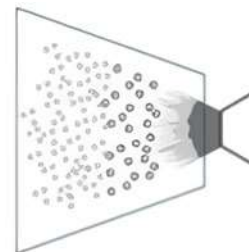


Gambar 2. *Nozzle Air-Assist Atomizer* [7]

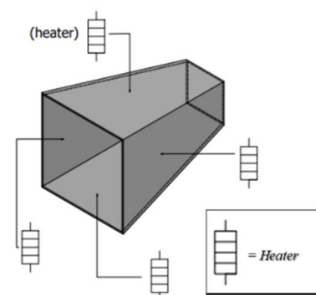
### 2.5. Cerobong Pemanas *Fuel Spray*

Metode kerja cerobong pemanas bahan bakar yang diusulkan dalam penelitian ini dipasang untuk menutupi semburan bahan bakar sehingga membantu proses pemanasan dan penguapan bahan bakar yang diinjeksikan pada nosel agar berlangsung tetesan yang lebih halus. Cerobong terbuat dari plat aluminium. Berfungsi sebagai jalur injeksi bahan bakar lalu dipanaskan sehingga ketika bahan bakar yang dikabutkan melewatinya menerima energi panas dari cerobong tersebut. Dengan pemanasan ini, diharapkan tetes bahan bakar akan menguap ke luar. Karena itu beberapa tetes akan menguap dan sisanya akan mengecil dalam ukuran tetesan; jadi atomisasi menghasilkan droplet yang lebih halus. Pemanasan ke suhu yang lebih tinggi akan menghasilkan atomisasi lebih halus, semakin tipis tetesannya produk, proses pembakaran mudah, stabil dan efisiensi tinggi.

Cerobong pemanas *fuel spray* yang diusulkan pada penelitian ini memiliki cara kerja yang dapat dilihat pada Gambar 3 dengan desain pada Gambar 4.



Gambar 3. Cerobong Pemanas *Fuel Spray*



Gambar 4. Desain Cerobong Pemanas *Fuel Spray*

### 3. Metode Penelitian

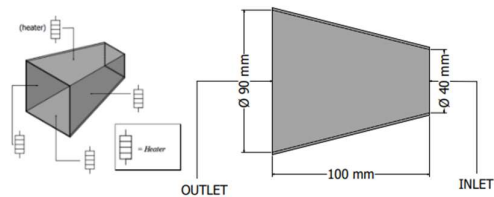
#### 3.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimen, yaitu melakukan pengujian secara langsung untuk mendapatkan hasil berupa hubungan sebab akibat antara variabel yang satu dengan variabel lainnya, kemudian mem-bandingkan hasil satu dengan hasil yang lainnya sebagai pembanding.

#### 3.2 Variabel Bebas

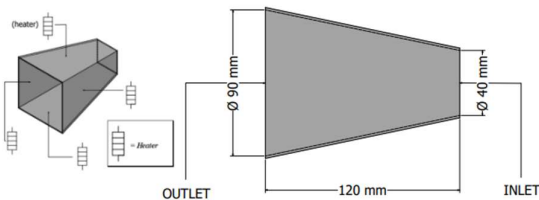
##### 1. Cerobong Pemanas

- i. Cerobong pemanas ukuran panjang 10 cm



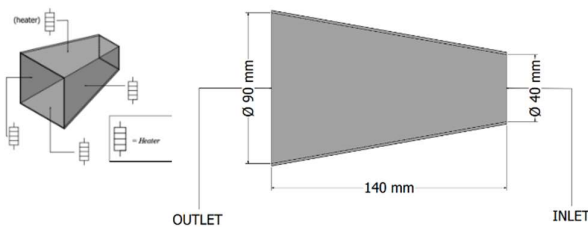
Gambar 5. Cerobong dengan ukuran inlet 40mm outlet 90mm panjang 100mm dengan luas permukaan 536 cm<sup>2</sup>

- ii. Cerobong pemanas ukuran panjang 12 cm



Gambar 6. Cerobong dengan ukuran inlet 40mm outlet 90mm panjang 120mm dengan luas permukaan 637,36 cm<sup>2</sup>

- iii. Cerobong pemanas ukuran panjang 14 cm



Gambar 7. Cerobong dengan ukuran inlet 40mm outlet 90mm panjang 140mm dengan luas permukaan 739,52 cm<sup>2</sup>

2. Bahan bakar biodiesel

#### 3.3. Variabel Terikat

Atomisasi bahan bakar

#### 3.4. Variabel Kontrol

1. Tipe nosel : Nosel tipe *air-assist (internal mix)*
2. Bentuk lubang nosel : Bulat
3. Diameter lubang nosel : 4mm
4. Bentuk cerobong pemanas : *Diffuser* bentuk limas persegi,
5. Temperatur plat besi cerobong pemanas : 120 ± 1 °C

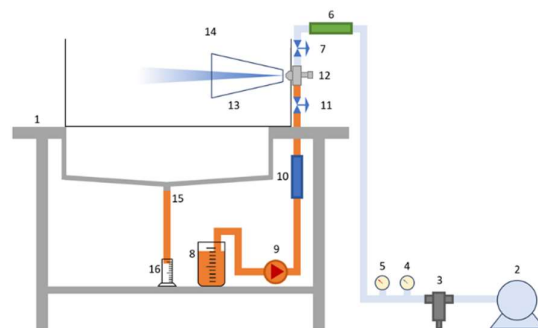
6. *Air-Fuel Ratio (AFR)* : 15:1

7. Dimensi cerobong pemanas :

- i. Diameter 4 cm pada bagian masuk (*Inlet*) dan Diameter 9 cm pada bagian keluar (*Outlet*) dengan Panjang 10 cm dengan dengan luas permukaan 536 cm<sup>2</sup>, dan tebal plat 0.25 mm berbahan plat aluminium.
- ii. Diameter 4 cm pada bagian masuk (*Inlet*) dan Diameter 9 cm pada bagian keluar (*Outlet*) dengan Panjang 12 cm dengan luas permukaan 637,36 cm<sup>2</sup>, dan tebal plat 0.25 mm berbahan plat aluminium.
- iii. Diameter 4 cm pada bagian masuk (*Inlet*) dan Diameter 9 cm pada bagian keluar (*Outlet*) dengan Panjang 14 cm dengan luas permukaan 739,52 cm<sup>2</sup>, dan tebal plat 0.25 mm berbahan plat aluminium.

#### 3.5. Skematik Pengujian Atomisasi Bahan Bakar

Skematik pengujian karakteristik spray ditunjukkan pada Gambar 5. Pengujian dimulai dengan menghidupkan kompresor kemudian membuka katup pengatur udara untuk menyuplai udara ke nosel yang dilengkapi dengan flowmeter gas, pressure gauge, dan temperature gauge. Bahan Bakar dialirkan dari gelas ukur dengan bantuan pompa, sebelum memasuki nosel, bahan bakar melewati flowmeter liquid dan katup pengatur. Di dalam nosel terjadi interaksi antara udara berkecepatan tinggi dengan bahan bakar berkecepatan rendah sehingga terbentuknya spray. Pada pengujian tanpa cerobong pemanas, bahan bakar akan disemprotkan tanpa melewati apapun, sedangkan pada pengujian dengan cerobong pemanas semprotan bahan bakar akan melewati cerobong pemanas terlebih dahulu. Pada penelitian ini, meja penelitian dilengkapi dengan dome tanpa atap. Dome digunakan agar spray tidak dipengaruhi oleh udara lingkungan sekitar. Bahan bakar yang teratomisasi dengan sempurna akan menguap dan terbawa udara sekitar melalui bagian atas dome yang terbuka, sedangkan yang tidak akan jatuh ke westafel atau bak kemudian di tampung pada silinder ukur melalui selang penghubung. Bahan bakar yang tertampung pada silinder ukur akan dicatat volumenya sebagai data. Alat uji akan dibiarkan beroperasi hingga bahan bakar pada silinder ukur berkurang sebanyak 50ml.



Keterangan:

1. Meja Penelitian
2. Kompresor
3. Filter Air Kompresor
4. Pressure Gauge
5. Temperature Gauge
6. Flowmeter Gas
7. Katup Pengatur Udara
8. Gelas Ukur
9. Pompa
10. Flowmeter Liquid
11. Katup Pengatur Bahan Bakar
12. Nosel
13. Cerobong Pemanas
14. Dome
15. Selang Penghubung
16. Silinder Ukur

Gambar 8. Skematik Pengujian Atomisasi Bahan Bakar

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Bahan Bakar

Pada pengujian ini atomisasi bahan bakar diperoleh dengan melihat tingkat penguapan dari bahan bakar yang terjadi. Tingkat penguapan diperoleh dengan mencari selisih antara volume bahan bakar sebelum diatomisasi dengan volume bahan bakar sesudah diatomisasi. Pengujian ini dilakukan dengan cerobong pemanas beberapa ukuran yaitu panjang 10cm, 12cm dan 14cm menggunakan biodiesel sebagai bahan bakar. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali untuk mencari rata-rata dan standar deviasi bahan bakar yang teratomisasi.

#### 4.1.1. Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Bahan Bakar Dengan Cerobong Pemanas 10 cm.

Tabel 1 Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Biodiesel Dengan Cerobong Pemanas 10 cm

| No                           | Volume Bahan Bakar Sebelum diatomisasi (ml) | Volume Bahan Bakar Sesudah diatomisasi (ml) | Volume Bahan Bakar Yang Teratomisasi dengan Sempurna (ml) | Tingkat Atomisasi Bahan Bakar (%) |
|------------------------------|---|---|---|-----------------------------------|
| 1                            | 50  | 5,2   | 44,8  | 89,6                              |
| 2                            | 50  | 5,4   | 44,6  | 89,2                              |
| 3                            | 50  | 5,6   | 44,4  | 88,8                              |
| Mean ( $\bar{x}$ )           |   |   |   | 89,2                              |
| Standar Deviasi ( $\sigma$ ) |   |   |   | 0,400                             |

#### 4.1.2. Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Bahan Bakar Dengan Cerobong Pemanas 12 cm.

Tabel 2 Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Biodiesel Dengan Cerobong Pemanas 12 cm

| No                           | Volume Bahan Bakar Sebelum diatomisasi (ml) | Volume Bahan Bakar Sesudah diatomisasi (ml) | Volume Bahan Bakar Yang Teratomisasi dengan Sempurna (ml) | Tingkat Atomisasi Bahan Bakar (%) |
|------------------------------|---|---|---|-----------------------------------|
| 1                            | 50  | 4,8   | 45,2  | 90,4                              |
| 2                            | 50  | 5   | 45  | 90                                |
| 3                            | 50  | 4,6   | 45,4  | 90,8                              |
| Mean ( $\bar{x}$ )           |   |   |   | 90,04                             |
| Standar Deviasi ( $\sigma$ ) |   |   |   | 0,400                             |

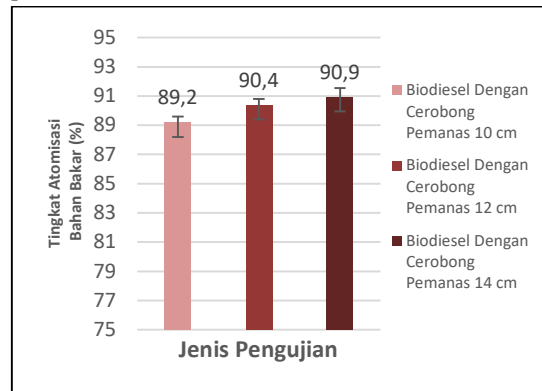
#### 4.1.3. Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Bahan Bakar Dengan Cerobong Pemanas 14 cm.

Tabel 3 Data Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Biodiesel Dengan Cerobong Pemanas 14 cm

| No                           | Volume Bahan Bakar Sebelum diatomisasi (ml) | Volume Bahan Bakar Sesudah diatomisasi (ml) | Volume Bahan Bakar Yang Teratomisasi dengan Sempurna (ml) | Tingkat Atomisasi Bahan Bakar (%) |
|------------------------------|---|---|---|-----------------------------------|
| 1                            | 50  | 4,2   | 45,8  | 91,6                              |
| 2                            | 50  | 4,8   | 45,2  | 90,4                              |
| 3                            | 50  | 4,6   | 45,4  | 90,8                              |
| Mean ( $\bar{x}$ )           |   |   |   | 90,9                              |
| Standar Deviasi ( $\sigma$ ) |   |   |   | 0,611                             |

## 4.2. Hasil Pengujian Atomisasi Bahan Bakar

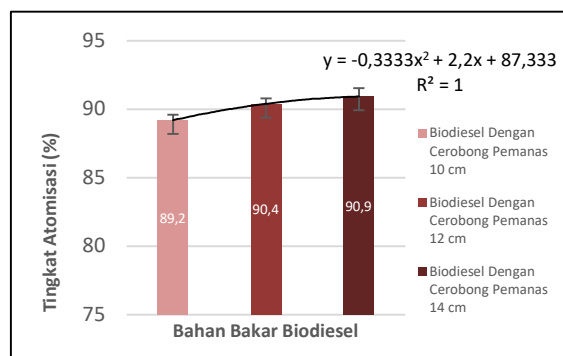
Hasil pengujian atomisasi bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Data Keseluruhan Hasil Pengujian Analisa Atomisasi Bahan Bakar

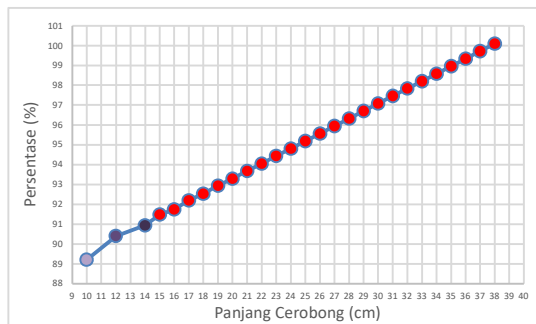
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa panjang cerobong pemanasan memiliki pengaruh terhadap setiap atomisasi bahan bakar. Dimana pada setiap panjang memiliki peningkatan atomisasi disetiap pengujian. Dalam grafik pada gambar 13 dapat dilihat kenaikan terhadap bahan bakar biodiesel yang disebabkan karena semakin panjang cerobong pemanas semakin besar ruang pemanasan sehingga bahan bakar mendapatkan pemanasan yang lebih maksimal pada cerobong yang memiliki panjang dimensi yang besar. Kenaikan grafik menunjukkan keberhasilan dalam pengatomisasian.

Pada pengujian bahan bakar biodiesel menggunakan cerobong pemanas panjang 10cm memiliki tingkat atomisasi sebesar 89,2% dengan menggunakan cerobong pemanas panjang 12cm diperoleh 90,4% dengan menggunakan cerobong pemanas panjang 14cm diperoleh 90,9%. Dapat disimpulkan setiap kenaikan panjang cerobong sebesar 2cm kenaikan persentase atomisasi diperoleh 0,8% dari rata-rata setiap kenaikan. Dengan penggunaan cerobong pemanas yang memiliki dimensi panjang lebih besar didapatkan hasil yang sempurna pada pengujian atomisasi ini.



Gambar 10 Trendline Hasil Pengujian Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel

Dari Gambar 10 juga kita bisa membuat prediksi dari hasil atomisasi sebagai titik ( $ys$ ) dan panjang cerobong sebagai titik ( $xs$ ) yang dimana sebagai formula pada program Microsoft excel sehingga dengan rumus ( $=TREND(known\_ys; [known\_xs]; [new\_xs]; [const])$ ) bisa mendapatkan prediksi dalam setiap bertambahnya panjang cerobong pemanas, dengan memilih tabel hasil atomisasi menjadi  $[known\_ys]$  dan panjang cerobong menjadi  $[known\_xs]$  dan kita mencari panjang cerobong yang akan mendapatkan hasil atomisasi sebesar 100% dengan menambah tabel panjang cerobong yang akan dicari menjadi  $[new\_xs]$  dan untuk  $[const]$  pilih label *TRUE* pada program excel dan akan keluar nilai prediksinya secara otomatis dalam program Microsoft excel. Berikut grafik prediksinya.



Gambar 11 Prediksi Atomisasi Biodiesel Sempurna

Pada Gambar 11 dapat dilihat prediksi panjang yang mendapatkan hasil atomisasi maksimal yaitu diangka 100% dengan panjang cerobong sekitar 38cm dengan selisih 1cm pada setiap kepanjangan berdasarkan dari hasil penelitian sebelumnya dengan nilai error kurang dari 1.

Dari hasil prediksi bahan bakar pada biodiesel untuk hasil atomisasi 100% dengan panjang 38cm hanya mengacu pada panjang dimensi cerobong saja, namun berbagai cara bisa mendapatkan hasil maksimal atomisasi seperti perbesar suhu plat cerobong pemanas dengan besaran lebih dari 120°C dengan menambah elemen pemanasnya atau mengubah elemen pemanas pada penelitian ini yang memiliki hasil yang lebih dari 120°C atau dengan daya lebih besar. Dapat juga dengan mengubah bentuk dari cerobong yang berawal diffuser limas persegi menjadi cone atau kerucut dengan ukuran dimensi yang dibuat lebih compact atau lebih baik.

## 5. Kesimpulan

Hasil penelitian atomisasi bahan bakar menggunakan minyak jelantah dan biodiesel, dapat disimpulkan hasil atomisasi semakin baik seiring dengan bertambah panjangnya dimensi cerobong pemanas, dengan hasil atomisasi yang lebih baik pada cerobong pemanas dengan panjang 14 cm. Didapatkan titik maksimal dalam prediksi atomisasi diperoleh 100% jika panjang cerobong untuk bahan bakar biodiesel sepanjang 38cm.

## Daftar Pustaka

- [1]. Zhao, X., Gu, B., Gao, F., & Chen, S. (2020). *Matching Model Of Energy Supply And Demand Of The Integrated Energy System In Coastal Areas*. Journal of Coastal Research, 983-989.
- [2]. Gad, H., Ibrahim, I., Abdel-baky, M., El-samed, A. A., & Farag, T. 2018. *Experimental Study Of Diesel Fuel Atomization Performance Of Air Blast*. Experimental Thermal and Fluid Science, 99, 211-218.
- [3]. Zarembo, M., Weiß, L., Malý, M., Wensing, M., & Jedelský, J. 2017. *Low-Pressure Twin-Fluid Atomization: Effect Of Mixing Process On Spray Formation*. International Journal of Multiphase Flow, 89, 277-289.
- [4]. Urbán, A., Malý, M., Józsa, V., & Jedelský, J. 2019. *Effect of liquid preheating on high-velocity airblast atomization: From water to crude rapeseed oil*. Experimental Thermal and Fluid Science, 102, 137-151. doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2018.11.006 [diakses tanggal 7 Juni 2023]
- [5]. Williams, A. 1990. *Combustion Of Liquid Fuel Sprays*. Butterworths
- [6]. G.S.E. Antipas. 2006 *Modelling of the break up mechanism in gas atomization of liquid metals. Part I: The surface wave formation model*. doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.03.009 [diakses tanggal 6 Oktober 2023]
- [7]. Dr. Olusegun Adefonabi Adefuye, Benneth Ifenna Okoli. 2017. *Design and Performance Evaluation of an Air-Blast-Atomizer*
- [8]. Ghurri, A., Anak Agung Adhi, S., & Bangun Tua, S. 2015. *Pengaruh Jumlah Lilitan Pipa Sebagai Pemanasan Awal Pada Kompur Pembakar Jenazah*. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin, 14.

|  |  |
|--|--|
|    | <p><b>Zelfa Graha Aqillah</b><br/>menyelesaikan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p> |
| <p>Judul tugas akhir Pengaruh Dimensi Geometris Cerobong Pemanasan Awal Terhadap Atomisasi Bahan Bakar Biodiesel Dengan Atomizer Berbasis Air-Assist</p> |  |



