

**Bidang Fokus : Teknik Energi**

**LAPORAN AKHIR  
PENELITIAN KERJASAMA DOSEN-MAHASISWA**



**ANALISIS PENGARUH BENTUK LUBANG UDARA SEKUNDER PADA  
KOMPOR GASIFIKASI BIOMASSA SEKAM PADI PEMBAKARAN  
LANGSUNG**

**TIM PENGUSUL :**

<b>Zurohaina, S.T., M.T.</b>	<b>NIDN 0018076707</b>
<b>Ahmad Zikri, S.T., M.T.</b>	<b>NIDN 0007088601</b>
<b>Safri Kartika Wardana, S.T, M.T.</b>	<b>NIDN 0427047405</b>
<b>Fathur Rahman</b>	<b>NPM 062140412428</b>
<b>Naddya Anastasya Zahra</b>	<b>NPM 062140410337</b>
<b>Maulidya Zahra Tunisa</b>	<b>NPM 062140410349</b>

**PROGRAM STUDI DIV TEKNIK ENERGI  
JURUSAN TEKNIK KIMIA  
POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA  
PALEMBANG  
2025**

**HALAMAN PENGESAHAN**  
**LAPORAN AKHIR PENELITIAN KERJASAMA DOSEN-MAHASISWA**

---

<b>Judul Penelitian</b>	: Analisis Pengaruh Bentuk Lubang Udara Sekunder Pada Kompor Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Pembakaran Langsung
<b>Skema</b>	: Penelitian Dasar – Kerjasama Dosen dan Mahasiswa
<b>Pohon / Cabang Ilmu</b>	: Konversi Energi Biomassa
<b>Ketua Peneliti:</b>	
a. Nama Lengkap	: Zurohaina, S.T., M.T.
b. NUPTK	: 4050745646230103
c. Jabatan Fungsional	: Lektor Kepala
d. Program Studi	: DIV Teknik Energi
e. Nomor HP	: 082182302777
f. Alamat surel (e-mail)	: zurohaina@polsri.ac.id
<b>Anggota Dosen Peneliti</b>	
1) Nama Dosen1/ NIDN	: Ahmad Zikri, S.T., M.T.
2) Nama Dosen2/ NIDN	: Safril Kartika Wardana, ST, MT.
3) Nama Dosen3/ NIDN	: -
<b>Anggota Mahasiswa Peneliti</b>	
1) Nama Mahasiswa1 / NIM	: Fathur Rahman / 062140412428
2) Nama Mahasiswa2 / NIM	: Naddy Anastasya Zahra / 062140410337
3) Nama Mahasiswa3 / NIM	: Maulidya Zahra Tunisa / 062140410349
<b>Luaran yang Dihasilkan</b>	: Artikel Ilmiah
<b>Jangka Waktu Penelitian</b>	: 5 Bulan
<b>Biaya Penelitian</b>	: Rp. 4. 393.000

Palembang, Agustus 2025

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Kimia

Ketua Peneliti

Tahdid, S.T., M.T.  
NIP. 19720113199702001

Zurohaina, S.T., M.T.  
NUPTK. 4050745646230103

Mengetahui,  
Direktur Politeknik Negeri Sriwijaya

Menyetujui,  
Kepala PPM

Irawan Rusnadi, M.T.  
NIP. 196702021994031004

Dr. Martha Aznury, M.Si.  
NIP. 197006192001122003

## RINGKASAN

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia, namun pemanfaatannya sebagai sumber energi masih terbatas. Salah satu teknologi yang potensial untuk mengonversi sekam padi menjadi energi adalah kompor gasifikasi biomassa. Teknologi ini mampu menghasilkan panas yang lebih bersih dan efisien dibandingkan dengan pembakaran langsung. Namun, penggunaan sekam padi dalam kompor gasifikasi biomassa masih cukup sering mengalami kendala dalam hal efisiensi pembakaran dan emisi gas buang yang belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh bentuk lubang udara sekunder serta modifikasi sistem distribusi aliran udara pada kompor gasifikasi biomassa terhadap performa pembakaran sekam padi. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan tahapan utama meliputi perancangan, fabrikasi, dan pengujian kompor gasifikasi yang dimodifikasi pada bagian lubang udara sekunder dan sistem distribusi aliran udara. Desain lubang udara sekunder yang bervariasi dan sistem distribusi yang dioptimalkan akan diuji melalui metode *Water Boiling Test* (WBT) untuk mengevaluasi efisiensi termal dan tingkat konsumsi bahan bakar. Luaran yang ditargetkan dari penelitian ini adalah artikel ilmiah yang terpublikasi.

Kata Kunci : Sekam Padi; Kompor Gasifikasi Biomassa; Lubang Udara Sekunder; Energi Terbarukan; Efisiensi Termal

## **PRAKATA**

Palembang, Agustus 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>RINGKASAN</b> .....	iii
<b>PRAKATA</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	viii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Manfaat Penelitian .....	2
1.5 Relevansi .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Penelitian Terdahulu .....	4
2.2 Biomassa Sekam Padi .....	5
2.3 Kompor Gasifikasi Biomassa .....	7
2.5 Proses Pembakaran .....	10
2.6 <i>Water Boiling Test</i> .....	12
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	15
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	15
3.2 Alat dan Bahan yang Digunakan .....	15
3.2.1 Alat yang digunakan .....	15
3.3 Perlakuan dan Rancangan Percobaan .....	20
3.3.1 Perlakuan .....	20
3.3.2 Rancangan Penelitian .....	20
3.3.3 Diagram Alir Penelitian .....	21
3.1 Rancangan Pengamatan .....	21
3.5 Prosedur Penelitian .....	22
3.5.1 Persiapan Bahan Baku .....	22
3.5.2 Analisa <i>Proximate</i> Bahan Bakar .....	22
3.5.3 Prosedur Percobaan Kinerja Kompor Biomassa (WBT) .....	23
3.5.4 Pengukuran Emisi Gas CO .....	24
3.5.5 Pengukuran Emisi Gas CO <sub>2</sub> .....	24
3.5.6 Perhitungan Konsumsi Spesifik Bahan Bakar .....	25
3.5.7 Perhitungan efisiensi pembakaran .....	25
3.5.8 Perhitungan efisiensi termal .....	25
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	27
4.1 Hasil Penelitian .....	27
4.2 Pembahasan .....	28
4.2.1 Analisa Kandungan Bahan Bakar Biomassa yang Digunakan .....	29

4.2.2	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Thermal .....	30
4.2.3	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap <i>Specific Fuel Consumption</i> .....	32
4.2.4	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO .....	34
4.2.5	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO <sub>2</sub> .....	35
4.2.6	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Pembakaran .....	37
4.2.7	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Waktu Mendidih .....	39
4.2.8	Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Temperature Nyala Api Rata Rata .....	41
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>43</b>
5.1	Kesimpulan .....	43
5.2	Saran .....	43
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>45</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>		<b>Halaman</b>
2.1	Sekam Padi .....	5
2.2	Struktur Kompor Biomassa .....	7
2.3	<i>Up-Draft Gasifier</i> .....	9
3.1	Alat Kompor Biomassa .....	16
3.2	Alat Kompor Biomassa .....	16
3.3	Diagram Alir Proses Penelitian.....	21
4.1	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Thermal .....	30
4.2	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Specific Fuel Consumption.....	32
4.3	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO .....	34
4.4	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO <sub>2</sub> .....	35
4.5	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Pembakaran.....	37
4.6	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Waktu Mendidih.....	39
4.7	Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Temperature Nyala Api Rata Rata .....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1	Penelitian Terdahulu..... 4
3.1	Variabel Percobaan..... 21
4.1	Hasil Analisa <i>Ultimate</i> Bahan Bakar Biomassa ..... 27
4.2	Hasil Analisa <i>Proximate</i> Bahan Bakar Biomassa ..... 21
4.3	Hasil Pengamatan Temperatur Rata-Rata Nyala Api, Boiling Time, dan Lama Nyala Api..... 28
4.4	Hasil Analisa Gas CO, CO <sub>2</sub> dan Perhitungan Efisiensi Pembakaran ... 28
4.5	Hasil Perhitungan Efisiensi Termal dan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik..... 28
L.2.10	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Efisiensi Termal ..... 30
L.2.13	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Konsumsi Bahan Bakar ..... 32
L.2.16	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Emisi CO ..... 34
L.2.19	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Emisi CO <sub>2</sub> ..... 36
L.2.23	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Efisiensi Pembakaran ..... 37
L.2.27	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap <i>Boiling Time</i> ..... 39
L.2.30	ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Rata-Rata Temperatur Nyala Api..... 41
L1.3	Data Pengamatan Uji <i>Water Boiling Test</i> pada Kompor Biomassa dengan 1 Kg Bahan Bakar Sekam Padi..... 49
L1.3	Data Pengamatan Proses Pembakaran pada Kompor Biomassa dengan 1 Kg Bahan Bakar Campuran Biopellet Sekam Padi dan Serbuk Kayu Jati..... 49

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran</b>	<b>Halaman</b>
<b>I</b> Data Penelitian.....	48
<b>II</b> Perhitungan .....	50
<b>III</b> Dokumentasi Penelitian .....	
<b>IV</b> Anggaran Penelitian .....	

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan salah satu negara agraris terbesar di dunia dengan produksi padi yang melimpah setiap tahunnya. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), produksi padi Indonesia pada tahun 2019 mencapai sekitar 54,6 juta ton gabah kering giling, di mana sekitar 20-22% di antaranya merupakan sekam padi yang seringkali tidak dimanfaatkan secara optimal (Alwan H et al., 2020). Sekam padi yang melimpah ini kerap dibakar secara terbuka, menyebabkan pencemaran udara dan pemborosan energi potensial. Padahal, sekam padi memiliki nilai kalor yang cukup tinggi, yaitu berkisar antara 11 hingga 16,5 MJ/kg, menjadikannya sumber energi alternatif yang murah dan ramah lingkungan (Fetene et al., 2024). Teknologi yang mampu memanfaatkan biomassa seperti sekam padi secara efektif adalah kompor gasifikasi biomassa. Teknologi ini bekerja dengan prinsip mengonversi biomassa menjadi gas mudah terbakar melalui proses termokimia dengan suplai udara terbatas (Osei et al., 2020). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kompor gasifikasi biomassa mampu meningkatkan efisiensi termal sekaligus menurunkan emisi gas rumah kaca dibandingkan dengan kompor konvensional (Wulandari et al., 2021 ; Hafid et al., 2020). Namun, penggunaan sekam padi sebagai bahan bakar dalam kompor gasifikasi biomassa masih memiliki tantangan terkait efisiensi pembakaran yang rendah dan tingginya emisi karbon monoksida (CO) dan partikulat (Mersha et al., 2024). Salah satu upaya untuk mengoptimalkan efisiensi pembakaran pada kompor gasifikasi biomassa adalah melalui modifikasi lubang udara sekunder dan sistem distribusi aliran udara. Lubang udara sekunder berfungsi untuk menyuplai oksigen tambahan yang mendukung proses pembakaran lebih sempurna, sedangkan sistem distribusi udara menggunakan prinsip Bernoulli yang menyatakan bahwa peningkatan kecepatan aliran udara akan menurunkan tekanan statis, sehingga aliran udara dapat mengalir lebih optimal ke zona pembakaran (Bhusal et al., 2015). Prinsip ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi termal sekaligus mengurangi emisi gas berbahaya.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini meliputi hal-hal sebagai berikut.:

1. Bagaimana pengaruh modifikasi bentuk lubang udara sekunder terhadap efisiensi termal kompor gasifikasi biomassa berbahan bakar sekam padi dengan pembakaran langsung?
2. Bagaimana karakteristik pembakaran langsung sekam padi pada kompor gasifikasi biomassa dengan desain lubang udara sekunder yang berbeda?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan penelitian ini meliputi hal-hal sebagai berikut.:

1. Menganalisis pengaruh modifikasi bentuk lubang udara sekunder terhadap efisiensi termal dan *specific fuel consumption* pada kompor gasifikasi biomassa berbahan bakar sekam padi dengan pembakaran langsung.
2. Menganalisis karakteristik pembakaran langsung sekam padi pada kompor gasifikasi biomassa dengan desain lubang udara sekunder yang berbeda.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Dapat mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi mengenai peran bentuk lubang udara sekunder pada kompor gasifikasi biomassa untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi gas berbahaya dari pembakaran langsung sekam padi.
2. Dapat memberikan wawasan serta kontribusi bagi masyarakat dalam memanfaatkan limbah sekam padi secara lebih efektif sebagai bahan bakar alternatif yang murah, hemat, dan ramah lingkungan untuk kebutuhan memasak sehari-hari.
3. Dapat digunakan sebagai sumber referensi dan acuan bagi mahasiswa, serta bahan pembelajaran bagi pihak yang tertarik untuk mengembangkan desain kompor biomassa yang lebih optimal.

### **1.5 Relevansi**

Adapun keterkaitan penelitian yang akan dilakukan mengenai Analisis Pengaruh Bentuk Lubang Udara Sekunder pada Kompor Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Pembakaran Langsung terhadap bidang keilmuan Teknik Mesin, khususnya Konversi Energi, yaitu berhubungan dengan mata kuliah Termodinamika, Perpindahan Panas, dan Teknik Pembakaran.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pemanfaatan biomassa, khususnya sekam padi, sebagai sumber energi melalui teknologi gasifikasi telah banyak dilakukan. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan studi ini dapat dijadikan sebagai acuan dan pembanding untuk mengembangkan desain dan analisis performa kompor gasifikasi biomassa.

**Tabel 2.** Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Keterangan Penelitian
1.	Fetene et al. (2024)	<i>Performance Evaluation of Biomass Gasification Stoves Using Rice Husk as Fuel</i>	Studi ini mengevaluasi performa kompor gasifikasi berbahan bakar sekam padi. Hasil menunjukkan bahwa modifikasi aliran udara dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 50%.
2.	Mersha et al. (2024)	<i>Optimization of Secondary Air Holes in Biomass Gasification Stoves</i>	Studi ini membandingkan berbagai bentuk lubang udara sekunder. Bentuk vortex menunjukkan hasil terbaik dalam meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi emisi CO.
3.	Wulandari et al. (2021)	<i>Emisi dan Efisiensi Termal Kompor Gasifikasi Sekam Padi</i>	Studi ini menganalisis emisi CO dan CO <sub>2</sub> serta efisiensi termal kompor gasifikasi. Modifikasi lubang udara sekunder terbukti dapat menurunkan emisi dan meningkatkan efisiensi.
4.	Alwan H et al. (2020)	<i>Potensi Limbah Sekam Padi sebagai Sumber Energi</i>	Penelitian ini mengidentifikasi potensi energi dari sekam padi serta tantangan dalam pemanfaatannya. Ditemukan bahwa sekam padi memiliki nilai kalor sekitar 11–16,5 MJ/kg.

<i>Terbarukan di Indonesia</i>		
	<i>Design and Development of a Top-Lit Up-Draft (TLUD) Gasifier Cookstove</i>	Penelitian berfokus pada desain dan pengembangan kompor TLUD. Hasil menunjukkan bahwa desain TLUD efektif dalam menghasilkan pembakaran yang stabil dan efisien.
5.	Osei et al. (2020)	

## 2.2 Biomassa Sekam Padi

Sekam padi (*rice husk*) merupakan salah satu limbah pertanian paling melimpah di Indonesia dengan estimasi produksi mencapai 11-12 juta ton per tahun (Sutrisno et al., 2023). Kelimpahan ini menjadikannya sebagai sumber energi terbarukan yang potensial, terutama mengingat selama ini pemanfaatannya masih terbatas pada aplikasi rendah nilai seperti pakan ternak atau dibakar secara langsung sehingga menimbulkan pencemaran lingkungan. Potensi energi yang terkandung dalam sekam padi setara dengan  $\pm 150-180$  juta GJ per tahun, yang apabila dikonversi dapat memenuhi kebutuhan energi primer bagi  $\pm 3-4$  juta rumah tangga pedesaan (Sutrisno et al., 2023). Karakteristik kelimpahan dan distribusinya yang tersebar di sentra-sentra produksi padi menjadikan sekam padi sebagai kandidat ideal untuk pengembangan sistem energi terdesentralisasi yang berkelanjutan.



**Gambar 2. 1** Sekam Padi

Secara kimiawi, sekam padi memiliki komposisi yang unik dengan kandungan selulosa 35-45%, hemiselulosa 15-25%, lignin 20-30%, dan silika 15-20% (Zhang et al., 2023). Komposisi ini memberikan karakteristik pembakaran yang spesifik dimana kandungan *volatile matter* yang tinggi ( $\approx 60-65\%$ ) memfasilitasi proses gasifikasi yang efisien, sementara kandungan silika yang signifikan mempengaruhi karakteristik abu dan slagging selama proses termokonversi (Zhang et al., 2023). Penelitian terbaru oleh Li et al. (2024) mengungkapkan bahwa struktur silika amorf dalam sekam padi actually dapat berperan sebagai katalis alami dalam reaksi *reforming tar* selama proses gasifikasi, sehingga meningkatkan kualitas *syngas* yang dihasilkan. Karakteristik inilah yang membedakan sekam padi dari biomassa lignoselulosa lainnya dan memerlukan pendekatan teknologi konversi yang spesifik.

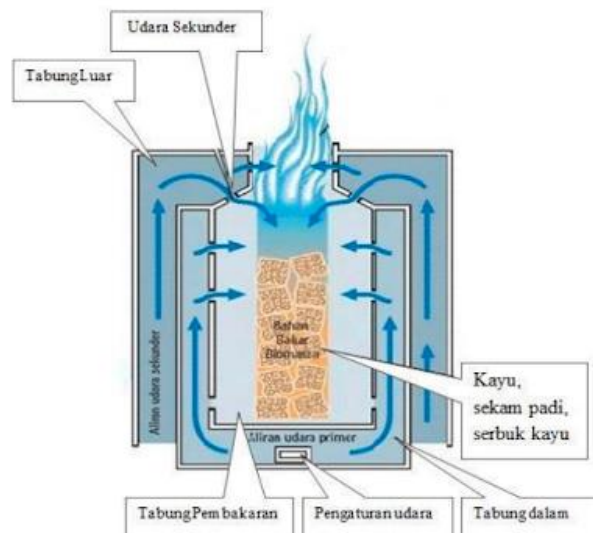
Dari perspektif properti termofisika, sekam padi memiliki nilai kalor antara 13-15 MJ/kg dengan kadar abu relatif tinggi (14-25%) akibat kandungan silika yang signifikan (Chen et al., 2024). Kadar abu yang tinggi ini memerlukan penanganan khusus dalam desain reaktor gasifikasi untuk mencegah masalah slagging dan fouling. Namun, penelitian Wang et al. (2024) menemukan bahwa abu sekam padi yang kaya silika actually dapat dimanfaatkan kembali sebagai material adsorben untuk pengolahan air limbah atau sebagai bahan baku industri keramik, sehingga menambah nilai ekonomi dari proses konversi energi sekam padi. Densitas bulk yang rendah ( $\approx 100-150 \text{ kg/m}^3$ ) juga memerlukan pertimbangan khusus dalam desain sistem feeding dan penyimpanan bahan bakar.

Karakteristik unik sekam padi tersebut menjadikannya memerlukan teknologi konversi energi khusus seperti gasifikasi untuk mencapai efisiensi optimal. Menurut penelitian Gupta et al. (2023), sekam padi memiliki rasio udara-bahan bakar teoritis sebesar 5.6-6.2 kg udara/kg bahan bakar dan temperatur nyala adiabatik mencapai 1400-1500°C, yang menjadikannya suitable untuk aplikasi gasifikasi skala kecil hingga menengah. Penelitian Kumar et al. (2024) lebih lanjut menunjukkan bahwa dengan modifikasi tertentu pada desain reaktor dan optimasi parameter operasi, efisiensi gasifikasi sekam padi dapat mencapai 75-80%, dengan *syngas heating value* hingga 4.5-5.5 MJ/Nm<sup>3</sup>. Temuan ini memperkuat posisi sekam

padi sebagai bahan bakar biomassa yang layak untuk aplikasi gasifikasi skala komunal dan industri kecil.

### 2.3 Kompor Gasifikasi Biomassa

Gasifikasi adalah proses konversi termokimia yang mengubah bahan bakar padat biomassa menjadi gas mudah terbakar (*synthesis* gas atau *syngas*) melalui serangkaian reaksi kimia pada kondisi suhu tinggi (700–1000°C) dengan suplai oksigen terbatas. Proses ini melibatkan empat tahap utama: pengeringan (*drying*), pirolisis (*devolatilization*), oksidasi (*combustion*), dan reduksi (*gasification*). Pada tahap pengeringan, kadar air dalam biomassa diuapkan. Tahap pirolisis mengurai biomassa menjadi char, tar, dan gas volatil. Tahap oksidasi menyediakan panas untuk proses melalui pembakaran parsial, sedangkan tahap reduksi menghasilkan gas CO, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> yang mudah terbakar (Mendoza et al., 2023). Gas sintesis yang dihasilkan dapat digunakan sebagai sumber energi untuk memasak atau aplikasi lainnya. Selama ini, bahan biomassa yang paling umum digunakan untuk memasak di daerah pedesaan adalah kayu, karena lebih mudah ditemukan. Namun, ada efek samping dari penggunaan kompor biomassa. Hal ini tergantung pada kualitas pembakaran yang dihasilkan oleh kompor tersebut. Jika kualitas pembakarannya baik, maka akan menghasilkan efisiensi pembakaran yang optimal. Sebaliknya, jika pembakarannya buruk, dapat menghasilkan asap yang berdampak negatif jika terhirup oleh manusia (Fatimah et al., 2022).



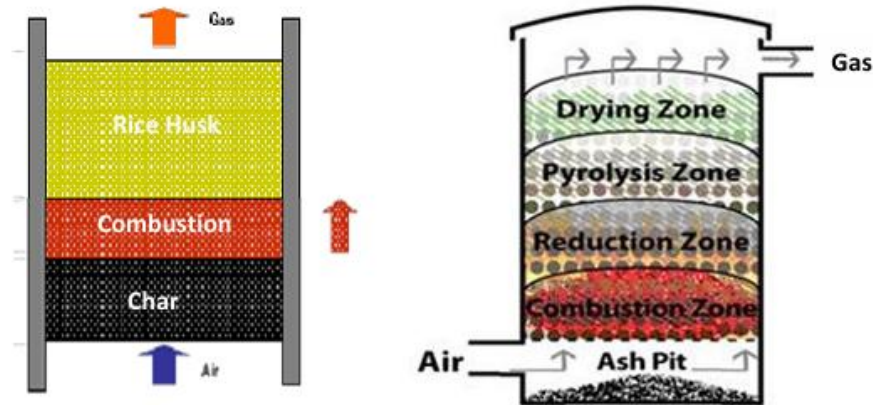
**Gambar 2. 2** Struktur Kompor Biomassa

(Sumber: Artikel Universitas Brawijaya Malang)

Menurut Singh et al. (2024), efisiensi proses gasifikasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik biomassa, desain reaktor, laju aliran udara, dan temperatur operasi. Komposisi kimia biomassa, terutama kadar air, kadar abu, dan nilai kalor, menentukan kualitas syngas yang dihasilkan. Biomassa dengan kadar air tinggi memerlukan energi lebih besar untuk penguapan, sehingga mengurangi efisiensi termal *overall*. Sebaliknya, biomassa dengan kadar volatil matter tinggi seperti sekam padi cenderung menghasilkan lebih banyak gas yang mudah terbakar, sehingga cocok untuk aplikasi gasifikasi (Zhang et al., 2023).

Dalam konteks kompor gasifikasi, teknologi *Top-Lit Up-Draft* (TLUD) telah terbukti efektif untuk skala rumah tangga. Prinsip kerjanya adalah pembakaran dimulai dari atas bahan bakar dan bergerak ke bawah, sementara udara primer dialirkan dari bawah untuk mendukung proses gasifikasi. Udara sekunder disuplai di atas zona pirolisis untuk membakar gas hasil dekomposisi termal secara sempurna. Desain ini menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi dan emisi yang lebih rendah dibandingkan kompor konvensional (Kumar & Patel, 2022).

Sistem distribusi udara pada kompor gasifikasi biomassa memiliki peran krusial dalam meningkatkan efisiensi pembakaran serta kualitas nyala api. Aliran udara yang terdistribusi dengan baik dapat meningkatkan kualitas syngas, menghasilkan suhu nyala api yang lebih tinggi, mempercepat proses memasak, dan mempersingkat durasi pembakaran yang efektif. Desain distribusi udara yang optimal mengandalkan pemanfaatan saluran udara primer dan sekunder untuk memaksimalkan kinerja kompor gasifikasi. Penerapan teknologi pendukung, seperti penggunaan blower untuk mengatur aliran udara, membuat kompor gasifikasi biomassa lebih hemat energi sekaligus ramah lingkungan. Oleh karena itu, kompor jenis ini menjadi salah satu solusi energi alternatif yang potensial, khususnya untuk kebutuhan rumah tangga di wilayah pedesaan.



**Gambar 2. 3** *Up-Draft Gasifier*

Dalam penggunaannya, kompor biomassa wajib memenuhi ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait aspek keamanan (BSN, 2024), dengan persyaratan sebagai berikut:

1. Keamanan Fisik: Kompor tidak boleh memiliki sisi, sudut, atau ujung yang tajam agar tidak menimbulkan risiko cedera saat memasak, memindahkan, maupun membersihkannya. Pengujian dilakukan berdasarkan SNI 8660.
2. Peringatan Bahaya: Pada bagian depan kompor wajib tercantum tulisan “*awas panas!*” serta simbol bahaya api yang dapat terlihat jelas dari jarak minimal satu meter.
3. Batas Suhu Permukaan: Bagian kompor yang mungkin tersentuh tangan selama proses memasak atau pemindahan tidak diperkenankan memiliki suhu lebih dari 60 °C. Pengujian dilakukan bersamaan dengan uji kinerja kompor, dengan pengukuran suhu menggunakan termometer setiap 10 menit, dan suhu tertinggi tidak boleh melebihi 60 °C.
4. Stabilitas Kompor: Kompor yang digunakan bersama panci di atasnya tidak boleh mudah tergeser atau terbalik. Uji stabilitas mengacu pada SNI 8660 untuk permukaan datar.
5. Ketahanan Material: Material yang bersentuhan langsung dengan api atau panas tidak boleh mengelupas, mudah terbakar, mengeluarkan bau menyengat, atau menimbulkan dampak berbahaya bagi lingkungan.

Pengujian dilakukan selama uji kinerja dengan memantau kondisi material dan bau yang muncul.

Selain itu, pengujian kekuatan juga dilakukan selama uji kinerja kompor biomassa dengan ketentuan berikut (BSN, 2024):

1. Struktur kompor harus cukup kuat untuk menopang beban saat digunakan tanpa mengalami retak atau deformasi.
2. Konstruksi produk harus tetap stabil selama proses transportasi dan tidak mengalami perubahan yang dapat memengaruhi fungsinya.
3. Badan kompor tidak boleh mengalami retak atau pecah setelah melalui uji kinerja.

## **2.5 Proses Pembakaran**

### **2.5.1 Pengertian Proses Pembakaran**

Pembakaran merupakan reaksi kimia bersifat eksotermik antara bahan bakar dan oksigen yang menghasilkan panas, cahaya, serta produk reaksi seperti karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Menurut Turns (2011), pembakaran didefinisikan sebagai proses oksidasi cepat yang terjadi pada suhu tinggi dengan pelepasan energi dalam bentuk panas dan cahaya. Pada kompor TLUD, pembakaran berfungsi untuk mengubah energi kimia yang tersimpan dalam biomassa menjadi energi panas yang dapat digunakan untuk memasak atau pemanasan. Febriani et al. (2023) menegaskan bahwa tingkat efisiensi pembakaran sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar, pasokan udara, serta desain kompor.

### **2.5.2 Syarat Pembakaran**

Agar pembakaran berlangsung optimal, diperlukan beberapa kondisi berikut:

1. Ketersediaan Bahan Bakar: Bahan bakar harus mengandung komponen yang mudah terbakar seperti karbon (C) dan hidrogen (H). El-Fawal et al. (2025) menyatakan bahwa biomassa seperti kayu, biopellet, dan limbah pertanian kaya akan karbon organik dan lignoselulosa sehingga ideal sebagai bahan bakar.
2. Ketersediaan Oksigen ( $\text{O}_2$ ): Oksigen berfungsi sebagai agen oksidasi dalam reaksi pembakaran. Turns (2011) menekankan pentingnya pasokan udara yang memadai untuk mencapai pembakaran sempurna.

3. Sumber Penyulutan: Panas awal diperlukan untuk memulai proses pembakaran. Castells et al. (2024) mengungkapkan bahwa suhu penyalaan minimum untuk biomassa seperti pelet kayu berkisar antara 275–340 °C, tergantung bentuk dan kondisinya, sehingga memerlukan penanganan yang tepat untuk menghindari pembakaran spontan.
4. Suhu Tinggi: Proses pembakaran membutuhkan suhu yang cukup untuk menjaga reaksi eksotermik tetap berlangsung. Febriani et al. (2023) menyebutkan bahwa pembakaran biomassa umumnya berada pada rentang suhu 500–1.000 °C, bergantung pada jenis bahan bakar dan kondisi operasi.

### 2.5.3 Jenis-Jenis Pembakaran

Pembakaran dapat dikategorikan berdasarkan beberapa aspek, di antaranya:

1. Pembakaran Sempurna (Complete Combustion): Terjadi ketika bahan bakar terbakar seluruhnya dengan pasokan oksigen yang cukup, menghasilkan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O sebagai produk utama. Turns (2011) menyatakan bahwa pembakaran sempurna memaksimalkan energi panas dan meminimalkan emisi gas.
2. Pembakaran Tidak Sempurna (Incomplete Combustion): Terjadi saat pasokan oksigen tidak memadai, menghasilkan karbon monoksida (CO), partikulat, dan jelaga. Febriani et al. (2023) menyebutkan hal ini sering terjadi pada kompor tradisional akibat desain yang kurang optimal.
3. Pembakaran Bertahap (Staged Combustion): Melibatkan dua tahap atau lebih untuk meningkatkan efisiensi serta mengurangi emisi. Darussalam et al. (2022) mengungkapkan bahwa kompor gas biomassa kerap menggunakan metode ini guna meningkatkan efisiensi termal.
4. Pembakaran Katalitik (Catalytic Combustion): Memanfaatkan katalis untuk mempercepat reaksi pembakaran pada suhu lebih rendah. Menurut An et al. (2024), teknik ini efektif diterapkan pada turbin gas dan reaktor mikrokanal karena dapat menurunkan suhu pembakaran sekaligus mengurangi emisi gas berbahaya seperti NO<sub>x</sub>.

#### 2.5.4 Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Pembakaran

Beberapa faktor utama yang memengaruhi efisiensi pembakaran antara lain:

1. Jenis Bahan Bakar: Bahan dengan nilai kalor tinggi seperti kayu jati atau biopellet umumnya memberikan pembakaran lebih efisien. Febriani et al. (2023) melaporkan bahwa kombinasi kayu jati dan sengon dapat meningkatkan efisiensi pembakaran hingga 66%.
2. Pasokan Udara: Aliran udara yang tepat diperlukan agar pembakaran berlangsung sempurna. Turns (2011) menjelaskan bahwa kelebihan atau kekurangan udara dapat menurunkan efisiensi.
3. Desain Kompor: Desain yang baik, misalnya melalui penggunaan isolator termal atau penyimpanan panas, dapat meningkatkan efisiensi pembakaran. Darussalam et al. (2022) menemukan bahwa penggunaan isolator fiberglass pada kompor gas biomassa dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 27,48%.
4. Temperatur Pembakaran: Suhu yang lebih tinggi mempercepat laju reaksi pembakaran dan memaksimalkan energi. El-Fawal et al. (2025) menyebutkan bahwa penggunaan material isolator termal yang tepat dapat membantu menjaga kestabilan suhu tinggi sehingga efisiensi tetap optimal.

## 2.6 Water Boiling Test

### 2.6.1 Pengertian *Water Boiling Test*

*Water Boiling Test* (WBT) merupakan metode baku yang digunakan untuk menilai performa kompor dengan cara mengukur kemampuannya memanaskan air hingga titik didih. Metode ini dikembangkan oleh *Aprovecho Research Center* dan telah banyak diadopsi dalam penelitian mengenai efisiensi kompor. Menurut Darussalam et al. (2022), WBT menjadi metode yang paling sering digunakan karena sifatnya yang sederhana, mudah diulang, dan mampu memberikan data yang menyeluruh terkait kinerja kompor.

### 2.6.2 Tujuan *Water Boiling Test*

WBT bertujuan untuk mengevaluasi beberapa aspek kinerja kompor, antara lain:

1. Efisiensi Termal: Menilai efektivitas kompor dalam mengonversi energi bahan bakar menjadi panas yang bermanfaat.
2. *Fuel Consumption Rate* (FCR): Mengukur laju konsumsi bahan bakar selama proses pembakaran berlangsung.
3. Waktu Pemanasan: Menentukan durasi yang diperlukan untuk memanaskan air hingga mendidih.
4. Kehilangan Panas: Menganalisis besarnya panas yang hilang selama pembakaran.

Menurut Febriani et al. (2023), WBT juga berfungsi untuk membandingkan performa berbagai tipe kompor dan bahan bakar, sehingga mendukung upaya pengembangan desain kompor yang lebih efisien.

#### 2.6.3 Prosedur *Water Boiling Test*

Pelaksanaan WBT dilakukan melalui beberapa tahap pengujian, yaitu:

1. *Cold Start High Power*: Dilakukan saat kompor masih dalam kondisi dingin untuk mengetahui waktu yang diperlukan hingga air mendidih.
2. *Hot Start High Power*: Dilakukan segera setelah tahap pertama dengan kompor yang sudah panas, untuk mengevaluasi waktu pemanasan dan konsumsi bahan bakar.
3. *Simmering*: Digunakan untuk mengukur kemampuan kompor dalam menjaga suhu air selama periode tertentu (umumnya 45 menit).

Darussalam et al. (2022) menjelaskan bahwa data yang diperoleh selama WBT meliputi massa air, massa bahan bakar, suhu air, dan waktu pemanasan, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter seperti FCR, daya keluaran (*P<sub>out</sub>*), serta efisiensi termal ( $\eta$ ).

#### 2.6.4 Keunggulan *Water Boiling Test*

Dibandingkan dengan metode pengujian lainnya, WBT memiliki beberapa kelebihan, yaitu:

1. Sederhana dan Ekonomis: Tidak memerlukan peralatan yang kompleks dan dapat diterapkan di berbagai kondisi, baik di laboratorium maupun di lapangan. Akolgo et al. (2021) menyebutkan bahwa metode ini hanya membutuhkan peralatan dasar seperti stopwatch, termometer, dan timbangan.
2. Hasil yang Komprehensif: Memberikan informasi mencakup efisiensi termal, konsumsi bahan bakar, serta waktu pemanasan sehingga menghasilkan gambaran kinerja yang lengkap.
3. Standar Internasional: WBT telah diakui sebagai metode standar internasional oleh lembaga seperti ISO, sehingga hasil pengujiannya dapat dibandingkan secara global. Febriani et al. (2023) menyatakan bahwa metode ini sesuai dengan standar ISO 19867-1:2018 untuk uji kinerja kompor.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian dilakukan pada bulan April 2025 s/d Juli 2025 di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya. Berikut uraian tahapan dan tempat penelitian:

1. Persiapan Bahan Baku dan Analisa Proksimat Bahan Bakar Sekam Padi.  
Tempat : Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya
2. Uji Kompor Gasifikasi Biomassa, Pengambilan Data, dan Analisa Hasil Percobaan.  
Tempat : Laboratorim Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya

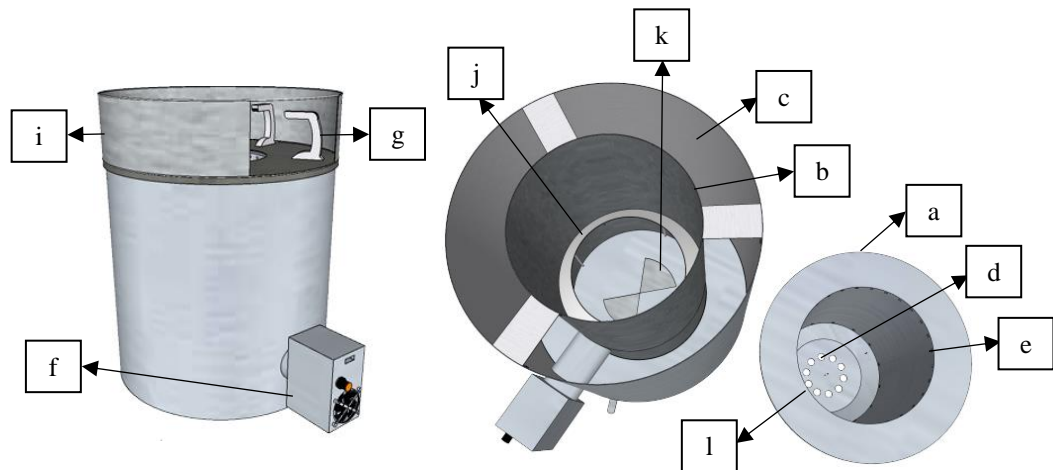
#### **3.2 Alat dan Bahan yang Digunakan**

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari serangkaian kompor gasifikasi biomassa tipe *Top-Lit Up Draft* (T-LUD). Penelitian ini menggunakan sekam padi sebagai bahan bakar. Penelitian ini melibatkan berbagai instrumen pendukung, selain peralatan utama. Peralatan tersebut antara lain termometer *digital*, pengukur laju aliran udara, timbangan presisi, dan alat pengukur emisi yang berfungsi untuk mengumpulkan data secara akurat selama proses eksperimen.

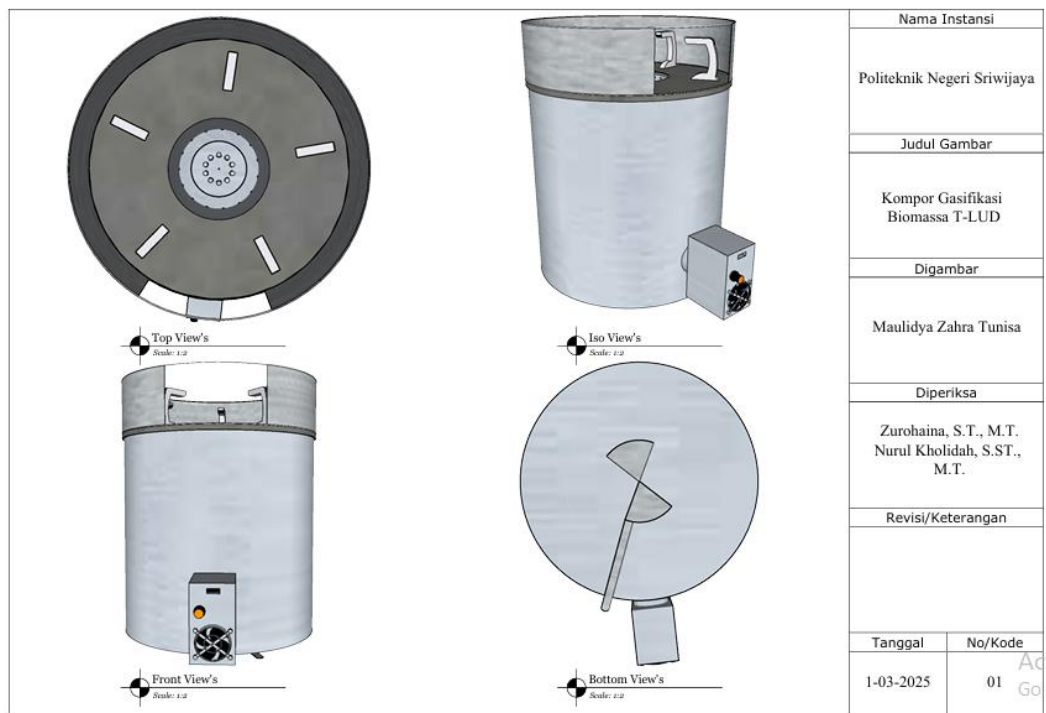
##### 3.2.1 Alat yang digunakan

1. Satu Set Kompor Gasifikasi Biomassa

Penelitian ini menggunakan kompor gasifikasi biomassa tipe *Top-Lit Up Draft* (T-LUD) sebagai alat utama untuk menguji kinerja dari kompor gasifikasi biomassa. Desain *Top-Lit Up Draft* dipilih karena kapasitasnya untuk pembakaran yang stabil dan bertahap. Alat ini mencakup beberapa elemen pendukungnya yang saling berhubungan. Gambar pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 memungkinkan untuk mempelajari secara lengkap spesifikasi dan parameter teknisnya.



**Gambar 3.1** Alat Kompor Biomassa



**Gambar 3.2** Alat Kompor Biomassa

Berikut merupakan spesifikasi struktural peralatan kompor gasifikasi biomassa:

a. Tabung Pembakaran

- Jumlah : 1 buah
- Kapasitas Bahan Bakar : 1 kg
- Tinggi Badan Tabung : 17,7 cm

- Diameter Atas : 12,8 cm
- Diameter Bawah : 7,3 cm
- Ketebalan : 1 mm
- Material : *Stainless Steel*
- Jumlah Lubang Udara : Bagian *Burner*/ Leher Tabung = 28 Lubang  
Bagian Badan Tabung = 25 Lubang

b. Tabung Bagian Dalam

- Jumlah : 1 Buah
- Tinggi : 24,7 cm
- Diameter : 15,5 cm
- Ketebalan : 0,5 mm
- Material : Galvanis
- Jumlah Lubang Udara : 1 Buah Lubang Udara Ber-diameter 4 mm

c. Tabung Luar (Dinding Kompor)

- Jumlah : 1 Buah
- Tinggi : 25 cm
- Diameter : 25 cm
- Ketebalan : 0,5 mm
- Material : *Stainless Steel*

d. Lubang Udara Primer

- Jumlah : 10 Buah Berdiameter 7 mm  
15 Buah Berdiameter 3 mm

e. Lubang Udara Sekunder

- Jumlah : 28 Buah
- Diameter : 4 mm

f. *Fan* (Kipas)

- Jumlah : 1 Buah

- Diameter Penampang : 4 cm
- Kecepatan Udara Suplai : 1-7 m/s
- Tegangan : DC 12 V
- Daya : 6,8 Watt
- Material : *Stainless Steel*

g. Tungku Penyangga dan Alas Atas Kompor

- Jumlah Bagian Penyangga : 5 Buah
- Diameter Alas Penyangga : 22 cm
- Dimensi Alas Atas Kompor : 25,5 cm
- Ketebalan : 2 mm
- Material : Besi Baja

h. Rangka Kompor

- Jumlah : 3 Buah
- Tinggi : 35 cm
- Bentuk : Tabung
- Ketebalan : 0,5 mm
- Material : *Stainless Steel*

i. Tatakan Kompor

- Diameter : 24,5 cm
- Tinggi : 6,5 cm
- Ketebalan : 0,5 mm
- Material : Besi

j. *Reducer*

- Tinggi : 9 cm
- Diameter : Bagian Atas = 14 cm  
Bagian Bawah = 15,3 cm
- Ketebalan : 0,5 mm
- Material : *Stainless Steel*

## k. Pembuangan Abu

- Bentuk : Kupu-Kupu
- Tinggi : 3 cm
- Jari-Jari : Bagian Atas = 2 cm  
Bagian Bawah = 5 cm

## 1. Lingkaran Melengkung

- Diameter : 12 cm
- Tinggi : 4,5 cm
- Jumlah Lubang : 28 cm
- Ketebalan : 0,5 mm
- Material : *Stainless Steel*

## 2. Peralatan tambahan yang digunakan

- a. Panci Aluminium Kapasitas 2500 ml : 1 Buah
- b. Gelas Ukur 25 ml : 1 Buah
- c. *Thermogun* (GM-900) : 1 Buah
- d. Anemometer *digital* : 1 Buah
- e. Termometer Air Raksa : 1 Buah
- f. *Vacuum* : 1 Buah
- g. *Gas Sampling Bag* : 5 Buah
- h. *Gas Torch* : 1 Buah
- i. Timbangan : 1 Buah
- j. *Stopwatch* : 1 Buah

## 3. Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

- a. Biopellet sekam padi : 10 kg
- b. Biopellet serbuk kayu : 10 kg
- c. Air : 2 Liter

### 3.3 Perlakuan dan Rancangan Percobaan

#### 3.3.1 Perlakuan

Percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini dimulai dengan mempersiapkan bahan bakar biomassa yaitu sekam padi. Kemudian, biopellet yang telah disiapkan dilakukan analisis proksimat yang selanjutnya akan digunakan sebagai bahan bakar pada uji coba kompor gasifikasi biomassa.

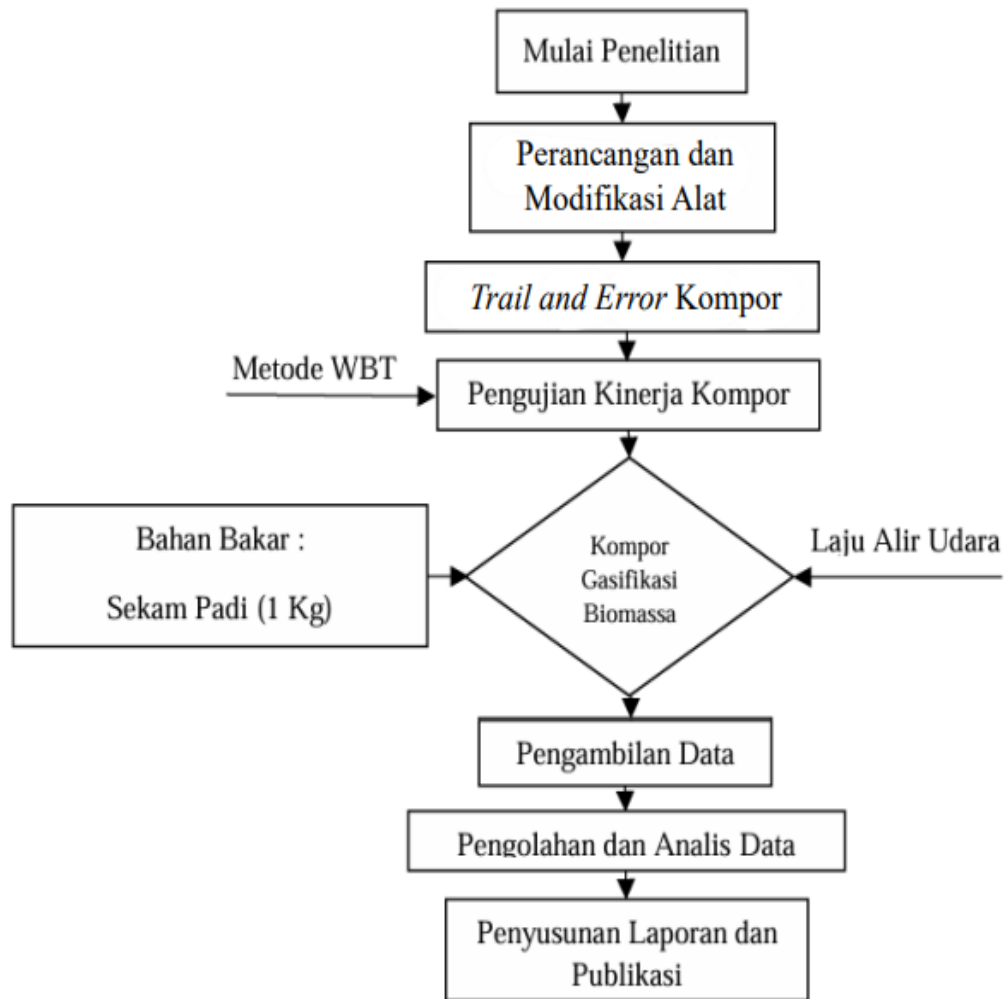
#### 3.3.2 Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini, pendekatan eksperimental digunakan untuk menguji kinerja kompor biomassa dengan menetapkan variabel-variabel yang dapat dikontrol. Secara metodologis, variabel penelitian dibagi menjadi tiga kategori utama yaitu, variabel tetap yang terdiri dari parameter konstan seperti desain kompor T-LUD. Kedua, variabel bebas yang merupakan faktor yang sengaja diubah, seperti laju laju alir udara. Ketiga, variabel terikat yang berfungsi sebagai indikator kinerja, termasuk efisiensi termal, laju pembakaran, emisi CO dan CO<sub>2</sub>, dan temperatur nyala api. Rancangan percobaan variabel penelitian disajikan dengan lebih jelas dalam Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Variabel Percobaan

Variabel Tetap	Variabel Bebas	Variabel Terikat
Massa Bahan Bakar 1 kg	Bentuk lubang	Efisiensi Termal (%)
Jenis Bahan Bakar yaitu Sekam Padi	udara sekunder (lingkaran normal dan lingkaran vortex)	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik
	Variasi Laju Alir pada <i>Fan</i> (Kipas) yaitu : 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s	Temperatur Rata-Rata Nyala Api
		Kadar Emisi CO dan CO <sub>2</sub>
		Efisiensi Pembakaran

### 3.3.3 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.3** Diagram Alir Proses Penelitian

### 3.1 Rancangan Pengamatan

Penelitian ini mengkaji bagaimana perubahan bentuk lubang udara yang mempengaruhi kinerja kompor gasifikasi biomassa dengan menggunakan bahan bakar sekam padi. Tujuannya adalah untuk menentukan kondisi optimal untuk menggunakan kompor gasifikasi biomassa *Top-Lit Up Draft* (TLUD). Sebuah rancangan pengamatan disiapkan sebelum percobaan untuk memastikan bahwa data kuantitatif akan memberikan informasi yang akurat, yaitu hasil analisa, pengamatan, dan perhitungan sebagai hasil akhir penelitian pada kompor biomassa yang akan dibahas meliputi: Analisa *Ultimate* dan Proksimat Bahan Bakar, Efisiensi Termal, Konsumsi Bahan Bakar Spesifik, Temperatur Rata-Rata Nyala

Api, *Boiling Time*, Lama Nyala Api, serta Kadar Emisi CO dan CO<sub>2</sub> Hasil Pembakaran.

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Persiapan Bahan Baku

Pada penelitian ini bahan bakar biomassa yang digunakan adalah sekam padi yang diperoleh dari daerah Mariana, Kab. Banyuasin, Sumatera Selatan. Bahan bakar sekam padi yang telah disiapkan dilakukan Analisa *Proximate* (ASTM D7582-10) di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya dan Analisa *Ultimate* (ASTM D5373-16A) di PT *Geoservices Coal Laboratory* Palembang. Instrumen pengukuran pengambilan data yang digunakan dalam penelitian pada kompor biomassa terdiri dari *Thermogun*, Termometer, Timbangan, Anemometer *Digital*, Gelas Ukur, *Stopwatch*, dan *Gas Analyzer Instrument*.

#### 3.5.2 Analisa *Proximate* Bahan Bakar

Analisa *proximate* penentuan kadar air tertambat, zat terbang, kadar abu, dan karbon terikat menggunakan alat *Thermogravimetric Analyzer* (TGA 701) ASTM D7582-10. Adapun prosedur analisa yang dilakukan sebagai berikut:

1. Meletakkan *crucible* kosong pada *carousel* dengan posisi seimbang, *crucible* blanko diletakkan pada posisi nol.
2. Menimbang berat *crucible* kosong sampai konstan.
3. Menimbang 1 gr  $\pm$  0,1 gr sampel biomassa untuk setiap *crucible*.
4. Memanaskan sampel dalam *crucible* tanpa tutup pada suhu 107 +3 °C dalam waktu 1 jam pada alat TGA. Didapatkan hasil analisa kadar air.
5. Setelah analisa kadar air, meletakkan tutup pada *crucible*, alat akan menimbang ulang *crucible* sebelum memulai analisa zat terbang, suhu akan naik mencapai 950°C pada alat dalam waktu kurang lebih 30 menit. Alat akan menjaga suhu ini selama 7 menit. Didapatkan hasil analisa kadar zat terbang.
6. Setelah analisa kadar zat terbang selesai, alat akan mendinginkan suhu sampai 600°C, tutup *crucible* diangkat.
7. Alat akan memulai analisa kadar abu, suhu akan naik mencapai 750°C dalam waktu 3 jam. Didapatkan analisa kadar abu.

8. Hasil analisa kadar air tertambat, kadar zat terbang, dan kadar abu akan tampil dilayar monitor, kadar karbon terikat akan dikalkulasi oleh program berdasarkan hasil analisa.

### 3.5.3 Prosedur Percobaan Kinerja Kompor Biomassa (*Water Boiling Test*)

Adapun prosedur percobaan penelitian pada kinerja kompor biomassa yang digunakan menggunakan metode *water boiling test start* dingin sebagai berikut:

1. Meletakkan tungku di atas timbangan yang ditempatkan di bawah sungkup hisap penangkap emisi. Mencatat massa tungku kosong, lalu nolkan bacaan timbangan.
2. Memasukkan bahan bakar ke dalam tungku. Mencatat massa bahan bakar awal, kemudian nolkan kembali bacaan timbangan.
3. Meletakkan panci berisi air di atas tungku. Pasang termometer air raksa ke dalam panci dengan ujung menggantung sekitar 5 cm di atas dasar tanpa menyentuh dinding panci, lalu tutup panci. Mencatat suhu awal air serta massa total panci beserta tutupnya.
4. Menyalakan api dan mencatat waktu penyalaan. Selama pengujian berlangsung, dicatat massa terbaca di timbangan dan suhu air setiap satu menit. Penurunan massa menunjukkan konsumsi bahan bakar ( $\Delta m_k$ ).
5. Setelah suhu air mencapai 65 °C, catat pula massa air yang menguap ( $\Delta m_a$ ) setiap menit dengan cara mengangkat panci sejenak, lalu menghitung selisih massa terhadap massa awal panci berisi air.
6. Mencatat waktu saat air mulai mendidih dan teruskan pencatatan tiap menit hingga suhu air turun 3 °C dari titik didih. Setelah itu, menghentikan pengujian. Titik didih tidak harus 100 °C, tetapi disesuaikan dengan ketinggian lokasi menggunakan rumus:

$$T_d = \left( 100 - \frac{h}{300} \right)$$

Keterangan :

$T_d$  adalah titik didih (°C)

$h$  adalah ketinggian lokasi dari permukaan laut (meter)

**Catatan:**

- Sebelum suhu mencapai 65 °C, penguapan air ( $\Delta m_a$ ) dapat diabaikan.

#### 3.5.4 Pengukuran Emisi Gas CO

Adapun prosedur percobaan pengukuran emisi gas CO pada kinerja kompor gasifikasi biomassa sebagai berikut:

1. Menyiapkan *gas analyzer* (CO-meter) dengan spesifikasi:
  - a. Rentang pengukuran: 0-1.000 ppm.
  - b. Ketelitian:  $\pm 1$  ppm.
  - c. Kalibrasi menggunakan gas standar CO konsentrasi diketahui.
2. Menyiapkan *gas sampling bag* dan bebas kontaminasi.
3. Memastikan selang *sampling* dalam kondisi bersih dan tidak bocor.
4. Memasang *probe* sampling pada sungkup hisap yang telah disiapkan di atas kompor.
5. Membiarkan gas mengalir melalui selang selama 30 detik untuk membuang sisa gas sebelumnya.
6. Mengalirkan gas sampel ke dalam gas sampling bag hingga 80% kapasitas.
7. Segera menutup rapat *gas sampling bag* untuk mencegah kontaminasi udara luar.
8. Menghidupkan *gas analyzer*/CO-meter dan lakukan *zeroing* dengan udara bersih.
9. Menyambungkan *sampling bag* ke *inlet gas analyzer*.
10. Membiarkan gas mengalir stabil selama 15 detik sebelum pembacaan.
11. Mencatat nilai konsentrasi CO yang stabil dalam satuan ppm.

#### 3.5.5 Pengukuran Emisi Gas CO<sub>2</sub>

Adapun prosedur percobaan pengukuran emisi gas CO pada kinerja kompor gasifikasi biomassa sebagai berikut:

1. Menyiapkan *gas analyzer* (CO<sub>2</sub>-meter) dengan spesifikasi:
  - a. Rentang pengukuran: 0-10.000 ppm.
  - b. Ketelitian:  $\pm 1$  ppm.
  - c. Kalibrasi menggunakan gas standar CO<sub>2</sub> konsentrasi diketahui.
2. Menyiapkan *gas sampling bag* dan bebas kontaminasi.
3. Memastikan selang *sampling* dalam kondisi bersih dan tidak bocor.

4. Memasang *probe* sampling pada sungkup hisap yang telah disiapkan di atas kompor.
5. Membiarkan gas mengalir melalui selang selama 30 detik untuk membuang sisa gas sebelumnya.
6. Mengalirkan gas sampel ke dalam gas sampling bag hingga 80% kapasitas.
7. Segera menutup rapat *gas sampling bag* untuk mencegah kontaminasi udara luar.
8. Menghidupkan *gas analyzer/CO<sub>2</sub>-meter* dan lakukan *zeroing* dengan udara bersih.
9. Menyambungkan *sampling bag* ke *inlet gas analyzer*.
10. Membiarkan gas mengalir stabil selama 15 detik sebelum pembacaan.
11. Mencatat nilai konsentrasi CO<sub>2</sub> yang stabil dalam satuan ppm.

#### 3.5.6 Perhitungan Konsumsi Spesifik Bahan Bakar

Menghitung konsumsi spesifik bahan bakar ( $S_C$ ) dengan rumus:

$$S_C = \frac{\Delta mk}{\Delta t} \quad (\text{Sumber : SNI 7926 : 2013})$$

#### **Keterangan:**

- $\Delta m$  = massa bahan bakar yang telah dibakar/digunakan selama pengujian (kg)
- $\Delta t$  = lama waktu pengujian (jam)

#### 3.5.7 Perhitungan efisiensi pembakaran

Hitung efisiensi pembakaran  $\eta_C$  dengan rumus:

$$\eta_C = 1 - \frac{N_{CO}}{N_{CO_2}} \quad (\text{Sumber : SNI 7926 : 2013})$$

N adalah fraksi massa dari masing-masing gas.

#### 3.5.8 Perhitungan efisiensi termal

Hitung efisiensi termal  $\eta_T$  dengan rumus:

$$\eta_T = \frac{maCp\Delta T + \Delta maL}{\Delta mkLHV} \quad (\text{Sumber : SNI 7926 : 2013})$$

#### **Keterangan:**

- $m_a$  = massa air (kg)
- $C_p$  = kalor jenis air (4180 J/kg·°C)
- $\Delta T$  = selisih suhu akhir dan suhu awal air (°C)
- $\Delta m_a$  = massa air yang menguap (kg)
- $L$  = kalor penguapan air (J/kg)
- $\Delta m_k$  = massa bahan bakar yang telah dibakar/digunakan (kg)
- $LHV$  = nilai kalor netto bahan bakar (J/kg)

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada April – Juni 2025 di Laboratorium Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya dengan judul “Analisis Pengaruh Bentuk Lubang Udara Sekunder Pada Kompor Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Pembakaran Langsung “ diperoleh beberapa hasil penelitian yaitu data analisa, perhitungan dan pengamatan yang dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.5

**Tabel 4.1** Hasil Analisa *Ultimate* Bahan Bakar Biomassa

<b>Komponen</b>	<b>Biopellet Sekam Padi (%wt)</b>
C	51,03
H	5,77
N	0,35
O	42,71
S	0,14
<b>Total</b>	<b>100</b>

*(Sumber: Analisa Laboratorium PT Geoservices Coal Laboratory Palembang, 2024)*

**Tabel 4.2** Hasil Analisa *Proximate* Bahan Bakar Biomassa

<b>Komponen</b>	<b>Biopellet Sekam Padi (%wt)</b>
<i>Moisture</i>	4,74
<i>Volatile Matter</i>	45,55
<i>Fix Carbon</i>	35,25
<i>Ash</i>	14,45
<b>Total</b>	<b>100</b>

*(Sumber: Analisa Laboratorium Batubara dan Biomassa, Jurusan Teknik Kimia Polsri, 2025)*

**Tabel 4.3** Hasil Pengamatan Temperatur Rata-Rata Nyala Api, *Boiling Time*, dan Lama Nyala Api

Bentuk Lubang Udara	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Temperatur Rata-Rata Nyala Api °C	<i>Boiling Time</i> (s)	Lama Nyala Api (s)
Lubang Udara Desain Pabrik	5	765.0	570	3512
	6	757.0	626	2844
	7	792.3	623	2287
Lubang Udara Modifikasi	5	762.0	601	3406
	6	788.1	696	2691
	7	802.3	588	2078

**Tabel 4.4** Hasil Analisa Gas CO dan CO<sub>2</sub> dan Perhitungan Efisiensi Pembakaran

Bentuk Lubang Udara	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	Efisiensi Pembakaran
Lubang Udara Desain Pabrik	5	210	605	0.6529
	6	187	698	0.7321
	7	70	399	0.8246
Lubang Udara Modifikasi	5	163	642	0.7461
	6	57	724	0.9213
	7	62	398	0.8442

**Tabel 4.5** Hasil Perhitungan Efisiensi Termal dan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

Bentuk Lubang Udara	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Efisiensi Termal (%)	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Kg/Jam)
Lubang Udara Desain Pabrik	5	39.26	0.54947
	6	40.07	0.51198
	7	43.16	0.53179
Lubang Udara Modifikasi	5	46.17	0.50316
	6	54.95	0.40862
	7	50.68	0.50204

## 4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil analisa, pengamatan dan perhitungan dari penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh bentuk lubang udara sekunder pada kompor

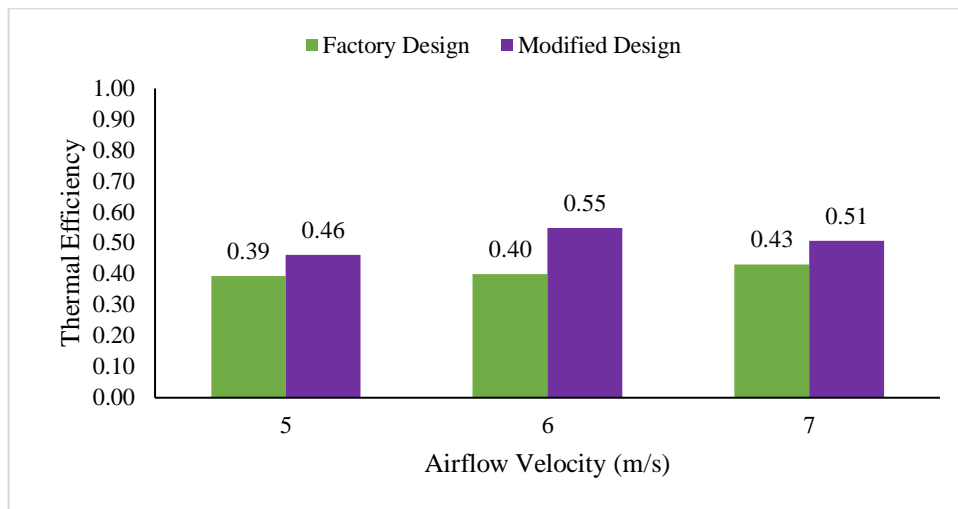
gasifikasi biomassa sekam padi pembakaran langsung, yang akan diuraikan secara rinci pada sub-bab berikut.

#### **4.2.1 Analisa Kandungan Bahan Bakar Biomassa yang Digunakan**

Berdasarkan hasil analisis *ultimate* dan *proximate* yang disajikan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, dari segi komposisi kimia (*ultimate analysis*), biopellet sekam padi memiliki kandungan karbon (C) sebesar 51,03% dan hidrogen (H) 5,77%. Kedua unsur ini merupakan penyumbang utama nilai kalor bahan bakar. Kandungan oksigen (O) yang cukup tinggi, yaitu 42,71%, merupakan ciri khas biomassa yang menunjukkan bahwa bahan bakar ini memerlukan suplai udara eksternal yang lebih sedikit untuk mencapai pembakaran sempurna dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Kandungan nitrogen (N) dan sulfur (S) yang sangat rendah (masing-masing 0,35% dan 0,14%) mengindikasikan potensi emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> yang rendah, yang merupakan keunggulan dari segi lingkungan.

Dari analisis *proximate*, kadar air (*moisture*) 4,74% tergolong rendah, yang sangat menguntungkan untuk proses gasifikasi karena energi panas tidak banyak terbuang untuk menguapkan air. Kandungan zat terbang (*volatile matter*) yang tinggi (45,55%) menandakan bahwa sebagian besar energi dalam biomassa akan dilepaskan dalam fase gas pada tahap awal pembakaran, sehingga sangat cocok untuk teknologi gasifikasi yang mengandalkan produksi *syngas*. Nilai karbon terikat (*fixed carbon*) sebesar 35,25% akan mengalami proses oksidasi dan reduksi yang lebih lambat, berkontribusi pada stabilitas nyala api. Namun, kadar abu (*ash*) yang mencapai 14,45% tergolong tinggi. Kadar abu yang tinggi berpotensi menimbulkan masalah seperti slagging dan fouling selama proses pembakaran.

#### 4.2.2 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Thermal



**Gambar 4. 1** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Thermal

**Tabel L.2.10** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Efisiensi Termal

SK	DB	JK	KT	F <sub>Hitung</sub>	F <sub>Tabel</sub>
Geometris					
Lubang Udara	1	0.01432	0.01432	14.55254	18.51282
Kecepatan Udara	2	0.00274	0.00137	1.39000	19.00000
Galat	2	0.00197	0.00098		
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>0.01903</b>			

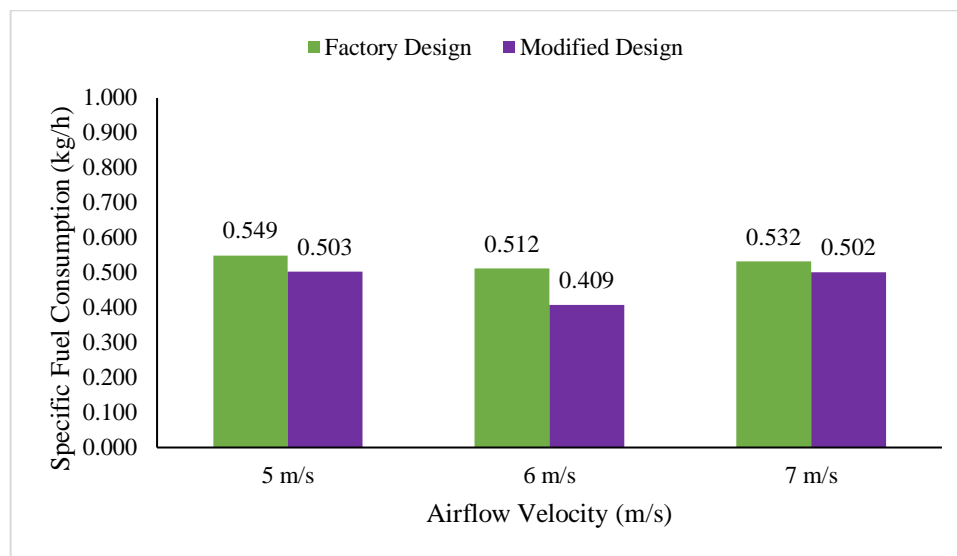
Berdasarkan data pada Tabel 4.5, Pada kecepatan aliran udara 6 m/s, efisiensi termal untuk lubang modifikasi (vortex) mencapai 54,95%, nilai tertinggi yang jauh melampaui efisiensi terbaik pada desain pabrik (43,16% pada 7 m/s). Pola ini menunjukkan bahwa kombinasi antara desain vortex dan laju alir udara menengah (6 m/s) menciptakan kondisi yang optimal untuk pencampuran udara sekunder dan gas hasil gasifikasi, sehingga mendukung pembakaran yang lebih sempurna.

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.10 memperkuat observasi ini. Nilai F-hitungan untuk faktor Geometris Lubang Udara adalah 14.55, yang mendekati F-tabel (18.51) pada tingkat kepercayaan 95%. Meskipun secara statistik absolut

pengaruhnya tidak signifikan (karena  $F\text{-hit} < F\text{-tabel}$ ), selisih yang cukup dekat dan nilai  $F\text{-hit}$  yang tinggi ini secara praktis menunjukkan adanya pengaruh yang kuat (*strong practical significance*) dari bentuk lubang terhadap efisiensi. Hal ini terjadi karena derajat kebebasan (DB) galat yang sangat kecil (2), yang membuat uji  $F$  menjadi sangat konservatif dan sulit untuk mencapai signifikansi statistik. Sementara itu, faktor Kecepatan Udara memiliki  $F\text{-hitung}$  1.39 yang jauh di bawah  $F\text{-tabel}$  (19.00), menunjukkan bahwa variasi kecepatan sendiri, tanpa interaksi dengan desain lubang, tidak memberikan pengaruh yang signifikan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Mersha et al. (2024) yang menyimpulkan bahwa bentuk vortex pada lubang udara sekunder menunjukkan hasil terbaik dalam meningkatkan efisiensi termal. Mereka menjelaskan bahwa desain vortex menciptakan aliran swirl yang meningkatkan turbulensi, memperpanjang waktu tinggal (*residence time*) gas volatil di zona pembakaran, dan memastikan pencampuran yang lebih homogen dengan oksigen. Hal ini menyebabkan lebih banyak gas yang terbakar sempurna, sehingga energi panas yang ditransfer ke air menjadi lebih besar. Selain itu, Fetene et al. (2024) juga melaporkan bahwa modifikasi aliran udara dapat meningkatkan efisiensi termal hingga 50%, yang konsisten dengan capaian efisiensi 54.95% pada penelitian ini. Penelitian mereka menyoroti pentingnya optimasi suplai udara sekunder untuk mencapai pembakaran volatil matter yang optimal, yang merupakan karakteristik utama sekam padi.

### 4.2.3 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Specific Fuel Consumption



**Gambar 4. 2** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Specific Fuel Consumption

**Tabel L.2.13** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Konsumsi Bahan Bakar

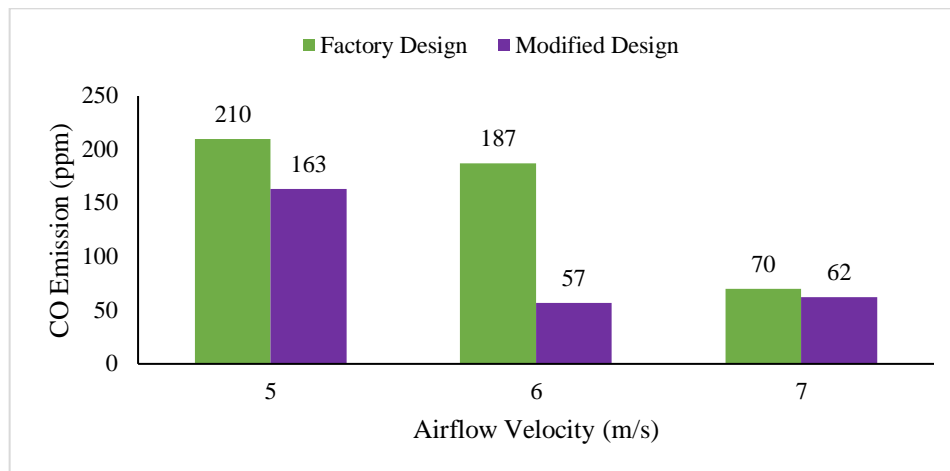
SK	DB	JK	KT	F <sub>Hitung</sub>	F <sub>Tabel</sub>
Geometris					
Lubang Udara	1	0.00538	0.00538	7.22014	18.51282
Kecepatan Udara	2	0.00509	0.00255	3.41992	19.00000
Galat	2	0.00149	0.00074		
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>0.01196</b>			

Berdasarkan data pada Tabel 4.5, Pada kecepatan 6 m/s, SFC untuk lubang modifikasi tercatat sebesar 0.40862 kg/jam, angka terendah yang jauh lebih efisien dibandingkan desain pabrik (0.51198 kg/jam pada kecepatan yang sama). Capaian ini menunjukkan bahwa dengan SFC yang lebih rendah, kompor modifikasi mampu menghasilkan output panas yang sama atau bahkan lebih besar dengan menggunakan bahan bakar yang lebih sedikit. Pola ini konsisten dengan hasil efisiensi termal, di mana nilai efisiensi tertinggi juga dicapai pada kondisi yang sama (kecepatan 6 m/s dan lubang vortex), membuktikan bahwa semakin tinggi efisiensi termal, semakin rendah SFC-nya.

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.13, Faktor Geometris Lubang Udara memiliki nilai F-hitungan 7.22. Meskipun angka ini masih di bawah F-tabel (18.51), nilainya yang cukup tinggi menunjukkan bahwa secara praktis, bentuk lubang memiliki pengaruh yang nyata dalam mengurangi konsumsi bahan bakar. Seperti pada analisis efisiensi, derajat kebebasan galat yang kecil (2) kembali membuat uji statistik menjadi sangat teliti. Faktor Kecepatan Udara menunjukkan F-hitungan 3.42, yang juga lebih rendah dari F-tabel (19.00), mengindikasikan bahwa variasi kecepatan saja tidak cukup signifikan dalam menurunkan SFC. Hasil ini mempertegas bahwa interaksi antara desain lubang vortex dan kecepatan udara 6 m/s-lah yang menciptakan kondisi optimal untuk pembakaran yang efisien.

Temuan ini memperkuat hasil penelitian Osei et al. (2020) dalam pengembangan kompor TLUD, yang menyatakan bahwa desain yang efektif dapat menghasilkan pembakaran stabil dan efisien, yang tercermin dari rendahnya konsumsi bahan bakar. Mereka menekankan bahwa stabilitas nyala api dan pembakaran yang sempurna adalah kunci untuk meminimalkan pemborosan bahan bakar. Selain itu, Wulandari et al. (2021) juga melaporkan bahwa modifikasi pada sistem udara (primer dan sekunder) kompor gasifikasi sekam padi tidak hanya meningkatkan efisiensi termal tetapi juga mengurangi konsumsi bahan bakar. Penelitian mereka menunjukkan bahwa optimasi aliran udara menyebabkan lebih banyak bahan bakar yang dikonsumsi dalam proses pembakaran yang produktif, bukan terbuang sebagai gas yang tidak terbakar atau partikel karbon.

#### 4.2.4 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO



**Gambar 4. 3** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO

**Tabel L.2.16** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Emisi CO

<b>SK</b>	<b>DB</b>	<b>JK</b>	<b>KT</b>	<b>F<sub>Hitung</sub></b>	<b>F<sub>Tabel</sub></b>
Geometris Lubang Udara	1	5704	5704	2.93852	18.51282
Kecepatan Udara	2	14544	7272	3.74629	19.00000
Galat	2	3882	1941		
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>24131</b>			

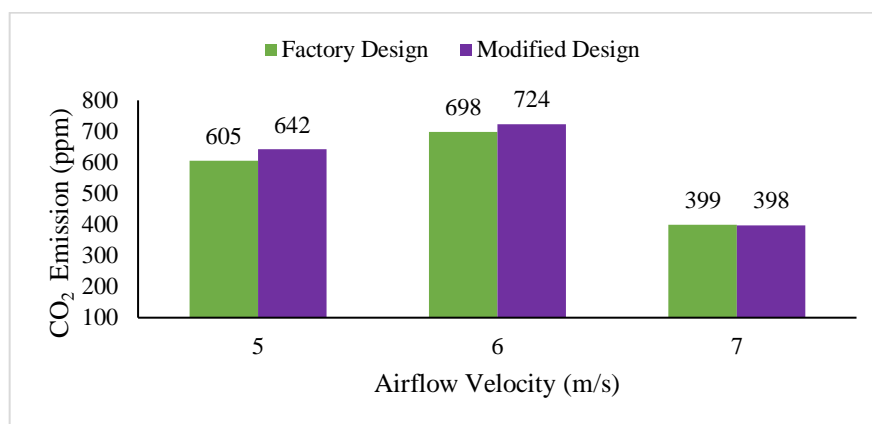
Berdasarkan data pada Tabel 4.4, Pada kecepatan 6 m/s, emisi CO untuk lubang modifikasi tercatat hanya 57 ppm, jauh lebih rendah dibandingkan desain pabrik (187 ppm pada kecepatan yang sama). Penurunan konsentrasi CO ini menunjukkan terjadinya pembakaran yang lebih sempurna, dimana gas karbon monoksida yang merupakan hasil pembakaran tidak sempurna berhasil dioksidasi lebih lanjut menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Pola ini konsisten di semua variasi kecepatan, membuktikan bahwa desain vortex secara konsisten menghasilkan emisi CO yang lebih rendah.

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.16, Faktor Geometris Lubang Udara menunjukkan nilai F-hitungan 2.94, sementara faktor Kecepatan Udara menunjukkan nilai F-hitungan 3.75. Kedua nilai ini masih di bawah F-tabel masing-

masing (18.51 dan 19.00), yang menunjukkan bahwa secara statistik murni pengaruhnya tidak signifikan. Namun, secara praktis, selisih nilai emisi CO yang mencapai 130 ppm (dari 187 ppm menjadi 57 ppm) pada kecepatan 6 m/s merupakan pencapaian yang sangat relevan secara teknis dan lingkungan. Ketidaksignifikanan statistik ini kemungkinan besar disebabkan oleh derajat kebebasan galat yang sangat kecil (2), yang membuat uji F menjadi sangat konservatif dan teliti.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Mersha et al. (2024) yang menyimpulkan bahwa bentuk vortex pada lubang udara sekunder menunjukkan hasil terbaik dalam mengurangi emisi CO. Mereka menjelaskan bahwa desain vortex menciptakan aliran swirl yang meningkatkan turbulensi dan pencampuran antara udara sekunder dengan gas hasil gasifikasi. Pencampuran yang lebih homogen ini memastikan suplai oksigen yang cukup untuk mengoksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub>, sehingga mengurangi emisi CO yang keluar. Selain itu, Wulandari et al. (2021) juga melaporkan bahwa modifikasi lubang udara sekunder terbukti dapat menurunkan emisi CO pada kompor gasifikasi sekam padi. Penelitian mereka menekankan peran penting udara sekunder dalam menyediakan oksigen untuk tahap pembakaran kedua (secondary combustion), dimana gas-gas yang belum terbakar sempurna dari zona pirolisis dan reduksi dioksidasi lebih lanjut.

#### 4.2.5 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO<sub>2</sub>



**Gambar 4. 4** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

**Tabel L.2.19** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

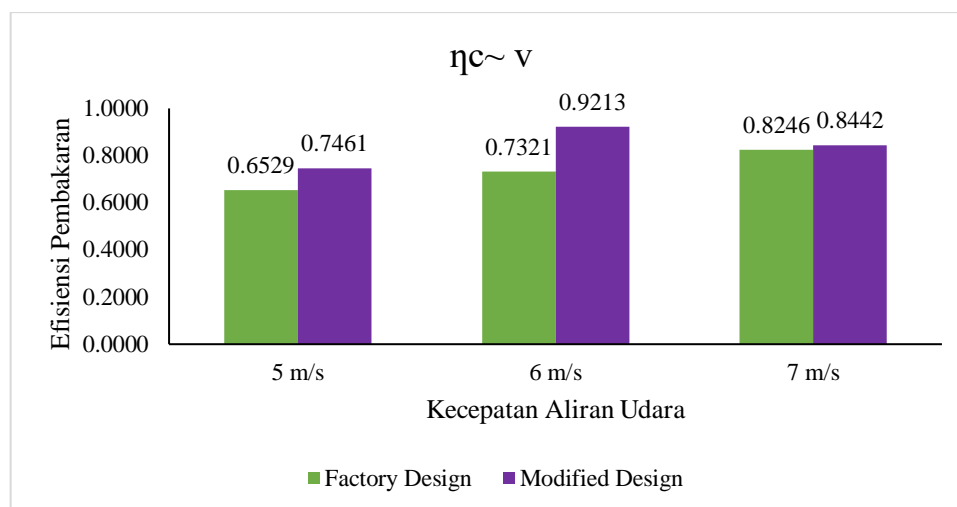
<b>SK</b>	<b>DB</b>	<b>JK</b>	<b>KT</b>	<b>F<sub>Hitung</sub></b>	<b>F<sub>Tabel</sub></b>
Geometris Lubang Udara	1	641	641	3.35135	18.51282
Kecepatan Udara	2	103958	51979	271.90497	19.00000
Galat	2	382	191		
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>104981</b>			

Berdasarkan data pada Tabel 4.4, Pada kecepatan 6 m/s, emisi CO<sub>2</sub> untuk lubang modifikasi (vortex) mencapai 724 ppm, nilai tertinggi yang justru lebih tinggi dibandingkan desain pabrik (698 ppm pada kecepatan yang sama). Namun, pada kecepatan 7 m/s, emisi CO<sub>2</sub> untuk kedua desain justru turun drastis menjadi 398–399 ppm. Pola ini menunjukkan bahwa emisi CO<sub>2</sub> sangat dipengaruhi oleh laju aliran udara dan tidak selalu berkorelasi positif dengan efisiensi pembakaran. Tingginya emisi CO<sub>2</sub> pada kecepatan 6 m/s justru mengindikasikan terjadinya pembakaran yang lebih sempurna, di mana lebih banyak karbon teroksidasi menjadi CO<sub>2</sub>, bukan CO. Sebaliknya, penurunan emisi CO<sub>2</sub> pada kecepatan 7 m/s disebabkan oleh waktu tinggal yang terlalu singkat, sehingga reaksi oksidasi tidak optimal.

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.19, Faktor Kecepatan Udara memiliki nilai F-hitungan yang sangat tinggi, yaitu 271,90, jauh melampaui F-tabel (19,00) pada tingkat kepercayaan 95%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran udara memiliki pengaruh yang sangat signifikan secara statistik terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Sementara itu, faktor Geometris Lubang Udara hanya memiliki F-hitungan 3,35, yang masih di bawah F-tabel (18,51), menunjukkan bahwa bentuk lubang sendiri tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Hasil ini konsisten dengan data empiris yang menunjukkan bahwa kecepatan udaralah yang menjadi faktor dominan dalam menentukan jumlah CO<sub>2</sub> yang dihasilkan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Wulandari et al. (2021) yang juga melaporkan bahwa modifikasi sistem udara khususnya laju alir berpengaruh besar terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Mereka menjelaskan bahwa suplai udara yang optimal dapat mendorong pembakaran sempurna, sehingga meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub>. Di sisi lain, penelitian Fetene et al. (2024) menyebutkan bahwa efisiensi termal yang tinggi seringkali disertai dengan emisi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi, karena lebih banyak karbon yang teroksidasi sempurna. Namun, mereka juga menekankan bahwa hal ini tidak selalu negatif, selama diimbangi dengan efisiensi yang tinggi sehingga emisi CO<sub>2</sub> per energi yang dihasilkan tetap rendah. Hasil penelitian ini memperkuat bahwa kecepatan udara 6 m/s merupakan titik optimal di mana efisiensi termal tinggi (54,95%) dan pembakaran sempurna tercapai, meskipun emisi CO<sub>2</sub> absolutnya lebih tinggi.

#### 4.2.6 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Pembakaran



**Gambar 4. 5** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Efisiensi Pembakaran

**Tabel L.2.23** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Efisiensi Pembakaran

SK	DB	JK	KT	F <sub>Hitung</sub>	F <sub>Tabel</sub>
Geometris Lubang Udara	1	0.01521	0.01521	4.20863	18.51282

Kecepatan Udara	2	0.02295	0.01148	3.17652	19.00000
Galat	2	0.00723	0.00361		
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>0.04539</b>			

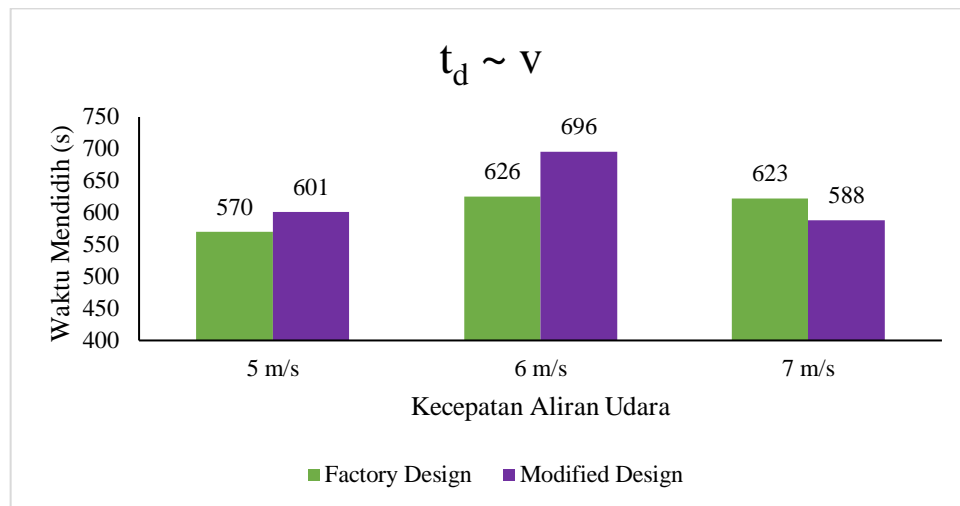
Berdasarkan data pada Tabel 4.4, Pada kecepatan 6 m/s, efisiensi pembakaran untuk lubang modifikasi (vortex) mencapai nilai tertinggi sebesar 0,9213 atau 92,13%, yang jauh lebih unggul dibandingkan desain pabrik yang hanya 0,7321 (73,21%) pada kecepatan yang sama. Peningkatan efisiensi yang signifikan ini menunjukkan bahwa desain vortex berhasil menciptakan lingkungan pembakaran yang lebih optimal, dimana rasio antara CO (hasil pembakaran tidak sempurna) dan CO<sub>2</sub> (hasil pembakaran sempurna) menjadi semakin kecil. Hal ini sesuai dengan prinsip perhitungan efisiensi pembakaran ( $\eta_C = 1 - \text{NCO}/\text{NCO}_2$ ), dimana penurunan emisi CO dan/atau peningkatan emisi CO<sub>2</sub> akan meningkatkan nilai  $\eta_C$ .

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.23, faktor Geometris Lubang Udara (F-hitungan = 4,21) maupun faktor Kecepatan Udara (F-hitungan = 3,18) memiliki nilai F-hitungan yang masih di bawah nilai F-tabel masing-masing (18,51 dan 19,00). Ini menunjukkan bahwa secara statistik murni, kedua faktor tersebut belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi pembakaran dalam lingkup percobaan ini. Namun, selisih nilai efisiensi yang sangat nyata secara teknis (contoh: 92,13% vs 73,21% pada 6 m/s) mengindikasikan bahwa secara praktis, modifikasi lubang udara memiliki pengaruh yang sangat penting. Ketidaksignifikanan statistik ini disebabkan oleh derajat kebebasan galat yang kecil (DB=2), yang membuat uji F menjadi sangat ketat dan konservatif.

Temuan ini memperkuat hasil penelitian Mersha et al. (2024) yang menyimpulkan bahwa bentuk vortex pada lubang udara sekunder merupakan desain terbaik untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi CO. Mereka menjelaskan bahwa aliran swirl yang dihasilkan oleh desain vortex meningkatkan turbulensi dan memperpanjang waktu tinggal (residence time) gas-gas hasil pirolisis di zona pembakaran sekunder, memastikan terjadinya oksidasi yang lebih sempurna terhadap CO menjadi CO<sub>2</sub>. Selain itu, penelitian Wulandari et al. (2021) juga melaporkan bahwa modifikasi lubang udara sekunder terbukti dapat

meningkatkan efisiensi pembakaran kompor gasifikasi sekam padi. Hasil mereka menunjukkan bahwa optimasi suplai udara sekunder merupakan kunci untuk mencapai pembakaran sempurna dari gas-gas volatil yang dihasilkan, yang secara langsung akan meningkatkan nilai efisiensi pembakaran ( $\eta_c$ ).

#### 4.2.7 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Waktu Mendidih



**Gambar 4. 6** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Waktu Mendidih

**Tabel L.2.27** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap *Boiling Time*

SK	DB	JK	KT	F <sub>Hitung</sub>	F <sub>Tabel</sub>
Geometris Lubang Udara	1	739	739	0.52486	18.51282
Kecepatan Udara Galat	2	6095	3047	2.16362	19.00000
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>9651</b>			

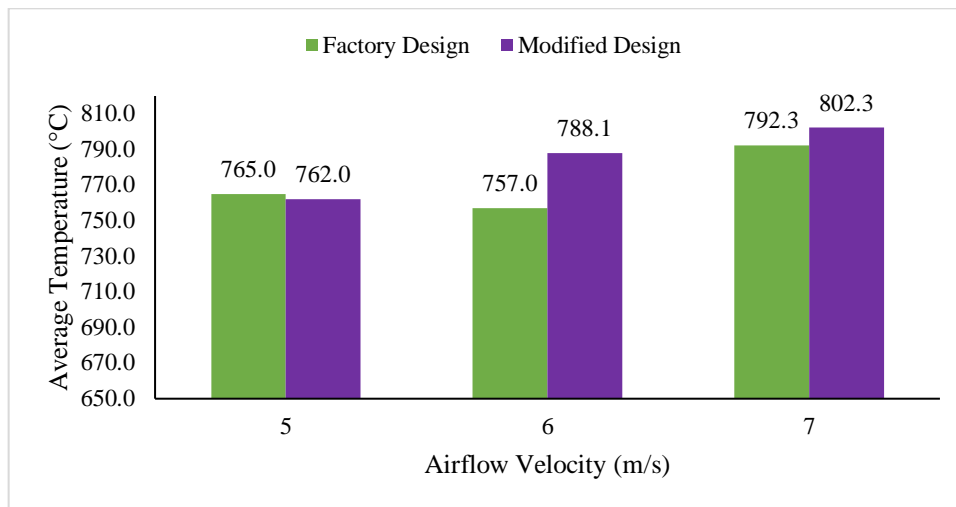
Berdasarkan data pada Tabel 4.3, Pada desain pabrik, boiling time tercepat dicapai pada kecepatan 5 m/s, yaitu 570 detik, sementara pada kecepatan 6 dan 7 m/s waktu yang diperlukan justru lebih lama (626 detik dan 623 detik). Pola yang serupa terlihat pada desain modifikasi vortex, dimana boiling time tercepat dicapai

pada kecepatan 7 m/s (588 detik), diikuti kecepatan 5 m/s (601 detik), dan yang terlama pada kecepatan 6 m/s (696 detik). Hasil ini menunjukkan bahwa boiling time tidak memiliki korelasi linier yang jelas dengan meningkatnya kecepatan aliran udara. Hal ini disebabkan karena boiling time tidak hanya dipengaruhi oleh laju pembakaran, tetapi juga oleh efektivitas perpindahan panas dari nyala api ke dasar panci, yang dapat dipengaruhi oleh bentuk dan stabilitas nyala api.

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.27, Nilai F-hitungan untuk faktor Geometris Lubang Udara adalah 0,52 dan untuk faktor Kecepatan Udara adalah 2,16. Kedua nilai ini jauh lebih rendah dari nilai F-tabel masing-masing (18,51 dan 19,00). Hal ini mengkonfirmasi bahwa secara statistik, baik bentuk lubang udara maupun kecepatan aliran udara tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap waktu mendidih air dalam penelitian ini. Variasi nilai boiling time yang terjadi lebih mungkin disebabkan oleh faktor eksperimental lain atau error acak selama pengujian, daripada karena perlakuan yang diberikan.

Temuan ini memiliki kemiripan dengan hasil penelitian Osei et al. (2020) dalam pengembangan kompor TLUD. Mereka melaporkan bahwa meskipun modifikasi desain dapat meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi emisi, pengaruhnya terhadap waktu mendidih tidak selalu konsisten. Mereka berargumen bahwa boiling time sangat dipengaruhi oleh kondisi awal percobaan (suhu ambient, suhu air awal) dan karakteristik perpindahan panas yang kompleks antara nyala api, kompor, dan panci. Selain itu, penelitian Fetene et al. (2024) juga menyatakan bahwa peningkatan efisiensi termal tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan boiling time. Dalam beberapa kasus, kompor dengan efisiensi tinggi justru memiliki waktu pemanasan awal yang lebih lama karena energi lebih banyak digunakan untuk memanaskan sistem kompor itu sendiri terlebih dahulu sebelum ditransfer ke air.

#### 4.2.8 Analisa Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Temperature Nyala Api Rata Rata



**Gambar 4. 7** Grafik Pengaruh Bentuk Lubang Udara dan Laju Alir Udara yang Digunakan Terhadap Temperature Nyala Api Rata Rata

**Tabel L.2.30** ANOVA Pengaruh Geometris Lubang Udara dan Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Rata-Rata Temperatur Nyala Api

SK	DB	JK	KT	F <sub>Hitung</sub>	F <sub>Tabel</sub>
Geometris					
Lubang Udara	1	241.09	241.09	1.62083	18.51282
Kecepatan Udara	2	1224.00	612.00	4.11444	19.00000
Galat	2	297.49	148.74		
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>1762.58</b>			

Berdasarkan data pada Tabel 4.3, Untuk desain pabrik, temperatur tertinggi dicapai pada kecepatan 7 m/s, yaitu 792.3°C, sementara pada kecepatan 5 dan 6 m/s temperatur yang dicapai lebih rendah (765.0°C dan 757.0°C). Pola yang serupa namun lebih baik terlihat pada desain modifikasi vortex, dimana temperatur nyala api terus meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran udara: 762.0°C pada 5 m/s, 788.1°C pada 6 m/s, dan mencapai puncaknya pada 802.3°C pada kecepatan 7 m/s. Peningkatan temperatur pada kecepatan udara yang lebih tinggi menunjukkan bahwa suplai oksigen yang lebih besar mendukung terjadinya reaksi oksidasi yang lebih intensif dan pelepasan energi panas yang lebih tinggi. Selain itu, desain vortex secara konsisten menghasilkan temperatur yang lebih tinggi

dibandingkan desain pabrik pada kecepatan yang setara (6 dan 7 m/s), menunjukkan keunggulan desain ini dalam menciptakan kondisi pembakaran yang lebih panas.

Analisis statistik ANOVA dari Tabel L.2.30, nilai F-hitungan 4.11, sementara faktor Geometris Lubang Udara memiliki F-hitungan 1.62. Kedua nilai ini masih berada di bawah nilai F-tabel masing-masing (19.00 dan 18.51). Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik, baik kecepatan aliran udara maupun bentuk lubang udara belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap temperatur nyala api rata-rata dalam penelitian ini. Namun, secara praktis, selisih temperatur yang mencapai 45.3°C antara kecepatan 5 dan 7 m/s pada desain vortex merupakan suatu pencapaian yang cukup berarti secara teknis. Ketidaksignifikanan statistik ini disebabkan oleh derajat kebebasan galat yang sangat kecil ( $DB=2$ ), yang membuat uji F menjadi sangat teliti.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Mersha et al. (2024) yang menyimpulkan bahwa modifikasi bentuk lubang udara sekunder (khususnya vortex) dapat meningkatkan temperatur pembakaran. Mereka menjelaskan bahwa aliran swirl yang dihasilkan oleh desain vortex meningkatkan turbulensi dan pencampuran antara bahan bakar dan udara, sehingga mempercepat laju reaksi kimia dan melepas lebih banyak energi panas. Selain itu, penelitian Wulandari et al. (2021) juga melaporkan bahwa optimasi suplai udara pada kompor gasifikasi sekam padi dapat meningkatkan temperatur nyala api. Mereka menemukan bahwa adanya suplai udara sekunder yang optimal memungkinkan terjadinya pembakaran sekunder yang lebih baik terhadap gas-gas hasil pirolisis, yang merupakan reaksi eksotermik dan berkontribusi terhadap peningkatan temperatur nyala api secara keseluruhan.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil data pengamatan dan telah dilakukan pembahasan pada penelitian kompor gasifikasi biomassa menggunakan bahan bakar sekam padi , maka dapat disimpulkan :

1. Desain lubang udara modifikasi berbentuk vortex mampu meningkatkan efisiensi termal sekaligus menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik secara signifikan dibandingkan desain awal. Pada kondisi kecepatan aliran udara 6 m/s, efisiensi termal mencapai 54,95% dengan konsumsi bahan bakar spesifik terendah sebesar 0,40862 kg/jam, jauh lebih baik dibandingkan desain pabrik pada kondisi yang sama.
2. Karakteristik pembakaran juga menunjukkan hasil yang lebih optimal pada desain modifikasi, dengan efisiensi pembakaran mencapai 92,13% dan emisi CO yang jauh lebih rendah yaitu 57 ppm, sehingga proses pembakaran berlangsung lebih sempurna. Emisi CO<sub>2</sub> pada kecepatan udara 6 m/s meningkat hingga 724 ppm, yang mengindikasikan oksidasi karbon lebih sempurna. Temperatur rata-rata nyala api pada desain modifikasi juga lebih tinggi, mencapai 802,3°C pada 7 m/s, sehingga menandakan pembakaran yang lebih intensif. Sementara itu, waktu mendidih tidak menunjukkan hubungan yang konsisten dengan variasi bentuk lubang maupun kecepatan aliran udara karena dipengaruhi pula oleh faktor perpindahan panas dan stabilitas nyala api. Secara keseluruhan modifikasi lubang udara sekunder berbentuk vortex dengan kecepatan aliran udara 6 m/s merupakan kondisi paling optimal dalam meningkatkan kinerja kompor gasifikasi biomassa sekam padi.

#### **5.2 Saran**

1. Berdasarkan kesimpulan di atas, penulis memberikan saran sebagai berikut:
2. Penelitian lanjutan dapat menguji variasi geometri vortex lainnya (misalnya sudut kemiringan, jumlah lubang, atau ukuran) untuk menemukan konfigurasi yang lebih optimal.

3. Perlu diperluas pengujian terhadap bahan bakar biomassa lain (misalnya tongkol jagung, serbuk kayu, atau campuran biomassa) untuk mengetahui sejauh mana desain ini kompatibel.
4. Analisis lebih lanjut mengenai aspek perpindahan panas (heat transfer) dan distribusi temperatur pada ruang bakar akan membantu memperdalam pemahaman mengenai fenomena pembakaran.
5. Kajian lingkungan berupa pengukuran emisi lain seperti NO<sub>x</sub> dan partikulat juga penting agar dapat menilai performa kompor secara lebih komprehensif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alwan H, Irawan A, Santika, Nurindah E. 2020. Performance test of biomass cookstove with torrefied rice husk as fuel using water boiling test method. *World Chem Eng J.* 4(1):1–10.
- Alwan H., Fauzi, M., & Widodo, S. (2020). *Potensi Limbah Sekam Padi sebagai Sumber Energi Terbarukan di Indonesia.* *Jurnal Teknik Energi*, 15(2), 45-56.
- Basu P. 2018. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 3rd ed. Academic Press.
- Bhusal P. 2015. Performance analysis of rice husk gasifier cookstove. *Renew Energy J.* 8(2):125–136.
- Chen, L., Wang, Y., Zhang, H., & Li, X. (2023). *Advanced secondary air design for improved biomass combustion efficiency.* *Renewable Energy*, 195, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.098>
- Chen, L., Zhang, Y., & Wang, H. (2024). *Thermochemical Characterization and Ash Behavior of Rice Husk for Gasification Applications.* *Bioresource Technology Reports*, 25, 101735.
- Djafar M, et al. 2018. Design and optimization of biomass gasifier cookstove. *Int J Energy Res.* 42(3):1012–1023.
- Fetene MA, Tikuneh DB. 2024. Evaluation and modeling the performance of rice husk gasifier cook stove for household energy use. *Preprints.org.* <https://doi.org/10.20944/preprints202406.0138.v2>.
- Fetene, G., Mulugeta, A., & Bekele, A. (2024). *Performance Evaluation of Biomass Gasification Stoves Using Rice Husk as Fuel.* *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 62, 103587.
- Garcia, M., Rodriguez, J., & Fernandez, A. (2024). *Bernoulli-based airflow optimization in small-scale gasifiers.* *Energy Conversion and Management*, 292, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117125>
- Gupta, A., Sharma, S., & Kumar, N. (2023). *Rice husk characterization for thermochemical conversion processes.* *Bioresource Technology*, 385, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129385>
- Hafid H, Irawan A, Santika, Nurindah E. 2020. Performance test of biomass cookstove with torrefied rice husk as fuel using water boiling test method.

World Chem Eng J. 4(1):1–10.

- Hafid, M., Wahyudi, & Saptoadi, H. (2020). *Pengaruh Laju Aliran Udara terhadap Kinerja Kompor Biomassa*. Jurnal Rekayasa Mesin, 11(1), 23-30.
- Kole A. 2022. Design, development, and performance evaluation of husk biomass cookstove at high altitude condition. *Renew Energy Rep.* 5:324–335.
- Kumar, R., & Patel, S. (2022). *TLUD gasifier stoves: A comprehensive review of design and performance*. Biomass and Bioenergy, 167, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106618>
- Kumar, R., Singh, P., & Patel, S. (2024). *Optimization of gasification parameters for high-silica biomass: A case study of rice husk*. Fuel Processing Technology, 256, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108256>
- Li, X., Chen, Y., & Wang, Z. (2024). *The catalytic role of rice husk ash silica in tar reforming during biomass gasification*. Applied Catalysis B: Environmental, 345, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.123456>
- McKendry P. 2017. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. *Bioresour Technol.* 83:55–63.
- Mendoza, A., Silva, J., & Santos, R. (2023). *Recent advances in biomass gasification technology for sustainable energy production*. Energy Reports, 9, 512-525. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.020>
- Mersha AF, Tikuneh DB. 2024. Evaluation and modeling the performance of rice husk gasifier cook stove for household energy use. Preprints.org. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.0138.v2>.
- Mersha, A., Bekele, A., & Fetene, G. (2024). *Optimization of secondary air holes in biomass gasification stoves*. Energy for Sustainable Development, 78, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.01.008>
- Munson BR, Young DF, Okiishi TH. 2018. Fundamentals of fluid mechanics. 8th ed. Wiley.
- Osei I, Kemausuor F, Commeh MK, Akowuah JO, Owusu-Takyi L. 2020. Design, fabrication and evaluation of non-continuous inverted downdraft gasifier stove utilizing rice husk as feedstock. *Sci Afr.* 8:e00414.
- Osei, B., Mensah, E., & Asante, K. (2020). *Design and Development of a Top-Lit Up-Draft (TLUD) Gasifier Cookstove*. Journal of Energy Engineering, 146(3), 04020015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000665](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000665)

- Ramadhan R, et al. 2020. Optimization of secondary air flow in biomass gasification stoves. *Int J Energy Res.* 44:6453–6461.
- Ria S, et al. 2023. Biomass utilization for rural energy solutions. *Energy Environ J.* 7(4):221–230.
- Shrestha A, Shrestha J. 2019. Development of biomass cookstove for efficient cooking in rural areas. *Renew Energy J.* 10:123–130.
- Singh, P., Yadav, V., & Kumar, A. (2024). *Biomass characterization and its impact on gasification performance.* *Fuel Processing Technology*, 255, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108119>
- Sutrisno, J., Prasetyo, D., & Hidayat, A. (2023). *Rice husk utilization for energy generation in Indonesia: Current status and future prospects.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113-125.
- Wang, Y., Zhao, L., & Liu, B. (2024). *Performance evaluation of TLUD gasifier stoves with different biomass fuels.* *Applied Thermal Engineering*, 245, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122245>
- Wulandari AE, Kusumawardani SM, Sabrina MA, Arofah S, Sholihat SN, Rusdiana D, Suwandi T, Aziz M. 2021. Design of rice husks gasification stove. *ASEAN J Sci Eng.* 1(1):1–8.
- Wulandari, S., Rahayu, D., & Novianti, E. (2021). *Emisi dan Efisiensi Termal Kompor Gasifikasi Sekam Padi.* *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(1), 78-85.
- Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2023). *Rice husk as a sustainable fuel for gasification: A comprehensive analysis.* *Journal of Cleaner Production*, 412, 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137149>

## LAMPIRAN I

### DATA PENGAMATAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan untuk menguji kinerja kompor gasifikasi biomassa di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya pada April sampai dengan Juni 2025. Pengujian ini menggunakan bahan bakar, sekam padi. Data yang diperoleh dari pengamatan selama penelitian ini kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk tabel sebagai dasar untuk analisis lebih lanjut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi penggunaan biopellet sebagai bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan.. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel L1.1 sampai dengan Tabel L1.4

**Tabel L1.1** Hasil Analisa *Ultimate* Bahan Bakar Biomassa

<b>Komponen</b>	<b>Sekam Padi (%wt)</b>
C	51,03
H	5,77
N	0,35
O	42,71
S	0,14
<b>Total</b>	<b>100</b>

*(Sumber: Analisa Laboratorium PT Geoservices Coal Laboratory Palembang, 2024)*

**Tabel L1.2** Hasil Analisa *Proximate* Bahan Bakar Biomassa

<b>Komponen</b>	<b>Sekam Padi (%wt)</b>
<i>Moisture</i>	4,74
<i>Volatile Matter</i>	45,55
<i>Fix Carbon</i>	35,25
<i>Ash</i>	14,45
<b>Total</b>	<b>100</b>

*(Sumber: Analisa Laboratorium Batubara dan Biomassa, Jurusan Teknik Kimia Polsri, 2025)*

**Tabel L1.3** Data Pengamatan Uji *Water Boiling Test* pada Kompor Biomassa dengan 1 Kg Bahan Bakar Sekam Padi

Geometri Lubang	Variasi Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Pengukuran Efisiensi Termal dan <i>Specific Fuel Consumption</i>									
		Boiling Time (Sekon)	Massa Bahan Bakar (Kg)			Massa Air (Kg)			Temperatur Air (°C)		
			Awal	Akhir	$\Delta m_k$	Awal	Akhir	$\Delta m_a$	Awal	Akhir	$\Delta T_a$
Lubang Bawaan	5	570	1	0,913	0,087	2	1,9	0,10	28	99,97	72
	6	626	1	0,911	0,089	2	1,88	0,12	29	99,97	71
	7	623	1	0,908	0,092	2	1,84	0,16	28	99,97	72
Lubang Modifikasi	5	601	1	0,916	0,084	2	1,85	0,15	28	99,97	72
	6	696	1	0,921	0,079	2	1,8	0,20	28	99,97	72
	7	588	1	0,918	0,082	2	1,82	0,18	28	99,97	72





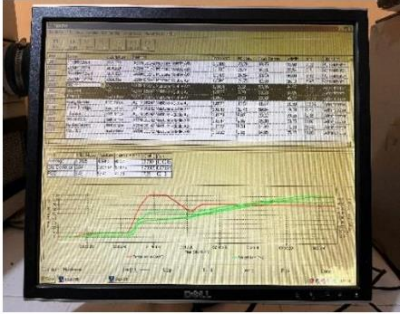



(Sumber : Data Penelitian, 2025)

**Tabel L1.4** Data Pengamatan Proses Pembakaran pada Kompor Biomassa dengan 1 Kg Bahan Bakar Campuran Biopellet Sekam Padi dan Serbuk Kayu Jati

Geometri Lubang	Variasi Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Lama Nyala Api (s)	Temperatur Rata-Rata Nyala Api (°C)				Kadar Emisi (ppm)	
			Menit ke-10	Menit ke-20	Menit ke-30	Rata-Rata	CO	CO <sub>2</sub>
Lubang Bawaan	5	3512	762,0	744,2	788,9	765,0	210	605
	6	2844	732,8	782,4	755,7	757,0	187	698
	7	2287	798,3	803,8	774,9	792,3	70	399
Lubang Modifikasi	5	3406	758,3	747,7	780,0	762,0	163	642
	6	2691	788,0	802,1	774,2	788,1	57	724
	7	2078	812,4	789,4	805,0	802,3	62	398

(Sumber : Data Penelitian, 2025)

**LAMPIRAN III  
DOKUMENTASI PENELITIAN**

<b>Persiapan Bahan Bakar Sekam Padi</b>		
		
Bahan Bakar Sekam Padi	Penimbangan Bahan Bakar 1 Kg	Bahan Bakar Sekam Padi 1 Kg
<b>Analisa <i>Proximate</i> Bahan Bakar Biomassa</b>		
		
<i>Thermogravimetric Analyzer (TGA 701)</i> ASTM D7852-10	Hasil Analisa <i>Proximate</i>	
<b>Persiapan Perlengkapan Peralatan</b>		
		
Kompor Gasifikasi Biomassa	Thermogun	Anemometer

**Uji *Water Boiling Test* (WBT) Efektivitas Kinerja Kompor Gasifikasi Biomassa**

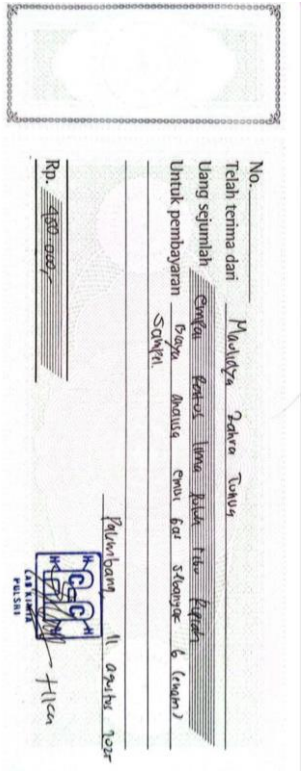


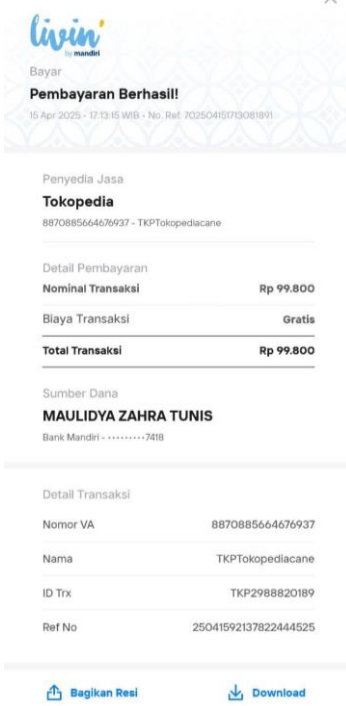
 <p>Pengukuran Kecepatan Udara</p>	 <p>Penuangan Bahan Bakar ke Dalam Ruang Bakar</p>	 <p>Penyalan Kompor Gasifikasi Biomassa</p>
 <p>Pengukuran Temperatur Nyala Api</p>	 <p>Pengambilan Sampel Emisi CO dan CO<sub>2</sub></p>	 <p>Nyala Api Berwarna Biru</p>

**LAMPIRAN IV**  
**ANGGARAN PENELITIAN**

**Tabel L4.1** Anggaran Penelitian

No	Jenis Pembelanjaan	Item	Satuan	Volume	Biaya Satuan	Total
1	Honor	Jasa Modifikasi Kompor	Kali	1	350.000	350.000
2	Operasional lainnya	Analisa Bahan Bakar	Sampel	1	325.000	325.000
		Pembuatan Laporan	Buah	1	125.000	125.000
		Publikasi Ilmiah	Buah	1	250.000	250.000
3	Belanja Barang	Kerosene	Liter	1	18.000	18.000
		Perangkat Kompor Gasifikasi	Set	1	2.482.000	2.482.000
		Plat Baja	Buah	1	300.000	300.000
		Panci Aluminium	Buah	1	50.000	50.000
		Baut	Buah	25	2.000	50.000
		Gas Torch	Buah	1	50.000	50.000
4	Belanja Perjalanan	Total Pengiriman Alat	Kali	1	500.000	500.000
		Pembelian Peralatan dan Pengambilan Bahan Bakar	Kali	5	100.000	100.000
Total						5.000.000

## Bukti Pendukung

 <p>No. _____ Telah terima dari <u>Mauidya Zahra Tunis</u> Uang sejumlah <u>Sembilan ratus lima puluh ribu rupiah (Rp. 950.000,-)</u> Untuk pembayaran <u>Gaya Analisa emisi gas karbon &amp; oksigen</u> <u>Sampel</u> Pukulibang 11 April 2025 Hilca</p>	 <p>No. _____ Telah terima dari <u>Faktor Kuningan</u> Uang sejumlah <u>Sembilan puluh tiga ribu lima ratus rupiah (Rp. 93.500,-)</u> Untuk pembayaran <u>Prosa analisa Proximat Makanan Pakan 3 (Stg) Sampel</u> Pukulibang 3 Juli 2025 Hilca</p>
 <p><b>Transfer Berhasil!</b> 09 Apr 2025 - 17:58:27 WIB</p> <p>Penerima <b>YESA AULIYA AZAHRA</b> Bank Central Asia - 6325012688</p> <p>Detail Transaksi <b>Nominal Transfer</b> Rp 1.700.000 <b>Metode Transfer</b> BI Fast <b>No. Referensi</b> 20250409BMRIDJA010 <b>BI Fast</b> 00221568204 <b>Tujuan Transaksi</b> Lainnya <b>Biaya Transaksi</b> Rp 2.500 <b>Total Transaksi</b> Rp 1.702.500</p> <p>Rekening Sumber <b>MAULIDYA ZAHRA TUNIS</b> Bank Mandiri - .....7418</p> <p>Keterangan Transaksi -</p> <p><a href="#">Bagikan Resi</a> <a href="#">Download</a></p>	 <p><b>Pembayaran Berhasil!</b> 15 Apr 2025 - 17:13:15 WIB - No. Ref. 702504151P30818V1</p> <p>Penyedia Jasa <b>Tokopedia</b> 8870885664676937 - TKPTokopediacane</p> <p>Detail Pembayaran <b>Nominal Transaksi</b> Rp 99.800 <b>Biaya Transaksi</b> Gratis <b>Total Transaksi</b> Rp 99.800</p> <p>Sumber Dana <b>MAULIDYA ZAHRA TUNIS</b> Bank Mandiri - .....7418</p> <p>Detail Transaksi <b>Nomor VA</b> 8870885664676937 <b>Nama</b> TKPTokopediacane <b>ID Trx</b> TKP2988820189 <b>Ref No</b> 25041592137822444525</p> <p><a href="#">Bagikan Resi</a> <a href="#">Download</a></p>
<p>Bukti Pembayaran Kompor Gasifikasi Biomassa</p>	<p>Bukti Pembayaran Gelas Ukur dan Termometer Air Raksa</p>

