

**SKRIPSI**

**Analisis Visualisasi Nyala Api *Co-firing* Menggunakan Rocket Stove**

**Disusun dan Diajukan Oleh:**

**FATHIRA NUR NAFISAH  
D021 20 1036**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2024**



**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI****ANALISIS VISUALISASI NYALA API *CO-FIRING* MENGGUNAKAN  
*ROCKET STOVE***

Disusun dan diajukan oleh

**FATHIRA NUR NAFISAH**

**D021201036**

Telah dipertahankan di hadapan panitia ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 6 Agustus 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama



**Dr.Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT**

**NIP. 19791112 200812 2 002**

Ketua Program Studi,



**Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST., MT**

**NIP. 19770707 200511 1 001**



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fathira Nur Nafisah

NIM : D021201036

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S-1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

“Analisis Visualisasi Nyala Api *Co-Firing* Menggunakan *Rocket Stove*”

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa , 6 Agustus 2024

pernyataan  
  
Fathira Nur Nafisah



**Fathira Nur Nafisah**

### **ABSTRAK**

**FATHIRA NUR NAFISAH**, *Analisis Visualisasi Nyala Api Co-Firing Menggunakan Rocket Stove* (dibimbing oleh Novriany Amaliyah)

Seiring dengan penambahan penduduk dan pertumbuhan industri, maka penggunaan akan bahan bakar juga meningkat sehingga dapat berdampak pada naiknya jumlah konsumsi bahan bakar yang berakibat pada semakin menipisnya cadangan minyak bumi yang ada. Co-firing dianggap sebagai pendekatan jangka pendek yang paling menjanjikan untuk mengurangi CO<sub>2</sub>, dengan mitigasi emisi melalui penggunaan biomassa. Teknologi co-firing dilakukan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang hampir punah.

Tujuan penelitian ini untuk menganalisis karakteristik pembakaran dari bahan bakar biomassa tempurung kelapa, cangkang kepayang dan serbuk kayu yang meliputi waktu pembakaran, laju pembakaran, temperatur pembakaran dan menganalisis visualisasi nyala api hasil pembakaran dari biomassa *rocket stove*.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dimulai pada bulan Desember 2023 di Laboratorium Internal Combustion Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penelitian ini dilakukan dengan tahapan mengidentifikasi dan perumusan masalah, melakukan studi pustaka, pengambilan data, melakukan analisa hasil dan pembahasan, serta penarikan kesimpulan dan saran.

Hasil penelitian ini menunjukkan tempurung kelapa, cangkang kepayang, dan serbuk kayu, dimana memiliki laju pembakaran berurutan 0,0000566 gr/menit, 0,000082 gr/menit, dan 0,000145 gr/menit. Untuk waktu pembakaran variasi biomassa tempurung kelapa, cangkang kepayang, dan serbuk kayu, memiliki waktu nyala api berurutan 5 menit, 3 menit 25, dan 2 menit 30 detik. AFR untuk biomassa tempurung kelapa 106,007 cangkang kepayang 87,805 dan serbuk kayu 66,207. ER untuk biomassa tempurung 492,685 cangkang kepayang 412,23 dan serbuk kayu 310,83. Kemudian laju alir volumetrik untuk biomassa tempurung kelapa 0,005 m<sup>3</sup>/s untuk cangkang kepayang 0,006 m<sup>3</sup>/s dan untuk serbuk kayu jati 0,008 m<sup>3</sup>/s. Pada visualisasi nyala api, warna nyala api tidak didapati ada yang berwarna kebiru-biruan. Namun temperatur nyala api tertinggi berhasil menyentuh angka sebesar 520°C pada laju aliran udara 0,0087 kg/s pada biomassa serbuk kayu. Warna api yang dihasilkan pada ketiga biomassa yang digunakan yaitu warna jingga.

*Kata Kunci* : Biomassa, Co-firing, AFR, ER, Visualisasi Nyala Api



## ABSTRACT

**FATHIRA NUR NAFISAH**, *Co-Firing Flame Visualization Analysis Using Rocket Stove* (Supervised oleh Novriany Amaliyah)

Along with population growth and industrial growth, the use of fuel also increases, which can result in an increase in fuel consumption which results in the depletion of existing petroleum reserves. Co-firing is considered the most promising short-term approach to reducing CO<sub>2</sub>, by mitigating emissions through the use of biomass. Co-firing technology is carried out to reduce the use of fossil fuels which are almost extinct.

The aim of this research is to analyze the combustion characteristics of coconut shell biomass fuel, kepayang shells and sawdust which includes burning time, burning rate, burning temperature and analyzing the visualization of the flame resulting from combustion from rocket stove biomass.

This research was carried out experimentally starting in December 2023 at the Internal Combustion Laboratory in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hasanuddin University. This research was carried out in the stages of identifying and formulating the problem, conducting a literature study, collecting data, analyzing the results and discussion, as well as drawing conclusions and suggestions.

The results of this research show that coconut shells, kepayang shells, and sawdust have sequential combustion rates of 0,0000566 gr/minute, 0,000082 gr/minute, and 0,000145 gr/minute. For the burning time of variations in coconut shell biomass, kepayang shells, and sawdust, the flame times are respectively 5 minutes, 3 minutes 25, and 2 minutes 30 seconds. AFR for coconut shell biomass 106.007 , kepayang shell 87.805, and wood dust 66.207. Then for ER for shell biomass 492.685, kepayang shell 412.23 and sawdust 310.83 . Volumetric flow rate for coconut shell biomass 0,005 m<sup>3</sup>/s. kepayang shell 0,006 m<sup>3</sup>/s. and sawdust 0,008 m<sup>3</sup>/s. In the visualization of the flames, the color of the flames was not found to be bluish in color. However, the highest flame temperature managed to reach 520°C at an air flow rate of 0.0087 kg/s on sawdust biomass. The color of the fire produced in the three biomasses used is orange.

s : Biomass, Co-firing, AFR, ER, Flame Visualization



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa kita panjatkan ke-hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan berkat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Analisis Visualisasi Nyala Api Co-firing Menggunakan Rocket Stove**” yang mana merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Selama proses pengerjaan skripsi ini penulis menerima begitu banyak bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan serta bantuan selama penyusunan skripsi ini.

1. Kedua orang tua tercinta ayahanda Alm. Abd. Sulaiman saya persembahkan skripsi ini kepada beliau semoga ayah tersenyum dan tenang di surga Nya dan Ibu Fatimah Nyuru terimakasih tak terhingga atas limpahan kasih sayang, doa yang tidak pernah putus, selalu memberi semangat dan motivasi untuk selalu sabar di setiap proses yang dilalui dan telah mengorbankan segalanya demi kelancaran proses perkuliahan penulis.
2. Bapak Dr. Ir.Muhammad Syahid, ST., MT selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bantuan dan kemudahan yang diberikan selama proses perkuliahan hingga selesainya skripsi ini.
3. Ibu Dr.Eng Novriany Amaliyah, ST., MT. sebagai Dosen Pembimbing yang telah sabar membimbing, memberikan waktu, arahan, dan saran selama proses pengerjaan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr.Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT. dan Bapak Ir. Andi Mangkau, MT. selaku penguji I dan penguji II yang telah memberikan saran dan arahan dari awal hingga selesai selesainya proses skripsi ini.

Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu, nasehat dan pengalaman selama menempuh studi di dunia perkuliahan.



6. Kakak Citri Novianti Irlan yang telah meminjamkan alat penelitian untuk pengambilan data sehingga terselesainya skripsi ini.
  7. Teman – teman saya Arsul Sani, Dhiarz Alfarezy dan Muhammad Taufiq N.A.N yang telah bersedia menemani dan membantu selama masa penelitian dan penyusunan skripsi.
  8. Teman - teman Teknik Mesin angkatan 2020/ZTATOR 2020 yang senantiasa membantu, mendukung, dan berjuang bersama sejak mahasiswa baru hingga saat ini.
  9. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah memberi dukungan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini
- Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna walaupun telah menerima bantuan dari berbagai pihak. Apabila terdapat kesalahan-kesalahan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis dan bukan para pemberi bantuan. Kritik dan saran yang membangun akan lebih menyempurnakan skripsi ini.

Gowa , 6 Agustus 2024

**Penulis**



## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACK</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Tujuan Penelitian .....	3
I.4 Manfaat Penelitian .....	3
I.5 Batasan Masalah .....	3
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b> .....	<b>4</b>
II.1 Biomassa 4	
II.2 Karakteristik Nyala Api.....	7
II.3 Tungku Roket Biomassa.....	8
II.4 <i>Co-firing</i> .....	10
II.5 Tempurung Kelapa .....	11
II.6 Tanaman Kepayang.....	12
II.7 Serbuk Kayu.....	13
II.8 Parameter Pengujian .....	14
II.8.1 Laju Alir Udara.....	14
II.8.2 Laju Pembakaran .....	15
II.8.3 Rasio Udara Bahan Bakar Aktual (Air Fuel Ratio Actual) .....	15
II.8.4 Rasio Ekivalen (Equivalence Ratio) .....	15
Laju Alir Volumetrik .....	15
<b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>16</b>
Lokasi dan Tempat Penelitian .....	16
Alat dan Bahan.....	16



III.2.1 Alat yang digunakan.....	16
III.2.2 Bahan yang digunakan .....	18
III.3 Skema Penelitian.....	20
III.4 Metode Pengambilan Data .....	21
III.4.1 Studi Lapangan ( <i>Field Research</i> ) .....	21
III.4.2 Uji eksperimen ( <i>experimental research</i> ). .....	21
III.5 Prosedur Penelitian.....	21
III.5.1 Persiapan biomassa .....	21
III.5.2 Persiapan Batu Bara .....	21
III. 5.3 Pengujian Alat.....	22
III.6 Diagram Penelitian.....	23
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>24</b>
IV.1 Data Pengujian.....	24
IV.1.1 Pengujian Biomassa Tempurung Kelapa.....	24
IV.1.2 Pengujian biomassa cangkang kepayang .....	24
IV.1.3 Pengujian biomassa serbuk kayu jati putih.....	25
IV.1.4 Tinggi Nyala Api .....	25
IV.2 Laju Konsumsi Pembakaran .....	25
IV.3 Laju Aliran Udara .....	27
IV.4 AFR Stokiometri.....	28
IV.5 Rasio udara bahan bakar Aktual ( <i>Air Fuel Ratio Actual</i> ) .....	28
IV.6 Rasio Ekuivalen ( <i>Equivalen Ratio</i> ) .....	29
IV.5 Laju Aliran Volumetrik.....	30
IV.5 Grafik dan Pembahasan .....	32
IV.5.1 Analisis Variasi Biomassa Terhadap Laju Pembakaran .....	32
IV.5.2 Analisis Variasi Biomassa Terhadap Waktu Pembakaran .....	33
IV.5.3 Analisis Variasi Biomassa terhadap Rasio Udara Bahan Bakar (AFR actual) .....	34
IV.5.4 Analisis Variasi Biomassa terhadap Rasio Ekuivalen .....	36
IV.5.5 Analisis Variasi Biomassa terhadap Laju Alir Volumetrik.....	37
IV.5.6 Analisis Temperature Biomassa Tempurung Kelapa Terhadap Waktu pembakaran .....	38



IV.5.7 Analisis Temperature Biomassa Cangkang Kepayang Terhadap Waktu Pembakaran .....	40
IV.5.9 Analisis Temperature Biomassa Serbuk Kayu Jati terhadap Waktu Pembakaran .....	41
IV.5.10 Analisis Tinggi Nyala Api terhadap Waktu Pembakaran .....	43
IV.6 Analisis Visualisasi Nyala Api.....	45
IV.6.1. Visualisasi Nyala Api Biomassa Tempurung Kelapa .....	45
IV.6.2 Visualisasi Nyala Api Biomassa Cangkang Kepayang.....	45
IV.6.3 Visualisasi Nyala Api Biomassa Serbuk Kayu.....	45
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>47</b>
V.1 Kesimpulan .....	47
V.2 Saran .....	47
<b>DAFTAR PUSKATA .....</b>	<b>48</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>53</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Teknologi Konversi Biomassa .....	6
Gambar 3.1 Tungku Rocket Stove .....	16
Gambar 3.2 Termokopel Dan Sensor Tipe K .....	16
Gambar 3.3 Timbangan Digital .....	17
Gambar 3.4 Anemometer .....	17
Gambar 3.5 Tripod .....	18
Gambar 3.6 Cawan Besi .....	18
Gambar 3.7 Tempurung Kelapa .....	18
Gambar 3.8 Cangkang Kepayang .....	19
Gambar 3.9 Serbuk Kayu Jati .....	19
Gambar 3.10 Skema Penelitian .....	20
Gambar 5.1 Variasi Biomassa Terhadap Laju Pembakaran .....	32
Gambar 5.2 Variasi Biomassa Terhadap Waktu Pembakaran .....	33
Gambar 5.4 Analisis Variasi Biomassa terhadap Rasio Udara Bahan Bakar .....	34
Gambar 5.5 Analisis Variasi Biomassa terhadap Rasio Ekuivalen.....	36
Gambar 5.6 Analisis Variasi Biomassa terhadap Laju Alir Voumetrik.....	37
Gambar 5.6 Temperature Biomassa Tempurung Kelapa Terhadap Waktu Pembakaran .....	38
Gambar 5.7 Temperature Biomassa Cangkang Kepayang Terhadap Waktu Pembakaran .....	39
Gambar 5.8 Temperature Biomassa Serbuk Kayu Jati Terhadap Waktu Pembakaran .....	40
Gambar 5.9 Tinggi Nyala Api.....	41



**DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Potensi Biomassa Di Indonesia .....	4
Tabel 2.2 Komposisi Kimia Serbuk Kayu .....	14
Tabel 4.1 Temperature Pengujian Biomassa Tempurung Kelapa .....	24
Tabel 4.2 Temperature Pengujian Biomassa Cangkang Kepayang .....	24
Tabel 4.3 Temperature Pengujian Biomassa Serbuk Kayu Jati .....	25
Tabel 4.4 Tinggi Nyala Api .....	25
Tabel 4.5 Laju Pembakaran Biomassa .....	27
Tabel 4.6 Laju Alir Udara .....	28
Tabel 4.7 Air Fuel Ratio Actual.....	29
Tabel 4.8 Ratio Equevalen .....	30
Tabel 4.9 Laju Alir Volumetrik .....	31



### DAFTAR SIMBOL

$\dot{m}_a$	Laju alir udara	kg/s
FCR atau $\dot{m}_f$	Laju konsumsi bahan bakar	kg/s
$\rho_{udara}$	Massa jenis udara	kg/m <sup>3</sup>
$A_{pipa}$	Luas pipa udara supply	m <sup>2</sup>
$V_u$	Kecepatan udara supply	m/s
$AFR_{act}$	Rasio Udara Bahan Bakar	-
ER	Rasio Equivalen	-



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **I.1 Latar Belakang**

Seiring dengan penambahan penduduk dan pertumbuhan industri, maka penggunaan akan bahan bakar juga meningkat sehingga dapat berdampak pada naiknya jumlah konsumsi bahan bakar yang berakibat pada semakin menipisnya cadangan minyak bumi yang ada. Untuk menanggulangi hal tersebut perlu diupayakan penyediaan sumber-sumber energi baru dan terbarukan (Ridhuan & Irawan, 2019).

Energi merupakan penggerak utama roda perekonomian nasional. Konsumsinya terus meningkat mengikuti permintaan berbagai sektor pembangunan khususnya listrik, industri dan transportasi. Kebutuhan energi saat ini dipenuhi oleh sumberdaya energi fosil baik minyak bumi, gas dan batubara. Sebagai energi tak terbarukan keberadaan sumberdaya energi fosil suatu saat akan habis. Peran batubara dalam sistem pasokan energi nasional akan ditingkatkan namun penggunaan batubara sebagai pembangkit energi memiliki suatu kendala, yaitu dihasilkannya emisi gas rumah kaca (GRK) sebagai penyebab utama pemanasan global yang sedang marak diperdebatkan. Salah satu cara mengurangi emisi GRK adalah dengan pembakaran cofiring batubara-biomassa (Suganal & Hudaya, 2019).

Co-firing secara umum dapat dinyatakan sebagai suatu proses pembakaran dua material bahan bakar berbeda yang dioperasikan secara bersamaan (Suganal & Hudaya, 2019). Co-firing merupakan pembakaran dua (atau lebih) jenis material yang berbeda pada saat bersamaan dan mengkombinasikannya dengan bahan bakar alternatif terbarukan yang lebih murah dengan kombinasi rasio tertentu sehingga dapat mengurangi pemakaian batubara dan menekan biaya pokok produksi. Cofiring dianggap sebagai pendekatan jangka pendek yang paling menjanjikan untuk mengurangi CO<sub>2</sub>, dengan mitigasi emisi melalui penggunaan biomasa (Farras Ilham & Christwardana, 2023).



Biomassa adalah semua material biologis berasal dari tanaman atau hewan yang bisa digunakan untuk menghasilkan panas dan/atau tenaga, bahan bakar atau pengganti produk dan material berbasis fosil. Materialnya mengandung unsur karbon yang dapat menghasilkan panas saat dioksidasi. (Suganal & Hudaya, 2019). Energi biomassa dapat menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil (minyak bumi) karena beberapa sifatnya yang menguntungkan yaitu dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang dapat diperbaharui (*renewable resources*), relatif tidak mengandung sulfur sehingga tidak menyebabkan polusi udara, dan mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hutan dan pertanian (Qistina et al., 2016).

Tungku merupakan sebuah perangkat yang digunakan untuk menghasilkan panas yang biasanya digunakan untuk memasak atau bisa disebut juga kompor. Biasanya tungku dapat ditemukan di dapur dan bahan bakarnya dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu cair, padat, dan gas. Menurut pengertian diatas dapat dikatakan bahwa tungku biomassa merupakan perangkat tungku yang memanfaatkan kalor hasil pembakaran biomassa di dalam ruang pembakarannya (Abdul Ajis et al., 2015)

Teknologi co-firing saat ini telah banyak dilakukan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang hampir punah. Biomassa dimasukkan ke dalam tungku dengan batubara. Biomassa bisa mengurangi kerusakan akibat pembakaran batu bara terhadap lingkungan. Kemudian ketika batubara dibakar, gas CO<sub>2</sub> dilepaskan ke udara. Jadi, menggunakan energi alternatif untuk memanaskan api dinilai baik untuk lingkungan. Namun perlu adanya penelitian seberapa berpengaruhnya penggunaan biomassa pada co-firing ini untuk melihat karakteristik pembakaran yang meliputi waktu pembakaran, laju pembakaran, temperatur pembakaran serta visualisasi nyala api di dalam tungku roket biomassa. Biomassa pada penelitian ini yaitu menggunakan tempurung kelapa, gkang kepayang dan serbuk kayu . Maka dari latar belakang inilah yang mendasari penulis melakukan penelitian dengan judul **Analisis Visualisasi Nyala Co-firing menggunakan Rocket Stove**



## I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik pembakaran dari bahan bakar biomassa tempurung kelapa, cangkang kepayang yang meliputi waktu pembakaran, laju pembakaran, temperatur pembakaran.
2. Menganalisis visualisasi nyala api hasil pembakaran dari biomassa.

## I.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik pembakaran dari bahan bakar biomassa tempurung kelapa, cangkang kepayang dan serbuk kayu yang meliputi waktu pembakaran, laju pembakaran, temperatur pembakaran.
2. Mengetahui visualisasi nyala api hasil pembakaran dari biomassa.

## I.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagi Mahasiswa
  - a. Sebagai persyaratan untuk menyelesaikan program sarjana di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
  - b. Sebagai bahan referensi untuk memberikan gambaran mengenai
2. Bagi Akademik
  - a. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya dilingkup Departemen Teknik Mesin.
  - b. Merupakan pustaka tambahan untuk menunjang proses perkuliahan.

## I.5 Batasan Masalah

Untuk memudahkan pelaksanaan penelitian sehingga tujuan dari penelitian dapat dicapai, perlu adanya batasan masalah, yaitu:

1. Tipe tungku pembakaran yang digunakan adalah *rocket stove*.
2. Biomassa yang digunakan adalah tempurung kelapa, cangkang kepayang dan serbuk kayu.
3. Cairan yang digunakan sebagai pemantik api minyak tanah.
4. Variabel yang di teliti adalah karakteristik nyala api.



## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### II.1 Biomassa

Biomassa adalah keseluruhan materi yang berasal dari makhluk hidup termasuk bahan organik yang hidup maupun yang mati, baik yang berada di atas permukaan tanah maupun yang ada di bawah permukaan tanah. Potensi limbah biomassa terbesar adalah dari limbah kayu hutan, kemudian diikuti oleh limbah padi, jagung, ubi kayu, kelapa, kelapa sawit dan tebu (Akbar et al., 2023). Potensi sumber daya biomassa Indonesia diproyeksikan sebesar 49.810 MW yang berasal dari tumbuh-tumbuhan dan sampah. Sampah perkebunan, seperti limbah kelapa sawit, kelapa, dan tebu, serta limbah hasil hutan, seperti limbah gergajian dan limbah pembuatan kayu, memiliki potensi energi yang tinggi saat ini. (Kasmaniar et al., 2023)

Potensi biomassa di Indonesia cukup tinggi. Dengan hutan tropis Indonesia yang sangat luas, setiap tahun diperkirakan terdapat limbah kayu sebanyak 25 juta ton yang terbuang dan belum dimanfaatkan. Jumlah energi yang terkandung dalam kayu itu sangat besar, yaitu 100 milyar kkal setahun.

**Tabel 2.1.** Potensi Biomassa di Indonesia

Sumber Energi	Produksi 10 <sup>6</sup> ton/thn	Energi 10 <sup>9</sup> kkal/thn
Kayu	25.00	100.0
Sekam Padi	7.55	27.0
Tongkol Jagung	1.52	6.8
Tempurung Kelapa	1.25	5.1
Potensi Total	35.32	138.9

(Sumber : (Abdul Ajis et al., 2015))



Prinsip dasar pada biomassa, tanaman akan menyerap energi dari matahari melalui proses fotosintesis dengan memanfaatkan air dan unsur hara dari dalam tanah serta CO<sub>2</sub> dari atmosfer yang akan menghasilkan bahan organik untuk memperkuat jaringan dan membentuk daun, bunga atau buah. Pada saat

biomassa diubah menjadi energi CO<sub>2</sub> akan dilepaskan ke atmosfer. Yang dalam hal ini siklus CO<sub>2</sub> akan menjadi lebih pendek dibandingkan dengan yang dihasilkan dari pembakaran minyak bumi atau gas alam. Ini berarti CO<sub>2</sub> yang dihasilkan tersebut tidak (Parinduri et al., 2020)

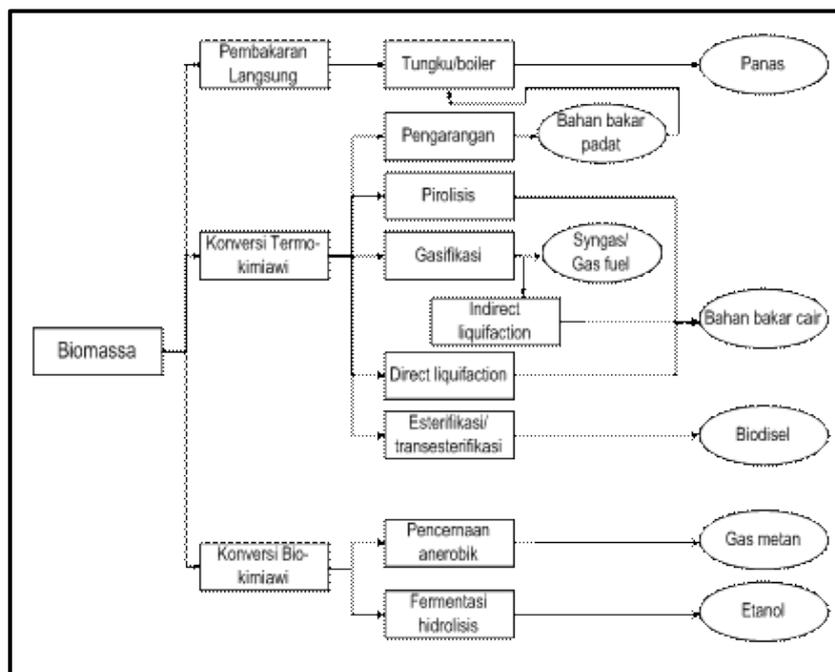
Secara umum bahan baku biomassa dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu pohon berkayu (*woody*) dan rumput-rumputan (*herbaceous*). Saat ini material berkayu diperkirakan merupakan 50% dari total potensial bioenergi sedangkan 20% lainnya adalah jerami yang diperoleh dari hasil samping pertanian. Batang kayu merupakan contoh aplikasi biomassa untuk energi yang pertama kali dikenal. Bagaimanapun juga penggunaan batangan kayu untuk tujuan energi saat ini bersaing dengan penggunaan non-energi yang mempunyai nilai lebih seperti untuk produksi pulp, industri furnitur, dan lain-lain sehingga menyebabkan tingginya harga bahan baku pengolahan biomassa serta meningkatnya konsumsi terhadap pohon. Bahan baku berkayu yang dimaksud adalah bahan berkayu hasil sisa pengolahan kertas, furnitur, peralatan rumah tangga dan lain-lain. Selain digunakan untuk tujuan primer serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar). Pada umumnya yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya (Arhamsyah, 2010).

Agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar maka diperlukan teknologi untuk mengkonversi biomassa. Secara umum teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu pembakaran langsung, konversi termokimia dan konversi biokimia.

1. Pembakaran langsung, Pembakaran langsung merupakan teknologi yang paling sederhana karena pada umumnya biomassa dapat langsung dibakar. Beberapa biomassa perlu dikeringkan terlebih dahulu dan didensifikasi untuk kepraktisan dalam penggunaan.



2. Konversi termokimiawi, Konversi termokimiawi merupakan teknologi yang memerlukan perlakuan termal untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar.
3. Konversi biokimiawi, merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar.(Parinduri et al., 2020)



**Gambar 2. 1:** Teknologi Konversi Biomassa

**Sumber :** (Parinduri et al., 2020)

Biomassa atau limbah pertanian memiliki keunggulan seperti lestari tidak akan habis, tersedia secara berlimpah, ramah lingkungan (rendah atau tidak ada limbah dan polusi). Sumber energi bisa dimanfaatkan secara cuma-cuma. Pengembangan biomassa sebagai sumber energi untuk substitusi bahan bakar bisa menjadi solusi untuk mengurangi beredarnya gas rumah kaca di atmosfer karena konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam atmosfer akan seimbang. Terkadang keberadaan biomassa disebagian tempat sangat tidak diinginkan karena merupakan limbah dan sangat mengganggu lingkungan, karena keberadaan limbah biomassa dapat memicu terjadinya peningkatan degradasi lahan. Oleh karena itu limbah biomassa perlu diolah dan dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Ridhuan & Irawan, 2019).



Pemanfaatan limbah nabati (biomassa) sebagai alternative bahan bakar memberi 3 keuntungan langsung , yaitu:

1. Pada limbah terdapat kandungan energy yang cukup besar, sehingga efisiensi energinya meningkat dan tidak akan terbuang percuma, menghemat biaya, karena membuang limbah seringkali bisa lebih mahal dari pada memanfaatkannya, di daerah khususnya perkotaan akan mengurangi keperluan tempat penimbunan sampah hal ini dikarenakan penyediaan tempat penimbunan akan menjadi sulit dan mahal.
2. Dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang *renewable resources*, meningkatkan efisien pemanfaatan limbah pertanian dan tidak mengandung unsur sulfur yang menyebabkan polusi udara.
3. Agar biomassa dapat dimanfaatkan, adapun beberapa teknologi untuk mengkonversi biomassa menjadi sumber energi, dimana hal ini dapat dilihat dari perbedaan alat yang digunakan untuk mengkonversi biomassa dan bahan bakar yang dihasilkan. (Fitriani Tumba Danun et al., n.d.)

## II.2 Karakteristik Nyala Api

Reaksi pembakaran merupakan hal yang biasa yang sering terjadi dalam kehidupan sehari-hari, baik terjadi dalam industri maupun rumah tangga. Untuk memperoleh hasil pembakaran yang sempurna dan efisien, maka perlu diketahui karakteristik pembakaran dari bahan bakar tertentu dan pada rasio campuran udara dan bahan bakar tertentu. Untuk mengetahui hal tersebut maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui reaksi pembakaran yang sesuai. Untuk mengetahui karakteristik nyala api dalam reaksi pembakaran maka dibutuhkan alat pengujian, terdapat berbagai macam alat yang dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik nyala api tersebut.

Untuk karakteristik nyala api adalah sesuatu yang akan diamati pada penelitian yang nantinya akan dibandingkan pada suatu bahan bakar dengan bahan bakar yang lainnya. Karakteristik nyala api yang akan diamati pada penelitian ini adalah:



### 1. Temperatur Pembakaran

Temperatur pembakaran yaitu temperatur dimana suatu zat atau material melepaskan uap yang cukup untuk membentuk campuran dengan udara yang ada sehingga terbakar. Temperatur pembakaran ditentukan oleh beberapa faktor, tergantung jenis bahan bakar dan oksidan yang digunakan. Untuk temperatur pembakaran dipengaruhi oleh nilai kalor bahan bakar, temperatur pembakaran yang lebih tinggi diperoleh dengan oksigen yang digunakan sebagai oksidan bukan udara, karena didalam udara terdapat nitrogen yang dapat menurunkan suhu nyala api (SARIN, 2018).

### 2. Kecepatan api

Pada api pembakaran terdapat gradien temperatur produk lebih tinggi daripada temperatur reaktan. Transfer kalor yang terus terjadi dapat meningkatkan temperatur reaktan. Saat temperatur reaktan meningkat pada daerah pada saat pemanasan awal maka akan bergeser kearah kanan, dan temperaturnya semakin tinggi yang menyebabkan terjadinya proses pembakaran.

### 3. Dimensi api

Dimensi api dipengaruhi oleh reaksi pembakaran, jika dimensi apinya kecil maka reaksi pembakaran semakin cepat begitu pula sebaliknya jika dimensi apinya panjang dan lebar maka reaksi pembakarannya lambat hal ini disebabkan oleh reaksi pembakaran yang lama akan mempengaruhi waktu yang digunakan untuk bahan bakar dapat beroksidasi dan terbakar (SARIN, 2018).

## II.3 Tungku Raket Biomassa

Kompur merupakan salah satu teknologi yang memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan proses memasak. Prinsip dasar kompor adalah sebagai media proses pembakaran bahan bakar. Proses pembakaran tergantung dari sifat fisik kimia bahan bakar serta mode penyediaan udara dan kondisi lingkungan sekitar. Rancangan kompor biomassa yang saat ini banyak digunakan masyarakat masih sangat sederhana sehingga emisi hasil pembakaran sangat berbahaya bagi kesehatan dan efesiensinya rendah. Saat ini



ada beberapa upaya yang telah dilaksanakan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran tungku biomassa dilakukan adalah dengan mengembangkan desain tungku biomassa jenis roket. Tungku jenis roket ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dengan efisiensi termal, kombinasi dari efisiensi pembakaran yang ditingkatkan dan transfer panas yang terkait dengan pembakaran bahan bakar (Nayan et al., 2022)

Kompur roket adalah kompor tungku yang terbuat dari besi dengan bentuk yang seperti cerobong asap. Aplikasi penggunaan kompor roket akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan perpindahan panas secara signifikan. Prinsip kerja kompor roket membutuhkan sedikit kayu bakar tetapi menghasilkan panas yang optimal. Kompur tradisional yang sering disebut juga kompor tiga batu hanya memiliki efisiensi 5-10% dan dengan sedikit sentuhan keteknikan telah dikembangkan dengan efisiensinya dua hingga tiga kali lipat (Nayan et al., 2021)

Rocket Stove atau kompor roket ini salah satu solusi, guna mengantisipasi kelangkaan gas elpiji bersubsidi di pasaran. Kompur ini menggunakan kayu berukuran kecil sebagai bahan baku utama. Kayu dibakar dalam ruang pembakaran sederhana yang berisi cerobong vertikal terisolasi. Pembakaran hampir sempurna sebelum api mencapai permukaan untuk dapat memasak. Kelebihan kompor roket (Rocket Stove) ini dapat dilakukan pembakaran kayu dengan temperatur yang tinggi, oleh karena itu menyebabkan pembakaran menjadi sempurna. Selanjutnya kompor ini dapat menghasilkan energi panas yang lebih banyak, sehingga tidak menimbulkan banyak asap serta ramah lingkungan. “Sedangkan besar kecil api yang diperlukan saat memasak dapat diatur lewat udara yang masuk dan menggunakan bahan bakar kayu yang sedikit, maka dapat menghasilkan api yang besar atau sebaliknya (Soebyakto et al., 2020)

lebih Kompor Roket diantaranya:

Kompur roket sangat efisien - memaksimalkan bahan bakar. Kompur roket bekerja secara efisien dengan bahan bakar kayu yang sangat sedikit. Kita



dapat menggunakan kayu bakar, ranting, atau biji pinus untuk menghasilkan banyak panas secara efisien. Kompor roket portabel kecil dapat menggunakan bahan bakar "bebas" yang dapat ditemukan hampir di semua tempat di tanah.

2. Kompor roket menghasilkan sedikit asap. Semakin efisien proses pembakaran, semakin sedikit asap.
3. Desain kompor roket pada skala yang berbeda - kecil atau besar. Kompor roket dapat menjadi kompor yang sangat portabel untuk memasak atau "pemanas massal roket" untuk memanaskan kabin atau gubuk kecil. Jadi desain kompor roket sangat serbaguna. (Soebyakto et al., 2020)

Kekurangan Kompor Roket diantaranya

1. Tidak mudah menstabilkan besar kecilnya nyala api tungku terutama pada awal penyalaan sehingga butuh waktu beberapa menit untuk menstabilkan nyala api.
2. Pada penggunaan tungku dibutuhkan energi tambahan atau minyak tanah sebagai penyulut api untuk mendapatkan nyala api.
3. Sulit dalam hal mematikan nyala api. (Nayan et al., 2021)

#### II.4 *Co-firing*

*Co-firing* secara umum dapat dinyatakan sebagai suatu proses pembakaran dua material bahan bakar berbeda yang dioperasikan secara bersamaan. Keuntungan operasi pembakaran sistem *co-firing* adalah terjadinya pengurangan emisi gas CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> pada bahan bakar fosil. Ditinjau dari operasi pembakarannya, sedikitnya terdapat 2 cara *co-firing* yaitu *direct co-firing* dan *indirect co-firing*. Dari ke-2 cara pembakaran tersebut, *direct co-firing* adalah yang paling murah, dengan cara membakar biomassa dan batubara secara bersamaan. *Indirect co-firing* didahului oleh gasifikasi biomassa. Gas yang dihasilkan diumpungkan bersama batubara dalam ruang pembakaran. Karena biomassa menyerap jumlah CO<sub>2</sub> yang sama seperti yang pancarkan selama pembakarannya, maka *co-firing* biomassa tidak berkontribusi pada efek rumah kaca. Sebagian besar bahan bakar biomassa



memiliki kandungan belerang dan nitrogen lebih rendah daripada batubara, jadi banyak kasus emisi NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> dapat dikurangi dengan *co-firing* biomassa. Untuk alasan ini, *co-firing* biomassa dengan batubara telah mendapat perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir (Suganal & Hudaya, 2019).

## II.5 Tempurung Kelapa

Tanaman kelapa sebagai tanaman tropis merupakan tanaman komoditi yang bisa tumbuh subur dikebun, dipantai, atau di hutan Indonesia. Secara khusus, tanaman ini tumbuh di sepanjang pasir pantai dan secara umum dapat tumbuh di dataran tinggi serta lereng gunung. Tanaman kelapa (*Cocos nucifera* L) adalah tipe tumbuhan yang mempunyai bermacam macam kegunaan, hal ini karena sebagian besar dari tumbuhan tersebut dapat langsung di manfaatkan sebagai makanan maupun diolah terlebih dahulu untuk melengkapi kebutuhan makanan masyarakat Indonesia. Daging buah dan air kelapa adalah sebagian dari buah kelapa yang bisa dimanfaatkan langsung sebagai bahan pangan dalam kehidupan sehari-hari, sedangkan tempurung kelapanya biasa dibuang begitu saja dan pemanfaatannya kurang (Ramadhani et al., 2020)

Indonesia sebagai negara tropis memiliki sumber daya alam yang sangat berlimpah seperti buah kelapa (*cocos nucifera*) yang pemanfaatannya masih sangat terbuka untuk dikaji dan dikembangkan lebih lanjut untuk dapat dimanfaatkan secara optimal. Hal ini juga mengingatkan bahwa meskipun hampir semua bagian dari buah kelapa telah diambil manfaatnya namun banyak pula yang terbuang menjadi sampah seperti bagian serabut dan tempurungnya. Salah satu pemanfaatan tempurung kelapa adalah dijadikan sebagai bahan bakar arang (Budi, 2011).

Tempurung kelapa merupakan salah satu biomassa yang berpotensi untuk dapat menghasilkan energy. Dikarenakan jumlah produksi tempurung kelapa sangat banyak dan hanya menjadi limbah pertanian. Pemanfaatannya saat ini hanya sebatas digunakan untuk pembakaran langsung dan digunakan sebagai arang, maka dari itu perlu dilakukan langkah langkah lain untuk memanfaatkan tempurung kelapa sebagai sumber energi. Selain untuk



mengatasi masalah limbah tempurung kelapa, pemanfaatan tempurung kelapa menjadi energi juga bermanfaat untuk menaikkan nilai ekonomis dari tempurung kelapa tersebut (Effendi et al., 2013).

## II.6 Tanaman Kepayang

Sektor pertanian masih merupakan sektor andalan bagi sebagian besar masyarakat untuk dapat meningkatkan pendapatannya, mencakup pertanian pangan baik tanaman, kehutanan, perkebunan, perikanan dan peternakan. Salah satu komoditi sub sektor kehutanan yang mempunyai nilai ekonomi tinggi dan merupakan salah satu komoditi yang perlu mendapat perhatian di adalah kepayang

Pangi (*Pangium edule Reiw*n) atau tanaman kepayang tersebar di seluruh nusantara dan banyak tumbuh liar di Pulau Jawa, yakni daerah-daerah dengan ketinggian di bawah 1.000 m dari permukaan laut. Tanaman ini dapat tumbuh dengan baik di daerah yang mempunyai ketinggian 10–1000 meter di atas permukaan laut. Tanaman kepayang dapat hidup sampai umur di atas 100 tahun. Tinggi pohon dapat mencapai 40 meter. Batang pokoknya besar dan pada pangkal pohon terdapat banir - banir yang lebarnya dapat mencapai 2,5 meter. Ranting muda berambut (berbulu) lembut dan berwarna coklat. Buah kepayang berukuran beragam ada yang besar dan ada pula yang berukuran kecil, serta berambut halus berwarna coklat yang rapat. Bentuk buah yang sudah tua adalah bulat telur (*ellipsoid*). Buah kepayang yang berukuran besar dapat mencapai diameter 25 cm, sedangkan yang berukuran kecil mempunyai diameter sekitar 10 cm (MUTMAINNAH, 2019)

Biji buah kepayang berkulit luar yang keras yang disebut tempurung atau cangkang. Tempurung biji berwarna coklat dengan garis-garis menonjol yang melingkar-lingkar indah. Biji kepayang mengandung inti biji (*endosperm*) berwarna putih dan keras, di mana antara inti biji dengan tempurung dibatasi oleh selaput tipis berwarna coklat. Manfaat inti biji kepayang berbeda-beda di setiap daerah (MUTMAINNAH, 2019). Limbah cangkang kepayang (*Pangium edule Reiw*n) hampir tidak pernah digunakan karena masyarakat



lebih mengutamakan hasil biji dan daunnya sebagai bahan makanan serta dijadikan minyak. Padahal limbah cangkang pangi (kepayang) ini dapat diolah menjadi sumber energi (Muthmainnah et al., 2023).

## II.7 Serbuk Kayu

Indonesia merupakan negara tropis yang kaya akan sumber biomassa terutama kayu-kayuan. (Ayuningtyas & Aridito, 2019). Penggunaan kayu yang dilakukan secara ketergantungan dan masif tanpa memperhatikan keberlanjutan alam dapat mengakibatkan kerusakan alam menjadikan kita harus mencari alternatif sumber bahan bakar lain. Serbuk gergaji kayu yang beragam merupakan sampah dengan tingkat tertinggi digunakan manusia sejak dahulu hingga saat ini (Rozi et al., 2023).

Dalam dunia perkembangan teknologi saat ini, terkhusus sektor industri yang salah satu bentuk pengolahan kayu yang banyak diusahakan oleh masyarakat, tetapi sektor bidang industri pengolahan kayu banyak menghasilkan limbah kayu yang berupa serbuk kayu dan potongan-potongan kayu kecil. Limbah serbuk kayu hanya dibiarkan membusuk maupun dibakar oleh masyarakat semuanya berdampak negatif terhadap lingkungan maupun kesehatan seperti salah satunya dapat menimbulkan polusi udara jika di bakar (Budiawan et al., 2023).

Menurut (Rozi et al., 2023) pemrosesan kayu akan menghasilkan sisa 54,24%, yang terdiri dari potongan-potongan dalam berbagai bentuk. Bahan baku yang mungkin dapat meminimalisir penggunaan kayu pohon adalah penggunaan sisa serbuk gergaji kayu. Serbuk kayu adalah biomassa dan memiliki komponen utama berupa serat kayu, zat gula, dan juga lignin dalam yang jumlahnya tergolong kecil. Semakin besar kandungan serat kayu, maka briket memiliki kualitas yang baik serta dapat mengurangi kadar abu. Oleh karena itu, diperlukan solusi lain untuk mengoptimalkan penggunaan limbah serbuk kayu. Limbah serbuk kayu memiliki posisi strategis yakni untuk mengurangi volume limbah biomassa dan menjadi sumber energi baru terbarukan. (Ayuningtyas & Aridito, 2019). Dalam penelitian (Farras Ilham &



Sinaga, 2022) serbuk kayu/gergaji dimanfaatkan sebagai bahan alternatif yang dicampurkan dengan batu bara (*Cofiring*) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Pelabuhan Ratu.

**Tabel 2.2** Komposisi Kimia Serbuk Kayu

Komponen	Kandungan (%)
Selulosa	40,99
Lignin	27,88
Pentosa	16, 89
Kadar Abu	1,38
Kadar	5,65

**Sumber:** (Rozi et al., 2023)

Serbuk kayu/gergaji merupakan limbah dari industri penggergajian berupa butiran kayu, sedetan, dan potongan - potongan kayu yang dihasilkan dari proses menggergaji. Rata-rata limbah yang dihasilkan oleh industri penggergajian adalah 49,15%, dengan perincian serbuk gergaji sebesar 8,46%, sedetan sebesar 24,41%, dan potongan - potongan kayu sebesar 16,28% (Nurhilal, 2017).

## II.8 Parameter Pengujian

### II.8.1 Laju Alir Udara

Laju alir udara adalah massa udara yang mengalir per satuan waktu ke dalam tungku. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$m_a = \rho_{udara} (Kg/m^3) \times A_{pipa} (m^2) \times V_u (m/s)$$

Ket:

$m_a$  = laju alir udara

$\rho_{udara}$  = massa jenis udara (1.2 kg/m<sup>3</sup>)

$A_{pipa}$  = luas pipa udara *supply* (m<sup>2</sup>)

$V_u$  = kecepatan udara *supply* (m<sup>2</sup>)



### II.8.2 Laju Pembakaran

Laju konsumsi bahan bakar adalah jumlah bahan bakar yang digunakan dalam tungku biomassa dibagi waktu pembakaran. Ini dihitung menggunakan rumus

$$\text{FCR atau } m_f = \frac{\text{Massa biomassa yang digunakan (gr)}}{\text{waktu operasi (s)}}$$

### II.8.3 Rasio Udara Bahan Bakar Aktual (Air Fuel Ratio Actual)

Rasio udara bahan bakar aktual (AFR actual) merupakan perbandingan antara laju alir udara aktual terhadap laju alir bahan bakar aktual. Untuk menghitung AFR dalam 1 kali operasi dengan waktu tertentu dapat menggunakan persamaan berikut ini

$$\text{AFR}_{act} = \frac{m_a}{m_f}$$

### II.8.4 Rasio Ekivalen (Equivalence Ratio)

Rasio ekivalen atau equivalence ratio atau adalah perbandingan antara AFR aktual dibandingkan dengan AFR stoikiometri. Jika  $ER < 1$  disebut pembakaran kaya (rich combustion). Jika  $ER = 1$  disebut pembakaran stoikiometri. Jika  $ER > 1$  disebut pembakaran miskin (lean combustion).

$$ER = \frac{\text{AFR}_{act}}{\text{AFR}_{stoi}}$$

### II.8.5 Laju Alir Volumetrik

Laju alir volumetrik syngas adalah volume fluida yang mengalir per satuan waktu. Ini dihitung menggunakan rumus:

$$Q_s = A_{persegi \text{ syngas}} (m^2) \times V_s (m/s)$$

$$Q_s = \text{laju alir volumetrik syngas } (m^3 / s)$$

$$A_{persegi \text{ syngas}} = \text{luas persegi syngas } (m^2)$$

$$V_s = \text{kecepatan syngas } (m/s)$$

