

**ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP OVER FIRE
MENGUNAKAN BAHAN BAKAR KAYU CEMARA GUNUNG DENGAN
VARIASI VOLUME AIR INJEKSI**



**NURMILA J.
D021 20 1035**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP *OVER FIRE*
MENGUNAKAN BAHAN BAKAR KAYU CEMARA GUNUNG DENGAN
VARIASI VOLUME AIR INJEKSI**

**NURMILA J.
D021 20 1035**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP *OVER FIRE*
MENGUNAKAN BAHAN BAKAR KAYU CEMARA GUNUNG DENGAN
VARIASI VOLUME AIR INJEKSI**

NURMILA J.
D021 20 1035

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Mesin

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

SKRIPSI

**ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP *OVER FIRE*
MENGUNAKAN BAHAN BAKAR KAYU CEMARA GUNUNG
DENGAN VARIASI VOLUME AIR AINJEKSI**

NURMILA J.
D021 20 1035

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian pada 24 September 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada

Program Studi Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT
NIP. 19791112 200812 2 002

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT
NIP. 19711221 199802 1 001

Mengetahui:

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST., MT
NIP. 19770707 200511 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul “Analisis Kinerja Tungku Biomassa Injeksi Uap *Over Fire* Menggunakan Bahan Bakar Kayu Cemara Gunung Dengan Variasi Volume Air Injeksi” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST., MT sebagai Pembimbing Utama dan (Prof. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT sebagai pembimbing pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 24 September 2024



Nurmila J.
D021201035

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wata'ala* atas rahmat, berkah serta izin-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian dan menyelesaikan skripsi ini dengan judul “**Analisis Kinerja Tungku Biomassa Injeksi Uap Over Fire menggunakan Bahan Bakar Kayu Cemara Gunung dengan Variasi Volume Air Injeksi**”. Penyusunan skripsi ini merupakan syarat kelulusan dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu selama proses penelitian dilaksanakan hingga penyusunan skripsi ini selesai. Ucapan terima kasih terkhusus yang sedalam-dalamnya penulis persembahkan kepada Ibunda **Mardiah** dan Ayahanda **Jumardin** serta Adik **Nurchaya J.** dan **Al-Fajri Ramadhan J.** yang senantiasa mendoakan, menyayangi, menyemangati dan menasehati penulis sampai bisa berada di tahap ini. Dengan segala keikhlasan dan kerendahan hati penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya terutama kepada:

1. Ibu **Dr. Eng. Novriany Amaliyah ST., MT** dan Bapak **Prof. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT** selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran dalam mengarahkan dan membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Ir. Andi Mangkau, MT** dan Bapak **Ir. Baharuddin Mire, MT** selaku dosen penguji atas segala saran dan masukan untuk perbaikan serta pengembangan skripsi ini.
3. Seluruh Dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan bantuan selama penulis menjalani perkuliahan.
4. Seluruh Staf Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala bantuan yang telah diberikan dalam pengurusan administrasi dan pengurusan lainnya selama penulis menjalani perkuliahan.
5. Kakak Topan Limbongallo yang telah menemani, membantu dan mendukung penulis dalam pengambilan data sehingga terselesainya skripsi ini.
6. Saudara – saudara seperjuangan ZTATOR 2020 yang setia menemani, membantu, dan mendukung penulis dari awal kuliah dan seterusnya.
7. Teman – teman, kakak senior serta junior seperjuangan Laboratorium *Internal Combustion* yang telah bersedia menemani dan membantu selama masa penelitian dan penyusunan skripsi.
8. Sahabat seperjuangan LAMBETURAH, BALANTANG FAMZ, RAIN FOREST yang senantiasa memberikan bantuan tenaga dan waktu serta semangat dalam penyusunan skripsi ini. Terima kasih sudah menemani penulis melewati hari-hari baik maupun buruk selama masa perkuliahan.
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.

Penulis,

Nurmila J.

ABSTRAK

NURMILA J. **Analisis Kinerja Tungku Biomassa Injeksi Uap Over Fire Menggunakan Bahan Bakar Kayu Cemara Gunung Dengan Variasi Volume Air Injeksi** (dibimbing oleh Novriany Amaliyah dan Andi Erwin Eka Putra).

Latar Belakang. Energi terbarukan kini menjadi solusi alternatif untuk mengatasi kelangkaan energi fosil. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar adalah biomassa, khususnya dari kayu cemara gunung. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisa kinerja tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi, serta menganalisa emisi CO dan CO₂ dari tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi. **Metode.** Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dimulai pada bulan Desember 2023 di Laboratorium *Internal Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin. Variasi volume air injeksi yang digunakan adalah 500 ml, 800 ml, dan 1200 ml. 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.** kinerja tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi dalam penelitian ini nilai terbaik pada air injeksi 1200 ml dengan laju konsumsi bahan bakar sebesar 0,0012 kg/s, daya termal 32,977 kcal/s, konsumsi spesifik bahan bakar 0,0008 kg/s, dan efisiensi termal mencapai 51%. Emisi CO dan CO₂ yang dihasilkan berada dalam kategori rendah dan memenuhi standar nasional Indonesia (SNI). **Kesimpulan.** Penggunaan kayu cemara gunung sebagai bahan bakar dengan variasi air injeksi pada tungku biomassa injeksi uap over fire terbukti efisien dan ramah lingkungan.

Kata kunci: tungku biomassa, kayu cemara, injeksi uap, efisiensi, emisi

ABSTRACT

NURMILA J. *Performance Analysis of Over Fire Steam Injection Biomass Furnace Using Mountain Pine Wood Fuel with Variations in Injection Water Volume* (supervised by Novriany Amaliyah and Andi Erwin Eka Putra).

Background. Renewable energy is now an alternative solution to address the scarcity of fossil energy. One of the renewable energy sources with great potential is biomass, particularly from mountain pine wood. **Aim.** This research aims to calculate and analyze the performance of a steam injection biomass furnace using mountain pine wood fuel with variations in injection water volume, as well as to analyze CO and CO₂ emissions from the furnace. **Method.** This research was conducted experimentally starting in December 2023 at the Internal Combustion Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Hasanuddin University. The injection water volumes used were 500 ml, 800 ml, and 1200 ml. The research followed several stages, including problem identification and formulation, literature review, data collection, result analysis, and conclusion and recommendation. **Results.** The performance of the steam injection biomass furnace using mountain pine wood fuel showed that the best result was obtained with 1200 ml of injection water, with a fuel consumption rate of 0.0012 kg/s, thermal power of 32.977 kcal/s, specific fuel consumption of 0.0008 kg/s, and thermal efficiency of 51%. CO and CO₂ emissions were low and complied with the Indonesian national standards (SNI). **Conclusion.** The use of mountain pine wood as fuel with varying injection water volumes in the steam injection biomass furnace proved to be efficient and environmentally friendly.

Keywords: biomass furnace, pine wood, steam injection, efficiency, emissions

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan dan Manfaat	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Landasan Teori.....	3
BAB II METODE PENELITIAN.....	16
2.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	16
2.2 Alat dan Bahan.....	16
2.3 Skema Penelitian	19
2.4 Metode Pengumpulan Data.....	20
2.5 Prosedur Penelitian.....	20
2.6 Diagram Alir.....	23
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN	24
3.1 Hasil	24
3.2 Perhitungan.....	27
3.3 Reaksi Pembakaran	30
3.4 Pembahasan	30
BAB IV KESIMPULAN	42

4.1	Kesimpulan	42
4.2	Saran	42
	DAFTAR PUSTAKA	43
	LAMPIRAN	45

DAFTAR TABEL

Nomor Urut	Halaman
1. Potensi Biomassa di Indonesia	5
2. Kinerja Tungku Biomassa dengan Berbagai Sistem	8
3. Kinerja Tungku Biomassa dengan Jet-Flame dan tanpa Jet-Flame	9
4. Senyawa Kimia Aktif pada Tanaman Cemara.....	13
5. Data Pengujian	24
6. Pengujian Mendidihkan Air dengan Variasi Air Injeksi 500 ml	24
7. Pengujian Emisi CO dan CO ₂ dengan Variasi Air Injeksi 500 ml.....	25
8. Pengujian Mendidihkan Air dengan Variasi Air Injeksi 800 ml	25
9. Pengujian Emisi CO dan CO ₂ dengan Variasi Air Injeksi 800 ml.....	26
10. Pengujian Mendidihkan Air dengan Variasi Air Injeksi 1200 ml	26
11. Pengujian Emisi CO dan CO ₂ dengan Variasi Air Injeksi 1200 ml	27
12. <i>Proximate Analysis</i> dari setiap Biomassa	28

DAFTAR GAMBAR

Nomor Urut	Halaman
1. Sumber-sumber biomassa	3
2. Skema konversi biomassa	4
3. Siklus energi biomassa	5
4. Tungku masak tradisional	6
5. Geometri platform injeksi udara	8
6. Kompor yang di uji dengan (baris bawah) dan tanpa (baris atas) jet flame, termasuk (kiri ke kanan) open fire, Asian Bucket, African Bucket, Heavy Rocket, Medium Rocket, Light Rocket	9
7. Tungku biomassa injeksi uap <i>over fire</i>	11
8. Bagian-bagian tungku biomassa injeksi uap <i>over fire</i> pada pusat saluran cerobong	11
9. Tungku Biomassa Injeksi Uap (Over Fire)	16
10. Termokopel dan Sensor Tipe K	16
11. Anemometer	17
12. Timbangan Digital	17
13. Panci	17
14. Alat Ukur Emisi	18
15. Kayu Cemara Gunung	18
16. Air	18
17. Skema Penelitian	19
18. Temperatur Air Dalam Panci Terhadap Waktu	30
19. Temperatur Ruang Bakar Terhadap Waktu	32
20. Temperatur Ujung Cerobong Terhadap Waktu	33
21. Temperatur Air Injeksi Terhadap Waktu	34
22. Kecepatan Udara Masuk Terhadap Waktu	36
23. Karbon Monoksida (CO) Terhadap Waktu	37
24. Karbon Dioksida (CO ₂) Terhadap Waktu	38
25. Laju Konsumsi Bahan Bakar Terhadap Variasi Air Injeksi	39
26. Daya Termal Terhadap Variasi Air Injeksi	40
27. Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Terhadap Variasi Air Injeksi	40
28. Efisiensi Termal Terhadap Variasi Air Injeksi	41

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor Urut	Halaman
1. Gambar Alat	45
2. Dokumentasi Pengambilan Data	48

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin bertambahnya populasi manusia dan meningkatnya perekonomian masyarakat menyebabkan konsumsi energi di segala sektor kehidupan manusia meningkat. Salah satu sektor yang mengalami peningkatan adalah penggunaan bahan bakar fosil (batu bara, minyak, dan gas), sementara keberadaannya di alam semakin menipis karena diproduksi secara terus menerus, maka perlu dilakukan penurunan pemakaian, dengan mengembangkan penggunaan energi terbarukan (Moeksin et al., 2017).

Energi terbarukan merupakan solusi yang tepat untuk mengantisipasi kelangkaan energi. Keunggulan penggunaan energi terbarukan selain berasal dari alam, antara lain penggunaannya lebih ramah lingkungan dibanding bahan bakar dari fosil. Salah satu energi terbarukan yang menarik perhatian untuk dikembangkan adalah biomassa. Biomassa merupakan suatu limbah benda padat yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi (bahan bakar). Energi biomassa ini biasanya diterapkan atau diaplikasikan pada kompor biomassa, di mana kompor biomassa merupakan kompor berbahan bakar biomassa padat (Fajar Aryansyah et al., 2022). Potensi biomassa di Indonesia cukup tinggi, terutama dengan hutan tropis yang sangat luas. Setiap tahun diperkirakan terdapat limbah kayu sebanyak 25 juta ton yang terbuang dan belum dimanfaatkan (Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015).

Kayu merupakan salah satu bahan baku biomassa yang digunakan untuk menghasilkan energi, namun sampai saat ini pemanfaatan jenis kayu yang tergolong kurang dikenal masih sangat terbatas. Salah satu dari kayu yang kurang dikenal yaitu kayu cemara gunung, di mana kayu cemara gunung merupakan salah satu jenis tanaman *fast growing* (cepat tumbuh) (Gatut Prakosa et al., 2018).

Hampir 40% populasi dunia masih mengandalkan kompor biomassa sebagai alat utama untuk memasak. Teknologi injeksi udara, dalam bentuk *over-fire*, *under-fire*, dan *staged*, telah digunakan selama beberapa dekade untuk mengurangi emisi pada pembakaran biomassa industri skala kecil. Baru-baru ini, para peneliti mulai mengintegrasikan injeksi udara ke dalam kompor biomassa, tetapi jumlah penelitian terbatas, dan injeksi udara yang tidak tepat dapat memperburuk kinerja kompor (Barbour et al., 2021).

(Barbour et al., 2021)., telah melakukan pengujian, mengembangkan dan menganalisis tiga strategi injeksi udara kompor roket biomassa pembakaran kayu menggunakan dinamika dan eksperimen fluida komputasi. Penelitian ini menguji kompor roket biomassa dengan injeksi udara *over-fire* dan *under-fire*, dan kemudian mengembangkan sistem injeksi udara bertahap yang menggabungkan karakteristik jet optimal dari sistem *over-fire* dan *under-fire*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kinerja yang signifikan, baik dalam hal pengurangan emisi dan peningkatan laju pembakaran dapat dicapai dengan injeksi udara paksa. Dengan melakukan pengetesan air mendidih diperoleh efisiensi termal dibandingkan dengan

konfigurasi kompor alami (37,5%), dengan kompor *over-fire* berkinerja terbaik dari ketiganya (36,3%), diikuti oleh kompor *under-fire* (31,9 %) dan kompor injeksi udara bertahap (28,1%).

Teknik injeksi udara ke dalam tungku biomassa dapat meningkatkan kinerja dari tungku biomassa, dengan menggunakan tenaga listrik untuk menggerakkan kipas injeksi udaranya (Bentson et al., 2022). Menggunakan energi panas dari tungku biomassa itu sendiri untuk tenaga injeksi uap adalah salah satu cara pemanfaatan energi panas untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi tungku biomassa tanpa bantuan energi listrik. Maka dari latar belakang inilah yang mendasari penulis melakukan penelitian dengan judul "**Analisis Kinerja Tungku Biomassa Injeksi Uap Over Fire Menggunakan Bahan Bakar Kayu Cemara Gunung Dengan Variasi Volume Air Injeksi**".

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi?
2. Bagaimana emisi CO dan CO₂ dari tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi?

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menghitung dan menganalisa kinerja tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi.
2. Untuk menganalisa emisi CO dan CO₂ dari tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung dengan variasi volume air injeksi.

1.3.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

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

1.4 Batasan Masalah

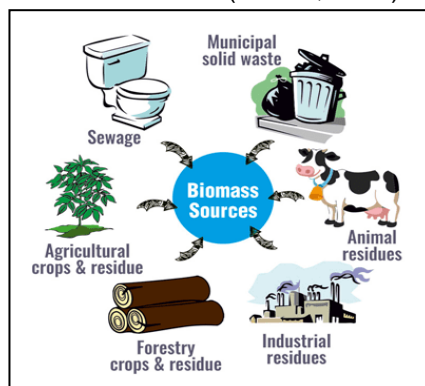
Untuk memudahkan pelaksanaan penelitian sehingga tujuan dari penelitian dapat dicapai, perlu adanya batasan masalah, yaitu:

1. Tipe tungku pembakaran yang digunakan adalah tungku/kompot roket dengan injeksi uap *over fire*
2. Biomassa yang digunakan adalah kayu cemara gunung.
3. Cairan yang digunakan untuk injeksi uap adalah air tawar.
4. Variasi volume air injeksi yang digunakan yaitu 500 ml, 800 ml dan 1200 ml.

1.5 Landasan Teori

1.5.1 Biomassa

Terdapat beberapa jenis energi yang dikenal dalam kehidupan manusia, dan dikelompokkan menjadi dua, yakni energi tidak terbarukan dan terbarukan. Energi tidak terbarukan adalah energi yang tidak dapat digunakan secara berulang dan akan habis pada waktu tertentu, contohnya minyak bumi. Sedangkan, energi terbarukan adalah sumber energi yang dapat diperbarui kembali dan dapat digunakan secara berulang, salah satunya adalah biomassa (Laondi, 2021).



Gambar 1. Sumber-sumber biomassa
(Sumber: Laondi, 2021)

Biomassa merupakan keseluruhan materi yang berasal dari makhluk hidup yang meliputi bahan organik yang hidup maupun yang mati. Biomassa bersifat mudah didapatkan, ramah lingkungan, dan terbarukan. Potensi energi biomassa secara umum berasal dari sektor kehutanan, perkebunan, dan pertanian. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, limbah pertanian dan limbah hutan. Selain digunakan untuk bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar) (Nurulhuda, 2022).

Indonesia memiliki sumber biomassa yang melimpah, sehingga potensi untuk menjadikannya sebagai sumber energi (bahan bakar) sangatlah besar. Sebagai sumber energi, biomassa memiliki beberapa keuntungan terutama dari sifat terbarukannya, dalam arti bahan tersebut dapat diproduksi ulang. Energi biomassa ini biasanya diterapkan atau diaplikasikan pada kompor biomassa, di mana kompor

biomassa merupakan kompor berbahan bakar biomassa padat. Bahan biomassa adalah semua yang berasal dari makhluk hidup, seperti kayu, tumbuh-tumbuhan, daun-daunan, rumput, limbah pertanian, limbah rumah tangga, sampah dan lain-lainnya (Fajar Aryansyah et al., 2022).

Biomassa merupakan sebuah bahan organik *biodegradable* yang berasal dari tumbuhan, hewan dan mikroorganisme. Dapat juga berupa produk samping, residu dan limbah dari pertanian, hutan dan industri-industri yang berkaitan dengan *nonfossil* dan fraksi organik *biodegradable* dari industri dan berkaitan dengan limbah. Biomassa dihasilkan melalui proses fotosintesis dengan menyerap CO₂. Pada proses pembakaran biomassa akan dihasilkan karbon dioksida yang akan diserap oleh tanaman dari atmosfer sehingga pembakaran biomassa tidak akan menambah kandungan karbon dioksida di bumi. Karena alasan inilah biomassa dianggap bahan bakar yang bersifat *zero emission* (Basu, 2010).

Biomassa dapat dikonversi menjadi energi dalam bentuk bahan bakar cair, gas, panas, dan listrik. Agar biomassa dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar, diperlukan teknologi untuk mengkonversi biomassa. Secara umum teknologi konversi biomassa menjadi bahan bakar dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu (Laondi, 2021):

1. Pembakaran langsung

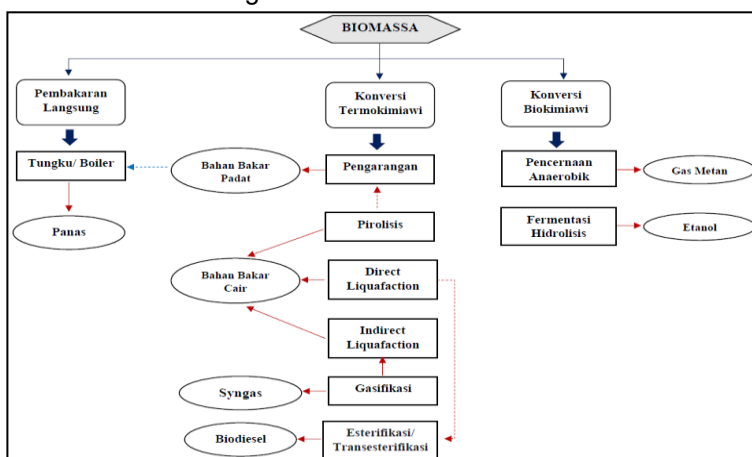
Pembakaran langsung merupakan teknologi yang paling sederhana karena pada umumnya biomassa dapat langsung di bakar. Beberapa biomassa perlu dikeringkan terlebih dahulu dan didensifikasi untuk kepraktisan dalam penggunaan.

2. Konversi termokimiawi

Konversi termokimiawi merupakan teknologi yang memerlukan perlakuan termal untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar.

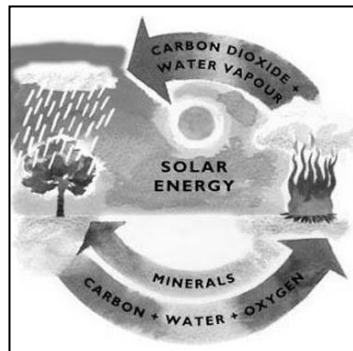
3. Konversi biokimiawi

Konversi biokimiawi merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar.



Gambar 2. Skema konversi biomassa
(Sumber: Laondi, 2021)

Energi biomassa adalah sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari benda-benda di sekitar kita seperti kayu, limbah pertanian, kotoran hewan dan tanaman hidup. Biomassa digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan bentuk-bentuk energi lainnya. Bahan bakar ini bisa dalam bentuk gas, cair atau padat. Penggunaan energi biomassa memiliki berbagai manfaat yaitu manfaat lingkungan dan ekonomi. Energi biomassa telah menjadi energi alternatif bagi bahan bakar fosil yang saat ini umum dipakai untuk memproduksi energi (Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015).



Gambar 3. Siklus energi biomassa
(Sumber: Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015)

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 1. Potensi Biomassa di Indonesia

Sumber Energi	Produksi 10 ⁶ ton/thn	Energi 10 ⁹ 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 : Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015)

Berikut beberapa keuntungan dari penggunaan biomassa, yaitu (Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015):

1. Mengurangi Jejak Karbon

Biomassa menghasilkan emisi karbon lebih sedikit dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Hal ini karena tanaman yang dipakai untuk biomassa baru tumbuh dan menggantikan yang lama yang digunakan untuk menghasilkan energi biomassa sebelumnya. Penggunaan bahan bakar fosil akan berkurang ketika sejumlah besar energi biomassa digunakan dan ini berarti akan menurunkan tingkat karbon dioksida di atmosfer.

2. Mengurangi Jumlah Metana di Atmosfer

Dengan menggunakan biomassa, jumlah metana di atmosfer dapat dikurangi. Metana bertanggung jawab atas efek rumah kaca dan dengan produksi serta pemakaian energi biomassa, tingkat gas metana diturunkan. Metana biasanya dihasilkan ketika bahan organik terurai, oleh karena itu dengan berkurangnya proses ini (pembusukan), efek rumah kaca dapat berkurang juga.

3. Mencegah Kebakaran Hutan

Kayu adalah salah satu bahan baku biomassa yang digunakan untuk menghasilkan energi biomassa biasanya diperoleh dari hutan. Pemanenan pohon dari hutan dapat membantu untuk mencegah melebarinya titik api karena pertumbuhan pohon yang padat. Jika terlalu banyak pohon di hutan, ada risiko tinggi akan terjadi kebakaran hutan.

4. Peningkatan Kualitas Udara

Saat biomassa menggantikan bahan bakar fosil, hal ini berarti membantu untuk meningkatkan kualitas udara karena akan ada lebih sedikit polusi. Penggunaan bahan bakar fosil telah lama dipermasalahkan karena menyebabkan hujan asam. Biomassa tidak menghasilkan emisi sulfur ketika dibakar dan ini akan mengurangi risiko hujan asam. Hal ini akan memberikan sebuah manfaat besar bagi peradaban manusia, berkurangnya polusi di udara.

5. Daur Ulang

Beberapa sumber energi biomassa meliputi limbah industri, hal ini merupakan sebuah keuntungan besar karena ini berarti tidak ada keluaran industri yang sia-sia. Semua produk limbah dari industri dapat digunakan untuk menghasilkan energi biomassa.

1.5.2 Tungku Biomassa

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 (Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015).



Gambar 4. Tungku masak tradisional

(Sumber: <https://www.mangyono.com/2014/12/peralatan-masak-tradisional-indonesia-tungku-hawu.html>)

Tungku pembakaran merupakan sesuatu tempat/ruangan yang bisa dipanaskan dengan bahan bakar ataupun listrik serta dipergunakan buat membakar benda-benda yang hendak diolah yang masih mentah. Kegunaan tungku pembakaran untuk membakar benda-benda mentah yang disusun di dalamnya serta terbakar dengan memakai bahan bakar spesial (kayu, batu kayu, minyak, gas, ataupun listrik) hingga seluruh panas menyebar serta membakar seluruh yang terdapat di atas tungku tersebut (Prayitno, 2020).

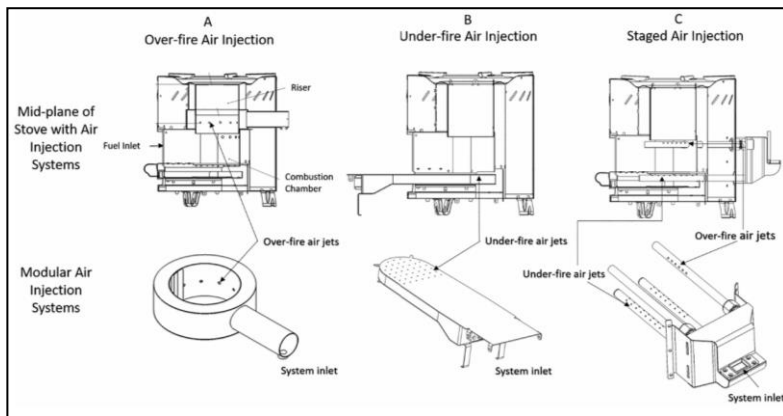
Ada dua jenis tungku biomassa, yaitu tungku biomassa pembakaran langsung dan tungku biomassa pembakaran tidak langsung. Tungku biomassa pembakaran langsung adalah panas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa langsung ditransfer ke dalam ruang pengering dengan cara langsung atau dipaksa dengan menggunakan blower, jadi yang masuk ke dalam ruang pengering atau oven berupa asap dan panas dari api, cara ini biasanya digunakan untuk pembuatan kopra hitam, pengeringan produk bukan makanan dan lain-lain. Tungku biomassa pembakaran tidak langsung adalah panas yang dihasilkan dari pembakaran biomassa hanya berupa udara panas saja, sedangkan asapnya dibuang ke udara, cara ini biasa digunakan untuk pembuatan kopra putih, pengeringan ikan, pengeringan kopi, pengeringan kakao dan lain-lain.

Persyaratan tungku harus memiliki (Atim Abdul A, FA. Widiharsa, 2015):

1. Ruang bakar untuk bahan bakar.
2. Aliran udara dari lubang bawah menuju lubang atas dengan melewati ruang bakar yang terdiri dari aliran udara primer dan sekunder.
3. Ruang untuk menampung abu dari bahan bakar biomassa yang terletak di bawah ruang bakar.

Keuntungan dari penggunaan tungku biomassa antara lain berkurangnya ketergantungan pada bahan bakar fosil, berkurangnya emisi karbon, dan penggunaan sumber daya alam terbarukan. Namun penggunaan biomassa juga harus dikelola secara bijak untuk memastikan bahwa sumber daya alam tidak dieksploitasi secara berlebihan dan pembakarannya tidak menimbulkan polusi udara yang berbahaya.

Barbour et al., (2021) telah melakukan pengujian, mengembangkan dan menganalisis tiga strategi injeksi udara kompor roket biomassa pembakaran kayu menggunakan dinamika dan eksperimen fluida komputasi. Penelitian ini menguji kompor roket biomassa dengan injeksi udara overfire dan under-fire, dan kemudian mengembangkan sistem injeksi udara bertahap yang menggabungkan karakteristik jet optimal dari sistem over-fire dan under-fire. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kinerja yang signifikan, baik dalam hal pengurangan emisi dan peningkatan laju pembakaran dapat dicapai dengan injeksi udara paksa. Dengan melakukan pengetesan air mendidih diperoleh efisiensi termal dibandingkan dengan konfigurasi kompor alami (37,5%), dengan kompor over-fire berkinerja terbaik dari ketiganya (36,3%), diikuti oleh kompor under-fire (31,9 %) dan kompor injeksi udara bertahap (28,1%).



Gambar 5. Geometri platform injeksi udara
(Sumber: Barbour et al., 2021)

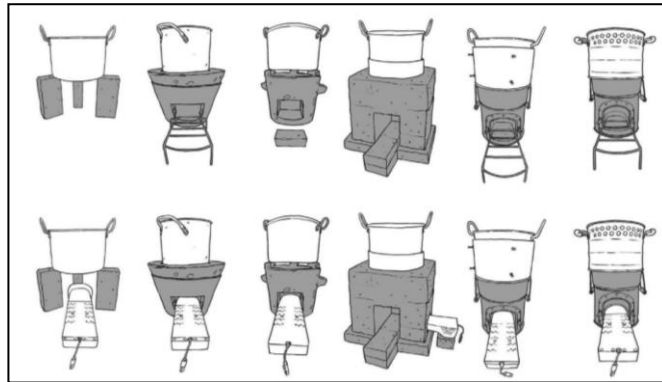
Pada gambar di atas, panel A menunjukkan sistem injeksi over-fire yang menggunakan annulus jet yang menghadap ke dalam secara radial di riser, tepat di atas ruang bakar. Panel B memperlihatkan skema injeksi udara under-fire yang menggunakan pelat berlubang sebagai permukaan bawah ruang bakar. Panel C menunjukkan skema injeksi udara bertahap itu menggabungkan strategi injeksi udara over-fire dan under-fire menggunakan empat tabung berlubang yang ditempatkan di bawah dan di atas ruang bakar (Barbour et al., 2021).

Tabel 2. Kinerja Tungku Biomassa dengan Berbagai Sistem

ISO metrics	Units	Over-fire Air Injection	Under-fire Air Injection	Staged Air Injection	Natural Draft
Thermal efficiency	%	36.3	31.9	28.1	37.5
Time to boil water 5L	min	23.5	16	20.1	24.7
Emissions (removing start up)	mg/min	2.6	5.1	2.2	25.3

(Sumber: Barbour et al., 2021)

(Bentson et al., 2022) telah melakukan pengujian untuk mengukur potensi dampak efisiensi dan kinerja emisi dari *Jet-Flame* ketika dipasang di enam jenis tungku biomassa yang berbeda (tiga tungku api terbuka atau terlindung dan tiga tungku roket) dibandingkan dengan kinerja rancangan alami masing-masing tungku. Tambahan penguat rancangan *Jet-Flame forced* baru-baru ini dikembangkan untuk menerapkan pancaran udara primer paksa untuk berbagai jenis kompor menggunakan kipas kecil 1.5 W yang ditempatkan di badan besi cor yang dimasukkan di bawah lapisan bahan bakar dari tungku biomassa. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi termal dengan arang dari tungku dengan rancangan alami (*Natural Draft*) adalah tungku *Open Fire* 15.3%, tungku *African Bucket* 18.7%, tungku *Asian Bucket* 29.8%, tungku *Heavy Rocket* 32.8%, tungku *Medium Rocket* 41% dan tungku *Light Rocket* 38.7%. Sedangkan efisiensi termal dengan arang dari tungku dengan penguatan *Jet-Flame* adalah tungku *Open Fire* 21.1%, tungku *African Bucket* 23.1%, tungku *Asian Bucket* 41.8%, tungku *Heavy Rocket* 35.1%, tungku *Medium Rocket* 45.4% dan tungku *Light Rocket* 47.1%.



Gambar 6. Kompur yang di uji dengan (baris bawah) dan tanpa (baris atas) jet flame, termasuk (kiri ke kanan) open fire, Asian Bucket, African Bucket, Heavy Rocket, Medium Rocket, Light Rocket
(Sumber: Bentson et al., 2022)

Tabel 3. Kinerja Tungku Biomassa dengan Jet-Flame dan tanpa Jet-Flame

ISO metrics	Units	Open Fire	African Bucket	Asian Bucket	Heavy Rocket	Medium Rocket	Light Rocket	Global average
Firepower ND	kW	7.7 ± 1	5.7 ± 0.5	5.6 ± 0.4	4.4 ± 1	4.2 ± 0.2	5.5 ± 0.5	5.5
Firepower FD	kW	5.1 ± 0.2	4.8 ± 0.2	4.5 ± 0.1	4.8 ± 0.6	4.5 ± 0.2	5.6 ± 0.7	4.9
Time to boil 5 L, 75C ND	min	34 ± 6	33 ± 4	22 ± 3	22 ± 3	21 ± 2	16 ± 2	25
Time to boil 5 L, 75C FD	min	38 ± 3	31 ± 3	18 ± 3	20 ± 1	17 ± 1	13 ± 1	23
Thermal efficiency with char ND	%	15.3 ± 0.6	18.7 ± 1.9	29.8 ± 2.3	32.8 ± 2	41 ± 1.1	38.7 ± 1.6	29.4
Thermal efficiency with char FD	%	21.1 ± 0.6	23.1 ± 1.6	41.8 ± 2.7	35.1 ± 0.9	45.4 ± 1.9	47.1 ± 3.5	35.6
CO emissions factor, energy delivered ND	g/MJd	9 ± 1.3	8.9 ± 4.1	2.4 ± 1.3	11.2 ± 2.3	7.3 ± 1.9	8 ± 2.5	7.8
CO emissions factor, energy delivered FD	g/MJd	2.3 ± 0.2	1.8 ± 0.7	1.5 ± 0.3	2.7 ± 0.9	2.6 ± 1.4	0.7 ± 0.2	2.0

(Sumber: Bentson et al., 2022)

1.5.3 Sistem Injeksi Uap

1.5.3.1 Manfaat Injeksi Uap Pada Pembakaran

Injeksi uap dalam pembakaran merupakan teknik yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi polutan selama pembakaran. Teknik ini sering diterapkan dalam industri, terutama pada penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara atau gas alam. Prinsipnya adalah memasukkan uap ke dalam ruang bakar, seperti mesin pembakaran internal atau tungku. Cara ini dapat memberikan berbagai pengaruh terhadap karakteristik pembakaran, seperti dijelaskan di bawah ini:

1. Peningkatan efisiensi: Injeksi uap dapat meningkatkan efisiensi proses pembakaran. Ketika uap diinjeksikan ke dalam ruang bakar dan terkena panas, uap tersebut menguap dan menciptakan pendinginan adiabatik. Hal ini mengurangi suhu pembakaran, yang dapat meningkatkan efisiensi termal. Artinya energi yang sebelumnya hilang sebagai panas dapat digunakan secara lebih efisien untuk menghasilkan listrik atau panas.
2. Mengurangi emisi NO_x: Injeksi uap dapat membantu mengurangi emisi nitrogen oksida (NO_x) selama pembakaran. NO_x merupakan polutan yang sering terbentuk pada suhu pembakaran tinggi. Penurunan suhu pembakaran akibat injeksi uap mengurangi pembentukan NO_x sehingga mengurangi emisi polutan tersebut.

3. Pemberian uap ke saluran cerobong pembakaran digunakan untuk memasukkan uap ke dalam nyala api untuk meningkatkan kapasitas tanpa asap. Uap yang diinjeksikan sering digunakan untuk mencegah pembakaran internal pada saluran cerobong dengan meningkatkan laju aliran volume dan oleh karena itu peningkatan kecepatan melalui ujung cerobong untuk mencegah infiltrasi udara (laju aliran udara tak terkendali/kebocoran). Udara dan uap yang diinjeksikan berfungsi untuk meningkatkan pembakaran, sehingga memperluas kapasitas tanpa asap.
4. Pengurangan Partikel Padat: Injeksi uap juga dapat membantu mengurangi emisi partikel padat (partikulat) dalam beberapa proses pembakaran. Partikulat ini dapat terbentuk dalam proses pembakaran yang tidak sempurna. Injeksi uap air dapat membantu dalam pembakaran yang lebih efisien dan mengurangi jumlah partikulat yang dihasilkan.
5. Pengurangan CO₂: Meskipun tidak mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) dalam artian sebenarnya (karena uap air adalah bentuk lain dari H₂O), injeksi uap air dapat membantu mengoptimalkan pembakaran sehingga penggunaan bahan bakar lebih efisien. Ini, pada gilirannya, dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂ terkait.

Injeksi uap pembakaran adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi dalam berbagai aplikasi industri. Namun efektivitas injeksi uap bergantung pada pengaturan dan jenis sistem pembakaran yang digunakan. Teknik ini memerlukan pemahaman dan pengendalian yang cermat untuk mencapai hasil yang diinginkan dan dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi proses pembakaran.

1.5.3.2 Tungku Biomassa dengan Injeksi Uap

Injeksi uap pembakaran adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi dalam berbagai aplikasi industri. Namun efektivitas injeksi uap bergantung pada pengaturan dan jenis sistem pembakaran yang digunakan. Teknik ini memerlukan pemahaman dan pengendalian yang cermat untuk mencapai hasil yang diinginkan dan dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi proses pembakaran.

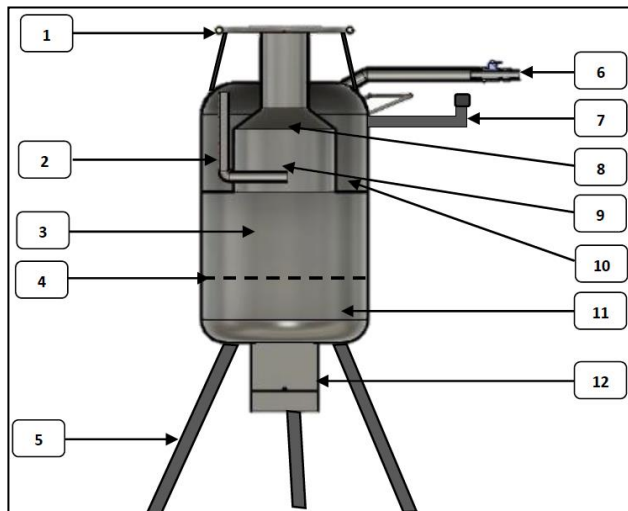
Pada tungku biomassa dengan injeksi uap, panas dari pembakaran dari ruang bakar selain digunakan untuk memasak juga dimanfaatkan untuk memanaskan air di dalam tangki injektor yang akan dipakai nantinya sebagai uap injeksi ke dalam pembakaran. Menggunakan energi panas dari tungku biomassa itu sendiri untuk tenaga injeksi uap adalah salah satu cara pemanfaatan energi panas untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi tungku biomassa tanpa bantuan energi listrik sebagaimana diterapkan pada tungku biomassa dengan injeksi paksa udara. Metode injeksi uap pada tungku sudah dimanfaatkan di lapangan (dimasyarakat), tapi dengan penggunaan bahan bakar minyak bekas pelumas mesin. Pembakaran minyak bekas pelumas mesin di udara bebas memberikan dampak emisi yang buruk

untuk lingkungan dan makhluk hidup, sehingga tidak bisa dimanfaatkan untuk keperluan memasak. Oleh karena itu penelitian dan pengembangan tungku biomassa dengan injeksi uap perlu dilakukan untuk pemanfaatan yang berkelanjutan.

Prinsip kerja tungku biomassa dengan injeksi uap adalah pada tungku memiliki tangki penampungan air di atas ruang bakar yang akan dipakai sebagai injeksi uap pada saluran cerobong api. Panas dari pembakaran biomassa di ruang bakar dimanfaatkan untuk mendidihkan air yang ada di dalam tangki penampungan air injeksi, kemudian uapnya akan disalurkan keluar melalui pipa dan diinjeksikan pada saluran cerobong api melalui lubang berdiameter 3 mm ke tengah saluran cerobong api (*over fire*). Ketika injeksi uap ini diaktifkan, tekanan dari uap akan memperkuat hembusan api pada saluran cerobong dan membantu menambah volume udara yang masuk melalui ventilasi bawah untuk meningkatkan laju pembakaran bahan bakar.



Gambar 7. Tungku biomassa injeksi uap *over fire*



Gambar 8. Bagian-bagian tungku biomassa injeksi uap *over fire* pada pusat saluran cerobong

Keterangan:

1. Dudukan untuk panci.
2. Pipa saluran injektor uap.
3. Ruang pembakaran.
4. Besi jaring untuk bahan bakar.
5. Kaki tungku.
6. Katup kontrol uap.
7. Saluran masuk tangki injektor.
8. Saluran cerobong.
9. Lubang injektor uap.
10. Tangki injektor.
11. Ruang penampungan abu.
12. Ventilasi / saluran pembuangan abu.

1.5.4 Kayu Cemara Gunung

Salah satu potensi biomassa bersumber dari kayu. Selain ketersediaannya cukup banyak di Indonesia, biomassa kayu juga cenderung tidak menyebabkan dampak negatif pada lingkungan. Saat ini material berkayu diperkirakan merupakan 50% dari total potensial bio-energi. 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 (Nurulhuda, 2022).

Kayu adalah salah satu bahan baku biomassa yang digunakan untuk menghasilkan energi biomassa biasanya diperoleh dari hutan (Atim Abdul A, FA. Widiarsa, 2015). Sampai saat ini pemanfaatan jenis kayu yang tergolong kurang dikenal masih sangat terbatas. Ribuan jenis kayu lainnya belum dimanfaatkan dengan baik. Selain itu, kayu-kayu yang belum diketahui secara luas penggunaannya cenderung diabaikan karena keawatiran akan kualitas kayu tersebut selama pemakaiannya. Salah satu dari kayu yang kurang dikenal adalah kayu cemara gunung (Gatut Prakosa et al., 2018).

Cemara gunung merupakan salah satu jenis tanaman fast growing (cepat tumbuh). Kegunaan lain dari tanaman ini yaitu sebagai sumber energi, khususnya kayu bakar. Kayu ini merupakan sumber energi dominan bagi masyarakat pedesaan yang pada umumnya berpenghasilan rendah. Menurut Departemen Ekonomi Sumber Daya Manusia 2005, 80% sumber energi masyarakat pedesaan diperoleh dari kayu bakar, khususnya untuk memasak. Penggunaan kayu cemara gunung masih terbatas secara lokal untuk bahan bakar dan kayu arang. Dalam upaya peningkatan nilai guna dan pengoptimalan penggunaan kayu, teknologi dan rekayasa dalam bidang perkayuan sangatlah penting. Dalam pemilihan kayu yang baik sifat fisik atau keawetan kayu merupakan hal yang penting. Faktor ini diperlukan karena kayu akan digunakan untuk menahan beban dengan aman dalam jangka waktu yang telah ditentukan. Oleh karena itu, pemanfaatan kayu cemara gunung untuk pengolahan

kayu memerlukan pemahaman terhadap sifat-sifat penting dari kayu tersebut sehingga kayu dapat dimanfaatkan secara maksimal (Gatut Prakosa et al., 2018).

Pohon cemara gunung menghasilkan kayu bakar dengan kualitas yang sangat baik, mudah untuk terbakar walaupun dalam kondisi hijau dengan kadar abu rendah. Sangat baik bila dijadikan bahan bakar langsung maupun briket arang. Cemara gunung memiliki nilai kalor sebesar 5000 kalori/g dalam bentuk kayu dan 7000 kalori/g dalam bentuk briket arang (National Academy of Science, 1983).

Tabel 4. Senyawa Kimia Aktif pada Tanaman Cemara

Nama Daerah	Nama Botanis	Bagian Tumbuhan	Ulangan	Senyawa Kimia Aktif						
				A	St	Tn	T	F	S	Q
Cemara gunung	<i>Casuarina junghuina</i>	Batang	1	+	+	+	-	-	-	+
			2	+	+	+	-	-	-	+
			3	+	+	+	-	-	-	+
		Akar	1	-	-	+	+	-	-	+
			2	-	-	+	+	-	+	+
			3	-	-	+	+	-	+	+
		Kulit	1	+	+	+	-	-	+	+
			2	+	+	+	-	-	+	+
			3	+	+	+	-	-	+	+
		Daun	1	-	+	+	-	-	+	+
			2	-	+	+	-	-	+	+
			3	-	+	+	-	-	+	+

(Sumber: Muhammad et al., 2021)

Keterangan:

A = Alkaloid

S = Saponin

St = Steroid

Q = Quinon

Tn = Tanin

+ = Ada

T = Triterpenoid

- = Tidak Ada

F = Flavonoid

1.5.5 Parameter Pengujian

1. Laju Konsumsi Bahan Bakar (*Fuel Consumption Rate*)

Laju konsumsi bahan bakar adalah jumlah bahan bakar yang digunakan dalam tungku biomassa dibagi dengan waktu operasi. Ini dihitung menggunakan rumus (Suyitno, 2011):

$$FCR = \frac{m_f}{t_f} \quad (1)$$

Keterangan:

FCR = Laju konsumsi bahan bakar, (kg/s)

m_f = Berat bahan bakar yang digunakan, (kg)

t_f = Waktu operasi, (s)

2. Daya Termal

Daya termal adalah ukuran seberapa cepat bahan bakar terbakar, dituliskan dalam Watt (Joule/detik). Hal ini dipengaruhi oleh kompor (ukuran pintu masuk bahan bakar/ ruang bakar) dan pengoperasian pengguna (laju pengumpanan

bahan bakar). Umumnya ini merupakan ukuran yang berguna untuk mengetahui keluaran panas kompor, dan merupakan indikator seberapa konsistennya operator menjalankan kompor melalui beberapa pengujian. Ini dihitung menggunakan rumus (Suyitno, 2011):

$$P_{\text{Out}} = \frac{\Delta m_k \times \text{HHV}}{\Delta t} \quad (2)$$

Keterangan:

P_{Out}	= Daya termal, (kcal/s)
Δm_k	= Berat bahan bakar yang terbakar, (kg)
HHV	= Nilai kalor (heating value) bahan bakar, (kcal/kg)
Δt	= Lama waktu pengujian, (s)

3. Efisiensi Termal

Efisiensi termal adalah rasio energi yang digunakan dalam pendidihan dan dalam penguapan air terhadap energi panas yang tersedia dalam bahan bakar. Ini dihitung dengan rumus (Suyitno, 2011):

$$\eta_t = \frac{\text{SH} + \text{LH}}{\text{HHV} \times \Delta m_k} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

η_t	= Efisiensi termal, (%)
SH	= Panas sensibel, (kkal)
LH	= Panas laten, (kkal)
HHV	= Nilai kalor bahan bakar, (kkal/kg)
Δm_k	= Berat bahan bakar yang terbakar, (kg)

- Panas Sensibel (*Sensible Heat*)

Panas sensibel adalah jumlah energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur air. Ini diukur sebelum dan sesudah air mencapai temperatur pendidihan. Ini dihitung menggunakan rumus (Suyitno, 2011):

$$\text{SH} = M_w \times C_p \times \Delta T \quad (4)$$

Keterangan:

SH	= Panas sensibel, (kJ)
M_w	= Massa air, (kg)
C_p	= Panas jenis air, (4,2 kJ/kg°C)
T_f	= Temperatur air mendidih, (100°C)
T_i	= Temperatur awal air, (°C)

- Panas Laten (*Laten Heat*)

Panas laten adalah jumlah energi panas yang digunakan dalam menguapkan air. Ini dihitung menggunakan rumus (Suyitno, 2011):

$$LH = W_e \times H_{fg} \quad (5)$$

Keterangan:

LH = Panas laten, (kcal)

W_e = Berat air yang diuapkan, (kg)

H_{fg} = Panas laten air, (540 kcal/kg)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2023 sampai Juni 2024 bertempat di Laboratorium *Internal Combustion* Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, Gowa, Sulawesi Selatan.

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

1. Tungku Biomassa

Tungku biomassa merupakan tungku yang berbahan bakar padat. Jenis tungku yang digunakan adalah tungku biomassa injeksi uap (*over fire*).



Gambar 9. Tungku Biomassa Injeksi Uap (*Over Fire*)

2. Termokopel

Termokopel berfungsi sebagai pengukur suhu air yang dididihkan, suhu ruang bakar dan suhu saluran cerobong tungku.



Gambar 10. Termokopel dan Sensor Tipe K

3. Anemometer

Anemometer berfungsi sebagai pengukur kecepatan aliran udara.



Gambar 11. Anemometer

4. Timbangan Digital

Timbangan digital berfungsi sebagai pengukur berat dari biomassa dan air yang digunakan.



Gambar 12. Timbangan Digital

5. Panci

Panci berfungsi sebagai wadah air yang akan di didihkan.



Gambar 13. Panci

6. Alat Ukur Emisi

Alat ukur emisi berfungsi untuk mengukur emisi CO dan CO₂ dari pembakaran.



Gambar 14. Alat Ukur Emisi

2.2.2 Bahan

1. Kayu Cemara Gunung

Kayu cemara gunung digunakan sebagai bahan bakar kompor biomassa.



Gambar 15. Kayu Cemara Gunung

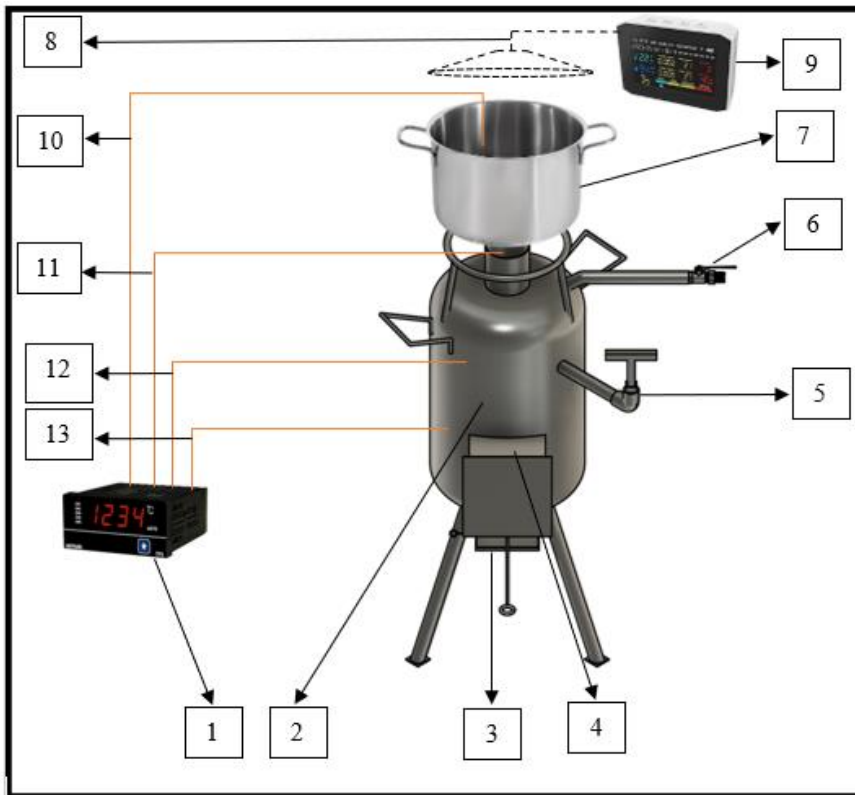
2. Air

Air berfungsi sebagai bahan pengujian untuk mengukur efisiensi termal.



Gambar 16. Air

2.3 Skema Penelitian



Gambar 17. Skema Penelitian

Keterangan:

1. Termokopel.
2. Tungku biomassa injeksi uap.
3. Saluran udara.
4. Saluran bahan bakar.
5. Saluran masuk tangki injektor.
6. Katup kontrol uap.
7. Panci.
8. Sungkup asap.
9. Alat ukur emisi.
10. Sensor suhu air dalam panci.
11. Sensor suhu pada saluran cerobong tungku.
12. Sensor suhu air injektor.
13. Sensor suhu ruang bakar.

2.4 Metode Pengumpulan Data

2.4.1 Studi Lapangan (*Field Research*)

Studi lapangan merupakan pengambilan data yang diperoleh dengan mengumpulkan data langsung dari analisa yang dilakukan dari tempat penelitian, meliputi setiap hasil penelitian, foto - foto, dan data yang relevan terhadap penelitian. Ini bisa berbentuk tulisan dan gambar sehingga mengelolanya dalam bentuk tabel dan grafik.

2.4.2 Studi Pustaka (*Library Research*)

Studi pustaka merupakan pengambilan data yang diperoleh dengan membaca dan mengumpulkan data-data teoritis melalui buku-buku, tulisan ilmiah, literatur serta catatan perkuliahan yang bersangkutan dengan masalah-masalah yang akan dibahas, sehingga diperoleh landasan yang digunakan dalam pemecahan masalah tersebut.

2.5 Prosedur Penelitian

2.5.1 Persiapan Biomassa

1. Mencari dan memotong kayu cemara gunung dilakukan dengan presisi, dengan potongan berukuran 2 x 2 cm hingga 3 x 3 cm dan panjang 10 cm.
2. Setelah bahan bakar dipilah dan dipotong kemudian dikeringkan dengan bantuan sinar matahari. Waktu yang dibutuhkan untuk pengeringan dengan sinar matahari adalah 24 jam atau 3 hari (dalam kondisi basah).
3. Setelah kering, maka bahan bakar siap untuk dijadikan bahan pengujian.
4. Untuk tiap pengujian dibutuhkan bantuan bambu dan kertas karton sebagai pemantik untuk penyalaan awal api. Potongan bambu ukuran 10 cm x 3 mm sebanyak 10 batang (15 gram) dan kertas karton ukuran 10 cm x 3 cm sebanyak 2 lembar.

2.5.2 Pengujian

A. Pengujian Mendidihkan Air

Untuk fase daya tinggi, pengujian dimulai pada suhu lingkungan dan menggunakan bahan bakar yang telah ditimbang sebelumnya untuk merebus sejumlah air dalam panci standar. Fase daya tinggi artinya proses pengujian mendidihkan air dengan tungku di mana penguji berusaha untuk mendidihkan air dalam waktu yang lebih cepat (Clean Cooking Alliance, 2014).

1. Persiapan Setiap Pengujian Mendidihkan Air
 - 1) Menyiapkan panci untuk pengujian, kemudian menimbang dan mencatat berat kering panick (gram), kemudian mengisi panick dengan air sebanyak 2,5 liter.
 - 2) Mencatat berat panci berisi air (gram).
 - 3) Mengukur dan mencatat kondisi sekitar: suhu udara (°C).
 - 4) Memasang sensor termokopel pada ruang bakar, saluran cerobong tungku, dan tangki air injector.

2. Pengujian Mendidihkan Air

- 1) Menyiapkan *timer*.
- 2) Mengisi tangki injektor dengan air (500 ml / 800 ml / 1200 ml).
- 3) Menimbang bahan bakar (1000 g).
- 4) Meletakkan panci yang berisi air di atas tungku, kemudian meletakkan sensor termokopel dalam panci sehingga suhu air dapat diukur di tengah (sekitar 5 cm dari bawah dasar panci).
- 5) Mengaktifkan termokopel dan mencatat temperatur awal dari air dalam panci, ruang bakar, saluran cerobong tungku dan air injektor.
- 6) Memasukkan bahan bakar serta pemantik ke dalam tungku dan menyalakan api.
- 7) Setelah api menyala, kemudian mengaktifkan pengatur waktu dan mencatat waktu dimulainya.
- 8) Mencatat temperatur air dalam panci, temperatur ruang bakar, temperatur saluran cerobong tungku, dan temperatur air injeksi setiap menit sampai air dalam panci mendidih.
- 9) Mengukur kecepatan aliran udara pada saluran masuk udara tungku menggunakan anemometer setiap menit sampai air dalam panci mendidih.
- 10) Saat air di panci mencapai suhu didih seperti yang ditunjukkan oleh termokopel segera lakukan langkah berikut:

- Mencatat waktu keseluruhan sampai air mencapai suhu didih. Mencatat juga suhunya. Titik didih tidak harus 100°C, tetapi mengikuti formula (BSN, 2013):

$$t_D = \left(100 - \frac{h}{300}\right) \quad (6)$$

Keterangan:

t_D = Titik didih, (°C)

h = Ketinggian lokasi dari permukaan laut, (meter)

- mengeluarkan semua bahan bakar dari tungku dan memadamkan apinya. Nyala api dapat dipadamkan dengan meniup ujung batang kayu atau memasukkannya ke dalam ember berisi abu atau pasir; jangan gunakan air karena akan mempengaruhi berat sisa bahan bakar. Kemudian menghancurkan semua arang yang lepas dari ujungnya ke dalam wadah untuk menimbang arang.
 - Menimbang bahan bakar yang belum terbakar yang dikeluarkan dari tungku bersama dengan sisa bahan bakar yang telah ditimbang sebelumnya.
 - Mengeluarkan semua sisa arang dari tungku. Kemudian menimbang sisa arang ini dengan arang yang sudah dibuang dari bahan bakar yang belum terbakar.
- 11) Menimbang panci beserta airnya. Kemudian buang air panasnya.
 - 12) Menimbang sisa air dari tangki injektor, kemudian di buang

B. Pengujian Emisi CO dan CO₂

Untuk pengujian emisi, pengujian dimulai pada suhu kamar dan menggunakan bahan bakar yang telah ditimbang sebelumnya untuk mengukur emisi pembakaran dari tungku injeksi uap.

1. Persiapan Setiap Pengujian Emisi

- 1) Memasang sungkup asap dan blower pengisap pada saluran sungkup asap.
- 2) Memasang sensor termokopel pada saluran sungkup asap, ruang bakar, saluran cerobong tungku dan tangki air injektor.
- 3) Memasang selang gas emisi pada saluran sungkup asap, kemudian dihubungkan ke alat pengukur emisi.

2. Pengujian Emisi

- 1) Menyiapkan *timer*.
- 2) Mengisi tangki injektor dengan air (500 ml / 800 ml / 1200 ml).
- 3) Menimbang bahan bakar (1000g).
- 4) Mengaktifkan termokopel dan mencatat temperatur awal dari saluran sungkup asap, ruang bakar, saluran cerobong tungku dan air injektor.
- 5) Memasukkan bahan bakar serta pemantik ke dalam tungku dan menyalakan api.
- 6) Setelah api menyala, kemudian mengaktifkan pengatur waktu dan mencatat waktu mulainya.
- 7) Mencatat temperatur saluran sungkup asap, temperatur ruang bakar, temperatur saluran cerobong tungku dan temperatur air injeksi setiap menit sampai bahan bakar habis terbakar.
- 8) Mengukur kecepatan aliran udara pada saluran masuk udara tungku menggunakan anemometer setiap menit sampai bahan bakar habis terbakar.
- 9) Mencatat emisi CO dan CO₂ setiap menit sampai bahan bakar habis terbakar.
- 10) Setelah bahan bakar habis terbakar, api dipadamkan dan sisa pembakaran dikeluarkan dari dalam tungku kemudian ditimbang.
- 11) Menimbang sisa air dari tangki injektor, kemudian dibuang.

2.6 Diagram Alir

Sistematika dari penelitian ini dapat kita tinjau pada diagram alir sebagai berikut:

