

TESIS

**ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP DENGAN
VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA**



TOPAN LIMBONGALLO

D022221003

PROGRAM STUDI PASCASARJANA TEKNIK MESIN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

**ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP DENGAN
VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA**

TOPAN LIMBONGALLO

D022221003

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Pascasarjana Teknik Mesin

pada

PROGRAM STUDI PASCASARJANA TEKNIK MESIN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA

Disusun dan diajukan oleh

TOPAN LIMBONGALLO

D022221003

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi

Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 26 November 2024

Menyetujui

Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T.
NIP. 197911122008122002

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra,
ST., MT.
NIP. 197112211998021001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran
Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN. Eng
Nip. 197309262000121002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T.
NIP. 197911122008122002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Topan Limbongallo

Nomor mahasiswa : D022221003

Program studi : S2 Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Eng. Novriany Amaliyah ST., MT. dan Prof. Dr. Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan sedang tidak diajukan dalam bentuk apapun 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 dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari tesis ini telah dipublikasikan di jurnal “*International Conference on Research in Engineering and Science Technology (IC-REST) 2024*” sebagai artikel dengan judul “*Performance Analysis of a Biomass Cookstove with Overfire Steam Injection using Casuarina Equisetifolia Wood as Fuel*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 28 November 2024

Yang menyatakan




Topan Limbongallo

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas kasih, anugerah serta penyertaan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini tepat pada waktunya.

Penyusunan tesis ini penulis susun dalam rangka untuk menyelesaikan tesis yang merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada program magister di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Terima kasih penulis ucapkan kepada mereka yang telah memberikan bantuan baik materi maupun moril, sehingga berkat bantuannyalah setiap kendala yang penulis alami dalam penyusunan tesis dapat terselesaikan. Untuk itu dengan segala rasa hormat, penulis ucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua, yakni ayah (Alm. Niko Ko'Wi) dan Ibu (Hermin Limbongallo), serta seluruh saudara dan keluarga atas bantuan, bimbingan, nasehat, serta doa selama menjalani pendidikan di Universitas Hasanuddin.
2. Dr. Eng. Novriany Amaliyah ST., MT. dan Prof. Dr. Eng. Ir. Andi Erwin Eka Putra, ST., MT., sebagai dosen pembimbing yang telah dengan penuh kesabaran dan ketulusan memberikan ilmu dan bimbingan terbaik kepada penulis.
3. Prof. Dr. Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME., Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT., dan Dr. Ir. Nasruddin Azis, M.Si. sebagai tim dosen penguji yang telah memberikan masukan dan saran sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan baik.
4. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
5. Seluruh Dosen Program Studi Magister, Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan bantuan selama penulis menjalani perkuliahan.
6. Seluruh Staf Program Studi Magister, Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala bantuan yang telah diberikan dalam pengurusan administrasi dan pengurusan lainnya selama penulis menjalani perkuliahan.
7. Nurmila, Nursalim dan Sukman yang membantu dan mendukung penulis dalam pengambilan data dan analisis hingga selesainya tesis ini.

8. Teman-teman, serta junior seperjuangan di Laboratorium Internal Combustion yang telah menemani dan membantu selama masa penelitian dan penyusunan tesis.
9. Semua pihak yang tidak disebutkan satu per satu, yang telah memberi dukungan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Penulis telah berusaha semaksimal mungkin agar tesis ini dapat terselesaikan dengan baik, namun keterbatasan dan kemampuan sehingga tesis ini tampil dengan segala kekurangannya. Oleh karena itu, penulis senantiasa membuka diri atas kritik dan saran yang bertujuan untuk menyempurnakan tesis ini. Akhir kata semoga tesis ini bermanfaat kedepannya, sekian dan terima kasih.

Penulis

Topan Limbongallo

ABSTRAK

Topan Limbongallo. *Analisis Kinerja Tungku Biomassa Injeksi Uap Dengan Variasi Bahan Bakar Biomassa* (dibimbing oleh Novriany Amaliyah dan Andi Erwin Eka Putra)

Injeksi uap dalam pembakaran merupakan teknik yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi polutan selama 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. Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja tungku biomassa injeksi uap menggunakan bahan bakar kayu cemara gunung, tempurung kelapa dan cangkang biji kemiri. Penelitian ini dilaksanakan di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin tepatnya di Laboratorium Motor Bakar Departemen Teknik Mesin. Pengujian menggunakan 3 variasi injeksi yaitu tanpa injeksi uap, injeksi uap *over-fire* dan injeksi uap *under-fire*, dengan volume air injeksi 500 ml. Kinerja tungku biomassa injeksi uap telah dilakukan pengujian dengan fase daya tinggi dan uji emisi CO dan CO₂, didapatkan variasi terbaik yaitu variasi injeksi uap *over-fire* dengan bahan bakar kayu cemara gunung yang menghasilkan efisiensi termal sebesar 21%, daya termal 5,9963 kkal/s, FCR 0,0014 kg/s dan waktu mendidihkan air 11 menit 6 detik. Perubahan entalpi (ΔH) dengan nilai paling tinggi didapatkan dari bahan bakar tempurung kelapa pada variasi injeksi uap *under-fire* sebesar 3644,94 kJ/mol, sedangkan nilai terendah didapatkan dari bahan bakar cangkang biji kemiri pada variasi injeksi uap *over-fire* sebesar 635,11 kJ/mol. Perbandingan hasil pengujian emisi CO dan CO₂, variasi injeksi uap *over-fire* dengan bahan bakar tempurung kelapa memiliki emisi CO dan CO₂ paling tinggi pada semua variasi bahan bakar dan variasi injeksi uap yaitu CO: 1923 ppm (1,92 g/kg) dan CO₂: 4693 ppm. Emisi paling rendah dengan bahan bakar kayu cemara gunung pada variasi tanpa injeksi uap yaitu CO: 750 ppm (0.75 g/kg) dan CO₂: 2053 ppm.

Kata kunci: tungku injeksi uap, biomassa, kayu cemara gunung, tempurung kelapa, cangkang biji kemiri, kinerja

ABSTRACT

Topan Limbongallo. *Performance Analysis of Steam Injection Biomass Cookstove with Biomass Fuel Variations* (supervised by Novriany Amaliyah and Andi Erwin Eka Putra)

Steam injection in combustion enhances combustion efficiency and reduces pollutant emissions. This technique improves cookstove performance and efficiency without relying on electrical power by leveraging the heat energy from the biomass cookstove for steam injection. This study aims to test the performance of a steam injection biomass cookstove using mountain fir wood, coconut shells, and candlenut shells as fuel. This research was conducted in Internal Combustion Laboratory at Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Hasanuddin University. The testing involved three injection variations: without steam injection, over-fire steam injection, and under-fire steam injection, using 500 ml injection water. The performance of the steam injection biomass cookstove was tested during high power phases, and CO and CO₂ emission tests were conducted. The best variation was found to be the over-fire steam injection using mountain fir wood, which achieved a thermal efficiency at 21%, a thermal power at 5.9963 kkal/s, an FCR at 0.0014 kg/s, and a water boiling time at 11 minutes and 6 seconds. The highest enthalpy change (ΔH) value is obtained from coconut shell fuel with a steam injection under-fire variation at 3644,94 kJ/mol, while the lowest value is obtained from candlenut shell fuel with a steam injection over-fire variation at 635,11 kJ/mol. Comparing the results of CO and CO₂ emission tests, the over-fire steam injection variation with coconut shell fuel has the highest CO and CO₂ emissions across all fuel variations and steam injection variations, with CO at 1923 ppm (1.92 g/kg) and CO₂ at 4693 ppm. The lowest emissions are observed with mountain spruce wood fuel in the no steam injection variation, with CO at 750 ppm (0.75 g/kg) and CO₂ at 2053 ppm.

Keyword: steam injection cookstove, biomass, mountain fir wood, coconut shell, candlenut shell, performance

DAFTAR ISI

SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Biomassa	5
2.1.1 Kayu Cemara Gunung (Casuarina Equisetifolia).....	7
2.1.2 Tempurung Kelapa	8
2.1.3 Cangkang Biji Kemiri	9
2.2 Tungku Biomassa	9
2.3 Prinsip Desain Tungku Biomassa	13
2.3.1 Prinsip Pertama	14
2.3.2 Prinsip Kedua.....	14
2.3.3 Prinsip Ketiga.....	15

2.3.4 Prinsip Keempat.....	16
2.3.5 Prinsip Kelima	16
2.3.6 Prinsip Keenam.....	17
2.3.7 Prinsip Ketujuh	17
2.3.8 Prinsip Kedelapan	18
2.3.9 Prinsip Kesembilan	19
2.3.10 Prinsip Kesepuluh	19
2.4 Mendesain Tungku Biomassa	20
2.5 Sistem Injeksi Uap	25
2.5.1 Manfaat Injeksi Uap pada Pembakaran	25
2.5.2 Tungku Biomassa dengan Injeksi Uap.....	26
2.6 Parameter Pengujian Karakteristik/ Kinerja.....	30
2.6.1 Laju Konsumsi Bahan Bakar (<i>Fuel Consumption Rate</i>).....	30
2.6.2 Daya Termal	30
2.6.3 Efisiensi Termal	31
2.6.4 Emisi	32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	33
3.2 Alat dan Bahan	33
3.2.1 Alat.....	33
3.2.2 Bahan	35
3.3 Skema Penelitian.....	37
3.3.1 Pengujian Mendidihkan Air	37
3.3.2 Pengujian Emisi Karbon Monoksida (CO) dan Karbon Dioksida (CO ₂)	38
3.4 Metode Pengambilan Data	39

3.4.1 Studi Lapangan (Field Research).....	39
3.4.2 Studi Kepustakaan (Library Research)	39
3.5 Prosedur Penelitian.....	39
3.5.1 Persiapan Biomassa.....	39
3.5.2 Pengujian.....	40
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 HASIL	45
4.2 PERHITUNGAN	50
4.2.1 Laju Konsumsi Bahan Bakar	50
4.2.2 Daya Termal	50
4.2.3 Efisiensi Termal	51
4.2.4 Reaksi Pembakaran	52
4.3 PEMBAHASAN	57
4.3.1 Temperatur Ruang Pembakaran	57
4.3.2 Kemampuan Mendidihkan Air.....	59
4.3.3 Laju Konsumsi Bahan Bakar	61
4.3.4 Daya Termal.....	63
4.3.5 Efisiensi Termal	64
4.3.6 Emisi	65
4.3.7 Perubahan Entalpi	69
BAB V PENUTUP.....	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	72
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Konversi Biomassa (Laondi, 2021)	7
Gambar 2. 2 Geometri tungku biomassa injeksi udara. Panel A: sistem injeksi over-fire yang menggunakan anulus jet, tepat di atas ruang bakar. Panel B: skema injeksi udara under fire yang menggunakan pelat berlubang sebagai permukaan bawah ruang bakar. Panel C: skema injeksi udara bertahap yang menggabungkan injeksi udara over-fire dan under-fire menggunakan empat tabung berlubang yang diposisikan di bawah dan di atas ruang bakar (Barbour et al., 2021)	11
Gambar 2. 3 Kompor yang diuji dengan Jet-Flame (baris bawah) dan tanpa Jet-Flame (baris atas), termasuk (kiri ke kanan) open fire, Asian Bucket, African Bucket, Heavy Rocket, Medium Rocket, Light Rocket (Bentson et al., 2022).	12
Gambar 2. 4 Isolasi di sekeliling api (Bryden et al., 2005)	14
Gambar 2. 5 Cerobong asap pendek terisolasi di atas api (Bryden et al., 2005) ..	15
Gambar 2. 6 (A) Pembakaran yang lebih bersih, (B) Kayu yang membara menghasilkan asap (Bryden et al., 2005)	15
Gambar 2. 7 (A) Panas rendah, (B) Panas tinggi (Bryden et al., 2005)	16
Gambar 2. 8 Mempertahankan aliran udara yang baik (Bryden et al., 2005).....	16
Gambar 2. 9 Menyeimbangkan aliran udara di kompor multipot (Bryden et al., 2005)	17
Gambar 2. 10 Mempertahankan luas penampang konstan (Bryden et al., 2005). 18	
Gambar 2. 11 Penggunaan alas jeruji di bawah api (Bryden et al., 2005).....	19
Gambar 2. 12 (A) Celah berukuran tepat mengoptimalkan perpindahan panas ke panci, (B) Celah yang terlalu besar akan mengurangi perpindahan panas ke panci (Bryden et al., 2005).....	20
Gambar 2. 13 Saluran sempit dekat pot meningkatkan perpindahan panas konveksi (Bryden et al., 2005).....	21
Gambar 2. 14 Tipikal Tungku Winiarki (Bryden et al., 2005).....	22
Gambar 2. 15 Pemanfaatan Injeksi Uap pada Flare Pembuangan Gas. Efektivitas uap dalam menekan asap: (kiri) tanpa uap, (kanan) dengan uap (Callidus Technologies, 2019)	26
Gambar 2. 16 Tungku Biomassa Injeksi Uap	28

Gambar 2. 17 Bagian-bagian Tungku Biomassa Injeksi Uap Over-fire pada pusat saluran cerobong	28
Gambar 2. 18 Komponen injektor over-fire dan under-fire pada tungku	29
Gambar 2. 19 Tungku biomassa sekam padi dengan injeksi uap over-fire dari sisi cerobong (https://stoves.bioenergylists.org/belonioqgas)	29
Gambar 2. 20 Pengukuran emisi gas pembakaran dari tungku (Clean Cooking Alliance, 2014)	32
Gambar 3. 1 Tungku Biomassa Injeksi Uap	33
Gambar 3. 2 Termokopel dan Sensor type K (https://hanyoungnux.com)	34
Gambar 3. 3 Timbangan Digital	34
Gambar 3. 4 Panci	34
Gambar 3. 5 Alat Ukur Emisi/ Kualitas Udara	35
Gambar 3. 6 Anemometer	35
Gambar 3. 7 Batang Kayu Cemara Gunung	35
Gambar 3. 8 Tempurung Kelapa	36
Gambar 3. 9 Cangkang Biji Kemiri	36
Gambar 3. 10 Air	36
Gambar 3. 11 Skema Penelitian (pengujian mendidihkan air)	37
Gambar 3. 12 Skema Penelitian (pengujian emisi)	38
Gambar 4. 1 Grafik temperatur ruang bakar tungku untuk bahan bakar batang kayu cemara gunung	58
Gambar 4. 2 Grafik temperatur ruang bakar tungku untuk bahan bakar tempurung kelapa	58
Gambar 4. 3 Grafik temperatur ruang bakar tungku untuk bahan bakar cangkang biji kemiri	59
Gambar 4. 4 Grafik temperatur air dalam panci untuk bahan bakar batang kayu cemara gunung	60
Gambar 4. 5 Grafik temperatur air dalam panci untuk bahan bakar tempurung kelapa	61
Gambar 4. 6 Grafik temperatur air dalam panci untuk bahan bakar cangkang biji kemiri	61

Gambar 4. 7 Grafik laju konsumsi bahan bakar untuk tiga variasi bahan bakar dan tiga variasi injeksi	62
Gambar 4. 8 Grafik daya termal untuk tiga variasi bahan bakar dan tiga variasi injeksi	64
Gambar 4. 9 Grafik efisiensi termal untuk tiga variasi bahan bakar dan tiga variasi injeksi	65
Gambar 4. 10 Grafik hasil uji emisi CO untuk bahan bakar batang kayu cemara gunung.....	67
Gambar 4. 11 Grafik hasil uji emisi CO ₂ untuk bahan bakar batang kayu cemara gunung.....	67
Gambar 4. 12 Grafik hasil uji emisi CO bahan bakar tempurung kelapa.....	68
Gambar 4. 13 Grafik hasil uji emisi CO ₂ bahan bakar tempurung kelapa.....	68
Gambar 4. 14 Grafik hasil uji emisi CO untuk bahan bakar cangkang biji kemiri.....	69
Gambar 4. 15 Grafik hasil uji emisi CO ₂ untuk bahan bakar cangkang biji kemiri.....	69
Gambar 4. 16 Grafik hasil perhitungan perubahan entalpi (ΔH).....	70
Gambar A. 1 Grafik temperatur pada ujung cerobong untuk bahan bakar batang kayu cemara gunung	93
Gambar A. 2 Grafik temperatur pada ujung cerobong untuk bahan bakar tempurung kelapa	93
Gambar A. 3 Grafik temperatur pada ujung cerobong untuk bahan bakar cangkang biji kemiri.....	94
Gambar A. 4 Grafik temperatur air injeksi untuk bahan bakar batang kayu cemara gunung.....	94
Gambar A. 5 Grafik temperatur air injeksi untuk bahan bakar tempurung kelapa.....	95
Gambar A. 6 Grafik temperatur air injeksi untuk bahan cangkang biji kemiri	95

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Analisis Proximate dan Ultimate Batang Kayu Cemara Gunung (Manavalla & Sreekanth, 2014)	8
Tabel 2. 2. Analisis Proximate dan Ultimate Tempurung Kelapa (Sarkar & Wang, 2020)	8
Tabel 2. 3. Analisis Proximate dan Ultimate Cangkang Biji Kemiri (Patabang et al., 2019).....	9
Tabel 2. 4. Hasil pengujian: Perbedaan kinerja antara tungku biomassa dengan sistem injeksi over-fire, injeksi udara under-fire, injeksi udara over-fire dan under-fire (Barbour et al., 2021).....	12
Tabel 2. 5. Hasil pengujian: Perbedaan kinerja antara tungku biomassa dengan Jet-Flame dan tungku biomassa tanpa Jet-Flame (Bentson et al., 2022).	13
Tabel 2. 6. Luas potongan melintang untuk ruang bakar berbentuk persegi (Bryden et al., 2005).....	23
Tabel 2. 7. Luas potongan melintang untuk ruang pembakaran melingkar (Bryden et al., 2005).....	24
Tabel 4. 1. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air, bahan bakar batang kayu cemara gunung	45
Tabel 4. 2. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air, bahan bakar tempurung kelapa	45
Tabel 4. 3. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air, bahan bakar cangkang biji kemiri.....	46
Tabel 4. 4. Rekapitulasi hasil analisis ultimate dan nilai kalor.....	46
Tabel 4. 5. Rekapitulasi hasil pengujian emisi Karbon Monoksida (CO) dan Karbon Dioksida (CO ₂), bahan bakar batang kayu cemara gunung.....	47
Tabel 4. 6. Rekapitulasi hasil pengujian emisi Karbon Monoksida (CO) dan Karbon Dioksida (CO ₂), bahan bakar tempurung kelapa	48
Tabel 4. 7. Rekapitulasi hasil pengujian emisi Karbon Monoksida (CO) dan Karbon Dioksida (CO ₂), bahan bakar cangkang biji kemiri.....	49
Tabel 4. 8. Rekapitulasi perhitungan kinerja tungku bahan bakar batang kayu cemara gunung	51

Tabel 4. 9. Rekapitulasi perhitungan kinerja tungku bahan bakar tempurung kelapa	51
Tabel 4. 10. Rekapitulasi perhitungan kinerja tungku bahan bakar cangkang biji kemiri	52
Tabel 4. 11. Rekapitulasi nilai CO ₂ , CO, Uap injeksi H ₂ O dan udara yang dipakai dalam perhitungan reaksi kimia	52
Tabel 4. 12. Rekapitulasi perhitungan perubahan entalpi bahan bakar batang kayu cemara gunung	56
Tabel 4. 13. Rekapitulasi perhitungan perubahan entalpi bahan bakar tempurung kelapa	56
Tabel 4. 14. Rekapitulasi perhitungan perubahan entalpi bahan bakar cangkang biji kemiri	56
Tabel A. 1. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi tanpa injeksi uap (batang kayu cemara gunung)	75
Tabel A. 2. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi injeksi uap over-fire (batang kayu cemara gunung).....	76
Tabel A. 3. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi injeksi uap under-fire (batang kayu cemara gunung).....	77
Tabel B. 1. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi tanpa injeksi uap (tempurung kelapa)	78
Tabel B. 2. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi injeksi uap over-fire (tempurung kelapa).....	79
Tabel B. 3. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi injeksi uap under-fire (tempurung kelapa).....	80
Tabel C. 1. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi tanpa injeksi uap (cangkang biji kemiri)	81
Tabel C. 2. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi injeksi uap over-fire (cangkang biji kemiri)	82
Tabel C. 3. Rekapitulasi hasil pengujian mendidihkan air variasi injeksi uap under-fire (cangkang biji kemiri)	83

Tabel D. 1. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ , variasi tanpa injeksi uap (batang kayu cemara gunung)	84
Tabel D. 2. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ , variasi injeksi uap over-fire (batang kayu cemara gunung)	85
Tabel D. 3. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ , variasi injeksi uap under-fire (batang kayu cemara gunung)	86
Tabel E. 1. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ variasi tanpa injeksi uap (tempurung kelapa).....	87
Tabel E. 2. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ variasi injeksi uap over-fire (tempurung kelapa)	88
Tabel E. 3. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ injeksi uap under-fire (tempurung kelapa)	89
Tabel F. 1. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ , variasi tanpa injeksi uap (cangkang biji kemiri)	90
Tabel F. 2. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ , injeksi uap over-fire (cangkang biji kemiri).....	91
Tabel F. 3. Rekapitulasi hasil pengujian emisi CO dan CO ₂ , injeksi uap under-fire (cangkang biji kemiri).....	92

DAFTAR SIMBOL

FCR	Laju konsumsi bahan bakar	kg/s
m_f	Berat bahan bakar sebelum pengujian	kg
m_{fc}	Berat bahan bakar yang telah terbakar/ digunakan	kg
m_{ff}	Berat bahan bakar setelah pengujian/ tersisa	kg
t_f	Lama waktu pengujian	s
FP	Daya termal	kcal/s
HVF	Nilai kalor (<i>heating value</i>) bahan bakar	kcal/kg
η_t	Efisiensi termal	%
SH	Panas sensible	kcal
LH	Panas laten	kcal
M_w	massa air	kg
C_p	Panas jenis air	kcal/kg.°C
T_f	Temperatur air mendidih	°C
T_i	Temperatur air sebelum mendidih	°C
W_e	Berat air yang diuapkan	kg
H_{fg}	Panas laten air	kcal/kg
t_D	Titik didih	°C
h	Ketinggian lokasi dari permukaan laut	meter

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi memainkan peran penting dalam kehidupan kita sehari-hari. Energi adalah salah satu masukan penting bagi pembangunan sosial-ekonomi di negara mana pun. Berbagai cara digunakan supaya kelimpahan energi di sekitar kita dapat disimpan, diubah, dan diperkuat untuk digunakan. Produksi energi juga selalu menjadi perhatian para peneliti sebagai pengambil kebijakan (Demirbas, 2009).

Pengklasifikasian sumber energi dibagi menjadi tiga kelompok: sumber energi fosil, sumber energi terbarukan, dan sumber energi nuklir (fisil). Terbentuknya bahan bakar fosil terjadi pada periode geologis yang lebih awal dan tidak terbarukan. Sumber energi fosil adalah minyak bumi, batu bara, bitumen, gas alam, serpih minyak, dan pasir tar. Bahan bakar sebagian besar berasal dari sumber daya mineral, minyak bumi, dan batu bara yang tidak dapat diperbaharui, yang menyebabkan pencemaran lingkungan, emisi gas rumah kaca, dan masalah keamanan energi. Sumber energi terbarukan meliputi sumber energi biomassa, air, angin, matahari (baik termal maupun fotovoltaik), panas bumi, dan kelautan. Sumber energi utama dari nuklir (fisil) adalah uranium dan thorium.

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 tungku/kompor biomassa, dimana 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).

Hampir 40% populasi dunia masih mengandalkan kompor biomassa sebagai alat utama untuk memasak. Teknologi injeksi udara, dalam bentuk *over-fire*, *under-fire*, dan *staged* (kombinasi antara *under-fire* dan *over-fire*), 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 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%).

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-Flameforced 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 (*Natrual 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%.

Teknologi 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. Proses injeksi uap pada tungku tanpa memakai alat bantu untuk menaikkan tekanannya, tetapi memanfaatkan tekanan uap dari air yang mendidih dalam penampungan tertutup, kemudian uap dikeluarkan melalui lubang kecil pada pipa injektor. Kinerja dari tungku yang dianalisis adalah kemampuan mendidihkan air, laju konsumsi bahan bakar, daya termal, efisiensi termal dan pengujian emisi CO dan CO₂, oleh karena itu penulis akan melakukan penelitian dengan judul **“ANALISIS KINERJA TUNGKU BIOMASSA INJEKSI UAP DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA”**.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja tungku biomassa injeksi uap dengan bahan bakar batang kayu cemara gunung, tempurung kelapa dan cangkang biji kemiri?
2. Bagaimana emisi CO dan CO₂ dari tungku biomassa injeksi uap dengan bahan bakar batang kayu cemara gunung, tempurung kelapa dan cangkang biji kemiri?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis kinerja tungku biomassa injeksi uap dengan bahan bakar batang kayu cemara gunung, tempurung kelapa dan cangkang biji kemiri.
2. Untuk mengukur emisi CO dan CO₂ dari tungku biomassa injeksi uap dengan bahan bakar batang kayu cemara gunung, tempurung kelapa dan cangkang biji kemiri?

1.4 Batasan Masalah

1. Tipe tungku pembakaran yang digunakan adalah tungku/kompor roket dengan injeksi uap *over fire*.
2. Tiga variasi injeksi uap yang digunakan: tanpa injeksi uap, injeksi uap *overfire* dan injeksi uap *underfire*.
3. Biomassa yang digunakan adalah batang kayu cemara gunung, tempurung kelapa dan cangkang biji kemiri.
4. Cairan yang digunakan untuk injeksi uap adalah air tawar (H_2O).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilaksanakannya penelitian ini adalah diketahuinya kinerja tungku biomassa injeksi uap dengan bahan bakar padat dan sebagai bahan informasi untuk penelitian selanjutnya yang kemudian dapat dikembangkan untuk penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

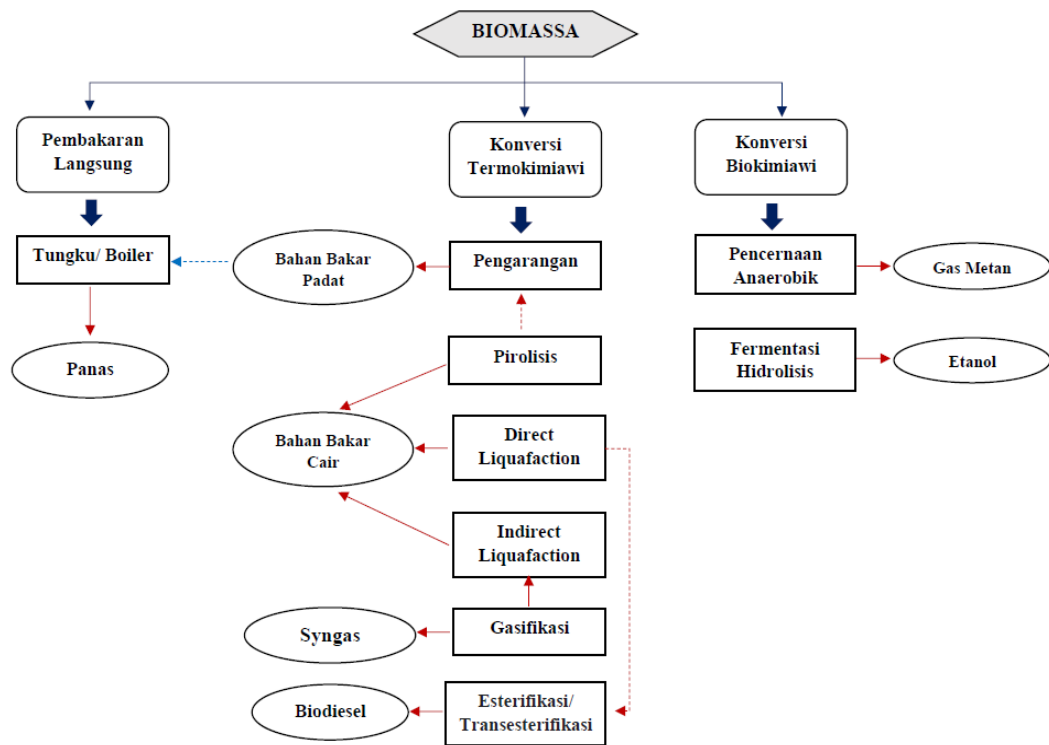
2.1 Biomassa

Biomassa adalah istilah umum untuk semua bahan nabati. Umumnya merupakan istilah untuk bahan yang berasal dari tanaman yang sedang tumbuh atau dari kotoran hewan. Biomassa memiliki karakteristik yang unik dibandingkan dengan bentuk energi terbarukan lainnya: biomassa dapat berbentuk cair, gas, dan padat, sehingga dapat digunakan untuk pembangkit listrik atau tenaga mekanik dan panas. Jika biomassa dapat diubah menjadi energi yang bermanfaat, konsumsi bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca akan berkurang. Selain itu, penggunaan biomassa dapat mengarah pada penciptaan industri biomassa baru, yang akan membantu merevitalisasi pertanian dan kehutanan, sehingga menghasilkan stabilitas sosial serta stimulus ekonomi (Saga et al., 2008).

Komponen biomassa antara lain selulosa, hemiselulosa, lignin, ekstraktif, lipid, protein, gula sederhana, pati, air, hidrokarbon, abu, dan senyawa lainnya. Dua kategori karbohidrat besar yang memiliki nilai signifikan adalah selulosa dan hemiselulosa (holoselulosa). Fraksi lignin terdiri dari makromolekul jenis non-gula. Tiga komponen struktural adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang masing-masing memiliki rumus kasar $\text{CH}_{1.67}\text{O}_{0.83}$, $\text{CH}_{1.64}\text{O}_{0.78}$, dan $\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{O}_{3.5}$ (Demirbas, 2009).

Sistem energi saat ini sangat bergantung pada penggunaan bahan bakar fosil. Menghadapi tantangan menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan kenaikan harga minyak dunia, banyak negara telah mengambil inisiatif untuk mendorong pengembangan dan penyebaran energi terbarukan. Indonesia merupakan salah satu negara potensial untuk pengembangan energi terbarukan. Terdapat banyak sumber energi terbarukan yang potensial untuk mendukung pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Biomassa terbarukan tetap menjadi sumber energi yang penting, karena 55% penduduk di Indonesia menggunakan biomassa untuk memasak. Dengan lebih dari separuh penduduk Indonesia tinggal di daerah pedesaan, biomassa merupakan solusi hemat biaya untuk menyediakan layanan energi di daerah pedesaan (Prastowo, 2011).

Bahan bakar biomassa padat terutama terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen. Idealnya, semua hydrogen dan karbon akan terpecah dan bergabung dengan oksigen di udara untuk menghasilkan uap air, karbon dioksida, dan panas. Temperatur nyala api dapat melebihi 2000°C, tergantung pada nilai kalor dan kadar air bahan bakar (karakteristik bahan bakar), jumlah udara yang digunakan untuk membakar bahan bakar dan desain, konfigurasi dan konstruksi kompor biomassa padat. Suhu nyala api yang tinggi berkaitan erat dengan efisiensi termal dan cenderung meningkatkannya. Kondisi ini dapat dicapai ketika terjadi pembakaran sempurna, yang menurunkan kerugian dan mengekstraksi seluruh energi dari biomassa sebagai bahan bakar. Dalam prakteknya, untuk memperoleh pembakaran yang sempurna sangat sulit disebabkan oleh berbagai faktor. Faktor teknis yang dapat mempengaruhi pembakaran sempurna adalah rasio bahan bakar/udara, cara penyediaan bahan bakar, serta suplai udara primer dan sekunder. Rasio bahan bakar dan udara yang sempurna diperlukan agar pembakaran stoikiometri dapat berlangsung. Dalam praktiknya, untuk mencapai pembakaran sempurna, jumlah udara yang digunakan dalam proses pembakaran perlu ditingkatkan untuk menjamin pembakaran seluruh bahan bakar biomassa. Jumlah udara yang harus ditambahkan untuk memastikan semua energi dapat diambil disebut udara berlebih. Kelebihan udara yang dibutuhkan untuk berbagai desain kompor berkisar antara 5% hingga 50%, bergantung pada sifat bahan bakar dan konfigurasi kompor (Baxter et al., 1998).



Gambar 2. 1 Skema Konversi Biomassa (Laondi, 2021)

2.1.1 Kayu Cemara Gunung (*Casuarina Equisetifolia*)

Casuarina berasal dari bahasa Melayu “kasuari” karena terdapat kemiripan antara ranting pohon dengan bulu burung kasuari. Sedangkan nama spesiesnya berasal dari bahasa latin “equines” yang berkaitan dengan kuda dan “folium” yang berarti daun. Sebagaimana bentuk dari ranting pohon cemara yang halus terkulai menyerupai rambut dari kuda (Natural Research Council, 1984).

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. Selain sebagai sumber energi, kayu cemara juga banyak digunakan sebagai tiang bangunan, rakit, balok, roda pedati bahkan digunakan sebagai bahan pembuat kertas (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. Batang kayu cemara gunung memiliki nilai kalor sebesar 17.94 MJ/kg (Dirgantara et al., 2020).

Tabel 2. 1. Analisis Proximate dan Ultimate Batang Kayu Cemara Gunung (Manavalla & Sreekanth, 2014)

Proximate Analysis (%)			
Volatile Matters (VM)	Moisture (M)	Ash(A)	Fixed Carbon (FC)
72.5	10.8	0.3	16.4

Ultimate Analysis (%)			
Carbon(C)	Nitrogen (N)	Hydrogen (H)	Oxygen (O2)
42.5	0.16	6.1	51.24

2.1.2 Tempurung Kelapa

Kelapa merupakan komoditi unggulan selain dibuat kopra maupun untuk konsumsi. Tempurung kelapa terletak pada bagian dalam buah kelapa setelah sabut kelapa. Tempurung kelapa merupakan lapisan keras yang memiliki ketebalan 3 mm sampai 5 mm. Selama ini limbah tempurung kelapa dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk memasak, dibuat cinderamata, digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan briket arang dan juga serbuk arang tempurung kelapa digunakan sebagai bahan pengisi *filter*.

Tempurung kelapa memiliki nilai kalor sebesar 17.4 MJ/kg (Amoako & Mensah-Amoah, 2019) dan Nilai kalor bruto tempurung kelapa sebesar 16.70 MJ/kg (Ghafar et al., 2020).

Tabel 2. 2. Analisis Proximate dan Ultimate Tempurung Kelapa (Sarkar & Wang, 2020)

Proximate Analysis (%)			
Volatile Matters (VM)	Moisture (M)	Ash(A)	Fixed Carbon (FC)
75.5	10.1	3.2	11.2

Ultimate Analysis (%)			
Carbon(C)	Nitrogen (N)	Hydrogen (H)	Oxygen (O2)
39.22	0.22	4.46	56.1

2.1.3 Cangkang Biji Kemiri

Aleurites moluccana (L.) Willd, atau lebih dikenal dengan nama kemiri, merupakan salah satu pohon serbaguna yang sudah dibudidayakan secara luas di dunia. Jenis ini merupakan jenis asli Indo-Malaysia dan sudah diintroduksi ke Kepulauan Pasifik sejak jaman dahulu. Di Indonesia, kemiri telah lama ditanam, baik untuk tujuan komersial maupun subsisten untuk menunjang kehidupan masyarakat sehari-hari, terutama bagi masyarakat Indonesia bagian timur. Jenis ini dapat digunakan untuk berbagai tujuan; bijinya dapat digunakan sebagai bahan media penerangan, masakan dan obat-obatan, sedangkan batangnya dapat digunakan untuk kayu (Krisnawati et al., 2011).

Biji kemiri diselimuti oleh kulit/ cangkang yang keras. Cangkang biji kemiri dimanfaatkan untuk bahan bakar dan ada juga yang dimanfaatkan untuk campuran semen sebagai pengganti batu. Cangkang biji kemiri memiliki sifat keras dengan nilai kalor sebesar 4.936 kkal/kg (Patabang et al., 2019).

Tabel 2. 3. Analisis Proximate dan Ultimate Cangkang Biji Kemiri (Patabang et al., 2019)

Proximate Analysis (%)				
Volatile Matters (VM)	Moisture (M)	Ash(A)	Fixed Carbon (FC)	HHV (kkal/kg)
63.00	6.72	0.47	28.69	4.936

Ultimate Analysis (%)				
Carbon(C)	Nitrogen (N)	Hydrogen (H)	Sulfur (S)	Oxygen (O2)
19.47	0.33	15.49	0.032	64.21

2.2 Tungku Biomassa

Tungku atau kompor adalah alat masak yang menghasilkan panas tinggi. Tungku mempunyai ruang tertutup/ terisolasi dari luar sebagai tempat bahan bakar diproses untuk memberikan pemanasan bagi barang-barang yang diletakkan di atasnya. Tungku/ kompor diperkenalkan sejak masa kolonial, yang menggunakan bahan bakar cair (terutama minyak tanah atau spiritus bakar), gas (dalam bentuk padatan cair LPG atau lewat pipa saluran), atau elemen pemanas (dengan daya listrik). Dalam ukuran besar, kompor dipakai di pabrik-pabrik yang membutuhkan

proses pemanasan dengan kebutuhan kalori tinggi. Untuk skala kecil, kompor digunakan secara luas di setiap rumah tangga untuk memasak. Memasak umumnya dilakukan dengan media panci, wajan, ketel, sedangkan memasak tanpa media disebut pemanggangan (Yunus Nasution et al., 2022).

Persyaratan tungku/kompor harus memiliki (Abdul Ajis et al., 2015):

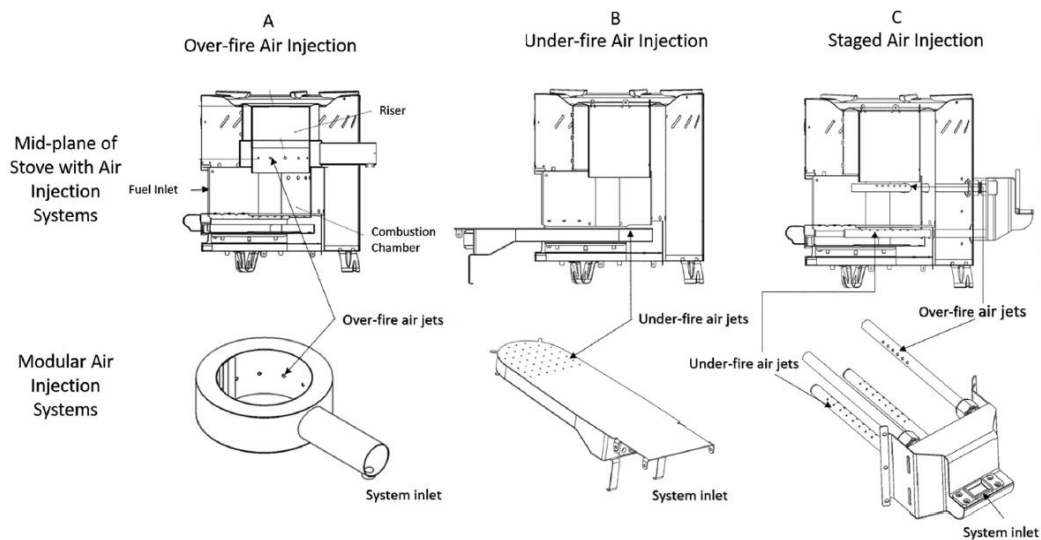
- 1) Ruang bakar untuk bahan bakar.
- 2) Aliran udara dari lubang bawah menuju lubang atas dengan melewati ruang bakar yang terdiri dari aliran udara primer dan sekunder.
- 3) Ruang untuk menampung abu dari bahan bakar biomassa yang terletak di bawah ruang bakar.

Jenis-jenis tungku biomassa (Global Alliance for Clean Cookstoves, n.d.):

1. Tungku dengan pengoperasian berkelompok, merujuk pada kompor yang dioperasikan dengan satu muatan bahan bakar pada satu waktu.
2. Tungku/ kompor yang diberi bahan bakar secara terus menerus: membutuhkan bahan bakar yang harus diisi selama proses memasak.
3. Tungku/ kompor roket berbahan bakar batang kayu atau residu biomassa yang diumpankan secara terus menerus melalui sisi kompor, biasanya diletakkan di atas jeruji sehingga abu dan arang dapat mengendap di bawahnya. Udara masuk melalui aliran alami atau paksa melalui bukaan yang sama dengan bahan bakar. (Contoh: *Grameen Greenway Stove*, *Envirofit G-3300*, *Ecozoom Zoom Stove*).
4. Tungku/ kompor gasifier bahan bakar diumpankan secara berkelompok atau kontinyu menggunakan bahan bakar olahan (misalnya pelet, residu berukuran kecil). Pembakaran terjadi di dua zona—zona pirolisis dimana bahan bakar dipanaskan untuk menghasilkan gas yang mudah terbakar, dan zona pembakaran dimana gas pirolisis bercampur dengan udara dan dibakar untuk menghasilkan panas. (Contoh : *Awamu Troika*, *Mimi Moto*, *Philips ACE I*)
5. Tungku arang dioperasikan secara berkelompok dan berbahan bakar arang atau biomassa berkarbonisasi, yang diproduksi melalui pirolisis untuk menghilangkan bahan mudah menguap dan menyisakan sebagian besar karbon. (Contoh: *Jiko Ceramic Kenya*, *Envirofit CH-2200*, *Burn Jikokoa*)

6. Tungku/ kompor dengan aliran paksa kipas, memiliki udara yang dipaksa masuk ke dalam kompor menggunakan kipas atau blower untuk meningkatkan turbulensi dan menghasilkan pembakaran yang lebih bersih (Contoh: *BioLite HomeStove*)

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.

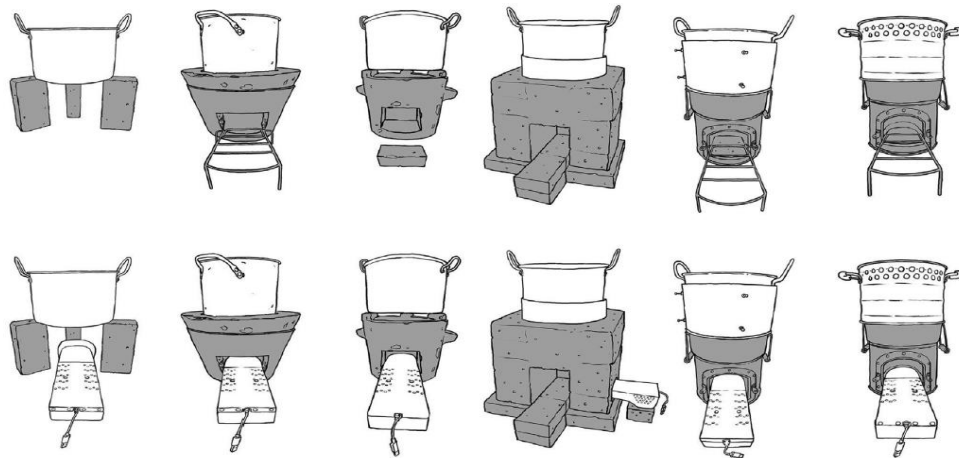


Gambar 2. 2 Geometri tungku biomassa injeksi udara. Panel A: sistem injeksi *over-fire* yang menggunakan anulus jet, tepat di atas ruang bakar. Panel B: skema injeksi udara *under fire* yang menggunakan pelat berlubang sebagai permukaan bawah ruang bakar. Panel C: skema injeksi udara bertahap yang menggabungkan injeksi udara *over-fire* dan *under-fire* menggunakan empat tabung berlubang yang diposisikan di bawah dan di atas ruang bakar (Barbour et al., 2021)

Tabel 2. 4. Hasil pengujian: Perbedaan kinerja antara tungku biomassa dengan sistem injeksi *over-fire*, injeksi udara *under-fire*, injeksi udara *over-fire* dan *under-fire* (Barbour et al., 2021)

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	mg/min	2.6	5.1	2.2	25.3

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-Flameforced 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.



Gambar 2. 3 Kompor yang diuji dengan Jet-Flame (baris bawah) dan tanpa Jet-Flame (baris atas), termasuk (kiri ke kanan) *open fire*, *Asian Bucket*, *African Bucket*, *Heavy Rocket*, *Medium Rocket*, *Light Rocket* (Bentson et al., 2022).

Tabel 2. 5. Hasil pengujian: Perbedaan kinerja antara tungku biomassa dengan Jet-Flame dan tungku biomassa tanpa Jet-Flame (Bentson et al., 2022).

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

2.3 Prinsip Desain Tungku Biomassa

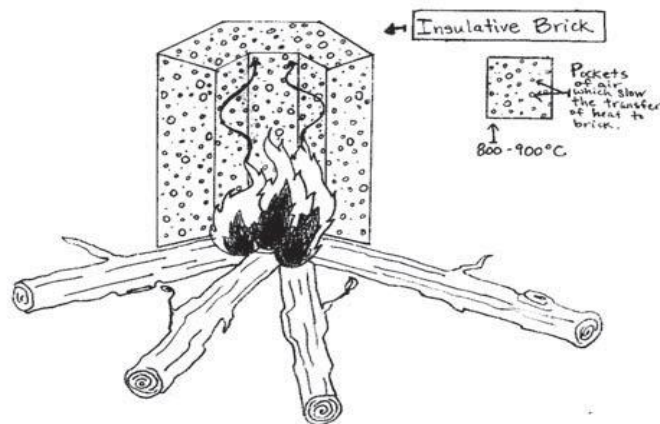
Dalam kondisi stabil, badan tungku yang tebal dan padat dengan konduktivitas termal yang rendah, tetapi kalor jenis yang tinggi akan menghantarkan lebih sedikit energi dari api dibandingkan badan yang lebih tipis dan kurang konduktif. Namun, kecil kemungkinannya hal ini akan mengimbangi banyaknya energi yang diserap saat tungku melakukan pemanasan. Oleh karena itu disarankan untuk menggunakan bahan yang tipis dan berkepadatan rendah dalam konstruksi tungku (Baldwin, 1987).

Tungku/ kompor roket adalah desain tungku yang dikembangkan oleh Larry Winiarski dan Aprovecho Institute. Kompor ini dilengkapi ruang bakar berbentuk L dan “rok” panci untuk meningkatkan perpindahan panas dan efisiensi pembakaran selama aktivitas memasak. Ruang bakar terdiri dari ruang bahan bakar horizontal dan cerobong internal vertikal. Kayu dimasukkan secara horizontal ke dalam wadah bahan bakar untuk memastikan pembakaran merata dari satu ujung dan laju pengumpanan lebih mudah diatur. Cerobong internal menciptakan aliran udara, mempercepat gas pembakaran dari api. Gas-gas ini kemudian dipaksa melalui lapisan yang mengelilingi panci masak. Perpindahan panas konveksi yang lebih besar merupakan hasil dari peningkatan adveksi dan peningkatan luas kontak permukaan (Bryden et al., 2005).

Setiap tipe kompor kayu yang diumpankan bahan bakar secara berkala dapat dirancang awalnya oleh komunitas lokal untuk memenuhi kebutuhan mereka, lalu disempurnakan dengan mengadaptasi prinsip-prinsip berikut ini (Bryden et al., 2005):

2.3.1 Prinsip Pertama

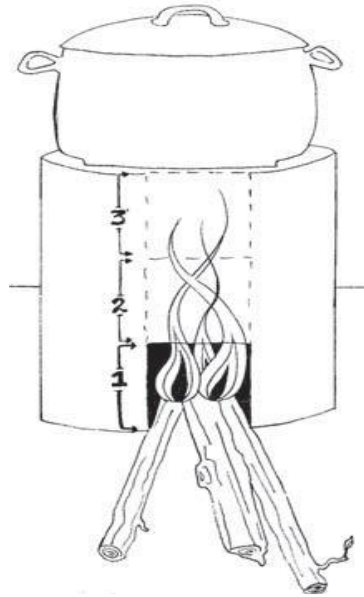
Menggunakan bahan yang ringan dan tahan panas untuk isolasi di sekitar api. Jika memungkinkan, menghindari bahan berat seperti pasir dan tanah liat; isolasi sebaiknya ringan dan mengandung banyak kantong udara kecil. Contoh bahan isolasi alami meliputi batu pumice, vermikulit, perlit, dan abu kayu. Bata refraktori ringan (bata yang dibakar dan tahan retak pada suhu tinggi) dapat dibuat dari sumber yang tersedia di sekitar.



Gambar 2. 4 Isolasi di sekeliling api (Bryden et al., 2005)

2.3.2 Prinsip Kedua

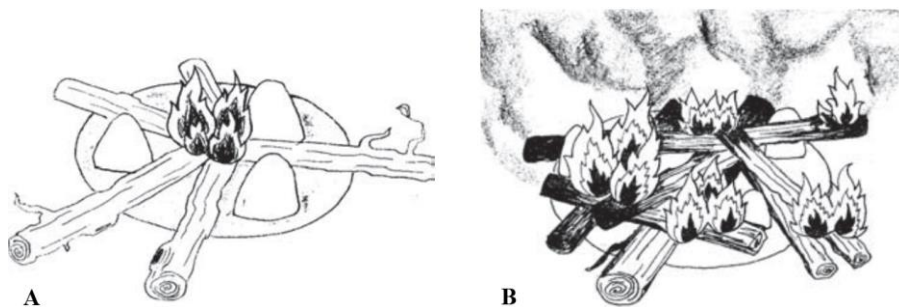
Memasang cerobong pendek yang terisolasi tepat di atas api. Tinggi cerobong ruang pembakaran sebaiknya sekitar tiga kali diameter-nya. Cerobong pendek di atas api akan meningkatkan daya hisap dan membantu api terbakar lebih panas. Asap akan berinteraksi dengan api di dalam cerobong dan terbakar, sehingga mengurangi emisi. Panci atau permukaan yang perlu dipanaskan harus diletakkan di atas cerobong pendek tersebut. Cerobong ruang pembakaran yang lebih tinggi, lebih dari tiga kali lebar, akan lebih efektif dalam membersihkan asap, tetapi cerobong yang lebih pendek akan membawa gas yang lebih panas ke panci. Cerobong yang sangat tinggi dapat menghasilkan daya hisap yang berlebihan, menarik terlalu banyak udara dingin yang dapat mengurangi transfer panas.



Gambar 2. 5 Cerobong asap pendek terisolasi di atas api (Bryden et al., 2005)

2.3.3 Prinsip Ketiga

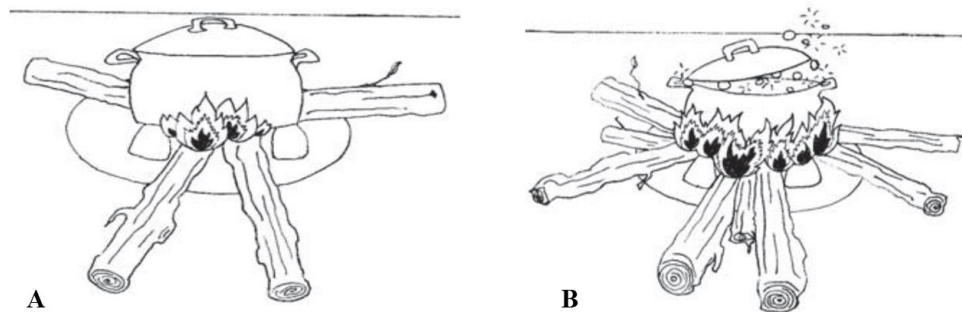
Memanaskan dan membakar ujung-ujung kayu saat dimasukkan ke dalam api. Jika hanya kayu yang terbakar yang panas, asap yang dihasilkan akan jauh lebih sedikit. Mengusahakan agar sisa kayu tetap dingin agar tidak membara dan mengeluarkan asap. Tujuannya adalah untuk menghasilkan jumlah gas yang tepat sehingga dapat terbakar dengan bersih tanpa menghasilkan arang atau asap. Asap adalah gas yang tidak terbakar! Asap berbahaya untuk dihirup. Bahkan pembakaran yang tampak lebih bersih pun mengandung emisi berbahaya.



Gambar 2. 6 (A) Pembakaran yang lebih bersih, (B) Kayu yang membara menghasilkan asap (Bryden et al., 2005)

2.3.4 Prinsip Keempat

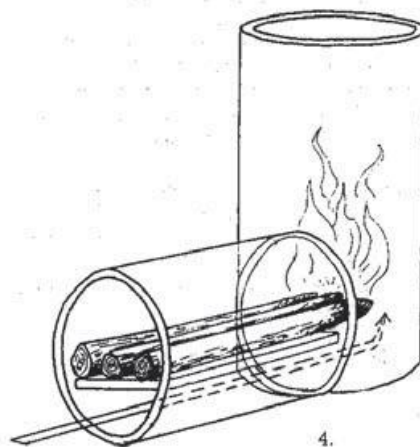
Panas tinggi dan rendah dihasilkan oleh berapa banyak batang kayu yang didorong ke dalam api. Menyesuaikan jumlah gas yang dihasilkan dan api yang tercipta sesuai dengan tugas memasak (kayu menjadi panas dan melepaskan gas, gas tersebut terbakar dan menghasilkan panas).



Gambar 2. 7 (A) Panas rendah, (B) Panas tinggi (Bryden et al., 2005)

2.3.5 Prinsip Kelima

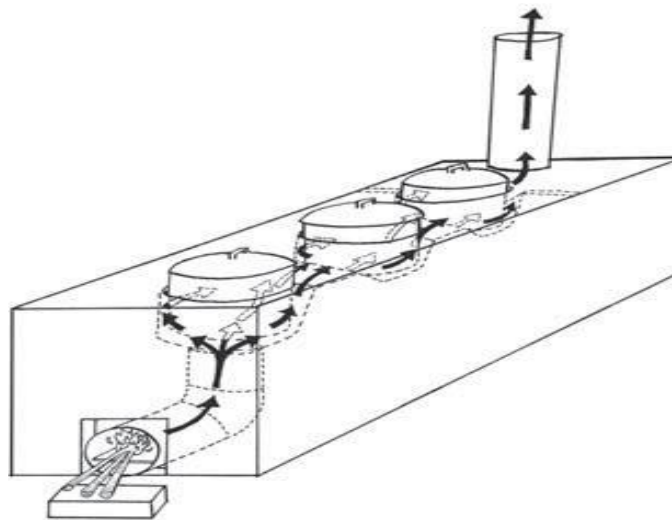
Mempertahankan aliran udara yang cepat dan baik melalui bahan bakar yang terbakar. Sama seperti meniup api dan arang dapat membuatnya lebih panas, memiliki jumlah aliran udara yang tepat akan membantu menjaga suhu tetap tinggi di kompor. Api yang panas adalah api yang bersih.



Gambar 2. 8 Mempertahankan aliran udara yang baik (Bryden et al., 2005)

2.3.6 Prinsip Keenam

Terlalu sedikit aliran udara yang masuk ke dalam api akan menghasilkan asap dan arang berlebih. Namun, terlalu banyak udara hanya akan mendinginkan api dan tidak membantu. Lubang yang lebih kecil ke dalam api membantu mengurangi udara berlebih. Meningkatkan perpindahan panas ke panci atau wajan merupakan faktor terpenting yang akan mengurangi penggunaan bahan bakar di tungku masak. Meningkatkan efisiensi pembakaran mengurangi polusi tetapi kurang penting saat mencoba menghemat kayu bakar.



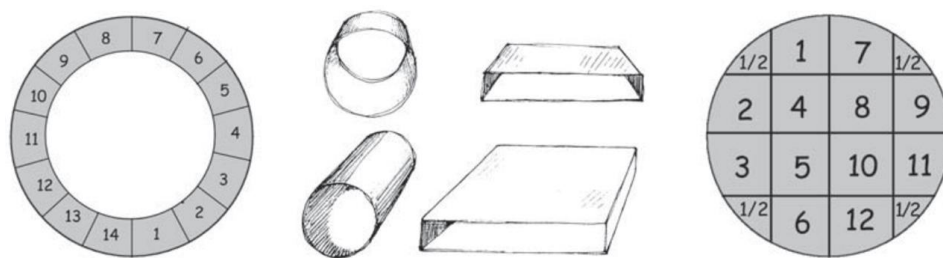
Gambar 2. 9 Menyeimbangkan aliran udara di kompor multipot (Bryden et al., 2005)

2.3.7 Prinsip Ketujuh

Bukaan ke api, ukuran ruang di dalam tungku tempat udara panas mengalir, dan cerobong asap semuanya harus berukuran sama. Ini disebut menjaga luas penampang yang konstan, dan membantu menjaga aliran udara yang baik di seluruh tungku. Aliran udara yang baik tidak hanya menjaga api tetap panas; tetapi juga penting agar udara panas yang dihasilkan oleh api dapat secara efektif mentransfer panasnya ke dalam panci. Udara tidak membawa banyak energi, jadi banyak udara yang perlu melewati tungku untuk menyelesaikan tugas memanaskan makanan atau air. Ukuran bukaan lebih besar

pada kompor yang lebih kuat yang membakar lebih banyak kayu dan menghasilkan lebih banyak panas.

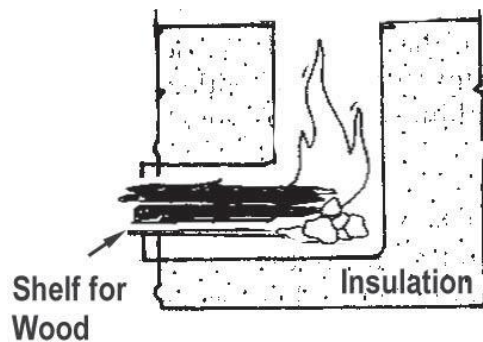
Sebagai aturan umum, pintu masuk ke api dengan bukaan persegi dua belas sentimeter per sisi dan cerobong asap serta terowongan berukuran sama di dalam tungku akan menghasilkan api yang cocok untuk memasak. Tungku komersial memerlukan bukaan, terowongan, dan cerobong asap yang lebih besar karena api yang lebih besar memerlukan lebih banyak udara.



Gambar 2. 10 Mempertahankan luas penampang konstan (Bryden et al., 2005)

2.3.8 Prinsip Kedelapan

Menggunakan jeruji di bawah api. Tidak menaruh kayu bakar di lantai ruang pembakaran. Udara harus melewati bawah kayu bakar yang terbakar, naik melalui arang, dan masuk ke dalam api. Rak di bukaan tungku juga mengangkat kayu bakar sehingga udara dapat melewatinya. Saat membakar kayu bakar, yang terbaik adalah meletakkannya berdekatan dan rata di rak, dengan ruang udara di antara setiap kayu bakar. Kayu bakar yang terbakar menjaga api tetap panas, setiap api memperkuat yang lain untuk membakar lebih sempurna. Akan lebih baik jika udara melewati bawah rak dan melalui bara sehingga saat mencapai api, udara dipanaskan terlebih dahulu untuk membantu gas mencapai pembakaran sempurna. Udara yang lewat atas kayu bakar tidak begitu membantu karena lebih dingin dan mendinginkan api. Api yang berkobar panas itu bersih, tetapi api yang dingin bisa sangat kotor.



Gambar 2. 11 Penggunaan alas jeruji di bawah api (Bryden et al., 2005)

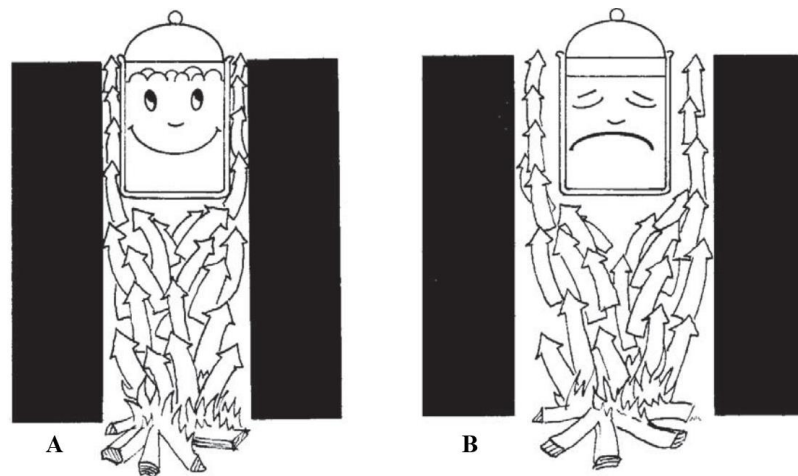
2.3.9 Prinsip Kesembilan

Isolasi jalur aliran panas. Koki cenderung menyukai kompor yang merebus air dengan cepat. Ini bisa jadi penting terutama di pagi hari saat anggota keluarga harus mulai bekerja. Jika panas masuk ke badan kompor, panci akan mendidih lebih lambat. Mengapa memanaskan lima puluh atau seratus kilogram kompor setiap pagi jika hasil yang diinginkan adalah memanaskan kilogram makanan atau satu liter air? Menggunakan bahan isolasi di kompor menjaga gas buang tetap panas sehingga dapat memanaskan panci atau wajan datar dengan lebih efektif. Isolasi penuh dengan lubang udara dan sangat ringan. Tanah liat dan pasir atau bahan padat lainnya bukanlah isolasi. Bahan padat menyerap panas dan mengalihkannya dari memasak makanan.

2.3.10 Prinsip Kesepuluh

Maksimalkan perpindahan panas ke panci dengan celah berukuran tepat. Memasukkan panas ke dalam panci atau wajan datar paling baik dilakukan dengan saluran kecil. Gas buang panas dari api dipaksa melalui saluran sempit ini, atau celah, yang memaksanya untuk menggesek panci atau wajan datar. Jika celah terlalu besar, gas buang panas sebagian besar tetap berada di tengah saluran dan tidak menyalurkan panasnya ke permukaan memasak yang diinginkan. Jika celah terlalu kecil, aliran udara berkurang, menyebabkan api menjadi lebih dingin, emisi meningkat, dan lebih sedikit panas yang masuk ke panci.

Dua faktor terpenting untuk memasukkan sejumlah besar panas ke dalam panci atau wajan datar adalah: 1) menjaga gas buang yang menyentuh panci atau wajan datar sepanas mungkin; dan, 2) memaksa gas panas untuk menggesek permukaan dengan cepat, bukan lambat. Udara tidak menahan banyak panas. Gas buang panas yang lebih cepat menggesek panci atau wajan datar akan mentransfer lebih banyak panas daripada udara dingin yang bergerak lambat.



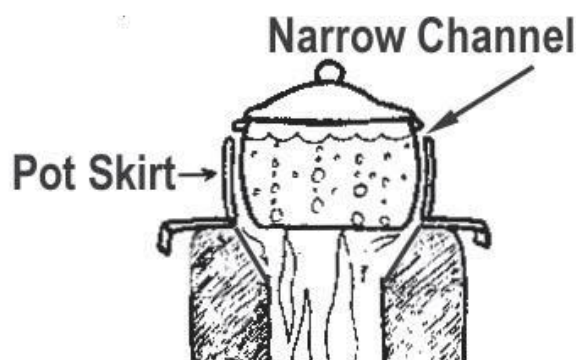
Gambar 2. 12 (A) Celah berukuran tepat mengoptimalkan perpindahan panas ke panci, (B) Celah yang terlalu besar akan mengurangi perpindahan panas ke panci (Bryden et al., 2005)

2.4 Mendesain Tungku Biomassa

Memaksa gas buang panas mengalir melewati permukaan panci atau wajan datar dalam saluran sempit adalah strategi desain kompor yang dipopulerkan oleh Dr. Samuel Baldwin dan Dr. Larry Winiarski. Pada tahun 1982 Dr. Winiarski menciptakan lapisan panci, silinder lembaran logam yang mengelilingi panci, yang membentuk saluran sempit yang meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Dr. Baldwin mempelajari kompor di Afrika dan pada tahun 1987 menulis buku pentingnya *Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination* di mana ia juga menekankan pentingnya menggunakan saluran sempit untuk mengalirkan lebih banyak panas ke dalam panci (Bryden et al., 2005).

Secara umum, ada tiga cara untuk meningkatkan perpindahan panas konveksi:

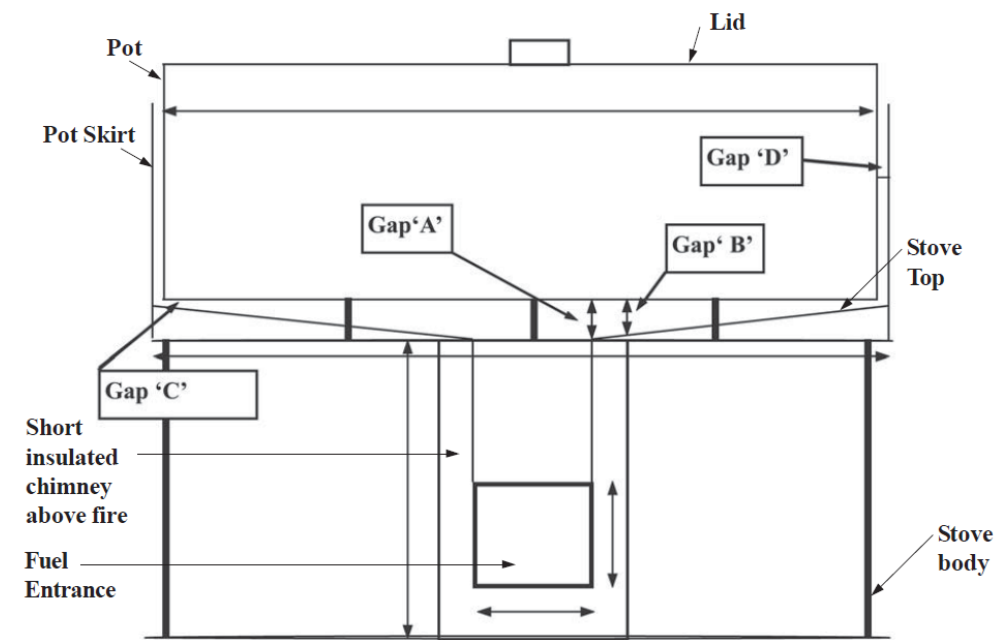
- Gas buang yang mengikis permukaan yang akan dipanaskan harus sepanas mungkin.
- Luas permukaan penukar panas harus seluas mungkin.
- Kecepatan gas buang panas harus ditingkatkan semaksimal mungkin. Aliran yang lebih cepat di bagian luar panci akan mengganggu lapisan batas udara yang stagnan yang memperlambat pemanasan efektif.



Gambar 2. 13 Saluran sempit dekat panci meningkatkan perpindahan panas konveksi (Bryden et al., 2005)

Saluran sempit yang dibentuk dekat panci oleh lapisan insulasi (Gambar 2.13) dapat membantu mengoptimalkan ketiga prinsip tersebut secara sederhana dan murah. Meskipun mempersempit celah meningkatkan efisiensi perpindahan panas, hal itu juga mengurangi aliran udara melalui tungku. Oleh karena itu, ukuran celah harus sesuai dengan daya api. Karena lebih banyak kayu yang dibakar per menit, lebih banyak udara yang dibutuhkan untuk mendukung pembakaran dan aliran yang diperlukan untuk menghindari aliran balik ke dalam ruangan.

Metode Diagram Winiarski dan tabel tungku berikut menunjukkan bagaimana ukuran saluran di dekat panci atau wajan berubah saat bukaan ke api diperlebar. Dr. Winiarski menyarankan bahwa bukaan berukuran 12 cm x 12 cm biasanya cukup untuk tungku masak berukuran keluarga. Bukaan yang lebih besar yang memungkinkan lebih banyak kayu masuk ke api menghasilkan daya yang lebih tinggi dan celah saluran yang lebih besar.



Gambar 2. 14 Tipikal Tungku Winiarki (Bryden et al., 2005)

Tabel 2. 6. Luas potongan melintang untuk ruang bakar berbentuk persegi (Bryden et al., 2005)

12 cm X 12 cm Square Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	3	3	3	3
GAP B (cm)	2.5	2.5	2.5	2.5
GAP C (cm)	2.3	1.5	1.1	0.9
GAP D (cm)	2.1	1.5	1.1	0.9

14 cm X 14 cm Square Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	3.5	3.5	3.5	3.5
GAP B (cm)	3.1	3.1	3.1	3.1
GAP C (cm)	3.1	2.1	1.6	1.2
GAP D (cm)	2.7	2	1.5	1.2

16 cm X 16 cm Square Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	NA	4	4	4
GAP B (cm)	NA	3.7	3.7	3.7
GAP C (cm)	NA	2.7	2	1.6
GAP D (cm)	NA	2.5	1.9	1.6

18 cm X 18 cm Square Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	NA	4.5	4.5	4.5
GAP B (cm)	NA	4.3	4.3	4.3
GAP C (cm)	NA	3.4	2.6	2.1
GAP D (cm)	NA	3.1	2.4	2

20 cm X 20 cm Square Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	NA	5	5	5
GAP B (cm)	NA	4.9	4.9	4.9
GAP C (cm)	NA	4.2	3.2	2.5
GAP D (cm)	NA	3.7	3	2.4

Tabel 2. 7. Luas potongan melintang untuk ruang pembakaran melingkar (Bryden et al., 2005)

12 cm Diameter Circular Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	3	3	3	3
GAP B (cm)	2	2	2	2
GAP C (cm)	1.8	1.2	0.9	0.7
GAP D (cm)	1.6	1.2	0.9	0.7

14 cm Diameter Circular Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	3.5	3.5	3.5	3.5
GAP B (cm)	2.4	2.4	2.4	2.4
GAP C (cm)	2.4	1.6	1.2	0.9
GAP D (cm)	2.2	1.5	1.2	0.9

16 cm Diameter Circular Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	NA	4	4	4
GAP B (cm)	NA	2.9	2.9	2.9
GAP C (cm)	NA	2.1	1.6	1.3
GAP D (cm)	NA	2	1.5	1.3

18 cm Diameter Circular Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	NA	4.5	4.5	4.5
GAP B (cm)	NA	3.4	3.4	3.4
GAP C (cm)	NA	2.7	2	1.6
GAP D (cm)	NA	2.5	1.9	1.6

20 cm Diameter Circular Combustion Chamber

Pot Size (cm)	20	30	40	50
GAP A (cm)	NA	5	5	5
GAP B (cm)	NA	3.8	3.8	3.8
GAP C (cm)	NA	3.3	2.5	2
GAP D (cm)	NA	3	2.4	1.9

2.5 Sistem Injeksi Uap

2.5.1 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. Penambahan uap air kering dapat menjadikan pembakaran lebih sempurna pada proses pembakaran di ruang bakar (Bagus Dharmawan et al., n.d.).
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 (Anufriev et al., 2021)
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 (J.Hong, 2007).
4. Pengurangan CO: Meskipun tidak mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) (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 CO (Li et al., 2021).



Gambar 2. 15 Pemanfaatan Injeksi Uap pada Flare Pembuangan Gas. Efektivitas uap dalam menekan asap: (kiri) tanpa uap, (kanan) dengan uap (Callidus Technologies, 2019)

2.5.2 Tungku Biomassa dengan Injeksi Uap

Injeksi uap pembakaran adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi termal maupun efisiensi penggunaan bahan bakar. 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.

Penelitian sebelumnya 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 (Barbour et al., 2021). Serta telah dilakukan 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 (Bentson et al., 2022).

Dalam penelitian ini menggunakan tiga cara/ variasi injeksi untuk menguji kinerja tungku, dengan tujuan untuk mengetahui jenis variasi injeksi yang terbaik.

1. Injeksi Uap *Over-fire*

Prinsip kerja tungku biomassa dengan injeksi uap overfire adalah pada tungku ini 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 melalui lubang berdiameter 3 mm ke tengah saluran cerobong api (*over-fire*) (Gambar 2.18). 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.

2. Injeksi Uap *Under-fire*

Prinsip kerja tungku biomassa dengan injeksi uap *under-fire* adalah sama dengan injeksi *over-fire*, injeksi *under-fire* memiliki tangki penampungan air di atas ruang bakar yang akan dipakai sebagai injeksi uap. Panas dari pembakaran biomassa di ruang bakar dimanfaatkan untuk mendidihkan air yang ada di dalam tangki penampungan air injeksi, kemudian uapnya akan disalurkan

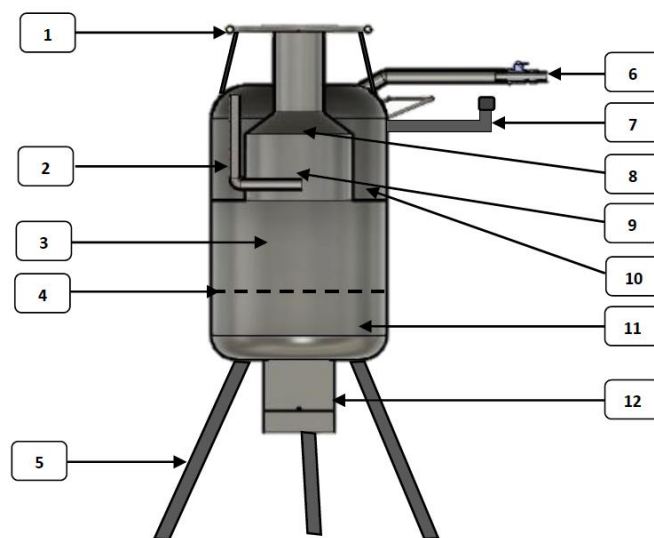
keluar melalui pipa dan diinjeksikan dengan pipa melingkar di bawah bahan bakar melalui lubang berdiameter 1 mm (sebanyak 6 lubang) (Gambar 2.18). Pipa injeksi melingkar ini dipasang tepat di bawah jeruji alas bahan bakar.

3. Tanpa Injeksi Uap

Pada pengujian kinerja tungku tanpa injeksi uap, penampungan air injeksi yang berada di atas ruang bakar pada tungku dikosongkan, sehingga tidak ada uap yang terinjeksi melalui pipa.

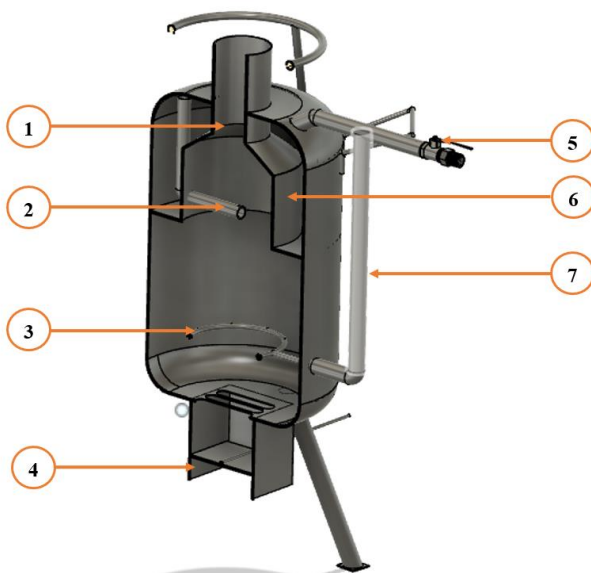


Gambar 2. 16 Tungku Biomassa Injeksi Uap



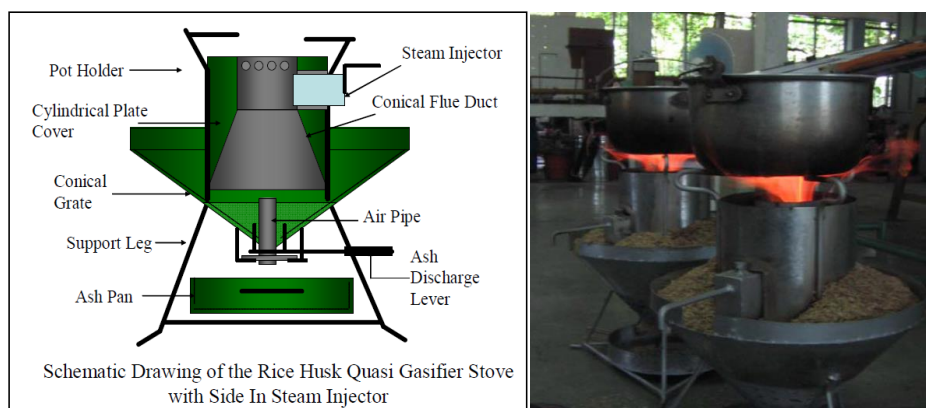
Gambar 2. 17 Bagian-bagian Tungku Biomassa Injeksi Uap Over-fire pada pusat saluran cerobong

Keterangan Gambar 2.17: 1. Dudukan untuk panci, 2. Pipa saluran injektor uap, 3. Ruang pembakaran, 4. Besi jaring untuk alas bahan bakar, 5. Kaki tungku, 6. Katup kontrol uap, 7. Saluran masuk tangki injektor, 8. Saluran cerobong, 9. Lubang injektor uap, 10. Ruang penampung air injeksi, 11. Ruang penampungan abu, 12. Ventilasi udara/ pintu pembuangan arang dan abu.



Gambar 2. 18 Komponen *injektor over-fire* dan *under-fire* pada tungku

Keterangan Gambar 2.18: 1. Saluran cerobong, 2. Pipa saluran uap/ injektor *over-fire*, 3. Pipa saluran uap/ injektor *under-fire*, 4. Ventilasi udara/ pintu pembuangan arang dan abu, 5. Katup kontrol uap, 6. Ruang penampung air injeksi, 7. Pipa saluran uap injeksi *under-fire*.



Gambar 2. 19 Tungku biomassa sekam padi dengan injeksi uap over-fire dari sisi cerobong (<https://stoves.bioenergylists.org/belonioqgas>)

2.6 Parameter Pengujian Karakteristik/ Kinerja

2.6.1 Laju Konsumsi Bahan Bakar (*Fuel Consumption Rate*)

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

$$FCR = \frac{m_{fc}}{t_f} \quad (2.1)$$

Keterangan:

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

m_f = Berat bahan bakar sebelum pengujian, (kg)

t_f = Lama waktu pengujian, (s)

m_{fc} = Berat bahan bakar yang terbakar/ digunakan (kg)
 $= m_f - m_{ff}$

m_{ff} = Berat bahan bakar setelah pengujian/ tersisa, (kg)

2.6.2 Daya Termal

Daya termal adalah energi bahan bakar yang dikonsumsi untuk operasi dan ini menunjukkan keluaran daya rata-rata kompor selama pengujian daya tinggi. Daya termal yang dihasilkan dari kompor dipengaruhi oleh jenis bahan bakar dan jumlah massa bahan bakar yang terbakar di dalamnya. 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):

$$FP = \frac{m_{fc} \times HVF}{t_f} \quad (2.2)$$

Keterangan:

FP = Daya termal, (kkal/s)

m_{fc} = Berat bahan bakar yang terbakar, (kg)

HVF = Nilai kalor (*heating value*) bahan bakar, (kkal/kg)

t_f = Lama waktu pengujian, (s)

2.6.3 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):

$$\eta_t = \frac{SH + LH}{HVF \times m_{fc}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

η_t = Efisiensi termal, (%)

SH = Panas sensible, (kkal)

LH = Panas laten, (kkal)

HVF = Nilai kalor bahan bakar, (kkal/kg)

m_{fc} = 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):

$$SH = M_{w1} \times C_p \times \Delta T \quad (2.4)$$

Keterangan:

SH = Panas sensibel, (kkal)

M_{w1} = Massa air sebelum pengujian, (kg), (1kg/liter)

C_p = Panas jenis air, (kkal/kg.°C)

T_f = Temperatur air mendidih, (100°C)

T_i = Temperatur air sebelum mendidih, (°C)

- **Panas Laten (*Laten Heat*)**

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

$$LH = W_e \times H_{fg} \quad (2.5)$$

Keterangan:

LH = Panas laten, (kkal)

W_e = Berat air yang diuapkan, (kg)

$$= M_{w1} - M_{w2}$$

M_{w2} = Massa air setelah pengujian, (kg)

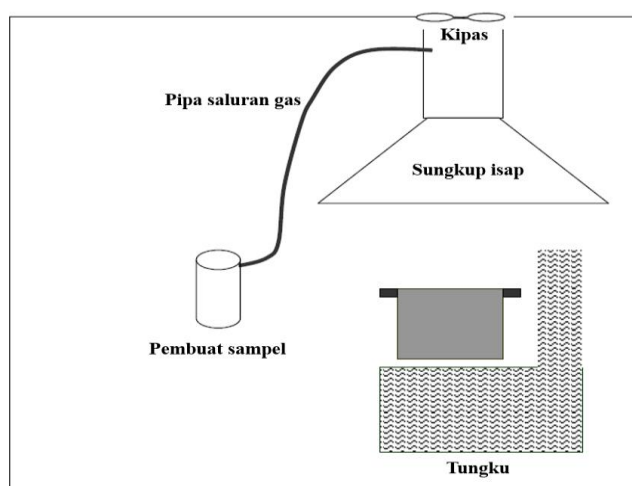
H_{fg} = Panas laten air, (kkal/kg)

2.6.4 Emisi

Emisi adalah produk yang dilepaskan dari suatu proses (misalnya pembakaran, biodegradasi) termasuk gas, uap, dan partikel. Untuk tungku masak, beberapa emisi menjadi perhatian khusus karena dampaknya terhadap kesehatan dan iklim, termasuk karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), partikel halus (PM_{2.5}) dan karbon hitam (BC) (Clean Cooking Alliance, 2014).

Metode pengujian emisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode sungkup isap. Gas buang ditangkap dalam sungkup isap, kemudian disalurkan melalui pipa saluran gas menuju ke ruang pengumpul/ pembuat sampel. Keuntungannya adalah menunjukkan perubahan instan/ cepat dalam pengukuran emisi pembakaran, sedangkan kekurangannya adalah membutuhkan pembuatan sungkup isap dan penambahan kipas kecil serta kurang mudah dipindahkan (Clean Cooking Alliance, 2014).

Tungku biomassa dinyatakan lulus uji emisi CO bila emisi CO tidak melebihi 67 g/kg bahan bakar terkonsumsi (Badan Standar Nasional, 2013).



Gambar 2. 20 Pengukuran emisi gas pembakaran dari tungku (Clean Cooking Alliance, 2014)