



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN DAN OPTIMASI KINERJA KOMPOR GAS-  
BIOMASSA RENDAH EMISI KARBON MONOKSIDA  
BERBAHAN BAKAR BIOPELLET DARI KAYU KARET**

**SKRIPSI**

**FARAH INAYATI**

**0806332976**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA**

**DEPOK**

**JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN DAN OPTIMASI KINERJA KOMPOR GAS-  
BIOMASSA RENDAH EMISI KARBON MONOKSIDA  
BERBAHAN BAKAR BIOPELLET DARI KAYU KARET**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**FARAH INAYATI  
0806332976**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
KEKHUSUSAN TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

**Nama** : Farah Inayati

**NPM** : 0806332976

**Tanda tangan** : 

**Tanggal** : 21 Juni 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Farah Inayati  
NPM : 0806332976  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Perancangan dan Optumasi Kinerja Kompor Gas-Biomassa  
Berbahan Bakar Biopellet dari Kayu Karet

Telah berhasil dipertabankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Ir. Dijan Supramono, M.Sc.  
Penguji : Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.T.  
Penguji : Dr. Eny Kusnini, S.Si.  
Penguji : Dr. Ing. Danni Adinata, S.T., M.Eng.Sc

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 29 Juni 2012

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Skripsi ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Kimia pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

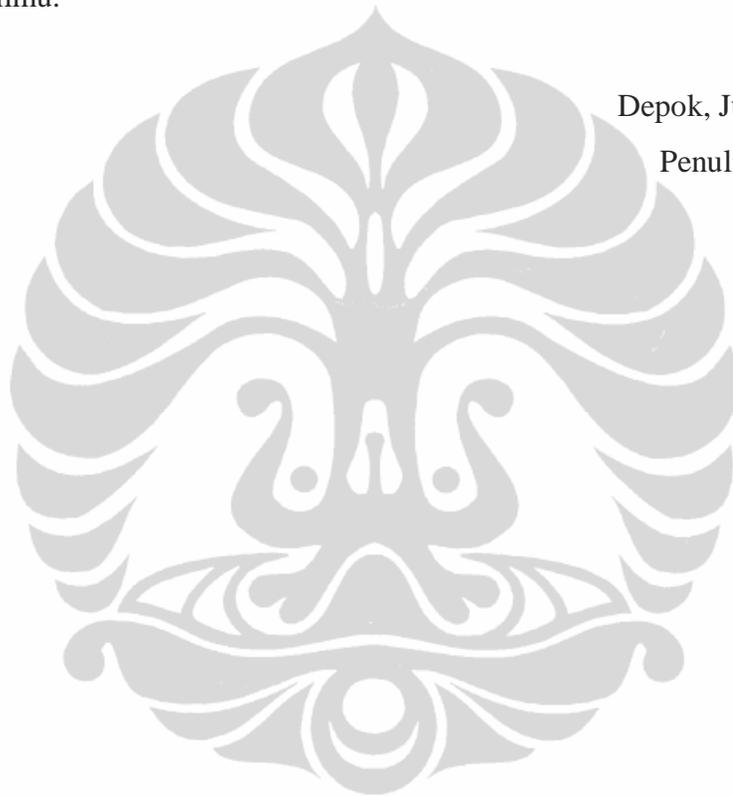
- (1) Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan nikmatnya selama penulis hidup.
- (2) Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
- (3) Bapak Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA dan Bapak Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Phd selaku pembimbing akademis penulis.
- (4) Bapak Ir. Dijan Supramono, M.Sc selaku pembimbing skripsi.
- (5) Seluruh keluarga atas segala perhatiannya selama ini.
- (6) Andika Dwicahyo, teman terbaik yang telah memberikan bantuan secara moril dan senantiasa memberikan semangat dalam pengerjaan skripsi ini.
- (7) Teman-teman satu bimbingan : Resiana, Ichwan, desy, Ayu, dan Fanny
- (8) Teman-teman Teknik Kimia UI angkatan 2008 atas masukan, dukungan, dan bantuan apapun selama ini.
- (9) Pak Tahmid dan para Pekerja Balai Mekanisasi Departemen Pertanian yang membantu preparasi bahan bakar.
- (10) Kang Jajat dan Mang Ijal dalam memberikan bantuan pembuatan dan perbaikan alat.
- (11) Mas Taufik atas bantuannya dalam mencari literatur serta Mas Sriyono atas segala bantuannya.

(12) Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu selama ini.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat diharapkan penulis untuk memperbaiki penulisan di masa mendatang. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi perkembangan ilmu.

Depok, Juni 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang betrandu tangan di bawah ini:

Nama : Farah Inayati  
NPM : 0806332976  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

PERANCANGAN DAN OPTIMASI KINERJA KOMPOR GAS-BIOMASSA  
RENDAH EMISI KARBON MONOKSIDA BERBAHAN BAKAR BIOPELLET  
DARI KAYU KARET

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 19 Juni 2012

Yang menyatakan



(Farah Inayati)

## ABSTRAK

Nama : Farah Inayati  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Perancangan Dan Optimasi Kinerja Kompor Gas-Biomassa Rendah Emisi Karbon Monoksida Berbahan Bakar Biopellet Dari Kayu Karet

Mekanisme pembakaran pada kompor biomassa yang menyertakan pembakaran fasa padat dengan 1 blower pemasok udara masih menghasilkan CO di atas ambang batasnya, 25 ppm. Peneliti merancang kompor gas-biomassa dengan mekanisme pembakaran fasa gas saja menggunakan 2 blower pemasok udara primer dan sekunder, mengakomodasi *preheating* udara sekunder dan efek turbulensi. Penelitian bertujuan mendapatkan rancangan kompor biomassa dengan rasio udara terbaik sehingga dihasilkan emisi CO rendah dan warna api biru. Penelitian diawali dengan perancangan kompor lalu membakar gas pirolisis yang dihasilkan dari devolatilisasi biomassa. Kondisi terbaik kompor berdiameter dalam ruang pembakaran 15 cm dengan tinggi ruang pembakaran 58 cm adalah pada rasio aliran udara sekunder terhadap udara primer 6,29 dengan emisi CO rata-rata 14 ppm dan efisiensi termal 52,8 %.

**Kata kunci:**

biomassa, blower, emisi CO, kompor

## ABSTRACT

Name : Farah Inayati  
Majoring : Chemical Engineering  
Title : Design and Optimization Biomass-Gas Stove with Low Carbon Monoxide Emission Using Rubber Wood Pellet

Existing biomass stoves using combustion in solid phase with 1 blower as an air supplier produce CO well above the minimum allowable CO emission (25 ppm). In this research, combustion mechanism occurs only in gas phase, the stove uses 2 blower as primary and secondary air supplier, accommodates preheating secondary air and turbulence effect. The objective of this research was to get biomass-gas stove design with the best air ratio that produces low CO emission and blue flame. First step of this research is to design the stove and then to burn pyrolysis gas produced of biomass devolatilization. The best condition of the biomass gas stove, which has dimension 15 cm inner diameter for combustion chamber and 58 cm height of combustion chamber is that the flow ratio of secondary air to primary air is 6,29 which has average CO emission at 14 ppm and thermal efficiency at 52,8%.

**Keywords :**

biomass, blower, CO emission, stove

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Biomassa.....	7
2.1.1 Kandungan dalam Biomassa .....	7
2.1.2 Pellet biomassa .....	9
2.1.3 Pirolisis Biomassa .....	10
2.2 Perancangan Kompor Biomassa .....	11
2.2.1 Komponen .....	11
2.2.2 Konstruksi.....	14
2.3 Perbandingan Kompor Biomassa.....	15
2.3.1 Kompor Biomassa dengan Pembakaran Langsung.....	15
2.3.2 Kompor Biomassa dengan Prinsip <i>Heat Recovery</i> .....	16

2.3.3	Kompore Biomassa dengan Prinsip <i>Updraft Downdraft Gasifier</i> ....	17
2.4	Pembakaran .....	20
2.4.1	Teori Pembakaran .....	20
2.4.2	Devolatilisasi.....	21
2.4.3	Pembakaran Zat Volatil dan char .....	22
2.4.4	<i>Laminar Premixed Flame</i> .....	23
2.4.4.1	Flame Speed .....	24
2.5	Perpindahan Panas .....	27
2.6	Kinetika Reaksi Emisi CO.....	32
2.7	Pengujian .....	33
2.7.1	Efisiensi termal.....	33
2.7.2	Emisi CO .....	33
<b>3.</b>	<b>METODE PENELITIAN .....</b>	<b>35</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	35
3.1.1	Tahap Perancangan Kompore .....	36
3.1.2	Tahap Penyediaan Alat dan Bahan .....	36
3.1.3	Tahap Fabrikasi Kompore.....	36
3.1.4	Tahap Preparasi Bahan Bakar dan Pelet Promotor.....	37
3.1.5	Tahap Pengujian .....	37
3.1.6	Tahap Analisa dan Evaluasi .....	39
3.2	Variabel Penelitian.....	39
3.3	Alat dan Bahan.....	40
3.3.1	Alat dan Bahan Fabrikasi Kompore .....	40
3.3.2	Alat dan Bahan Persiapan Bahan Bakar .....	40
3.3.3	Alat dan Bahan Pengujian Kompore.....	40
3.4	Jadwal Pelaksanaan Penelitian .....	41
<b>4.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>42</b>
4.1	Desain Kompore Gas Biomassa .....	42
4.2	Hasil Uji Emisi Karbon Monoksida.....	48
4.3	Efisiensi Termal.....	57

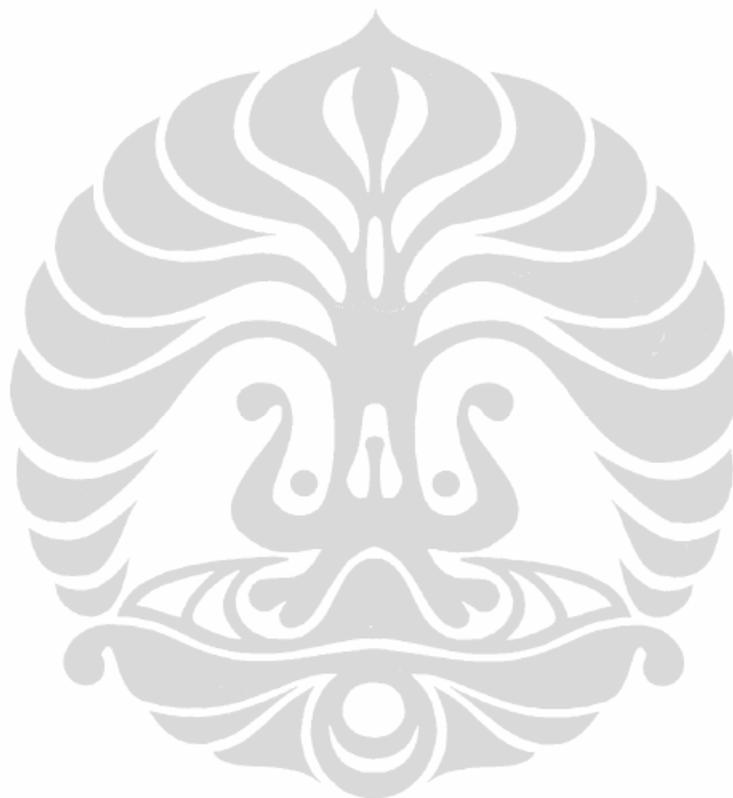
<b>5. KESIMPULAN .....</b>	<b>60</b>
5.1 Kesimpulan.....	60
5.2 Saran.....	61
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>62</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Desain Awal Kompor Gas-Biomassa .....	5
Gambar 2.1 Skema Sederhana Proses Pirolisis .....	11
Gambar 2.2 Contoh Tampilan Kompor Biomassa .....	12
Gambar 2.3 <i>Indian “Harsha” Stove</i> .....	15
Gambar 2.4 Desain Kompor Dengan <i>Heat Recovery</i> .....	17
Gambar 2.5 Turbo Stove .....	18
Gambar 2.6 Pembakaran Kayu .....	21
Gambar 2.7 Penggambaran Proses Penyalaan <i>Volatile Matters</i> .....	23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	35
Gambar 4.1 Dimensi Kompor Gas Biomassa .....	44
Gambar 4.2 Hasil Fabrikasi Kompor Gas-Biomassa .....	45
Gambar 4.3 Diagram <i>Flammability Limit</i> .....	46
Gambar 4.4 Grafik Adiabatic Flame Temperature Vs Temperature Udara Preheat Untuk Campuran Stoikiometrik Udara Dan Bahan Bakar .....	46
Gambar 4.5 Kompor Gas Biomassa Modifikasi .....	47
Gambar 4.6 Mesin Crusher (kiri) dan Alat Penekan (kanan) .....	48
Gambar 4.7 Biopellet Kayu Karet .....	49
Gambar 4.8 Peralatan Uji Emisi CO .....	50
Gambar 4.9 Nyala Api Percobaan 1(kiri) dan 2(kanan) .....	51
Gambar 4.10 Api Percobaan Setelah Waktu Tertentu .....	51
Gambar 4.11 Waktu Vs Emisi CO .....	53
Gambar 4.12 Waktu Vs Suhu Api .....	54
Gambar 4.13 Suhu Api Vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:6,29 .....	55
Gambar 4.14 Suhu Api Vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:25,58 .....	56
Gambar 4.15 Suhu Api Vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:18,43 .....	56
Gambar 4.16 Suhu Api vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:2,44 .....	56

Gambar 4.17 Grafik Waktu vs Temperatur Air.....	58
Gambar 4.17 Panjang gelombang dari berbagai sinar .....	59

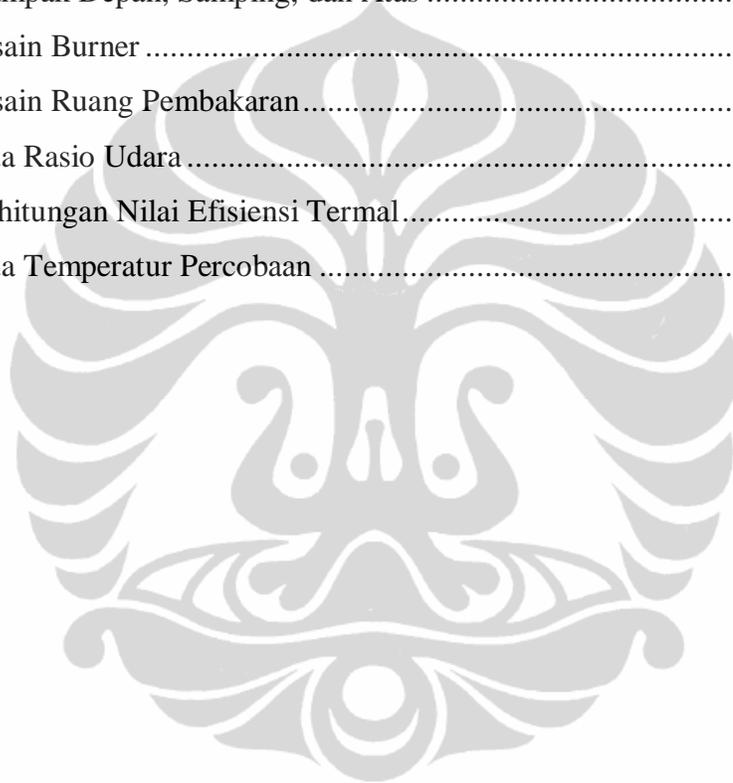


## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Potensi energi dari limbah biomassa di Indonesia .....	1
Tabel 2.1 Hasil Analisis Kandungan Biopolimer Biomassa .....	7
Tabel 2.2. Hasil Analisis Proksimat Sampel Biomassa .....	8
Tabel 2.3 Hasil Analisis Ultimat Sampel Biomassa .....	8
Tabel 2.4 Produk Pirolisis Pada Berbagai Suhu .....	10
Tabel 2.5 Nilai Konstanta C dan Gr.Pr Untuk Beberapa Konfigurasi Standar ...	31
Tabel 2.6 Nilai Konstanta-Konstanta Rumus Konveksi Paksa .....	31
Tabel 3. 1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	41
Tabel 4.1 Pengolahan Data Percobaan dengan Variasi Laju Alir Udara Primer dan Sekunder .....	52
Tabel 4.2 Nilai Efisiensi Termal Pada Keempat Percobaan .....	57

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Uji Analisi Biomassa Kayu Karet.....	66
Lampiran 2 Proses Perhitungan Dimensi Kompor .....	67
Lampiran 3 Desain Kompor Gas-Biomassa Keseluruhan .....	71
Lampiran 4 Desain Kompor Gas-Biomassa Tampak Depan, Samping, dan Atas .....	72
Lampiran 5 Desain Burner .....	73
Lampiran 6 Desain Ruang Pembakaran.....	74
Lampiran 7 Data Rasio Udara.....	75
Lampiran 8 Perhitungan Nilai Efisiensi Termal.....	76
Lampiran 9 Data Temperatur Percobaan .....	77



## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Masyarakat Indonesia menggunakan kompor berbahan bakar nonpadat berupa LPG yang berasal dari sumber energi tak terbarukan yang dihasilkan melalui proses ratusan juta tahun secara alami dan juga membahayakan lingkungan karena memicu terjadinya pemanasan global. Alternatif bahan bakar yang berpotensi untuk mengatasi masalah ini adalah biomassa karena biomassa merupakan sumber energi terbarukan dan memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan bahan bakar nonpadat yang akan dijelaskan pada Tinjauan Pustaka.

**Tabel 1.1** Potensi energi dari limbah biomassa di Indonesia [1,2]

Sumber Biomassa	Limbah	Rasio Limbah (%)	LHV (MJ/kg)	Banyaknya Limbah (Juta ton/Tahun)	Potensi Energi (Juta GJ/Tahun)	Crude Oil Equivalent ( $10^6$ toe/Tahun)
Tebu	Bagas Daun dan Pucuk Tebu	32	8,31	8,5	70,64	1,70
	Tandan Kosong Kelapa Sawit	30	15,81	1,3	20,55	0,49
Kelapa Sawit	Serat	27	8,16	12,9	105,26	2,53
	Tempurung	15	11,34	6,7	75,98	1,82
Pohon Karet	Limbah Kayu Karet	9	18,83	3,5	65,91	1,58
	Serabut	-	-	2,8	46,45	1,11
Kelapa	Tempurung	16	16,23	6,7	108,74	2,61
	Sekam Padi	23	17,93	3	53,79	1,29
Padi	Jerami	40	12,69	13,5	171,32	4,11
	Limbah Cair Pabrik Tapioka	-	-	49	534,10	12,82
Ubi Kayu	Limbah Kayu	-	-	7,3	133,13	3,20
Industri Kayu	Limbah Kayu	-	-	8,3	70,11	1,68
<b>TOTAL</b>				<b>123,5</b>	<b>1455,97</b>	<b>34,94</b>

Di Indonesia, biomassa sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar karena ketersediaannya yang sangat banyak seperti yang terlihat pada Tabel 1.1 dan belum dimanfaatkan secara optimal. Biomassa dapat dimanfaatkan

melalui pembakaran langsung yang menimbulkan emisi CO tinggi karena pembakaran langsung pada zat padat menyebabkan temperatur permukaan biomassa menjadi lebih rendah yang mendorong terbentuknya emisi CO lebih banyak. Untuk itu, perlu diperhatikan faktor-faktor yang berpengaruh pada pembakaran biomassa yang kemudian dihubungkan dengan desain media pembakaran yang digunakan, dalam hal ini adalah kompor, agar dihasilkan kompor dengan emisi CO yang rendah dan bernyala api biru layaknya kompor berbahan bakar LPG.

Upaya mengurangi permasalahan efisiensi dan emisi telah banyak dilakukan dengan pengembangan kompor biomassa berbasis ICS (*Improved Cook Stove*) [3]. Akan tetapi, masih mengandung partikel dan gas pembakaran melebihi ambang batasnya, 25 ppm [4]. Di Tahun 2000, dihasilkan kompor biomassa dengan prinsip *upside downdraft gasifier* menggunakan pengontrol untuk udara primer yang berhasil mencapai angka efisiensi 30% [5]. Untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi sudah dikembangkan desain yang mengadopsi sistem kerja *heat exchanger* untuk mengambil kembali panas gas buang dengan besar panas yang dapat diambil kembali adalah 75 - 90% panas yang terbawa gas buang [6]. Modifikasi kompor ini dengan penambahan *preheating* bahan bakar menghasilkan emisi CO 50 ppm pada *cold start* [7]. Penelitian selanjutnya dihasilkan emisi CO yang lebih besar, yaitu 620 ppm pada *cold start* [8]. Pada tahun 2005, sebuah kompor gas biomassa berbahan bakar gabah padi dengan prinsip *preheating* udara sekunder sebagai udara pembakaran dan menggunakan 1 buah blower sebagai penyuplai udara primer. Performa emisi dari kompor ini tidak di kuantifikasi tetapi kompor ini telah menghasilkan nyala api biru yang dapat diindikasikan bahwa pemakaran yang terjadi cukup sempurna [9].

Penelitian terakhir dilakukan oleh Muhammad Nurhuda pada tahun 2010 dengan kompor biomassa yang dapat menghasilkan nyala api biru dikarenakan gerak turbulen yang dapat dihasilkan dari hasil perancangannya sehingga pembakaran yang terjadi menjadi sempurna. Pada kompornya terdapat pengatur aliran udara primer sebagai pemasok udara pada tabung *preheating* dengan udara sekunder yang dibiarkan masuk dengan bebas. Perlu didefinisikan bahwa yang disebut udara primer adalah udara yang digunakan pada proses pemanasan awal

biomassa yang nantinya akan bercampur dengan bahan bakar terlebih dahulu sebelum pembakaran terjadi dan udara sekunder adalah udara yang berperan sebagai udara pembakaran yang akan berkontak dengan *volatile matters* yang telah tercampur udara primer.

Pada penelitian ini, udara primer dan sekunder diatur melalui blower. Proses pembakaran didahului dengan penyulutan kertas yang telah dicelup etanol kemudian proses pirolisis terjadi pada pellet biomassa dengan mendapat panas dari api yang disulut pada kertas sehingga *volatile matters* yang terkandung dalam pellet biomassa dapat keluar ke bagian atas dengan dukungan udara primer pada kecepatan tertentu. Dengan kecepatan tertentu pula, udara sekunder yang sebelumnya telah terpanaskan akan memberikan pasokan udara untuk proses pembakaran *volatile matters*. Proses ini memungkinkan devolatilisasi terjadi bertahap dan *volatile matters* terbakar sempurna dengan nyala api senantiasa berada di zona atas dari ruang pembakaran. Upaya agar nyala api senantiasa berada di atas ruang pembakaran berkaitan dengan teori *flame speed* yang akan dijelaskan kemudian pada bagian Tinjauan Pustaka.

Desain kompor pada penelitian ini sebenarnya tidak dapat dikatakan kompor biomassa karena yang dibakar adalah *volatile matters* dari biomassa dan nyala api yang dihasilkan diduga mendekati nyala api yang dihasilkan pada kompor LPG sehingga tidak seperti kompor-kompor biomassa pada umumnya. Untuk itu, kemudian kompor ini dapat dikatakan merupakan kompor penghubung atau *interface* antara kompor biomassa dengan kompor LPG. Desain pada bagian atas kompor, dapat dilihat pada bagian Metode Penelitian, memungkinkan terjadinya turbulensi sehingga memperkuat kontak udara dengan bahan bakar untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Emisi CO yang rendah dapat diupayakan dengan menjaga proses pembakaran terjadi pada temperatur yang tinggi. Selanjutnya, kecukupan oksigen, turbulensi, dan temperatur yang tinggi menjadi keadaan satu, dua, dan tiga yang harus terbentuk pada proses pembakaran dalam kompor ini.

Bahan bakar yang digunakan berasal dari biomassa kayu karet berbentuk pellet karena kandungannya yang mendukung untuk dijadikan bahan bakar memasak seperti data yang tertera pada tinjauan pustaka. Kemudian, akan

dilakukan uji emisi CO menggunakan *Gas Analyzer* sebagai analisis keberhasilan upaya mengurangi emisi CO pada biomassa sebagai bahan bakar memasak dan juga pengujian efisiensi termal menggunakan *Water Boiling Test* untuk melihat aplikasi perpindahan panas yang terjadi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan biomassa sebagai bahan bakar untuk memasak dengan menggunakan rancangan kompor khusus yang memiliki kinerja mendekati kompor berbahan bakar LPG dengan emisi CO yang rendah. Diharapkan dari penelitian ini juga dapat menjadi alternatif energi untuk keperluan rumah tangga masyarakat perkotaan yang saat ini masih memakai kompor berbahan bakar LPG (*Liquified Petroleum Gas*) dan kompor briket batubara yang menghasilkan emisi CO yang tinggi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana rancangan kompor yang dibuat memungkinkan terjadinya devolatilisasi biopellet dan pembakaran *volatile matters* pada zona di atas unggun pellet untuk menghasilkan :

- a. Emisi CO rendah dari pembakaran biopellet sebagai bahan bakar untuk memasak
- b. Nyala api biru pada kompor
- c. Waktu penyalaan bahan bakar yang singkat untuk mempersingkat keberadaan *volatile matters* yang tak terbakar atau terbakar tidak sempurna dalam bentuk asap.

## 1.3 Tujuan Penelitian

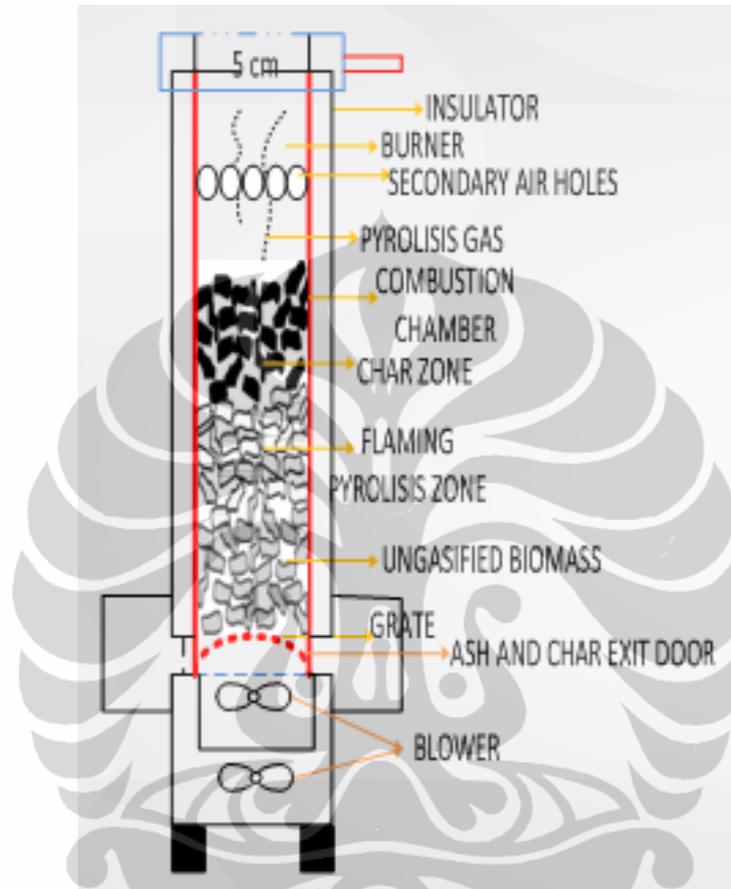
Mendapatkan hasil rancangan kompor biopellet dengan rasio udara terbaik sehingga dihasilkan emisi CO rendah dan warna nyala api biru

## 1.4 Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi dengan :

- a. Perancangan kompor menggunakan 2 blower sebagai penyuplai udara primer dan sekunder agar kedua kecepatan udara tersebut dapat diatur secara *independent*.
- b. Pellet terbuat dari biomassa kayu karet.

- c. Penggunaan konduktor pada dinding bagian dalam kompor agar udara kearah atas mengalami pemanasan pendahuluan dan isolator pada dinding bagian luar kompor agar panas yang hilang dapat di minimalisasi. Untuk lebih jelasnya, gambar rancangan kompor dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Desain Awal Kompor Gas Biomassa

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah ini adalah sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Menjelaskan tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian, metode penelitian secara umum, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Menjelaskan tentang kandungan dalam biomassa, proses pirolisis biomassa, komponen pada perancangan kompor berbahan bakar biomassa, perbandingan beberapa kompor biomassa yang ada, teori

pembakaran, devolatilisasi, konsep *laminar premixed flame*, perpindahan panas, kinetika reaksi emisi CO, dan metode pengujian.

Bab 3 : Metode Penelitian

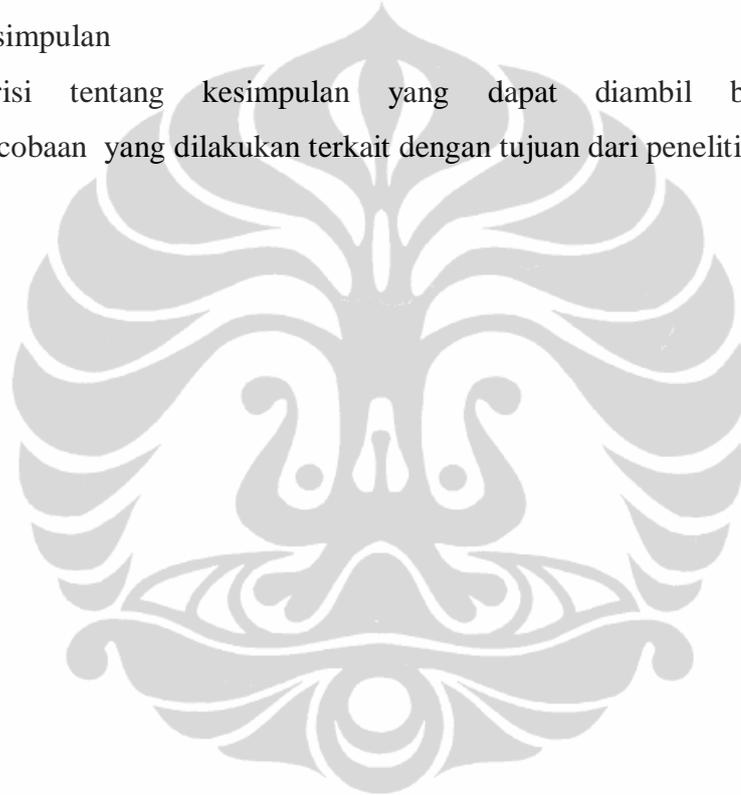
Menjelaskan diagram alir penelitian, prosedur tiap tahap penelitian, alat dan bahan yang diperlukan, serta jadwal pelaksanaan penelitian.

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

Menjelaskan dimensi kompor, hasil uji emisi CO dan efisiensi termal serta kondisi optimum yang didapatkan.

Bab 5 : Kesimpulan

Berisi tentang kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan percobaan yang dilakukan terkait dengan tujuan dari penelitian ini.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Biomassa

##### 2.1.1 Kandungan dalam Biomassa

Biomassa adalah seluruh hal yang berkenaan dengan tanaman yang masih hidup termasuk limbah organik yang berasal dari tanaman, manusia, kehidupan laut, dan hewan [10]. Biomassa mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin [11]. Selulosa adalah polimer glukosa (hanya glukosa) yang tidak bercabang. Hemiselulosa merupakan polimer gula yang tersusun dari bermacam-macam jenis gula. Lignin adalah molekul kompleks yang tersusun dari unit *phenylpropane* yang terikat di dalam struktur tiga dimensi dan merupakan material paling kuat di dalam biomassa. Lignin memiliki rasio dari C:O dan H:O lebih besar dibandingkan dengan fraksi karbohidrat lainnya di dalam biomassa. Hal inilah yang membuat lignin lebih potensial untuk proses oksidasi. Kandungan selulosa yang tinggi akan memudahkan dekomposisi dari bahan baku untuk melepaskan *volatile matters light hydrocarbon* di bawah temperatur 450°C [12]. Berikut tabel 2.1 yang memuat data kandungan lignin, selulosa, dan hemiselulosa pada beberapa biomassa

Tabel 2.1 Hasil analisis kandungan biopolimer biomassa [10]

Jenis Biomassa	Lignin (%Dry Base)	Cellulose (%Dry Base)	Hemi-Cellulose (%Dry Base)
Jerami	12,87	40,54	20,80
Sekam	26,11	35,31	22,60
Kayu Kamper	26,01	35,97	20,57
Kayu Karet	22,68	47,89	26,88
Serabut Kelapa	35,57	26,93	25,49
Bagas	21,98	39,29	27,63

Analisis proksimat dan ultimat biasa digunakan untuk mengetahui kandungan dalam biomassa. Analisis proksimat digunakan untuk mengetahui kandungan air, abu, *volatile matters*, dan *fixed carbon*. Semakin besar kandungan air maka semakin rendah nilai kalornya karena H<sub>2</sub>O tidak memiliki nilai kalor, kadar abu yang tinggi

akan menghasilkan emisi abu dan partikulat paling banyak, semakin besar kandungan *volatile matters* maka akan semakin mudah biomassa terbakar atau lebih cepat terignisi, dan semakin banyak kandungan karbon menandakan bahwa semakin banyak pula zat yang dapat bereaksi dalam reaksi pembakaran sehingga memungkinkan reaksi pembakaran berjalan dengan lebih baik [10]. Berikut Tabel 2.2 yang merupakan hasil analisis proksimat beberapa biomassa

**Tabel 2.2.** Hasil analisis proksimat sampel biomassa [10]

Jenis Biomassa	Kandungan air	Abu	Volatile matters	Fixed Carbon
	%, adb	%, adb	%, adb	%, adb
Jerami	11,98	17,42	56,48	14,12
Sekam	7,78	21,84	57,05	13,33
Kayu Kamper	15,52	1,21	68,22	15,05
Kayu Karet	10,85	4,29	69,76	15,1
Serabut Kelapa	10,27	3,27	62,64	23,82
Bagas	8,76	1,34	75,94	13,96

Sedangkan analisis ultimat digunakan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur kimia seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, dll. Berikut Tabel 2.3 yang merupakan hasil analisis ultimat beberapa biomassa

**Tabel 2.3** Hasil analisis ultimat sampel biomassa [10]

Jenis Biomassa	Carbon (% , adb)	Hidrogen (% , adb)	Nitrogen (% , adb)	Belerang (% , adb)	Oksigen (% , adb)
Jerami	36,48	4,7	0,61	0,09	40,7
Sekam	35,18	4,46	0,15	0,01	38,36
Kayu Kamper	45,67	5,74	0,12	Trace	47,26
Kayu Karet	45,62	5,57	0,72	0,04	43,76
Serabut Kelapa	46,87	5,77	0,04	0,08	43,97
Bagas	46,1	6,1	0,11	0,17	46,18

Semakin tinggi kadar karbon yang terkandung di dalam biomassa maka akan semakin tinggi pula nilai kalor yang terbentuk [10].

Seperti yang terlihat pada Tabel 2.1 sampai Tabel 2.3 di atas, bahwa kayu karet memiliki beberapa kelebihan yang membuatnya layak dipertimbangkan menjadi bahan bakar memasak. Kayu karet memiliki kandungan selulosa yang cukup besar yang akan mempermudah proses devolatilisasi sehingga *volatile matters* yang terkandung sebesar 69,76% lebih mudah untuk terdekomposisi. Kandungan oksigen

yang cukup besar yang dimiliki juga akan memudahkan kayu karet untuk dapat terbakar.

### 2.1.2 Pellet biomassa

Pellet biomassa berbentuk silindris dapat diproduksi dari berbagai macam materi untuk tujuan yang berbeda-beda dengan menggunakan panas dan tekanan [10]. Beberapa ciri khas dari pellet biomassa adalah:

- a. memiliki densitas tidak kurang dari 40 lbs/ft<sup>3</sup>
- b. mengalir seperti liquid
- c. dapat digunakan baik di kompor ataupun *boiler*
- d. mudah untuk digunakan, disimpan, dan ditransportasikan
- e. meningkatkan karakteristik pembakaran jika dibandingkan dengan bahan bakunya

Kualitas dari pellet yang dihasilkan dapat dilihat dari dua faktor, yaitu ketahanan mekanis dan kandungan airnya [10]. Ketahanan mekanis secara sederhana dapat dinyatakan dalam seberapa rapat pellet tersebut dan seberapa baik pellet terbentuk. Kelebihan pellet dengan densitas lebih tinggi yaitu, ketahanan pellet lebih tinggi ketika transportasi, dan kerja pellet lebih efisien pada pembakar pellet.

Pellet dengan kualitas yang baik memiliki permukaan yang halus dengan tidak ada atau sedikit retakan ketika keluar dari penggilingan pellet. Jika terdapat retakan atau mengalami pertambahan luas, maka hal tersebut dikarenakan terlalu banyak jumlah air di dalam pellet atau kompresi yang buruk ketika proses penggilingan pellet. Untuk menguji kualitas pellet, dapat dilakukan dengan cara menyentak pellet dengan permukaan keras untuk melihat apakah pellet tersebut remuk atau hancur dengan mudahnya dan kemudian terpisah. Pellet yang terlalu panjang yaitu di atas 1 inch (2,54 cm) dapat menyebabkan kerusakan di dalam pembakar. Pellet yang berkualitas memiliki nilai kandungan air di bawah 10%. Pellet dengan nilai kandungan air di atas 10% akan tetap dapat terbakar, namun memiliki efisiensi yang rendah.

### 2.1.3 Pirolisis Biomassa

Pirolisis adalah proses pemecahan ikatan pada biomassa padat dengan menggunakan panas pada temperatur lebih dari 200°C [11]. Proses pirolisis menyebabkan terjadinya dekomposisi termal pada biomassa tanpa hadirnya oksigen [13]. *Volatile matters* dan *char* beberapa biomassa dapat mulai dihasilkan akibat dekomposisi termal pada temperatur 100°C -150°C [12,14,15]. Pirolisis biasanya merupakan tahap pertama yang terjadi pada proses pembakaran biomassa. Terdapat dua jenis pirolisis yakni *fast pyrolysis* jika pirolisis terjadi dengan proses yang sangat cepat dan *slow pyrolysis* jika pirolisis terjadi pada waktu yang relatif lambat. Pada proses *fast pyrolysis*, sebaiknya temperatur dijaga agar proses berlangsung pada temperatur tidak kurang dari 500°C[13,16]. Temperatur yang rendah dan *residence time* yang singkat menunjang pembentukan *char*, temperatur yang tinggi dan *residence time* yang panjang akan meningkatkan konversi biomassa ke gas, sedangkan temperatur menengah dan *residence time* yang singkat adalah kondisi optimum untuk memproduksi *liquid*. Berikut Tabel 2.4 merupakan perbandingan produk gas hasil pirolisis pada berbagai temperatur :

**Tabel 2.4** Produk pirolisis pada berbagai temperatur [16]

Produk Pirolisis	temperatur (°C)			
	600	700	800	900
H <sub>2</sub> (%)	0,1	0,32	0,75	1,67
CO(%)	7,45	19,9	23,7	31,32
CO <sub>2</sub> (%)	6,22	7,81	9,1	8,01
C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub> (%)	4,71	11,64	11,68	10,49
Total gas yield (%)	18,48	39,67	45,23	51,49
Remaining carbon (%)	10,23	9,49	6,4	5,84

Produk pirolisis digolongkan dalam 3 grup,yakni *char*, gas, dan tar. *Char* adalah produk yang kaya akan karbon dan tidak mengandung *volatile matters*. Tar adalah produk dengan massa molekul berat yang ter volatilisasi pada temperatur pirolisis. Gas adalah produk dengan massa molekul rendah seperti CO dan CO<sub>2</sub>.

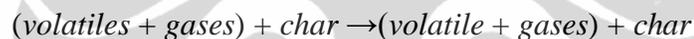
Ketika biomassa dipanaskan, terjadi proses penguapan *moisture content* yang terdapat didalamnya yang diikuti dekomposisi termal mengeluarkan *volatile matters*

dari padatan biomassa. Reaksi kimia yang terjadi pada pirolisis biomassa dibagi menjadi 2 tahap : reaksi primer untuk mendegradasi padatan dan reaksi sekunder adalah terjadi sebagai pengembangan dari degradasi yang terjadi pada reaksi primer [17]. Pada biomassa kayu, degradasi termal yang terjadi pada reaksi primer menghasilkan gas, tar, dan *char*. Tar kemudian akan mengalami proses kembali pada reaksi sekunder bersama dengan *char* untuk menghasilkan gas sekunder dan *char* sekunder. Berikut skema reaksi yang terjadi pada reaksi primer dan sekunder pirolisis biomassa kayu [17].

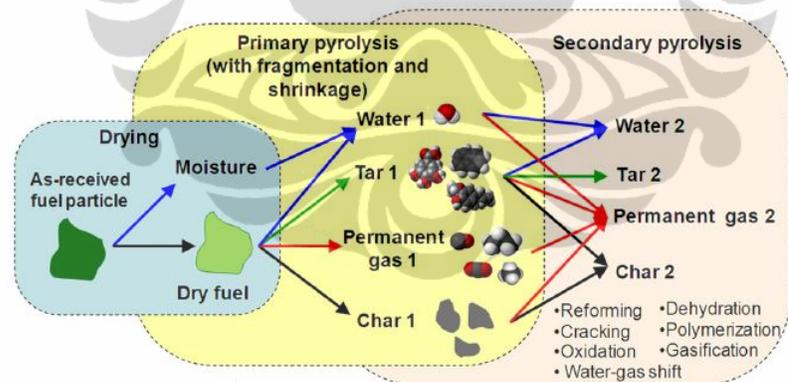
Reaksi primer :



Reaksi sekunder :



Skema reaksi secara keseluruhannya adalah tergambar pada Gambar 2.1 sebagai berikut



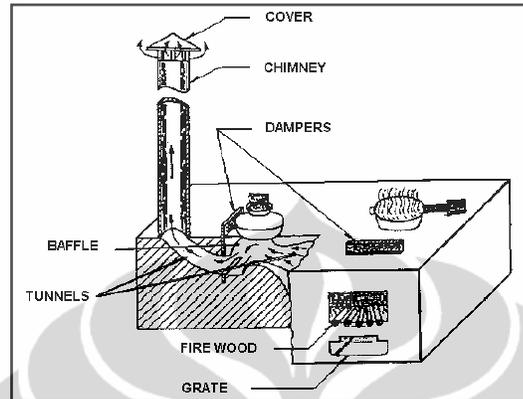
Gambar 2.1 Skema Sederhana Proses Pirolisis [18]

## 2.2 Perancangan Kompor Biomassa

### 2.2.1 Komponen

Perancangan kompor biomassa erat kaitannya dengan aplikasi teori perpindahan kalor, pembakaran, dan prinsip aliran fluida untuk memperoleh pembakaran sempurna dengan tingkat udara berlebih yang minimal, perpindahan

kalor maksimal dari api ke bejana masak, dan kalor hilang yang minimum. Kriteria tersebut dapat dicapai dengan mengoptimalkan atau menambahkan beberapa subsistem yang terdapat dalam sebuah kompor [8]. Komponen tersebut adalah



**Gambar 2.2** Contoh Tampilan Kompor Biomassa [8]

a. Ruang pembakaran

Ruang pembakaran merupakan komponen utama kompor, dimana pembakaran terjadi. Rancangan ruang pembakaran biasanya berdasarkan daya keluaran rata-rata  $P_{av}$  kompor dalam kW, dirumuskan sebagai berikut [9]:

$$Q_n = (M_f \times E_s) / T \quad (2.1)$$

Dimana  $M_f$  adalah massa makanan yang dimasak (kg),  $E_s$  adalah energi spesifik yang dimiliki masakan (kcal/kg) dan  $T$  adalah lama waktu pemasakan (jam). Diameter ruang pembakaran dihitung dengan persamaan :

$$D = \sqrt{1.27 \frac{FCR}{SGR}} \quad (2.2)$$

Tinggi ruang pembakaran dapat dibagi menjadi tinggi bahan bakar dan tinggi api.

Tinggi bahan bakar dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [9] :

$$H = FCR / (\text{densitas bulk bahan bakar} \times A) \quad (2.3)$$

Dengan  $FCR$  adalah laju konsumsi bahan bakar per satuan waktu tertentu (kg/jam), densitas bulk bahan bakar ( $\text{kg/m}^3$ ), dan  $A$  luas penampang ruang pembakaran ( $\text{m}^2$ ).

$FCR$  dihitung dengan persamaan berikut [9] :

$$FCR = Q_n / (HV_f \times S_g) \quad (2.4)$$

$HV_f$  adalah heating value bahan bakar (kcal/kg) dan  $S_g$  adalah *gasifier stove efficiency* (%). Tinggi api dapat dihitung dengan persamaan [19] :

$$H_{fl} = C_2 \times Qn^{2/5} \quad (2.5)$$

$C_2$  adalah konstanta, untuk kompor dengan garangan, nilai konstanta ini adalah 75 mm/kW<sup>0.4</sup>, dan untuk kompor tanpa garangan bernilai 110 mm/kW<sup>0.4</sup>.

b. Garangan (*grate*)

Adanya *grate* pada kompor dapat meningkatkan efisiensi pembakaran karena udara dapat terdistribusi dengan lebih merata ke bagian bawah bahan bakar sebagai hasil dari pencampuran udara dengan *volatile matters*. Hal ini dapat meningkatkan laju pembakaran dengan api yang tetap sehingga mengurangi panas yang hilang ke dinding. Hal ini dikarenakan api hampir tidak menyentuh dinding. Udara juga terpanaskan terlebih dahulu sebelum masuk ke ruang pembakaran. *Grate* juga dapat mengurangi panas yang hilang akibat perpindahan panas secara konduksi oleh bahan bakar dan juga mengurangi pembentukan arang sehingga pembentukan gas CO dan hilangnya *volatile matters* yang tak terbakar juga turut berkurang.

c. Lubang panci (*pot hole*)

Lingkaran lubang harus dirancang sedemikian rupa sehingga meminimalisasi gas keluaran untuk keluar.

d. Cerobong (*chimney*)

Pemasangan sebuah cerobong pada rancangan kompor akan membantu mengisap gas keluaran (*flue gas*) karena adanya perbedaan temperatur dari tinggi (gas panas) ke rendah (udara *ambient*). Akibatnya, gas panas akan bergerak keluar melalui cerobong, sedangkan udara biasa dapat masuk ke dalam. Terdapat tiga gaya yang mengontrol pergerakan fluida dalam kompor, yaitu:

- Gaya apung (*buoyance force*) yang dihasilkan oleh api.
- Laju alir yang diciptakan oleh cerobong karena adanya perbedaan temperatur dalam kompor dan luar cerobong, serta tinggi cerobong.
- Gaya friksi berlawanan.

e. Penghalang (*baffle*)

*Baffle* merupakan penghalang yang dirancang dalam lintasan aliran di bawah panci kedua atau ketiga, tergantung dari konfigurasi kompor. Penghalang ini sangat penting pada rancangan kompor multi-pot menggunakan cerobong. Fungsinya adalah untuk

meningkatkan perpindahan kalor konveksi, meningkatkan *residence time*, mengatur gas panas menuju bawah panci, meningkatkan radiasi dalam panci, dan mengurangi aliran dalam kompor (aliran dihalang agar lebih terkonsentrasi di bawah panci).

f. Sambungan (*connecting tunnels*)

Pada kompor multi-pot, diperlukan saluran seperti terowongan yang menyambungkan ruang-ruang dalam kompor. Bentuk umumnya adalah silindris yang mengecil ataupun melebar.

g. Pengatur api (*damper*)

Pengatur api ini berupa pelat/piringan yang dapat dipindahkan dari dan ke dalam kompor, tepatnya di dalam lintasan aliran udara antar pot. Gunanya adalah untuk mengatur induksi udara dalam kompor, sehingga dapat mengatur daya keluaran kompor. Bentuk umumnya rektanguler atau trapezoidal, dan terdapat dua posisi umum untuk peletakannya, yaitu di ujung dalam cerobong, dan mulut ruang pembakaran.

### 2.2.2 Konstruksi

Teknologi konstruksi berbeda-beda untuk tiap bahan dan skala produksi yang berbeda. Beberapa diantaranya [19]:

a. Kompor logam (*metal stoves*)

Kompor logam dapat terbuat dari lembaran logam atau cetakan besi. Kompor lembaran logam dapat diproduksi di pabrik atau oleh pekerja tangan ahli. Rancangan yang rumit akan meningkatkan biaya produksi. Untuk mencegah terjadinya korosi, dapat dilakukan pelapisan (*coating*) sehingga menambah umur logam.

b. Kompor tanah liat (*clay stoves*)

Bahan komposit tanah liat memiliki sifat-sifat yang berbeda, bergantung dari proporsi tanah liat, pasir, dan endapan (*silt*). Tanah liat menyebabkan plastisitas dan kohesi, sedangkan pasir dan endapan mengatur kekasaran dan kelembutan bahan.

c. Kompor *ceramic / fired-clay*

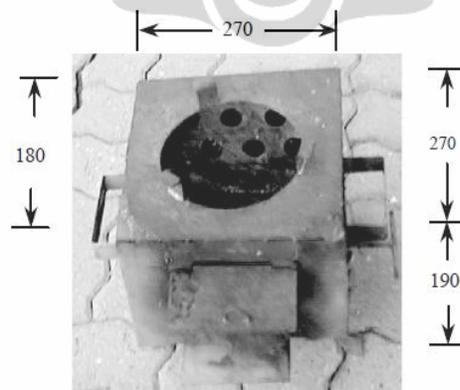
Kompor ceramic membutuhkan aditif seperti sekam padi, *fired-clay* dalam bentuk bubuk, untuk meningkatkan ketahanan termal dan *shock* mekanik.

## 2.3 Perbandingan Kompor Biomassa

### 2.3.1 Kompor Biomassa dengan Pembakaran Langsung

Penggunaan kompor biomassa dengan pembakaran langsung berbahan bakar kayu telah diaplikasikan melalui kompor bertipe *Indian “Harsha” Stove* dengan model rancangan seperti pada Gambar 2.3 [3]. Bahan bakar berupa kayu ataupun limbah pertanian lain digunakan dalam pengoperasian kompor ini. Kompor dirancang tidak memiliki *chimney* dan pembakaran bahan bakar dilakukan secara pembakaran langsung. Pembakaran langsung yang dimaksud adalah pengoperasian dilakukan dengan menyulutkan api secara langsung pada bahan bakar.

Metode pembakaran seperti ini masih banyak memiliki kelemahan diantaranya emisi CO yang masih sangat tinggi. Hal ini disebabkan pembakaran secara langsung mengakomodasi pembakaran fasa padat dari biomassa yang digunakan yang artinya pembakaran *volatile matters* dan pembakaran *char* terjadi secara simultan. Pembakaran fasa padat, yakni *char*, memungkinkan dihasilkan gas CO dengan sangat cepat sehingga jumlahnya pun menjadi banyak terlihat dari emisi CO terendah yang berhasil dihasilkan oleh kompor *harsha* ini adalah di atas 50 ppm yang tergolong diatas ambang batas sebesar 25 ppm [4]. Pembakaran ini juga menghasilkan nyala api yang merah kekuningan yang mengindikasikan pembakaran terjadi dengan tidak sempurna sehingga akan membentuk *soot* sebagai hasil pembakarannya.

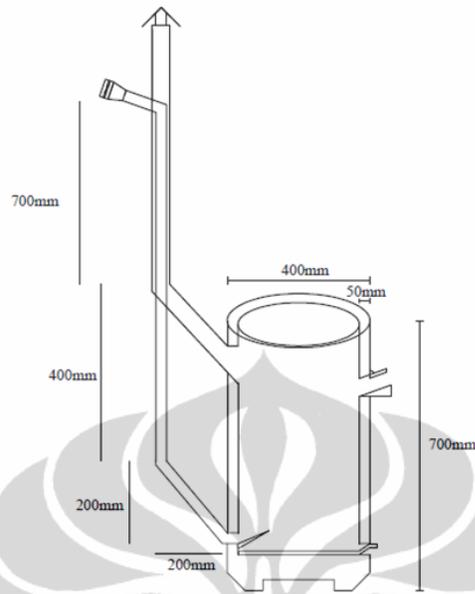


Gambar 2.3 *Indian “Harsha” Stove* [3]

### 2.3.2 Kompor Biomassa dengan Prinsip *Heat Recovery*

Adanya *heat recovery* pada kompor biomassa adalah sebuah perkembangan yang dilakukan dengan mempertimbangkan peristiwa perpindahan panas dan pembakaran yang terjadi. Prinsip ini mengadopsi sistem kerja pada *heat exchanger* [6] dimana fluida dengan temperatur lebih tinggi akan melepaskan kalornya yang kemudian kalor tersebut diserap oleh fluida lain yang memiliki temperatur lebih rendah [20]. Kompor ini dirancang sedemikian rupa, seperti terlihat pada Gambar 2.4, sebagai upaya pengurangan emisi CO dari penggunaan biomassa sebagai bahan bakar memasak dengan metode pembakaran langsung menggunakan bahan bakar kayu karet.

Peristiwa yang terjadi pada kompor biomassa ini adalah fluida dengan temperatur lebih tinggi berupa gas hasil pembakaran atau gas buang membawa panas yang dihasilkan dari proses pembakaran, kemudian panas pembakaran tersebut akan terkontakkan dengan udara masuk yang bertemperatur lebih rendah. Karena adanya perbedaan temperatur inilah sehingga proses perpindahan panas secara konveksi dapat terjadi. Sebagai akibat perpindahan panas tersebut, udara masuk akan memiliki temperatur yang lebih tinggi ketika masuk ruang pembakaran sehingga proses pembakaran menjadi lebih efisien. Tercatat bahwa jumlah panas yang dapat dikembalikan mencapai 70-85% dari panas yang terbawa oleh gas buang [6]. Emisi CO yang dihasilkan adalah sebesar 50 ppm. Besar emisi CO ini masih tergolong diatas ambang batas yakni 25 ppm [4]. Emisi yang masih tergolong besar ini pun dikarenakan pembakaran yang dilakukan adalah pembakaran langsung yang berarti adanya pembakaran fasa padat di dalamnya. Gambar 2.4 berikut adalah contoh desain kompor dengan prinsip *heat recovery*.

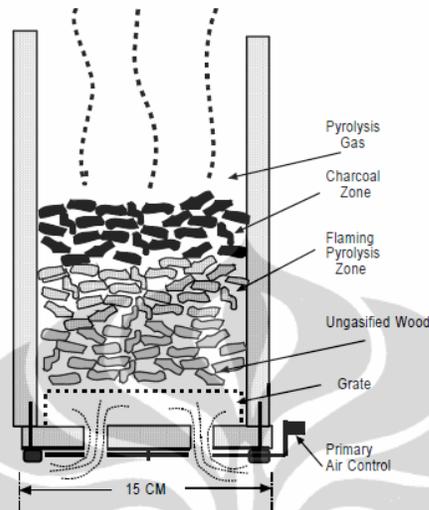


**Gambar 2.4** Desain Kompor dengan *Heat Recovery* [7]

### 2.3.3 Kompor Biomassa dengan Prinsip *Upside Downdraft Gasifier*

Pada pembakaran biomassa, umumnya terjadi proses pelepasan *volatile matters* terlebih dahulu yang kemudian diikuti dengan pembakaran *volatile matters* dan pembakaran arang yang dapat terjadi secara simultan ataupun tidak. *Upside downdraft gasifier* berarti bahwa proses pengeluaran gas-gas yang mudah menguap atau biasa disebut *volatile matters* dari bahan bakar biomassa terjadi secara bertahap dari lapisan paling atas ke lapisan bawahnya [5]. Peristiwa yang terjadi adalah penyulutan *starter fuel* yang kemudian memanaskan bahan bakar biomassa di bawahnya sehingga *volatile matters* keluar dari biomassa hingga terbentuk arang. Selanjutnya, bergantung pada jenis bahan bakar biomassa yang digunakan, proses pembakaran arang terjadi bertahap dari lapisan teratas ke lapisan bawahnya hingga mencapai *grate* dan menghasilkan emisi gas karbon monoksida (CO). Pembakaran terjadi pada bagian unggun pellet. Emisi gas CO yang dihasilkan adalah 10-30% dari gas buang yang dihasilkan pada proses pembakaran sedangkan efisiensi termal yang dimiliki tidak kurang dari 30% [5]. Pembakaran pada kompor biomassa berprinsip *upside downdraft gasifier* telah dilakukan oleh Reed T.B pada tahun 2000 dengan menggunakan 1 blower sebagai pengontrol aliran udara masuk. Kompor ini kemudian

dikenal dengan *Turbo stove*. Desain *Turbo Stove* dapat dilihat pada gambar 2.5 di bawah ini.



**Gambar 2.5** Turbo stove [5]

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 di atas, rancangan kompor ini, udara sekunder mengalir secara konveksi alami, tetapi udara primer secara konveksi paksa. Hal ini menyebabkan terdapatnya kelemahan pada rancangan kompor ini karena udara pembakaran yang dibiarkan bebas akan memiliki kecepatan, temperatur, dan komposisi yang tidak optimal untuk pembakaran. Ketidakefektifan tersebut akan memberikan dampak pada terbentuknya *soot* dan emisi sebagai hasil dari pembakaran yang terjadi [5].

Menurut Reed and Larson, tahun 2000, untuk biomassa dengan rasio massa *volatile matter* : *charcoal* = 3,73, jika hanya *volatile matter* dibakar, rasio massa udara (primer+sekunder) : *pellet* = 1,28, jika *volatile matter* dan *charcoal* dibakar, rasio massa udara : *pellet* = 6,36. Maka untuk membakar *charcoal*, rasio massa udara : *charcoal* =  $6,36 - 1,28 = 5,08$ . *Combustion heat ratio volatile matter* : *charcoal* = 2,97. Perbandingan angka 3,73 dan 2,97 menunjukkan *heating value volatile matter/gram* sedikit lebih kecil dibanding *heating value charcoal/gram*, yaitu  $2,97/3,73 (=0,8) : 1$ , tetapi kebutuhan udara untuk membakar *volatile matter/gram* jauh lebih kecil dibandingkan untuk membakar *charcoal/gram*, yaitu  $1,28/3,73$

(=0,34) : 5,08/1 = 0,07 : 1. Hal ini kemungkinan besar dikarenakan dalam *volatile matter* sudah mengandung oksigen dalam molekulnya.

Dari ketiga penjelasan kompor biomassa di atas dapat ditulis kelemahan-kelemahan dari kompor-kompor tersebut adalah kurang dikondisikannya temperatur yang tinggi, turbulensi, serta, pasokan udara sehingga pembakaran mendapat tidak memiliki cukup oksigen (terlalu berlebih atau kurang) sehingga pembakaran yang terjadi tidak sempurna dan menghasilkan emisi CO tinggi. Temperatur yang tidak tinggi disebabkan udara sekunder mengalir secara bebas tanpa pengontrol dan masuk ke atas unggun pellet tanpa melalui proses *preheating* terlebih dahulu [3,5]. Pasokan udara yang kurang dikondisikan dikarenakan pada desain kompor ini, hanya aliran udara primer yang mendapat pengontrolan sedangkan tidak untuk aliran udara sekunder [3,5,7]. Hal ini diduga menyebabkan rasio campuran udara dengan bahan bakar menjadi kurang optimal untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Yang menjadi perhatian Peneliti pada penelitian ini adalah fakta bahwa sudah terkandungnya oksigen di dalam biomassa sekitar 30-45% yang akan terdegradasi keluar dari biomassa padat melalui proses pirolisis sehingga pembakaran *volatile matters* menjadi lebih mudah karena membutuhkan oksigen yang jauh lebih kecil [21]. Oleh karena itu, Peneliti ingin melakukan mekanisme pembakaran yang agak berbeda dengan sebelumnya untuk memperbaiki kelemahan-kelemahan tersebut, yakni dengan hanya melakukan pembakaran pada fasa gas saja. Alasan pemilihan pembakaran hanya pada fasa gas saja juga dikarenakan fasa gas lebih mudah terbakar karena tidak adanya perpindahan panas konduksi yang menurunkan temperatur sehingga menyebabkan *heat loss* seperti pada pembakaran fasa padat [22] dan adanya oksigen di *volatile matter* akan menaikkan kinetika pembakaran sesuai dengan *fast reaction* pada kinetika reaksi CO yang dapat dilihat pada persamaan 2.27 . Gas yang dibakar ini merupakan *volatile matters* yang terdekomposisi dari biomassa kayu karet yang digunakan atau disebut proses devolatilisasi. Mengingat temperatur fasa gas lebih tinggi daripada fasa padat karena tidak terjadinya perpindahan panas secara konduksi seperti pada fasa padat yang menyebabkan *heat loss* [22] maka mekanisme ini juga dapat membuat kondisi pembakaran dengan temperatur yang tinggi terpenuhi

sehingga menurunkan emisi CO karena reaksi yang terjadi pada konversi CO menjadi CO<sub>2</sub> akan lebih cepat terjadi pada temperatur yang tinggi. Sedangkan pembakaran zat padat akan menyebabkan temperatur permukaan menjadi lebih rendah sehingga pembakaran akan menjadi lebih cepat menghasilkan CO yang akan memperbanyak jumlah emisinya. Kecukupan oksigen akan diatur melalui 2 blower sebagai pemasok udara primer dan udara sekunder.

## 2.4 Pembakaran

### 2.4.1 Teori Pembakaran

Pembakaran adalah suatu reaksi kimia yang melibatkan pencampuran bahan bakar dan oksigen untuk menghasilkan panas dan produk pembakaran [23]. Pembakaran didefinisikan sebagai suatu reaksi kimia antara oksigen dengan bahan yang dapat terbakar menghasilkan kalor secara tepat dan diiringi dengan pancaran cahaya. Diuraikan lebih lanjut, terdapat beberapa syarat agar dapat terjadi suatu proses pembakaran, yaitu :

a. Adanya bahan bakar

Bahan bakar didefinisikan sebagai bahan yang apabila terbakar dapat meneruskan proses pembakaran dengan sendirinya disertai dengan pengeluaran kalor. Secara umum, unsur di dalam bahan bakar adalah C, H, S.

b. Adanya suplai oksigen

Oksigen yang digunakan dapat berupa oksigen murni maupun oksigen yang berasal dari udara.

c. Adanya energi panas

Energi panas berfungsi untuk mengaktifasi reaksi pembakaran (ignition) [24].

Contoh reaksi pembakaran :



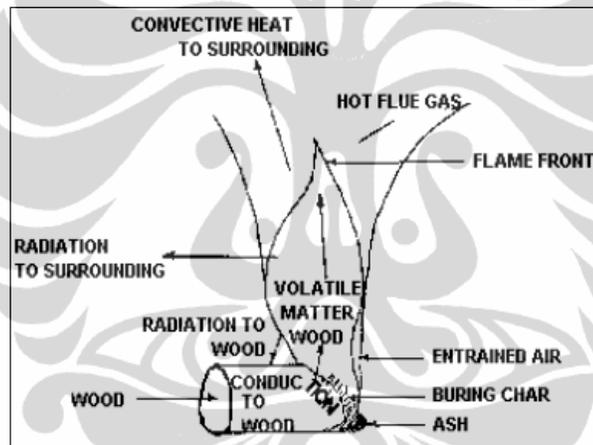
Reaksi di atas adalah reaksi sempurna yang terjadi pada proses pembakaran. Namun, pada kenyataannya, proses pembakaran yang terjadi seringkali menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna, sehingga reaksi pembakaran yang terjadi menghasilkan karbon monoksida. Emisi CO berasal dari reaksi oksidasi tak sempurna

hidrokarbon dan karbon yang terkandung dalam bahan bakar. Untuk memperoleh reaksi yang sempurna menuju pembentukan  $\text{CO}_2$ , harus dipenuhi tiga syarat : kecukupan waktu tinggal reaksi untuk reaksi  $\text{CO}$  ke  $\text{CO}_2$ , kecukupan oksigen untuk menyempurnakan reaksi oksidasi, dan temperatur reaksi yang cukup tinggi untuk memperbesar kinetika reaksi oksidasi [25].

Pembakaran biomassa dapat terbagi ke dalam empat tahap, yaitu:

- a. Pengeringan kandungan air dalam biomassa
- b. Pelepasan zat-*volatile matters* yang terkandung dalam biomassa (devolatilisasi)
- c. Pembakaran gas volatil yang keluar dari biomassa
- d. Pembakaran arang

Skema prosesnya dapat dilihat dari Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Pembakaran Kayu [19]

Untuk menekan angka emisi  $\text{CO}$ , proses pembakaran diupayakan hanya sampai pembakaran gas *volatile* yang dikeluarkan dari biomassa melalui proses devolatilisasi atau dengan kata lain, pembakaran fasa gas dan pembakaran fasa padat tidak terjadi secara simultan.

#### 2.4.2 Devolatilisasi

Biomassa pada umumnya mempunyai kadar *volatile matters* yang tinggi sehingga pembakarannya dimulai pada temperatur yang rendah,  $160^{\circ}\text{C}$ - $200^{\circ}\text{C}$  untuk biomassa *coffee husk* dan *wood chip* [26]. Semakin banyak kandungan *volatile matters* dan semakin sedikit *moisture content* dalam biomassa akan mempercepat terjadinya proses devolatilisasi, sedangkan jumlah *volatile matter* yang diproduksi

pada temperatur tertentu sebagai hasil devolatilisasi bergantung pada jenis biomassa yang digunakan dan ukurannya [29]. Reaksi yang terjadi pada devolatilisasi adalah



Selama proses devolatilisasi, kandungan *volatile matters* akan keluar dalam bentuk gas. *Volatile matterse* umumnya terdiri dari H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, HCN, NH<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dll [20].

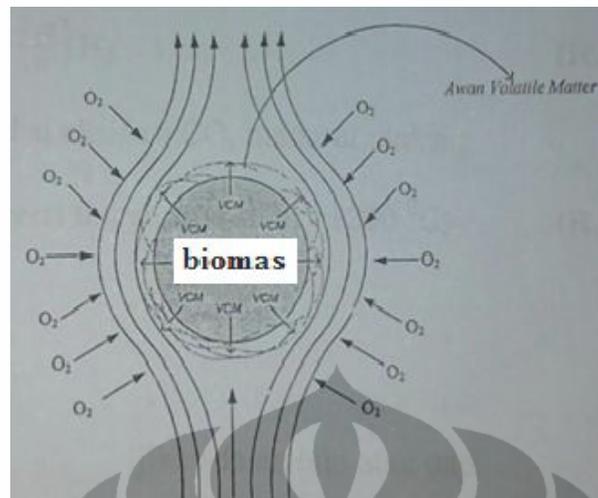
### 2.4.3 Pembakaran *Volatile matters* dan char

Berikut ini merupakan reaksi pembakaran sederhana dari *volatile matters* yang seringkali terjadi pada proses pembakaran biomassa [10].



Panas yang dihasilkan oleh reaksi eksotermis sangat penting dalam pelepasan *volatile matters* dan penyalaan api pada arang (bahan bakar padat tertinggal setelah terjadi proses devolatilisasi).

Proses yang terjadi adalah *volatile matters* yang dihasilkan dari devolatilisasi bereaksi dengan oksigen dalam udara menghasilkan nyala api pada permukaan biomassa. Menurut Sumarni di Tahun 2010, pada proses ini udara terhalang untuk berkontak dengan permukaan biomassa karena adanya awan *volatile matters*. Pembakaran *volatile matters* menghasilkan panas yang mengakibatkan naiknya temperatur biomassa. Kemudian, difusi oksigen dari udara eksternal akan melakukan penetrasi ke permukaan biomassa setelah *volatile matters* habis terbakar dan oksigen teradsorpsi kemudian bereaksi dengan permukaan biomassa. Panas ini kemudian menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konduksi dari permukaan ke dalam biomassa. Ilustrasi proses yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut



**Gambar 2.7** Penggambaran Proses Penyalaan *Volatile Matters*

Pada kompor, proses pembakaran *volatile matters* dapat terjadi secara simultan dengan pembakaran arang ataupun tidak. Pembakaran *volatile matters* yang terjadi terlebih dahulu atau tidak simultan dengan pembakaran arang dapat menurunkan emisi CO dikarenakan proses pembakaran *volatile matters* menghasilkan pembakaran yang sempurna. Pembakaran arang dan *volatile matters* yang terjadi bertahap menghasilkan efisiensi pembakaran yang tinggi dan menjadi cara efektif untuk dapat mengurangi emisi karbon monoksida [21]. Pada pembakaran arang, temperatur permukaan arang menjadi lebih tinggi akibat adanya perpindahan panas sehingga pembakaran terjadi dengan lebih mudah yang berakibat pada CO yang dihasilkan menjadi lebih banyak.

#### 2.4.4 *Laminar premixed flame*

*Premixed flame* adalah salah satu fenomena yang terjadi pada pembakaran dimana bahan bakar telah bercampur terlebih dahulu dengan udara atau oksigen sebelum terbentuk nyala. *Flame* (nyala) dapat didefinisikan sebagai propagasi zona pembakaran lokal yang dapat bertahan sendiri dengan kecepatan di bawah kecepatan suara. *Flame* ini bersifat lokal, hanya mencakup suatu bagian kecil dari campuran yang dapat terbakar pada suatu saat tertentu. Terdapat dua zona *flame*, yakni zona *preheating* dan zona reaksi. Pada *preheating* terjadi pelepasan sedikit panas, sedangkan zona reaksi melepaskan sebagian energi kimia. Kemudian, terdapat 2 area dalam zona reaksi :

*a. Thin region*

Reaksi berjalan sangat cepat, yakni reaksi destruksi dari molekul bahan bakar untuk menghasilkan produk-produk *intermediate* seperti karbon monoksida. Terdapat warna penyalaan yang dapat dilihat pada thin region, yakni reaksi akan memberikan warna nyala biru bila rasio udara dalam campuran udara dan bahan bakar melebihi dari proporsi stoikiometriknya sebagai indikasi keluarnya radikal hidrokarbon.

*b. Wide region*

Reaksi berjalan lambat yang didominasi oleh reaksi pengkontakkan ulang karbon monoksida dengan oksigen untuk menghasilkan karbon dioksida. Bila komposisi udara dalam campuran udara-bahan bakar kurang dari proporsi stoikiometriknya, maka akan terbentuk soot dan warna nyala yang terlihat oleh mata manusia adalah oranye atau kuning terang bergantung pada temperatur flame.

**2.4.4.1 Flame speed**

Karakteristik utama *premixed flame* yang membedakannya dari *non-premixed flame* adalah adanya *flame speed* pada *premixed flame*. *Flame speed* didefinisikan sebagai kecepatan perpindahan panas dari nyala api ke bahan yang mudah terbakar, satuannya adalah m/detik. Pada pembakaran yang terjadi dalam kompor berbahan bakar biomassa, *flame speed* erat kaitannya dengan stabilisasi nyala. Sifat dari api adalah cenderung merambat ke arah zat yang mudah terbakar berada.

Pada penelitian ini, konsep yang akan terjadi adalah *partial diffusion flame* atau *partial premixed flame* karena keberadaan udara primer (udara yang nantinya akan bercampur dengan bahan bakar terlebih dahulu sebelum pembakaran terjadi) dan udara sekunder (udara yang berperan sebagai udara pembakaran yang akan berkontak dengan *volatile matters* yang telah tercampur udara primer). Biopellet ditempatkan di dalam ruang pembakaran, sedangkan yang akan dibakar hanyalah *volatile matters* yang keluar dari biopellet sebagai hasil dari devolatilisasi. Untuk mencegah terbakarnya fasa padat dari biopellet (char) maka nyala api diupayakan berada pada bagian atas dari ruang pembakaran. Oleh karena itu, diperlukan stabilisasi agar posisi api tetap berada di atas. Dengan menggunakan 2 pemasok udara, pasokan pertama yakni udara dari zona bagian bawah ruang pembakaran yang

akan mengupayakan *volatile matters* yang keluar secara bertahap saat proses devolatilisasi senantiasa terbawa ke bagian atas untuk selanjutnya berkontak dengan pasokan aliran kedua pada zona bagian atas dari ruang pembakaran. Posisi nyala api bergantung pada kecepatan perpindahan panas yang terjadi ke bagian bawah dan kecepatan gas dari bagian bawah ke atas, untuk nyala api dengan posisi di bagian atas maka diupayakan kecepatan perpindahan panas ke bawah tersebut sama dengan kecepatan gas dari bawah ke atas.

Penelitian ini menggunakan prinsip *topside downdraft gasifier*. Dimana *topside* berarti posisi nyala api di atas unggun pellet biomassa, *downdraft* berarti udara sekunder yang merupakan bagian terbesar dari udara ( $\pm 2/3$  bagian) mengalir ke arah bawah (*downward*) atau ke arah nyala api, dan *gasifier* berarti terjadi perubahan *volatile matter* menjadi gas yang naik bersama-sama udara primer ( $\pm 1/3$  bagian) ke bagian unggun pellet untuk mengimbangi *flame speed*. *Flame speed* dipengaruhi oleh beberapa faktor :

a. Turbulensi

*Flame speed* merupakan fungsi dari turbulensi, semakin turbulen aliran udara maka semakin tinggi nilai *flame speed*. Menurut Nurhuda di Tahun 2010, turbulensi yang terbentuk pada aliran udara sekunder dapat memfasilitasi udara sekunder untuk berkontak lebih lama dengan *volatile matters* pada bagian atas ruang pembakaran sehingga hal ini dapat menjadikan pembakaran lebih sempurna dan meminimalisasi emisi CO

b. *Preheating*

*Preheating* berarti adanya proses pemanasan terlebih dahulu pada udara sebelum berkontak dengan bahan bakar. Menurut Nurhuda Tahun 2010, *preheating* ini akan menaikkan temperatur udara sehingga akan menaikkan angka *flame speed*. Proses *preheating* akan dilakukan pada penelitian ini yakni dengan melewati udara sekunder pada dinding konduktor yang membatasi ruang pembakaran dengan aliran udara sekunder. Dengan begitu, akan terjadi perpindahan kalor dari dinding konduktor yang bertemperatur tinggi ke udara sekunder yang bertemperatur lebih

rendah awalnya. Udara sekunder yang memiliki temperatur tinggi akan menaikkan nilai flame speed.

c. Volatile matter

Volatile matter yang merupakan produk devolatilisasi sebenarnya memiliki nilai *flame speed* yang tertentu, tetapi besarnya belum diketahui. Pada penelitian ini, pembakaran dilakukan hanyalah pembakaran *volatile matters*, dimana *volatile matters* merupakan bahan bakar berfasa gas yang belum terbakar, sehingga kandungan volatile matter mempengaruhi nilai *flame speed*. *Volatile matters* akan diupayakan ke bagian atas ruang pembakaran dengan pasokan udara primer sehingga akan terjadi aliran dari bawah yang akan bergerak dengan arah normal menuju lapisan nyala api di bagian atas.

d. Tekanan

Menurut Andrews dan Bradly, tekanan memiliki pengaruh bernilai negative terhadap besar *flame speed*, yakni sesuai persamaan

$$S_L(\text{cm/s}) = 43 P(\text{atm})^{-1/2} \quad (2.13)$$

e. Temperatur

Semakin tinggi temperatur dari unburned gas maka semakin besar *flame speed* [19].

f. Rasio Udara-bahan bakar

Perbandingan udara dengan bahan bakar (Air Fuel Ratio-AFR) adalah perbandingan massa udara dari bahan bakar yang digunakan selama pembakaran. Ketika seluruh massa udara dari bahan bakar yang digabungkan dengan oksigen bebas, secara tipikal di dalam ruang pembakaran, campuran seimbang secara kimiawi dan disebut campuran stoikiometrik. Menurut Harinaldi di Tahun 2008, pembakaran yang sempurna terjadi pada kondisi stoikiometri ( $\lambda=1$ ).

AFR adalah parameter penting untuk anti polusi dan alasan penyetelan kinerja.

Lamda ( $\lambda$ ) adalah cara untuk merepresentasikan AFR dengan persamaan :

$$\lambda = \frac{\text{AFR}}{\text{AFR}_{\text{stoic}}} \quad (2.14)$$

Campuran kaya akan udara memiliki nilai  $\lambda$  lebih dari satu dan campuran miskin akan udara memiliki nilai  $\lambda$  kurang dari 1. Campuran yang kaya udara menghasilkan

gas pembakaran yang lebih dingin dibandingkan campuran stoikiometrik terutama karena berlebihnya oksigen yang tidak dikonsumsi dan gas nitrogen yang terikut. Campuran yang kurang udara juga menghasilkan gas pembakaran yang lebih dingin dibandingkan campuran stoikiometrik, terutama karena jumlah karbon yang berlebihan sehingga membentuk CO. Menurut Harinaldi pada Tahun 2008, campuran sedikit kaya udara (melebihi campuran stoikiometrik) akan memberikan nilai maksimum untuk *flame speed* dan campuran mendekati stoikiometrik akan memberikan nilai minimum pada *flame speed*. Oleh karena itulah, perlu dilakukan pengaturan kecepatan pada udara primer, dan sekunder agar nyala api tetap berada di atas ruang pembakaran dan pembakaran yang terjadi menghasilkan emisi CO yang minimal.

g. Jenis bahan bakar

Jenis bahan bakar akan mempengaruhi nilai *flame speed*. Oleh karena penelitian akan memanfaatkan *volatile matters* dari biomassa sebagai bahan bakar, maka banyaknya kandungan *volatile matters* pada biomassa yang akan digunakan menjadi pertimbangan penting dalam hal pemilihan biomassa. Seperti yang telah dituliskan diatas, bahwa biomassa yang digunakan adalah terbuat dari kayu karet dengan kandungan *volatile matters* cukup tinggi, 67,76% [10].

## 2.5 Perpindahan Panas

Sebagian dari panas yang dihasilkan melalui pembakaran akan diterima oleh makanan dalam panci. Selebihnya akan hilang melalui proses konduksi, konveksi, dan radiasi. Untuk memaksimalkan perpindahan panas ke makanan dalam panci, perlu dipelajari mekanisme perpindahan panas dan prinsip-prinsipnya, agar dapat mengetahui penyebab adanya panas yang hilang dan cara meminimalisasinya dengan modifikasi rancangan kompor.

a. Konduksi

Molekul-molekul dalam bahan padat tersusun rapat. Bila terdapat gradien temperatur, molekul-molekul tersebut terdistribusi dan menyamakan energi kinetiknya dengan interaksi langsung yang disebut konduksi. Pada logam, panas terkonduksi lewat

pergerakan elektron bebas berkecepatan tinggi dari area bertemperatur tinggi ke area bertemperatur rendah. Saat memasak, konduksi terjadi dari panci ke isi panci, panas yang hilang lewat dinding, dari api ke dalam bahan bakar, penyimpanan panas dalam bahan bakar, panci, isinya, dan badan kompor.

Perpindahan kalor konduksi dapat dihitung dengan persamaan berikut (Hukum Konduksi Fourier):

$$q = -\frac{k \times A \times \Delta T}{\Delta X} \quad (2.15)$$

dimana  $q$  adalah laju perpindahan panas,  $k$  konduktivitas termal,  $A$  luas permukaan,  $\Delta X$  ketebalan permukaan dimana terjadi konduksi, dan  $\Delta T$  perbedaan temperatur dari permukaan dingin dan panas.  $\Delta X/kA$  dinamakan tahanan termal. Penggunaan persamaan di atas menghasilkan nilai yang jauh lebih besar dari nilai aktualnya, sebab tahanan udara dari lapisan batas permukaan (*surface boundary layer*), juga tahanan dari kotoran atau lapisan oksida, tidak diperhitungkan. Persamaan yang memuat tahanan-tahanan tersebut adalah:

$$q = \frac{A \times \Delta T}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta X}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.16)$$

dimana  $1/h_1$  dan  $1/h_2$  adalah tahanan permukaan dalam dan luar, dan  $h_1$  dan  $h_2$  adalah koefisien perpindahan panas konvektif.

Kemampuan suatu bahan untuk menyimpan panas juga penting dalam perpindahan kalor konduksi. Hal ini dihitung dari kalor spesifik (specific heat), yaitu energi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur dari 1 kg massa sebanyak  $1^\circ\text{C}$ . Perubahan jumlah total kalor yang disimpan  $\Delta Q$ , saat temperatur dari kompor bermassa  $m$  diubah sebanyak  $\Delta T$ , diberikan pada persamaan berikut:

$$\Delta Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (2.17)$$

dimana  $c_p$  adalah kalor spesifik dari bahan kompor.

Dari persamaan-persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa kompor besar membutuhkan waktu yang lebih lama untuk memanaskan. Kompor kecil dan ringan cepat memanaskan dan cepat menghilangkan panasnya. Jadi, untuk penggunaan kompor

yang tidak lama, rancangan dengan dinding kompor yang tipis lebih diinginkan. Juga dapat disimpulkan bahwa kelembaman termal (*thermal inertia*) kompor adalah fungsi dari kalor spesifik dan massa, sedangkan laju perpindahan kalor adalah fungsi dari konduktivitas termal. Jadi, untuk menambah laju perpindahan kalor ke material panci, diperlukan bahan dengan konduktivitas termal tinggi. Dengan kata lain, panci aluminium akan memasak dengan lebih cepat daripada panci tanah liat bakar (*fired clay pots*). Untuk mengurangi panas yang hilang dari dinding, bahan dengan konduktivitas rendah seperti lumpur dan lempung lebih baik. Untuk kompor logam, aplikasi lapisan isolasi dapat mengurangi kehilangan kalor.

#### b. Radiasi

Setiap benda yang memiliki temperatur di atas temperatur absolute dapat mengeluarkan energi dalam bentuk radiasi. Radiasi yang teremisi memiliki intensitas maksimum pada panjang gelombang yang dirumuskan oleh hukum Wien, dengan  $T$  adalah temperatur absolut [20]:

$$\text{max. wavelength} = \frac{2897.8}{T} \text{ microns} \quad (2.18)$$

Saat memasak radiasi terjadi dari api, antara dinding dalam, panci, dan kayu, dan dari dinding, panci, cerobong, dan bukaan kotak api, ke atmosfer. Laju perpindahan kalor radiasi dirumuskan dengan persamaan hukum Stefan-Boltzman untuk benda hitam:

$$q = \sigma \times A \times T^4 \quad (2.19)$$

dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzman, bernilai  $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ,  $A$  adalah luar emisi benda (dalam  $\text{m}^2$ ), dan  $T$  temperatur (dalam K). Modifikasi rumus (2.19) dengan mempertimbangkan emisivitas bahan  $E_m$  (bernilai dari 0 hingga 1), adalah;

$$q = E_m \times \sigma \times A \times T^4 \quad (2.20)$$

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa temperatur sangat berpengaruh terhadap emisi benda. Parameter lain yang mempengaruhi radiasi adalah *View Factor* (VF) antara permukaan yang mengemisi dengan permukaan yang menyerap. VF merupakan fraksi dari energi teremisi dari suatu permukaan yang ditahan oleh permukaan kedua. Hal ini dideterminasi oleh geometri relatif kedua permukaan.

Perpindahan kalor radiasi dari dasar api (*firebed*) sebuah kompor dapat ditingkatkan dengan menaikkan temperatur dasar api (dengan cara mengatur udara masuk) atau meningkatkan VF (dengan cara memperkecil jarak dari panci ke dasar api atau dengan meningkatkan diameter panci). Namun jarak yang terlalu pendek akan menyebabkan pembakaran tak sempurna dan meningkatkan emisi gas CO dan hidrokarbon.

### c. Konveksi

Perpindahan kalor konveksi adalah perpindahan kalor dari pergerakan fluida (cair atau gas), dilanjutkan dengan konduksi antara fluida panas dengan bahan. Konveksi dapat dibedakan menjadi alami dan paksa. Konveksi alami disebabkan oleh daya apung (*buoyance force*) yang dihasilkan oleh perbedaan temperatur. Sedangkan konveksi paksa disebabkan oleh udara paksa dari *blower, fan*, atau kondisi berangin. Konveksi merupakan perpindahan kalor utama yang terjadi pada kompor. Gas panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar, memanaskan panci. Rumus umum konveksi adalah [20]

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (2.21)$$

dimana  $q$  adalah panas yang dipindahkan dari gas panas ke permukaan panci atau dinding,  $A$  adalah luas permukaan dimana aliran panas terjadi,  $h$  adalah koefisien perpindahan kalor konveksi, dan  $\Delta T$  adalah perbedaan temperatur antara gas panas dengan permukaan padat. Untuk konveksi alami, bilangan Nusselt dapat dihitung sebagai berikut [20]:

$$Nu = C \times (Gr \times Pr)^n \quad (2.22)$$

Dimana  $Gr$  dan  $Pr$  merupakan bilangan Grashof dan Prandtl, dihitung dengan:

$$Gr = \frac{g \times \beta \times T \times l^3}{\nu^2} \quad (2.23)$$

$$Pr = \mu \times \frac{c_p}{k} \quad (2.24)$$

dimana  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $\beta$  adalah koefisien ekspansi volumetrik ( $=1/T$ ),  $T$  adalah perbedaan temperatur antara permukaan dan ambient,  $\mu$  adalah

viskositas fluida,  $k$  konduktivitas termal, dan  $\nu$  viskositas kinematik. Untuk aliran vertikal pada permukaan silindris, panjang karakteristik  $l$  sama dengan tinggi. Pada kompor,  $C$  bernilai 0.53 dan 0.25.

**Tabel 2.5** Nilai Konstanta C dan Gr.Pr Untuk Beberapa Konfigurasi Standar [19]

Konfigurasi	Gr.Pr	C
<i>Hot vertical plate</i>	$10^4-10^9$	0,59
	$10^9$ and more	0,13
<i>Horizontal plate, hot side up</i>	$10^5-10^7$	0,54
<i>Horizontal plate, hot side down</i>	$2 \times 10^7-10^{10}$	0/14
<i>Vertical parallel plate</i>	$2 \times 10^3-10^5$	0,20
	$2 \times 10^5-10^7$	0,71

Untuk konveksi paksa, rumus bilangan Nusselt adalah:

$$Nu = C_f \times Re^x \times Pr^y \quad (2.25)$$

Dengan Re adalah bilangan tak berdimensi Reynold, dihitung dengan:

$$Re = \frac{d \times v \times \rho}{\mu} \quad (2.26)$$

dimana  $d$  adalah diameter,  $v$  laju fluida,  $\rho$  densitas fluida, dan  $\mu$  viskositas fluida,  $C_f$  adalah konstanta yang bergantung pada konfigurasi.

**Tabel 2.6** Nilai Konstanta-Konstanta Rumus Konveksi Paksa [19]

Konfigurasi	Re	$C_f$	x	y
<i>Laminar flow parallel to a flat plate</i>	$<3 \times 10^5$	0,332	0,5	0,333
<i>Turbulent flow over a flat plate</i>	$>3 \times 10^5$	0,664	0,5	0,333
<i>Laminar plane stagnation</i>		0,57	0,5	0,4
<i>A-symmetric to flat plate</i>		0,93	0,5	0,4

Pada kompor, daerah dimana terjadi perpindahan kalor konveksi adalah: plume gas panas dari api, titik stagnasi dari plume ke panci, aliran panas dari dasar dan/atau dinding panci, dimana gas panas mengalir keluar dan ke atas, aliran

melewati *tunnel*, cerobong, sekat, dan celah antara panci dan dinding, serta permukaan panas luar dari panci, kompor, dan cerobong.

## 2.6 Kinetika Reaksi Emisi CO

Pada pembakaran, CO dan CO<sub>2</sub> merupakan polutan dengan emisi CO dapat terjadi melalui pembakaran fase gas. CO biasanya dihasilkan ketika udara pembakaran yang tersedia kurang dari jumlah stoikiometrik campuran udara dengan bahan bakar. Reaksi yang terjadi adalah :



Kontak pertama oksigen dengan hidrokarbon, CO terbentuk melalui mekanisme reaksi yang cepat pada daerah sempit pada zona reaksi di temperatur sekitar 550°C [21] dan bersifat eksotermis. Kemudian, CO yang terbentuk dikonversi menjadi CO<sub>2</sub> melalui mekanisme reaksi yang lambat pada daerah luas pada zona reaksi yang memerlukan waktu tinggal (*residence time*) yang cukup lama untuk mencapai pembakaran sempurna dan reaksi ini bersifat endotermis. Pada reaksi endotermis, reaksi konversi CO menjadi CO<sub>2</sub> ini akan berjalan menjadi lebih cepat apabila temperatur reaksi berlangsung pada temperatur yang tinggi dalam upaya pemenuhan kebutuhan panas reaksi.

Reaksi yang sempurna menuju pembentukan CO<sub>2</sub> dapat terjadi apabila terpenuhi ketiga syarat berikut, yaitu kecukupan waktu tinggal reaksi untuk reaksi CO ke CO<sub>2</sub>, kecukupan oksigen untuk menyempurnakan reaksi oksidasi, dan temperatur reaksi yang cukup tinggi untuk memperbesar kinetika reaksi oksidasi [25]. Sehingga, untuk mengurangi emisi CO memang dapat dilakukan dengan memperhatikan temperatur reaksi yang sesuai dan konsentrasi O<sub>2</sub> dalam udara yang digunakan untuk pembakaran dalam perancangan kompor. Temperatur reaksi yang sesuai adalah temperatur yang tinggi lebih dari 800°C [21] untuk reaksi konversi CO menjadi CO<sub>2</sub> sehingga emisi CO dapat didegradasi.

## 2.7 Pengujian

### 2.7.1 Efisiensi termal

Salah satu metode pengujian efisiensi termal adalah dengan menggunakan *Water Boiling Test* (WBT) [19]

$$\eta = \frac{M \times c_{p1} \times (T_b - T_a) + M_1 \times c_{p2} \times (T_b - T_a) + M_2 \times H_L}{H_c \times W} \quad (2.29)$$

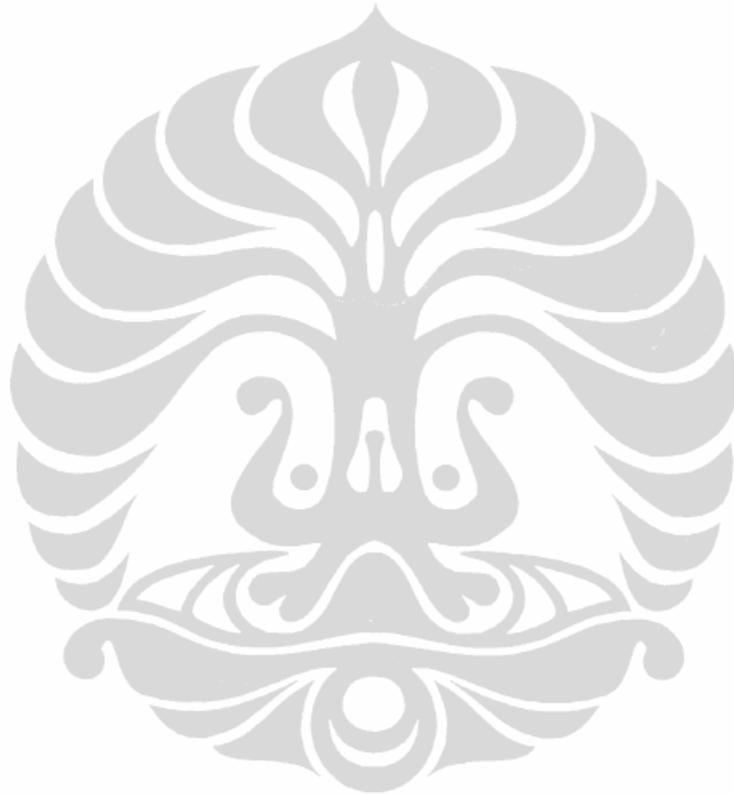
dimana M massa air,  $M_1$  massa bejana,  $c_{p2}$  kalor spesifik bejana,  $M_2$  massa air terevaporasi, dan  $H_L$  kalor laten penguapan. Secara garis besar, metode ini menghasilkan rasio perbandingan kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar terhadap kalor yang diterima air untuk menaikkan temperaturnya dan menguapkannya [7]. Dengan menggunakan pengujian ini diharapkan penguji dapat mengetahui nilai efisiensi termal dari kompor yang digunakan dengan menggunakan biomassa dari kayu karet, yang berarti mengetahui besar kalor yang dilepas oleh api dan diterima oleh air di dalam panci. Penggunaan mekanisme pembakaran hanya pada fasa gas diduga akan menyebabkan temperatur yang dihasilkan dari pembakaran menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan pembakaran fasa padat sehingga hal ini dapat menaikkan efisiensi.

### 2.7.2 Emisi CO

Untuk mengetahui tercapai tidaknya pengurangan emisi gas buang, digunakan alat yang dapat menganalisa kandungan CO dalam gas yaitu *CO Detector* sedangkan pengukuran temperatur digunakan termokopel.

Dari uraian di atas, dapat dikatakan bahwa dengan menggunakan prinsip *topside downdraft gasifier* dan penggunaan 2 blower sebagai pemasok udara primer dan sekunder pada kompor yang akan dirancang, dimungkinkan terjadi pembakaran pada fasa gas saja (*volatile matters*) yang hanya membutuhkan udara lebih sedikit dibandingkan pembakaran fasa padat. Desain pada bagian atas kompor memungkinkan terjadinya turbulensi dan waktu kontak udara dengan volatile matter menjadi lebih lama. Adanya *preheating* dari udara sekunder menyebabkan udara

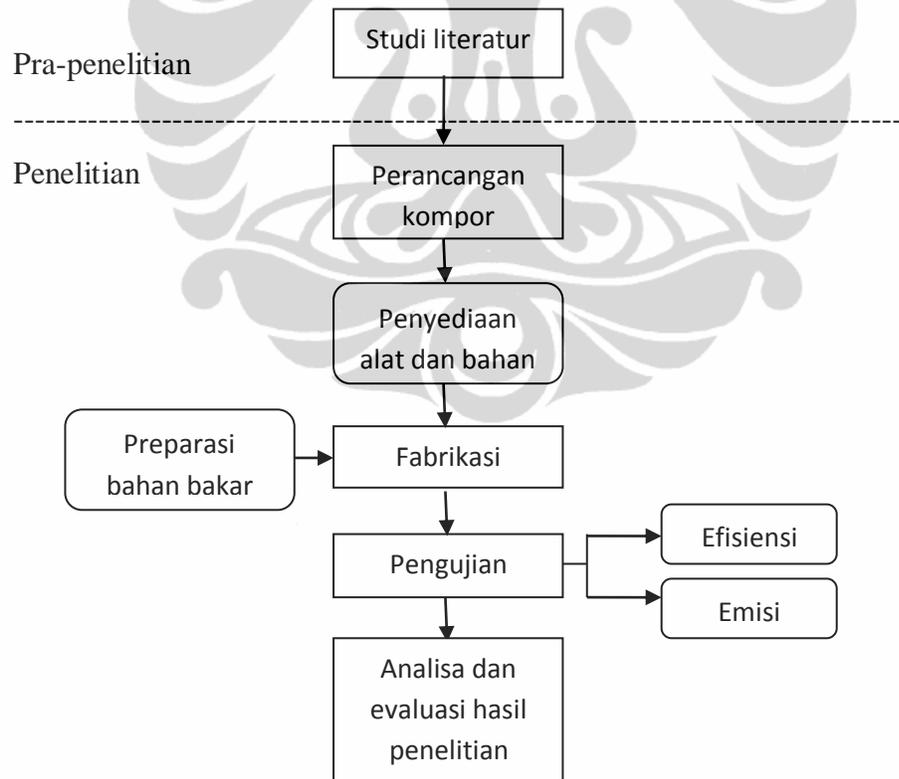
sekunder memiliki temperatur yang tinggi untuk bertindak sebagai udara pembakaran. Hal ini diduga akan menghasilkan emisi CO yang rendah sebagai emisi dari pembakaran mengingat kinetika reaksi konversi CO menjadi CO<sub>2</sub> yang merupakan reaksi lambat akan menjadi cepat dengan temperatur reaksi yang tinggi. Pembakaran yang sempurna dan emisi CO yang rendah akan memiliki efek pada warna nyala api pada kompor yang memperlihatkan warna biru.



## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimana tahap pra-penelitian adalah melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan kompor biomassa. Seperti terlihat pada Gambar 3.1, penelitian utama menyangkut empat hal: perancangan kompor, fabrikasi kompor, preparasi bahan bakar, dan pengujian. Penyediaan alat dan bahan dapat dilakukan sebelum fabrikasi, sedangkan preparasi bahan bakar dapat dilakukan pada waktu yang bersamaan dengan fabrikasi kompor. Hal-hal yang diuji meliputi emisi gas buang kompor dan efisiensi termal kompor. Setelah melewati pengujian akan dilakukan analisa dan evaluasi hasil penelitian, kemudian dibuat kesimpulan.



**Gambar 3.2** Diagram Alir Penelitian

### 3.1.1 Tahap Perancangan Kompor

Sesuai dengan diagram alir di atas, hal pertama yang dilakukan adalah merancang kompor yang akan difabrikasi. Perancangan difokuskan pada penghitungan ukuran komponen-komponen kompor sesuai desain yang sudah direncanakan. Prosedur umum perancangan kompor adalah sebagai berikut:

1. Menghitung daya keluaran menggunakan persamaan (2.1)
2. Menghitung diameter ruang pembakaran menggunakan rumus (2.2)
3. Menghitung tinggi ruang pembakaran bagian bahan bakar dan bagian api menggunakan rumus (2.3) dan (2.5)
4. Menentukan jarak unggun api ke lubang api
5. Menentukan tinggi ruang untuk blower
6. Menentukan jarak pipa dalam dengan pipa luar
7. Menentukan bahan dan ukuran garangan, serta pengaturan lubang-lubang masuk udara primer, lubang-lubang keluar udara sekunder, dan lubang-lubang keluar api serta jarak antar lubangnya.
8. Menentukan ukuran dan bentuk lubang untuk meletakkan panci di atasnya, dengan pertimbangan penggunaan panci umum.
9. Membuat gambar teknik dari kompor rancangan, sesuai penentuan dan perhitungan di atas. Rancangan kompor dapat dilihat pada Gambar 1.1.

### 3.1.2 Tahap Penyediaan Alat dan Bahan

1. Menyediakan bahan untuk komponen-komponen kompor sesuai dengan penentuan pada subbab 3.3.1
2. Menyediakan alat untuk preparasi bahan bakar dan pellet promotor sesuai dengan penentuan pada subbab 3.3.2
3. Menentukan dan menyediakan alat-alat pengujian sesuai dengan penentuan pada subbab 3.3.3

### 3.1.3 Tahap Fabrikasi Kompor

Tahap ini tidak dilakukan langsung oleh peneliti, tetapi peneliti akan memesan pada orang lain sesuai dengan rancangan yang telah dibuat dengan melakukan pengontrolan secara berkala. Prosedur umumnya adalah sebagai berikut:

1. Membuat komponen utama kompor, yaitu ruang pembakaran.
2. Membuat lubang udara primer, udara sekunder, dan lubang untuk meletakkan panci.
3. Membuat garangan dan memasangnya dalam ruang pembakaran paling bawah, tepat di atas level lubang udara masuk.
4. Membuat *char chamber* dan memasangnya di bagian bawah samping kanan dan kiri ruang pembakaran untuk meletakkan bahan bakar setelah selesai digunakan.
5. Membuat lubang tempat keluar api di bagian atas kompor.
6. Memasang isolator agar panas dari ruang pembakaran tidak terbuang percuma ke lingkungan.
7. Memasang blower dan pipa fleksibel untuk aliran udara primer dan sekunder.

#### **3.1.4 Tahap Preparasi Bahan Bakar dan Pellet Promotor**

Di waktu yang bersamaan dengan fabrikasi kompor, akan dipreparasi bahan bakar yang akan dipakai, dan dilakukan perlakuan sedemikian rupa sehingga siap dibakar dalam kompor dan diuji. Adapun prosedur umum dalam preparasi bahan bakar secara umum adalah sebagai berikut:

1. Membeli kayu karet
2. Melakukan pencacahan pada kayu karet (menjadi serbuk)
3. Memasukkan serbuk kayu karet ke dalam alat pencetak
4. Memasukkan besi penekan ke dalam alat pencetak
5. Memompa mesin *pressure pelletizer*
6. Menunggu 2 menit untuk mengaktivasi lignin yang terkandung dalam kayu karet
7. Mengeluarkan pellet yang berada dalam alat pencetak

#### **3.1.5 Tahap Pengujian**

Tahap selanjutnya adalah pengujian kerja kompor. Pengujian nyala api biru dilakukan dengan pengamatan saja. Untuk metode pengujian efisiensi termal dengan metode *Water Boiling Test*, sedangkan emisi akan diuji dengan menggunakan *Gas Analyzer*. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Menentukan sejumlah air awal, dengan massa inisial ( $M$ ), kalor jenis air ( $c_{p1}$ ), dan temperatur awal air ( $T_a$ ).
2. Menggunakan sebuah panci yang sudah diketahui kalor jenisnya ( $c_{p2}$ ), dan massanya ( $M_1$ ) sebagai wadah air
3. Menyiapkan kompor pada temperatur ruang
4. Menentukan sejumlah bahan bakar pellet biomassa dengan massa tertentu. Menghitung massa bahan bakar dengan mengalikan massa biomassa dengan persentase volatile matters kayu karet yang digunakan ( $W$ ).
5. Menyiapkan alat pengukur waktu pada skala 00:00 dan dinyalakan tepat ketika api mulai menyala.
6. Memasukkan potongan-potongan kertas yang sudah direndam etanol ke unggun *pellet*
7. Menyalakan api dengan menyulutkan api ke bagian atas unggun *pellet*
8. Mengukur temperatur air (termometer dibiarkan di dalam panci untuk mengukur temperatur air per satuan waktu yang dikehendaki).
9. Mengukur temperatur api dengan meletakkan termokopel di bagian unggun api dan menghubungkannya ke *data logger*
10. Setelah proses pendidihan berakhir, menimbang massa air akhir, lalu menghitung massa air yang menguap ( $M_2$ ), yaitu selisih massa air awal dengan massa air akhir. Kalor laten penguapan sudah diketahui ( $H_L$ ). Heating value dari volatile matters kayu karet sudah diketahui ( $H_C$ ).
11. Mengukur kadar CO menggunakan *Gas Analyzer* dan mengambil data temperatur api dengan termokopel setiap 2 menit hingga bahan bakar sudah menjadi char. Mengukur temperatur air (termometer dibiarkan di tengah panci untuk mengukur temperatur air per satuan waktu yang dikehendaki).
12. Membuat grafik temperatur terhadap waktu untuk melihat pengaruhnya terhadap besar efisiensi yang dihasilkan serta kecenderungan pemerataan api yang dihasilkan oleh bahan bakar.

13. Membuat grafik temperatur terhadap emisi CO yang dihasilkan untuk melihat kualitas pembakaran yang dihasilkan dari sistem pembakaran pada kompor yang dirancang.
14. Menghitung efisiensi termal menggunakan rumus (2.29).

### **3.1.6 Tahap Analisa dan Evaluasi**

Hasil penelitian akan dibahas setelah penelitian ini selesai berlangsung, dimana analisa dan evaluasi juga akan dijelaskan. Hal-hal yang perlu dianalisa dan dievaluasi adalah:

- Rancangan kompor: bahan konstruksi dan dimensi
- Emisi: konsentrasi emisi CO
- Efisiensi termal: kelebihan dan kekurangan rancangan dalam meningkatkan efisiensi termal
- Performa kondisi optimum kompor dengan menggunakan bahan bakar dari kayu karet

### **3.2 Variabel Penelitian**

1. Variabel bebas berupa kecepatan udara primer dan sekunder yang diatur dengan menggunakan dua buah blower.
2. Variabel terikat berupa :
  - Konsentrasi emisi karbon monoksida yang dihasilkan (CO) dalam satuan ppm terkait dengan mekanisme pembakaran dan suplai udara primer dan sekunder
  - Efisiensi termal kompor terkait dengan desain kompor.
  - Temperatur pada titik di sekitar api dalam ruang pembakaran dan temperatur air. Hasil pengukuran temperatur kemudian digunakan sebagai data dalam perhitungan efisiensi termal.

### 3.3 Alat dan Bahan

Pada tahap perancangan, tidak dibutuhkan peralatan maupun bahan penelitian. Di bawah ini adalah alat dan bahan yang dibutuhkan pada tahap fabrikasi dan pengujian.

#### 3.3.1 Alat dan Bahan Fabrikasi Kompor

Peralatan:

- Las listrik
- Peralatan fabrikasi umum ( obeng, palu, sekrup, dan sebagainya)

Bahan:

- Lembaran logam *mild steel*
- Garangan logam *stainless steel*
- Isolator berupa *ceramic fiber*
- *Dimmer lamp*
- *Blower*
- Pipa fleksibel

#### 3.3.2 Alat dan Bahan Persiapan Bahan Bakar

Peralatan:

- Oven
- *Crusher*
- Cetakan *pellet*
- *Pressure pelletizer*

Bahan:

- Kayu karet

#### 3.3.3 Alat dan Bahan Pengujian Kompor

Peralatan:

- Kompor hasil fabrikasi
- Panci
- Termokopel
- *Data logger*
- Pompa vakum

- *Gas Analyzer*

Bahan:

- Kayu karet bentuk *pellet*
- Air 1 liter

### 3.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan dalam waktu empat bulan, dimana setiap minggunya akan dilakukan sebagian dari keseluruhan tahap-tahap yang harus dilakukan. Jadwal pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat dari tabel 3.1 berikut ini.

**Tabel 3. 2** Jadwal Pelaksanaan Penelitian

Kegiatan	Jadwal Mingguan																			
	Bulan I				Bulan II				Bulan III				Bulan IV				Bulan V			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. Perancangan																				
2. Penyediaan alat dan bahan																				
3. Preparasi bahan bakar																				
4. Fabrikasi kompor																				
5. Pengujian waktu nyala																				
6. Pengujian emisi																				
7. Pengujian efisiensi																				
8. Analisa dan evaluasi hasil																				

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang didapatkan berupa data – data yang dihasilkan dari rincian metode penelitian yang sudah dijabarkan pada Bab 3. Yang dihasilkan diantaranya: dimensi kompor dari hasil perhitungan, langkah – langkah fabrikasi, hasil pengujian efisiensi termal kompor dan hasil pengujian emisi.

#### 4.1 Desain Kompor Gas Biomassa

Kompor didesain untuk mengakomodasi dua penelitian dengan bahan bakar yang berbeda, yakni kayu karet dan bagasse (dilakukan oleh peneliti yang lain). Oleh karena itu, desain kompor juga disesuaikan dengan dimensi ruang pembakaran dari penelitian yang menggunakan bagasse.

Penentuan dimensi kompor diawali dengan menentukan dimensi dari ruang pembakaran. Ruang pembakaran berbentuk silinder karena aliran udara akan dapat bergerak lebih bebas sehingga distribusi udara lebih merata [27] . Diameter ruang pembakaran ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.2) [9] :

$$D = \sqrt{1.27 \frac{FCR}{SGR}}$$

SGR adalah laju gasifikasi spesifik dari biomassa. FCR adalah laju konsumsi bahan bakar (kg/hr) didapat dari persamaan (2.4) [9]:

$$FCR = Q_n / HV_f \text{ biomass} \times sg$$

Dimana  $HV_f$  yang digunakan merupakan rata-rata dari LHV kedua biomassa yang digunakan. Nilai  $Q_n$  ditentukan dengan persamaan (2.1) [9] :

$$Q_n = M_f \times E_s / T$$

$M_f$  adalah massa makanan yang dimasak, dalam hal ini adalah air.  $E_s$  adalah energy spesifik dari air dan  $T$  adalah waktu memasak. Sehingga didapat nilai daya keluaran sebesar 1 kW. Mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Reed dkk., dengan menggunakan blower yang sama, daya keluaran yang dihasilkan adalah 1-3kW sehingga, dalam perhitungan ini digunakan besar daya keluaran sebesar 3kW.

Sehingga didapatkan besar diameter ruang pembakaran adalah sebesar 14.9 cm dibulatkan menjadi 15 cm.

Tinggi ruang pembakaran terdiri dari tinggi bahan bakar dan tinggi api. Tinggi bahan bakar dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3) [9] :

$$H = FCR / (\text{densitas bulk} \times A)$$

Dengan densitas bulk yang digunakan adalah densitas bulk rata-rata untuk kedua biomassa. Didapatkan nilai H sebesar 46 cm dengan nilai H untuk kayu karet adalah sebesar 27 cm. Tinggi api dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5) [19]:

$$H_{fl} = C_2 \times P^{2/5}$$

$C_2$  adalah konstanta dengan nilai 75 mm/kW<sup>0.4</sup> dan daya keluaran (P) sama dengan  $Q_n$ . Sehingga didapat nilai tinggi api sebesar 11,6 cm dibulatkan menjadi 12 cm. Tinggi ruang pembakarannya menjadi 58 cm.

Luas permukaan dari lubang keluaran api harus lebih kecil dibandingkan dengan luas permukaan dari lubang masuk udara primer dan sekunder agar volatile matters memiliki waktu yang cukup untuk berinteraksi dengan udara sekunder [9]. Lubang masukan udara sekunder memiliki diameter 1,5 cm dengan jarak antar lubang sebesar 0,6 cm, sedangkan diameter untuk keluaran api dan masukan udara primer adalah sebesar 0,5 cm dengan jarak antar lubang 0,3 cm. Lubang udara sekunder di tempatkan di bagian atas unggun pellet karena pada desain ini, yang terjadi adalah pembakaran gas sebagai hasil dari devolatilisasi biopellet kayu karet. Gambar 4.1 berikut menggambarkan dimensi kompor gas biomassa yang dirancang, sedangkan untuk gambar secara rinci dari perancangan kompor gas biomassa ini dapat dilihat pada Lampiran.

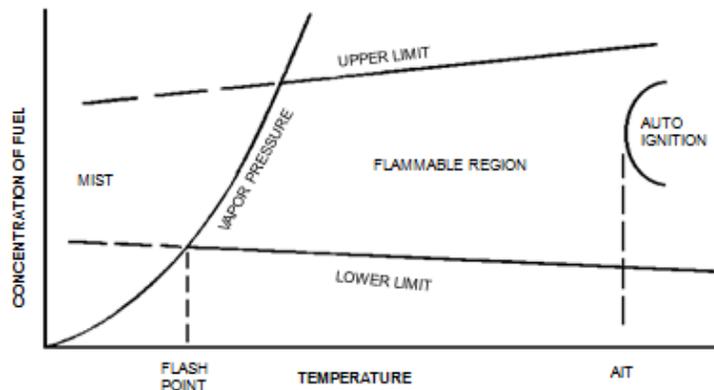


Hasil fabrikasi kompor gas biomassa dapat dilihat pada gambar 4.2



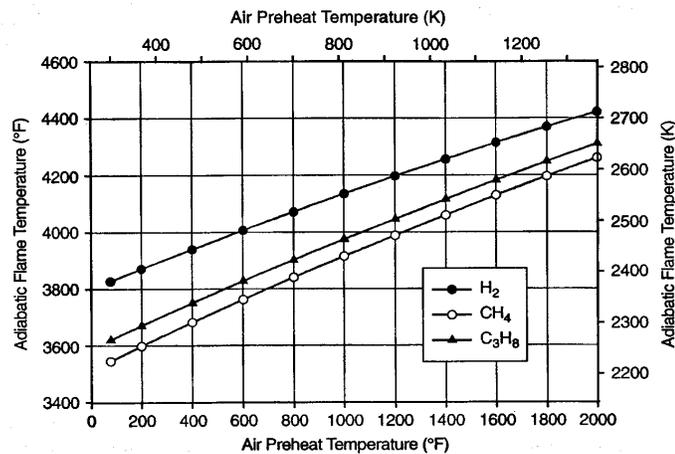
**Gambar 4.2** Hasil Fabrikasi Kompor Gas-Biomassa

Desain kompor dibuat dengan menggunakan 2 blower untuk memasok udara primer dan sekunder agar kecepatan udara dapat diatur secara *independent*. Desain dibuat dengan udara sekunder masuk ke dalam ruang pembakaran sebagai udara pembakaran yang telah mengalami preheating karena adanya perpindahan panas secara konveksi dari dinding ruang pembakaran ke udara sekunder yang mengalir. Hal ini menguntungkan karena memungkinkan udara sekunder memiliki temperatur yang lebih tinggi dimana energi panas berfungsi untuk mengaktivasi reaksi pembakaran (*ignition*) [24]. Semakin tinggi temperatur udara pembakaran maka semakin besar energi panas yang dimiliki sehingga akan mempersingkat waktu penyalaan, terkait dengan diagram *flammability limit* dari bahan bakar seperti yang digambarkan pada gambar 4.3 berikut



**Gambar 4.3** Diagram *Flammability Limit* [28]

Selain itu, meningkatnya temperature udara pembakaran akan meningkatkan *adiabatic flame temperature* seperti yang digambarkan oleh gambar 4.4 berikut



**Gambar 4.4** Grafik *Adiabatic Flame Temperature* Vs Temperatur Udara *Preheat* Untuk Campuran Stoikiometrik Udara Dan Bahan Bakar [30]

*Adiabatic flame temperature* adalah temperature nyala api yang didapatkan jika tidak ada panas yang keluar dari sistem ke lingkungan.

Meninjau dari material yang digunakan, kompor ini menggunakan isolator *ceramic fiber* sebagai upaya meminimalisasi panas pembakaran yang keluar dari sistem. Material pembuat kompor adalah mild steel dengan *grate* yang terbuat dari *stainless steel*. Untuk memudahkan pengambilan char, pada desain kompor ini dibuat *char chamber* yang digunakan untuk meletakkan *char* setelah proses pembakaran

volatile matters berakhir. Penentuan dimensi *char chamber* tidak menggunakan persamaan karena tidak berpengaruh terhadap proses pembakaran.

Setelah menjalani fabrikasi, desain kompor ini mengalami beberapa perubahan menjadi seperti yang terlihat pada gambar 4.5 di bawah ini



**Gambar 4.5** Kompor Gas Biomassa Modifikasi

Modifikasi yang dilakukan adalah :

- Lubang keluaran api tidak digunakan karena trial memperlihatkan api tidak bisa keluar melalui lubang-lubang tersebut. Hal ini diduga karena terjadinya pendinginan tiba-tiba atau yang disebut dengan istilah *quenching* sehingga api cenderung mengecil. Dapat dilihat pada Lampiran B, bahwa perbandingan antara luas lubang udara masukan untuk udara primer dan sekunder jauh lebih besar dibandingkan dengan luas lubang udara keluaran api, hal ini diduga terjadi fenomena back pressure yang mengakibatkan laju udara dari blower menjadi lebih kecil sehingga suplai udara berkurang dan menyebabkan api mengecil sampai akhirnya padam.
- Blower yang sudah terpasang diganti dengan blower sentrifugal yang memiliki kapasitas lebih besar (blower pemasok udara sekunder : 220 V dan 1,6 A; blower

pemasok udara primer : 220 V dan 1 A) karena api tidak terbentuk dengan suplai udara dari blower yang sebelumnya terpasang. Blower untuk udara sekunder memiliki kapasitas yang lebih besar karena pada system pembakaran yang digunakan membutuhkan suplai udara sekunder 3 sampai dengan 5 kali lebih besar dibandingkan dengan suplai udara primernya untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna [9]. Akan tetapi karena blower yang digunakan memiliki ukuran yang cukup besar sehingga penempatan blower pada kompor dimodifikasi. Blower di tempatkan di luar dan dihubungkan dengan menggunakan pipa fleksibel untuk aliran udaranya ke ruang pembakaran.

#### 4.2 Hasil Uji Emisi Karbon Monoksida

Emisi yang dideteksi hanya CO karena cukup menggambarkan kesempurnaan dari pembakaran. Kadar CO yang tinggi merupakan indikasi pembakaran yang dihasilkan tidak terlalu sempurna. Sebelum mengambil data, dilakukan preparasi bahan bakar di waktu yang bersamaan dengan fabrikasi kompor. Pembuatan pellet dilakukan di Balai Mekanisasi Pertanian, Serpong. Bahan biomassa yang telah dikumpulkan dari limbah kehutanan (kayu karet) direduksi terlebih dahulu ukuran partikelnya ke dalam mesin *crusher*. Agar partikel menjadi lebih halus, selanjutnya bahan dimasukkan ke dalam mesin penepung. Setelah serbuk biomassa siap, serbuk dimasukkan ke dalam alat pencetak yang nantinya akan ditekan dengan mesin *cold press*. Gambar 4.6 berikut adalah alat yang digunakan dalam pembuatan pellet kayu karet



**Gambar 4.6** Mesin Crusher (kiri) dan Alat Penekan (kanan)

dengan hasil pellet yang terbentuk, seperti terlihat pada Gambar 4.7, berdiameter 1.5 cm dengan tinggi 3 cm.



**Gambar 4.7** Biopellet Kayu Karet

Diameter biopellet dibuat sekecil mungkin agar panas terdistribusi lebih merata dan proses devolatilisasi yang terjadi lebih baik. Semakin kecil diameter pellet maka volatile matters yang dihasilkan dari devolatilisasi menjadi lebih banyak pada temperature yang sama [31]. Ukuran pellet yang lebih kecil akan meningkatkan laju pembakaran dan juga menurunkan emisi karbon monoksida karena naiknya temperatur di dalam kompor yang akan mengurangi terbentuknya produk dari pembakaran yang tidak sempurna [32].

Dalam melakukan emisi CO digunakan alat-alat seperti anemometer yang digunakan untuk mengukur laju alir udara, *dimmer lamp* sebagai pengatur laju alir udara, pompa vakum untuk menarik flue gas, dan *Gas Analyzer* untuk mengukur besar emisi CO yang dihasilkan. Alat-alat tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8 di bawah ini



**Gambar 4.8** Peralatan Uji Emisi CO. Anemometer (kiri-atas), pompa vakum (kiri-bawah), *dimmer lamp* (kanan-atas), dan *Gas Analyzer* (kanan-bawah)

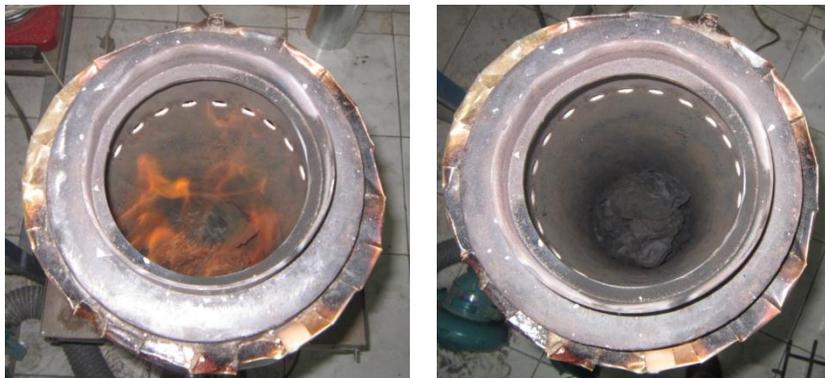
Pengambilan data dilakukan sebanyak 4 kali dengan variasi udara primer dan sekunder yang berbeda-beda. Variasi udara primer dan sekunder tidak ditetapkan sebelum api menyala tetapi udara primer di atur secara perlahan terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan mengatur udara sekunder hingga didapatkan api yang stabil. Hal ini dikarenakan api yang terbentuk sangat sensitif terhadap kecepatan udara primer dan sekunder sehingga pengaturan udara primer dan sekunder yang dilakukan di awal justru dapat membuat pembakaran tidak terjadi. Laju alir primer menentukan besarnya *volatile matter* yang tereaksi tak sempurna dengan udara menjadi CO dan menjadi *driving force* pengeluaran *volatile matter* karena temperatur yang dihasilkan dari reaksi tersebut. Laju alir sekunder menentukan kesempurnaan reaksi *volatile matters* ke CO<sub>2</sub>.

Berikut Gambar 4.9 adalah nyala api yang didapatkan pada percobaan



**Gambar 4.9** Nyala Api Percobaan 1(kiri) dan 2(kanan)

Semakin lama, nyala api akan semakin mengecil sampai akhirnya api padam dan hanya terdapat *char*. Gambar 4.10 berikut memperlihatkan nyala api yang sudah hampir padam dan *char* yang terbentuk.



**Gambar 4.10** Api Percobaan Setelah Waktu Tertentu. Hampir Padam (kiri) dan Api Padam (kanan)

Dari empat kali percobaan, didapat data seperti yang tercantum pada Lampiran. Emisi CO diuji menggunakan *gas analyzer* dengan mengambil *flue gas* yang keluar melalui celah panci.

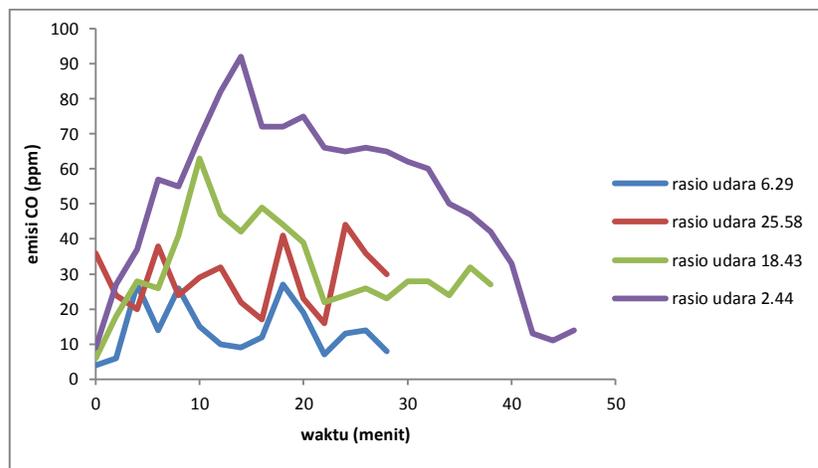
Tabel 4.1 berikut adalah data yang telah diolah dari empat kali percobaan yang dilakukan dengan variasi laju alir udara primer dan sekunder.

**Tabel 4.1** Hasil Pengolahan Data Percobaan dengan Variasi Laju Alir Udara Primer dan Sekunder

Laju Alir Udara Primer (m <sup>3</sup> /S)	Laju Alir Udara Sekunder (m <sup>3</sup> /S)	Laju Alir Udara Total (m <sup>3</sup> /S)	Rasio Udara Sekunder Dan Primer	Emisi CO (ppm)	Temperatur Api Maksimum (°C)	Temperatur Air Maksimum (°C)
0,00038	0,0024	0,00278	6,29	14	739,282	87,077
0,00038	0,0097	0,01008	25,58	29	441,746	86,437
0,00034	0,0063	0,00664	18,43	32	516,816	96
0,00038	0,00093	0,00131	2,44	52	360,787	133

Dari keempat percobaan dapat dilihat pada tabel 4.1 bahwa rasio udara yang menghasilkan emisi CO paling rendah adalah percobaan 1 dengan rasio laju alir udara sekunder berbanding udara primer adalah 6,29. Hal ini menunjukkan bahwa percobaan 1 menghasilkan *volatile matters* dan CO yang bisa direaksikan dengan O<sub>2</sub> yang mendekati stoikiometrik. Percobaan 4 diduga menghasilkan *volatile matters* dan CO yang cukup banyak, tetapi udara sekunder yang ada tidak cukup mereaksikannya menjadi CO<sub>2</sub>. Percobaan 2 dan 3 diduga menghasilkan *volatile matters* dan CO yang sedikit dan direaksikan dengan udara sekunder yang berlebih sehingga gas mengalami penurunan temperatur sehingga butuh waktu yang lebih lama lagi untuk mengubah CO menjadi CO<sub>2</sub>, akibatnya dihasilkan gas CO yang lebih banyak dibandingkan pada percobaan 1, terlihat pula pada temperatur api maksimum yang rendah. Pada percobaan 2 dan 3, percobaan 3 memiliki emisi CO yang lebih besar karena diduga *volatile matters* yang dihasilkan banyak dan CO yang dihasilkan lebih banyak sehingga panas eksotermis yang dihasilkan menjadi lebih tinggi.

Emisi CO yang dihasilkan di tiap percobaannya untuk tiap waktu tertentu digambarkan oleh grafik pada gambar 4.11 berikut ini :

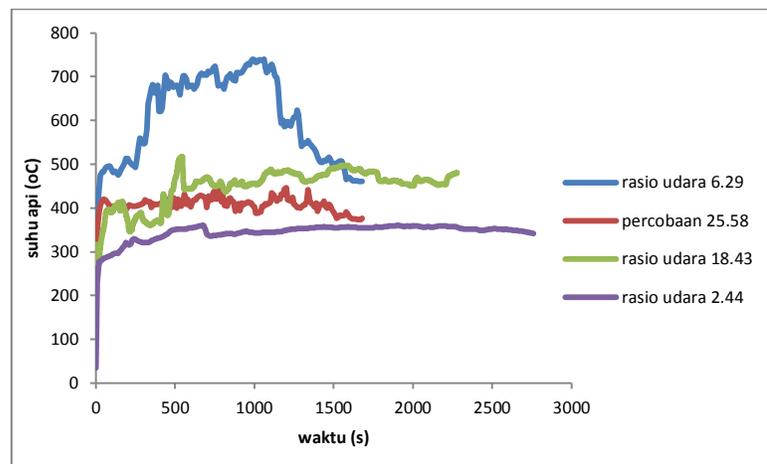


**Gambar 4.11** Waktu vs Emisi CO

Dari gambar 4.11 diatas terlihat bahwa emisi CO yang dihasilkan sangat fluktuatif dengan adanya peak-peak di tiap percobaannya. Hal ini dikarenakan terjadinya penyusunan kembali pada biopellet selama berlangsungnya proses pirolisis. Fenomena ini memang tidak dapat dilihat secara langsung tetapi dapat dilihat setelah api pada unggun kompor padam atau saat pembakaran *volatile matters* berakhir, susunan biopellet berubah dari keadaan awalnya dan mengalami penurunan ketinggian. Dari kondisi ini dapat dikatakan bahwa biopellet mengalami perubahan susunan baik penyusunan di dalam kompor maupun penyusunan materi di dalam biopellet itu sendiri. Perubahan susunan biopellet di dalam kompor menyebabkan udara primer kembali mencari celah untuk naik keatas sehingga terdapat perbedaan profil aliran dari gas pirolisis di dalam ruang pembakaran yang membuat keberadaan *volatile matters* di bagian atas ruang pembakaran menjadi tidak merata. Ketidakmerataan ini menyebabkan adanya daerah yang berlebih udara yang menjadi penyebab terjadinya pembakaran yang tidak sempurna dengan emisi CO yang cukup tinggi. Ketidakmerataan ini juga menyebabkan nyala api menjadi tidak merata, dengan design bagian atas kompor yang langsung berhubungan dengan lingkungan memungkinkan *flue gas* di sisi samping bagian atas kompor langsung keluar tanpa bertemu sisi bawah panci sehingga reaksi tidak memiliki *residence time* yang cukup untuk merubah CO menjadi CO<sub>2</sub>. Ketidakmerataan emisi CO ini diperlihatkan dari

perhitungan standar deviasi di tiap percobaan pada tabel 4.1 yang cukup jauh dari rata-rata emisi CO di tiap percobaannya.

Besar emisi CO yang dihasilkan adalah sebagai salah satu indikator kesempurnaan proses pembakaran yang terjadi. Pembakaran yang sempurna akan tidak membentuk CO sesuai dengan persamaan (2.27) dan (2.28). Proses pembakaran sangat erat kaitannya dengan temperatur reaksi seperti yang dijelaskan pada Bab 2, pada reaksi endotermis, reaksi konversi CO menjadi CO<sub>2</sub> akan berjalan menjadi lebih cepat apabila temperatur reaksi berlangsung pada temperatur yang tinggi dalam upaya pemenuhan kebutuhan panas reaksi dimana CO akan terkonversi menjadi CO<sub>2</sub> pada temperatur reaksi 800°C [20]. Temperatur reaksi dalam hal ini dapat dilihat dari temperatur api yang dihasilkan, seperti terlihat pada gambar 4.12 di bawah ini, temperatur api tertinggi yang dapat dicapai dari keempat percobaan adalah 739,282 °C atau masih lebih rendah dari 800°C sehingga masih menyisakan emisi CO.

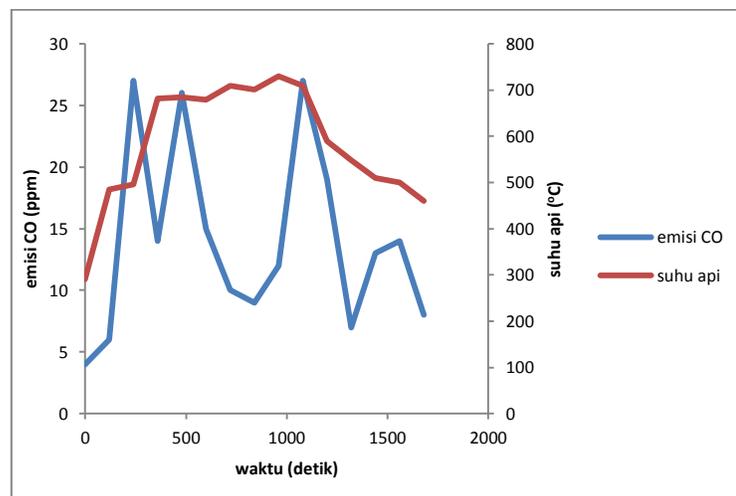


**Gambar 4.12** Waktu vs Suhu Api

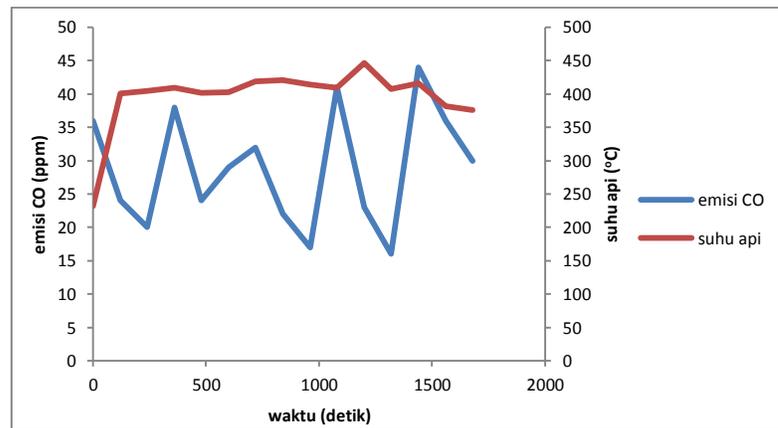
Temperatur api tertinggi diperoleh pada percobaan 1 dengan rasio udara primer berbanding udara sekunder sebesar 1:6,29 dan pada percobaan ini pula emisi CO terendah dihasilkan. Hal ini dikarenakan dengan tingginya temperatur api mengindikasikan reaksi berlangsung pada temperatur yang tinggi sehingga panas yang dimiliki cukup tinggi untuk meminimisasi CO yang keluar sebagai gas buang hasil pembakaran karena konversi CO menjadi CO<sub>2</sub> adalah reaksi yang membutuhkan panas. Di awal, temperatur api akan meningkat seiring dengan proses pirolisis yang

terjadi pada biopellet menghasilkan lebih banyak volatile matters yang keluar, kemudian temperature mengalami fluktuasi hingga mencapai titik dimana volatile matters hampir habis sehingga temperatur nyala api terus menurun. Fluktuasi yang terjadi dikarenakan titik pengukuran api menggunakan termokopel yang tidak stagnan di tempat yang sama dan juga disebabkan ada masanya disaat api menyala tidak merata sebagai akibat keberadaan *volatile matters* yang tidak merata di bagian atas kompor sehingga nyala api tidak langsung menyentuh termokopel yang menyebabkan pengukuran temperature nyala api menjadi turun. Temperatur yang tinggi di percobaan 3 dibanding percobaan 2 diduga karena banyaknya *volatile matters* dan gas CO yang dihasilkan lebih banyak di percobaan 3 sehingga walaupun emisi CO lebih tinggi, panas eksotermis yang dihasilkan tetap lebih besar di percobaan 3.

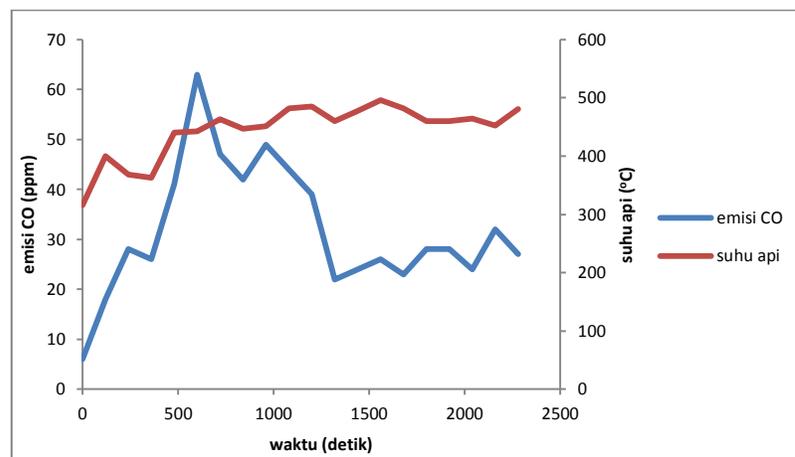
Kemudian kita meninjau temperature nyala api dan emisi CO yang dihasilkan di tiap percobaan yang digambarkan pada gambar 4.13 sampai dengan gambar 4.16 berikut



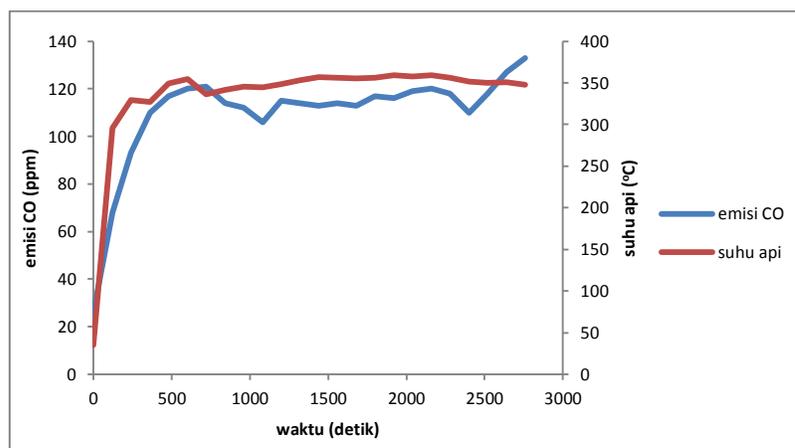
**Gambar 4.13** Suhu Api vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:6,29



**Gambar 4.14** Temperatur Api vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:25,58



**Gambar 4.15** Suhu Api vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:18,43



**Gambar 4.16** Suhu Api vs Emisi CO Pada Rasio Udara 1:2,44

Hal yang seharusnya terjadi adalah emisi CO akan berkurang seiring dengan bertambahnya temperature api karena reaksi perubahan CO menjadi CO<sub>2</sub> adalah reaksi endotermis, tetapi pada penelitian ini terdapat beberapa titik dimana emisi CO naik dengan kenaikan temperatur api. Selain panas reaksi yang tinggi, reaksi CO menjadi CO<sub>2</sub> membutuhkan *residence time* yang cukup mengingat reaksi ini berlangsung lebih lama dibandingkan dengan reaksi pembentukan CO pada pembakaran seperti yang dijelaskan pada Bab 2. *Flue gas* pada kompor hingga mencapai titik pengukuran CO hanya berjarak kurang lebih 12 cm, lebih kecil dari jarak yang dikatakan optimal (15 cm) [28], sehingga tidak cukup untuk memenuhi waktu tinggal yang dibutuhkan dalam reaksi CO menjadi CO<sub>2</sub>.

Melihat desain kompor yang digunakan, yakni api langsung berhubungan dengan lingkungan tanpa adanya penutup yang dapat menimbulkan turbulensi dan memperpanjang *residence time* juga ukuran panci sebesar 17 cm sebagai wadah pemasakan yang masih memiliki celah untuk api keluar menjadi salah satu penyebab penyimpangan ini. Temperatur nyala api diukur di bagian dalam ruang pembakaran dimana api terbentuk, tetapi api dapat keluar melalui celah di bawah panci tanpa mengalami friksi dengan bagian bawah panci menyebabkan CO yang terbentuk tidak memiliki waktu yang cukup untuk menjadi CO<sub>2</sub>.

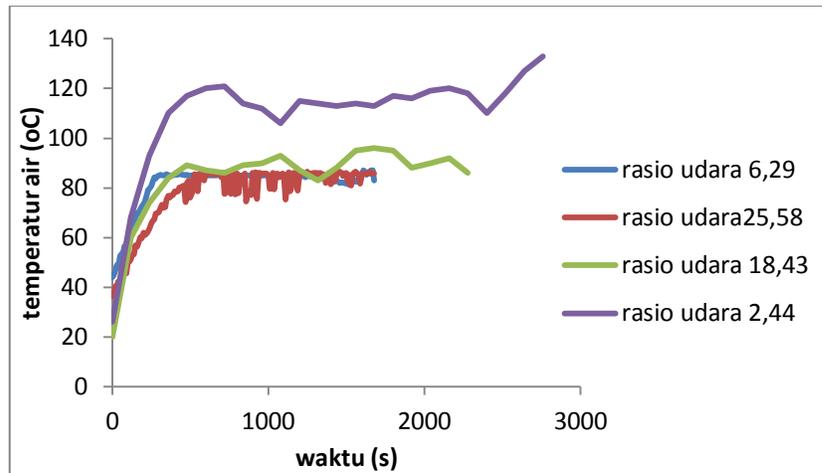
### 4.3 Efisiensi Termal

Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 2, untuk menentukan efisiensi termal digunakan *water boiling test* sesuai dengan persamaan (2.29). Tabel 4.2 berikut menampilkan hasil perhitungan efisiensi termal untuk keempat percobaan yang dilakukan dengan efisiensi terbesar yang dicapai adalah 61.35%.

**Tabel 4.2** Nilai Efisiensi Termal pada Keempat Percobaan

Percobaan	Rasio Kecepatan Udara Sekunder dan Primer	Efisiensi Termal (%)	Temperatur Api Maksimum (°C)
1	6,29	52,8	739,282
2	25,58	26,32	441,746
3	18,43	56,98	516,816
4	2,44	61,35	360,787

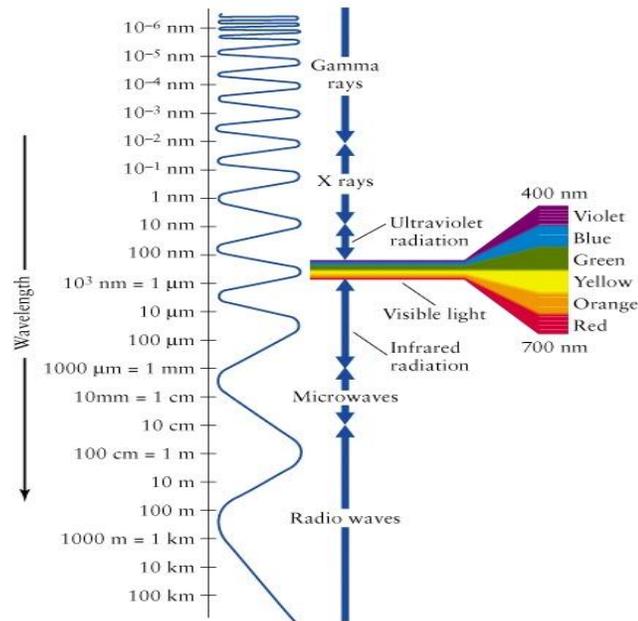
Ditinjau dari persamaan (2.29), nilai efisiensi termal dipengaruhi oleh temperatur air tertinggi yang dapat dicapai. Gambar 4.17 berikut memperlihatkan temperatur air per satuan waktu tertentu.



**Gambar 4.17** Waktu vs Temperatur Air

Pada tiga percobaan pertama, air mengalami penguapan walaupun tidak pernah mencapai temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  sebagai titik didihnya. Tinggi atau rendahnya temperatur air yang berada di dalam panci bergantung pada besarnya panas yang dapat diserap panci dari flue gas. Perpindahan panas dari api ke panci secara konveksi paksa yang lebih besar dibandingkan yang terjadi secara konveksi alami memungkinkan terjadinya kenaikan temperatur air. Konveksi paksa terjadi dari flue gas ke badan panci sedangkan konveksi alami terjadi dari badan panci ke lingkungan. Proses pemasakan yang terbuka sangat mungkin menyebabkan terjadinya konveksi alami yang akan menurunkan temperatur air di dalam panci. Lain halnya dengan ketiga percobaan tersebut, pada percobaan 4 temperatur air yang dihasilkan lebih tinggi yakni mencapai  $133^{\circ}\text{C}$  padahal temperatur api yang dihasilkan cukup rendah seperti yang ditunjukkan gambar 4.11 dengan temperatur api tertinggi yang dapat dicapai hanya  $360,767^{\circ}\text{C}$ . Pengamatan pada percobaan empat ini memperlihatkan api terbentuk sangat tinggi dengan warna kemerahan dan jelaga (*soot*) yang terbentuk lebih banyak dari percobaan-percobaan sebelumnya. Jelaga ini membuat panas yang

diserap panci menjadi lebih besar dan temperatur air yang dicapai menjadi lebih tinggi.



**Gambar 4.18** Panjang gelombang dari berbagai sinar [28]

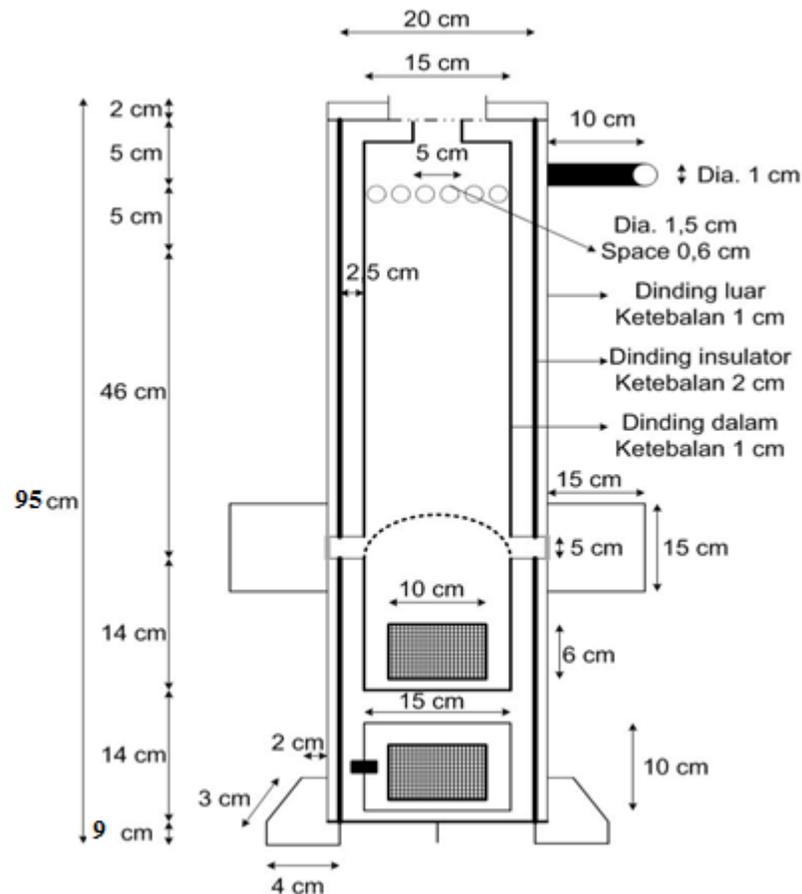
Gambar 4.18 menunjukkan warna api kemerahan memiliki panjang gelombang mendekati panjang gelombang infra-red. Perpindahan panas secara radiasi sebenarnya terjadi pada panjang gelombang infrared, tetapi karena infrared bukanlah sinar tampak, maka warna merah menjadi indikator terjadinya perpindahan panas secara radiasi. Dapat dikatakan bahwa perpindahan panas yang terjadi dari api pada kondisi ini adalah perpindahan panas secara radiasi dimana gradien temperature yang terbentuk dari titik terbentuknya api ke titik menjauhi api lebih landai dibandingkan perpindahan panas secara konveksi sehingga pada jarak yang sama dari api, panas yang ditimbulkan lebih besar. Hal ini memungkinkan temperature air mencapai nilai yang jauh lebih tinggi karena air mendapat panas tidak hanya dari badan panci tetapi juga dari api langsung secara radiasi.

## BAB 5 KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan :

1. Dimensi kompor gas biomassa sebagai berikut dengan gambar detail dapat dilihat pada bagian Lampiran



**Gambar 5.1** Dimensi Kompor Gas-Biomassa Secara Keseluruhan Setelah Modifikasi

- Diameter ruang pembakaran : 15 cm
- Tinggi ruang pembakaran 58 cm
- Tinggi ruang penempatan pipa kedua blower 28 cm
- Diameter total 20 cm

- Diameter lubang keluar udara sekunder 1,5 cm dengan jarak masing-masing lubang 0,6 cm
  - Diameter lubang keluar udara primer 0,5 cm dengan jarak masing-masing lubang 0,3 cm
  - Tinggi kaki bawah setelah modifikasi 9 cm
  - Tinggi kompor total setelah modifikasi 95 cm
2. Kondisi optimum dengan mempertimbangkan warna nyala api dan emisi CO adalah pada rasio udara sekunder berbanding udara primer 6,29 dengan emisi CO rata-rata sebesar 14 ppm. Efisiensi termal dicapai pada kondisi ini adalah 52,8%.
  3. Tujuan dari penelitian ini untuk mendapatkan rancangan kompor gas-biomassa yang menghasilkan emisi CO rendah adalah berhasil dengan emisi CO yang dihasilkan 14 ppm yakni lebih rendah dari ambang batasnya, 25 ppm. Sedangkan warna nyala api didapat berwarna jingga sehingga warna api biru yang diinginkan tidak terbentuk.

## 5.2 Saran

Saran dari penelitian ini kedepannya, antara lain:

1. Sebaiknya digunakan penutup bagian atas kompor dengan mempertimbangkan jumlah lubang keluaran yang memungkinkan api dapat keluar melalui lubang tersebut agar dapat memperpanjang residence time flue gas didalam ruang pembakaran
2. Untuk pengujian temperatur nyala api disarankan menggunakan banyak termokopel dengan titik pengujian yang berbeda-beda agar dapat mengetahui penyebaran temperatur pada nyala api.
3. Sebaiknya digunakan material logam dari stainless steel pada ruang pembakaran agar panas pembakaran yang di pindahkan dari dinding ruang pembakaran ke udara preheating menjadi lebih optimal.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] National Renewable Energy Laboratory . (2008). *Survey of Biomass Resource Assessments and Assessment Capabilities in APEC Economies*. Colorado.
- [2] Zentrum fur Rationell Energieanwendung and Umwelt GmbH. (2000). *Biomass in Indonesia-Business*.
- [3] Bhattacharya SC, Albina DO, Salam PA. (2002). Emission Factors of Wood and Charcoal-Fired Cookstoves. *Journal of Biomass & Bioenergy*.
- [4] Supramono, Dijan, dkk (2008). Designing Biomass Pellet Stove of High Efficiency and Environmental Friendly Using Heat Recovery Principle.
- [5] Reed, T.B., et al. (2000, September). *Testing and Modeling The Wood-Gas Turbo Stove*. Presented at the Progresss in Thermochemical Biomass Conversion Conference, Austria.
- [6] Messerer,A., et al. (2007). Combined Particle Emission Reduction and Heat Recovery from Cpmbustion Exhaust-A novel approach for small Wood-Fired Appliances. *Journal of Biomass and Bioenergy*, 512-521.
- [7] Rizqiardihatno, R. Febry. (2008). *Perancangan Kompor Biomassa Berefisiensi Tinggi dan Ramah Lingkungan dengan Prinsip Heat Recovery untuk Masyarakat Urban*. Depok.
- [8] Handayani, Nita. (2009). *Perancangan Kompor Biomassa untuk Masyarakat Urban dengan Prinsip Pre Heating Bahan Bakar dan Udara Masuk Menggunakan Panas Gas Buang*. Depok.
- [9] Belonio, Alexis. and Anderson. (2005). *Risk Husk Gas Stove Handbook*. Central Philippine University : Department of Agricultural Engineering and Environmental Management.
- [10] Fisafarani, Hanani. (2010). *Identifikasi Karakteristik Sumber Daya Biomassa dan Pengembangan Pellet Biomassa di Indonesia*. Depok.

- [11] Reed, T.B. (1981). *Biomass Gasification Principles and Technology*. New Jersey : Noyes Data Corp.
- [12] Strezov, Monghtaderi, and Lucas. (2007). Thermal Study of Decomposition of Selected Biomass Samples. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1041-1048.
- [13] Bridgewater, A.V. (2011). Review of Fast Pyrolysis of biomass and Product Upgrading. *Journal of Biomass and Bioenergy*.
- [14] Lingens, Windeisen, Wegener. (2005). Investigating the combustion behavior of Various Wood species via Their Fire Gas. *Wood Science and Technology*, 49-U1.
- [15] Orfao , Deris , Delichatsios. (1995). *Pyrolysis Kinetics of Lignocellulosic Materials : Three Independent Reaction Model*, 78, 349-358.
- [16] Jian, Changbin, Zeng, et al. (2011). Biomass Pyrolysis in a Microfluidized Bed Reactor : Characterization and Kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 839-847.
- [17] Sadukhan, Anup,K., Gupta, et al. (2008). Modelling and Experimental Studies Pyrolysis of Biomass Particles. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 183-192.
- [18] Neves, Daniel, Thinman, et al. (2011). Characterization and Prediction of Biomass Pyrolysis Products. *Progress in energy and Combustion Science*.
- [19] Regional Wood Energy Development Programme In Asia. (1993) *Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: A Development Manual*. Bangkok : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [20] Holman, J.P. (1981). *Heat Transfer*. Singapore: McGraw Hill Book Company.
- [21] Khan, A.A., Jong, W., et al. (2009). Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers : Potential Problems and Remedies. *Fuel Processing Technology*, 21-50.

- [22] Nyahoro, Kariuki Peter. (2006). *Effect of Air Distribution on Pollutant Emission and Flame Characteristic of Open Bouyant Wood Combustion*. North Carolina State University.
- [23] Bartok, W., Sarofim, A.F. (1991). *Fossil Fuel Combustion : A Source Book*. Wiley Interscience.
- [24] Beck, N.C., Hayhurst, A.N., (1990). The early stages of the combustion of pulverized coal at high temperature : The kinetics of devolatilisation, Combustion and Flame.
- [25] Makino, A. (1992). Drag Coefficient Of a Slowly Moving Carbon Particle Undergoing Combustion. *Combustion Science and Technology*.
- [26] Werther, J., Saenger, M., Ogada, T., et al. (1972). Combustion of Agricultural Residues. *Progress in Energy and Combustion Science*.
- [27] Rouse, J. (1999). *Improved Biomass Cookstove Programmes: Fundamental Criteria for Success*. The University of Sussex.
- [28] Turns, Stephen R. (2000). *Introduction to Combustion Concepts and Applications*, , 2<sup>nd</sup> edition, McGraw Hill.
- [29] Sumarni, Iis. (2010). *Perbandingan Efek Blind Hood dan Open Hood Terhadap Pembentukan Emisi CO pada Kompor Batu Bara*. Depok, 2010.
- [30] Baukal, Charles E. (2004). *Industrial Burners Handbook*. CRC Press.
- [31] Gaston, K., Jarvis, M. (2011). Biomass Pyrolysis and Gasification in Various Size. National Bioenergy Center, National Renewable Energy Laboratory, American Chemical Society.
- [32] Bhattacharya S.C., Albina, D.O. (2002). Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. *Journal of Biomass & Bioenergy*.

LAMPIRAN

## LAMPIRAN 1

Hasil Uji Analisis Biomassa Kayu Karet

Energy Technology Center  
( Balai Besar Teknologi Energi )

No.: 6A/Lap.Jatek/B2TE/BPPT/12

**LAPORAN ANALISA  
REPORT OF ANALYSIS**

SAMPLE CODE : KAYU KARET ( RUBBER WOOD)		
PARAMETER OF ANALYSIS	VALUE	STANDARD METHOD
<b>PROKSIMATE ANALYSIS (adb)</b>		
% MOISTURE	14.40	ASTM D-5142-09
% VOLATILE MATTER	68.32	
% ASH	4.23	
% FIXED CARBON	13.07	
<b>ULTIMATE ANALYSIS (adb)</b>		
% CARBON ( C )	41.62	ASTM D-5373-08
% HYDROGEN ( H )	4.46	
% NITROGEN ( N )	0.33	
% TOTAL SULFUR ( S )	0.13	ASTM D-4239-08
% OXYGEN ( O )	34.85	By Diff
NILAI KALOR (cal/g)	3771	ASTM D-5865-7a

ENERGY TECHNOLOGI CENTER  
Head of Fuel Characterization Laboratory,



Jr. Trisaksono BP, MEng  
NIP. 196309201988121001

2/2

## LAMPIRAN 2

Proses perhitungan Dimensi Kompor

Daya keluaran ( $Q_n$ )

$$\begin{aligned} M_f \times E_s/T &= (1 \text{ kg} \times 1 \text{ kcal/kg} \times 60 \text{ menit/jam}) / 5 \text{ menit} \\ &= 864 \text{ kcal/jam} \\ &= 1 \text{ kW} \end{aligned}$$

Daya keluaran kemudian yang dipakai adalah 3 kW sesuai dengan penelitian yang dilakukan Bellonio [28]

$$\begin{aligned} HV_f &= 0,5 \times (\text{LHV bagasse} + \text{LHV kayu karet}) \\ &= 0,5 \times (1319 \text{ kJ/kg} + 12544,7 \text{ kJ/kg}) \\ &= 3069,2 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

Laju konsumsi bahan bakar (FCR)

$$\begin{aligned} Q_n / (HV_f \text{ biomass} \times sg) &= 3 \text{ kW} / (3069,2 \text{ kcal/kg} \times 0,6) \\ &= 1,4 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

Diameter ruang pembakaran (D)

$$\begin{aligned} (1,27 \times (\text{FCR}/\text{SGR}))^{0,5} &= (1,27 \times (1,4 \text{ kg/jam} / 80 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}))^{0,5} \\ &= 14,9 \text{ cm} = 15 \text{ cm} \end{aligned}$$

Tinggi bahan bakar (H)

$$\begin{aligned} \text{FCR} / (0,5 \times (\text{densitas bulk bagasse} + \text{densitas bulk kayu karet}) \times A) &= \\ 1,4 \text{ kg/jam} / (0,5 \times (122,5 \text{ kg/m}^3 + 290,67 \text{ kg/m}^3) \times 3,14 \times 0,075^2) &= 46 \text{ cm} \end{aligned}$$

Tinggi api ( $H_{fl}$ )

$$75 \text{ mm/kW}^{0,4} \times \text{daya keluaran}^{0,4} = 75 \text{ mm/kW}^{0,4} \times 3^{0,4}$$

$$= 11,6 \text{ cm}$$

$$= 12 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi ruang pembakaran} &= H + H_{fl} \\ &= 46 \text{ cm} + 12 \text{ cm} \\ &= 58 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\text{Tinggi ruang untuk blower} = 28 \text{ cm}$$

$$\text{Tinggi kaki bawah} = 2 \text{ cm}$$

$$\text{Jarak pipa dalam dengan pipa luar} = 2,5 \text{ cm [28]}$$

$$\text{Diameter lubang udara sekunder} = 1,5 \text{ cm [28]}$$

$$\text{Jarak antar lubang} = 0,6 \text{ cm}$$

$$\text{Banyak lubang} = 21 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas seluruh lubang} &= 21 \times 3,14 \times 0,75 \text{ cm} \times 0,75 \text{ cm} \\ &= 37,09 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Diameter keluaran api} = 0,5 \text{ cm [28]}$$

$$\text{Jarak antar lubang} = 0,3 \text{ cm}$$

$$\text{Banyak lubang} = 87 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas seluruh lubang} &= 87 \times 3,14 \times 0,25 \text{ cm} \times 0,25 \text{ cm} \\ &= 17,07 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

### Penentuan komposisi Biomassa

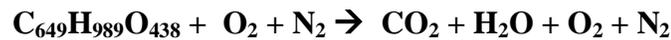
Rumus Kimia untuk masing-masing komponen kayu:

- Selulosa (  $C_6H_{10}O_5$  ) $x$
- Hemiselulosa (  $C_5H_8O_4$  ) $y$
- Lignin (  $C_9H_{10}O_3(CH_3O)_{0,9-1,7}$  ) $z$   $\rightarrow$  0,9 – 1,7 diambil nilai 1

Basis nilai untuk x,y,z diatas adalah 100, dengan variasi nilai tersebut menurut referensi dari wikipedia antara 60-1000. Maka rumus kimia disederhanakan menjadi  $C_xH_yO_z$  sehingga didapat :

Kayu karet :  $C_{649}H_{989}O_{438}$  dengan  $Mr = 15799,402 \text{ gr/mol}$

Reaksi Pembakaran:



Asumsi yang digunakan saat pembakaran adalah

- Pembakaran sempurna
- Komposisi udara : oksigen 21% dan nitrogen 79%
- Ekses udara 25% (dari literature disebutkan ekses udara antara 25%-30%)

Maka didapatkan koefisien reaksi masing-masing komponen sehingga menjadi



Basis penggunaan bahan bakar sebesar 1,4kg

$$\text{Maka mol biomassa} = \frac{m}{Mr} = \frac{1400}{15799,402} = 0,08875 \text{ mol}$$

Secara stoikiometrik, maka kesetimbangan mol dan massa yang diperlukan atau dihasilkan:

$$n.O_2 = 75,14 \text{ mol}$$

$$n.N_2 = 282,65 \text{ mol}$$

$$n.CO_2 = 57,6 \text{ mol}$$

$$n.H_2O = 43,89 \text{ mol}$$

$$n.O_2 \text{ ekses} = 31 \text{ mol}$$

untuk mencari massa menggunakan persamaan  $m = n.Mr$

$$\text{massa } O_2 = 2404,36 \text{ gr}$$

$$\text{massa } N_2 = 7914,34 \text{ gr}$$

massa  $\text{CO}_2 = 2535,05 \text{ gr}$

massa  $\text{H}_2\text{O} = 790,71 \text{ gr}$

massa  $\text{O}_2$  ekses = 961,74 gr

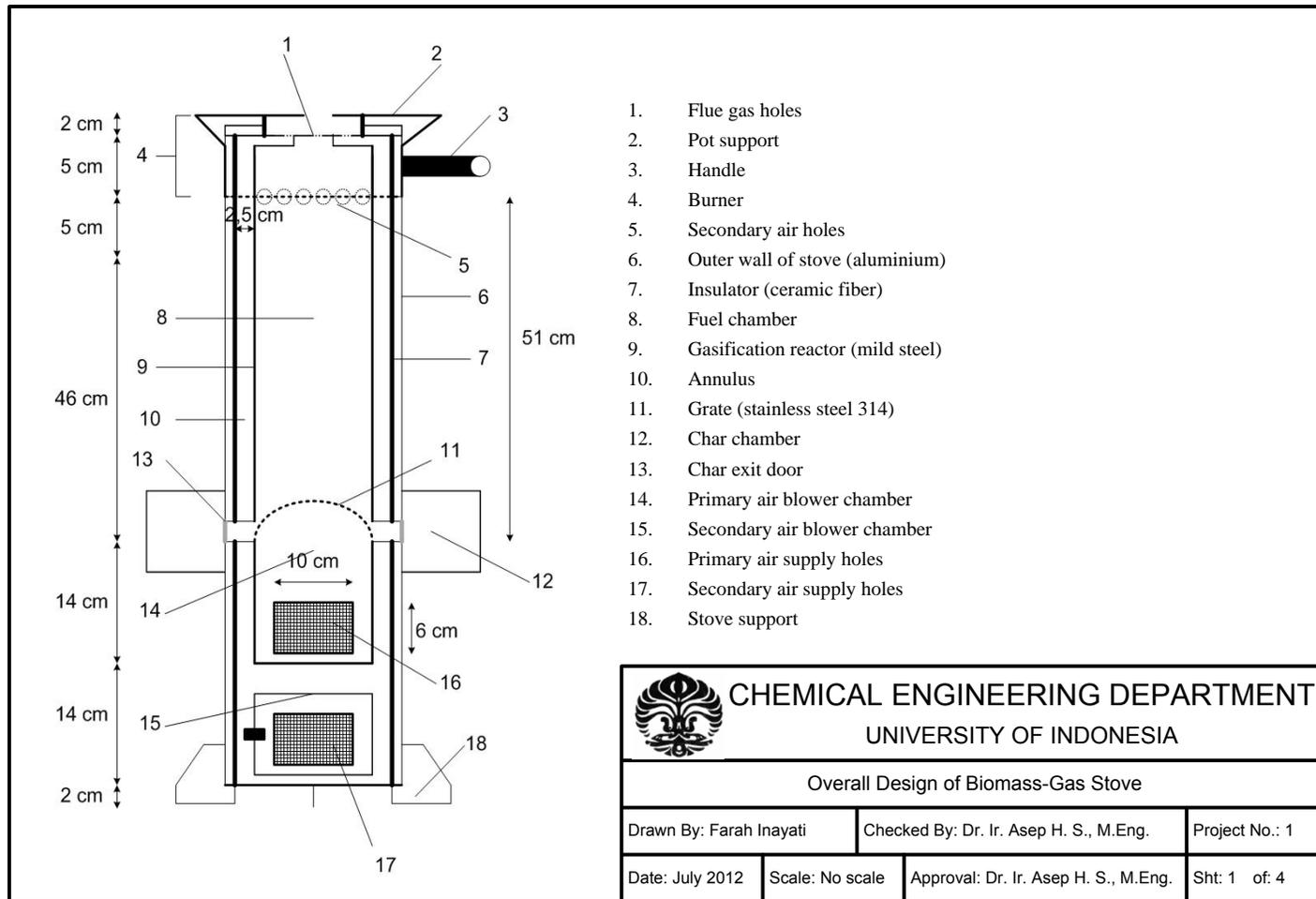
rasio udara-bahan bakar = massa udara ( $\text{N}_2 + \text{O}_2$ ) / massa bahan bakar per 1 jam  
= 7,39 kg udara/kg bahan bakar

volume spesifik udara = 773,48  $\text{cm}^3/\text{g}$

volume udara masuk = massa total udara ( $\text{N}_2 + \text{O}_2$ )  $\times$  volum spesifik udara  
= 7981300,62  $\text{cm}^3$

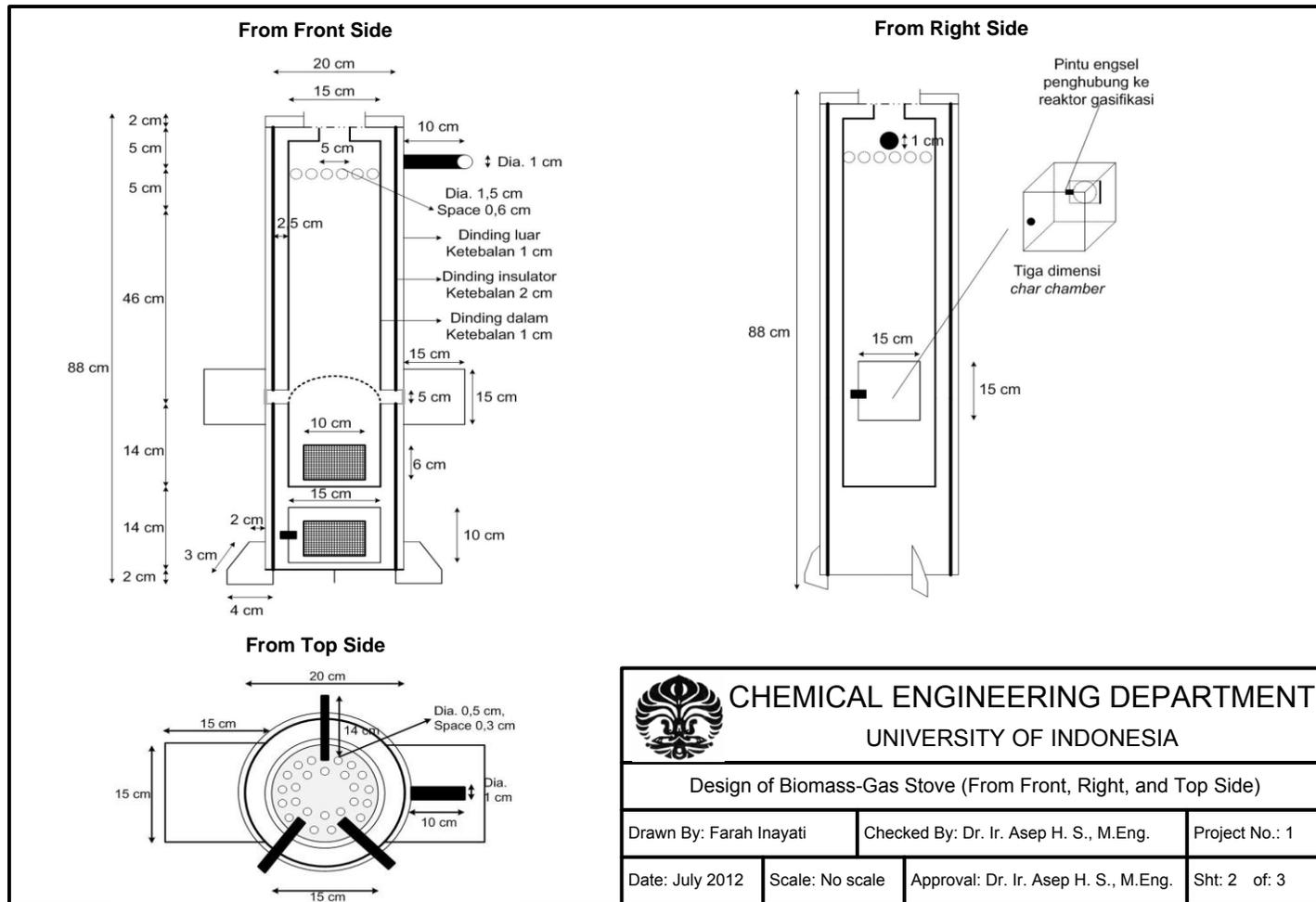
Atau laju udara yang dibutuhkan selama 1 jam adalah 2217,03  $\text{cm}^3/\text{s} = 2,217 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

## LAMPIRAN 3

Desain Kompor Gas-Biomassa Keseluruhan

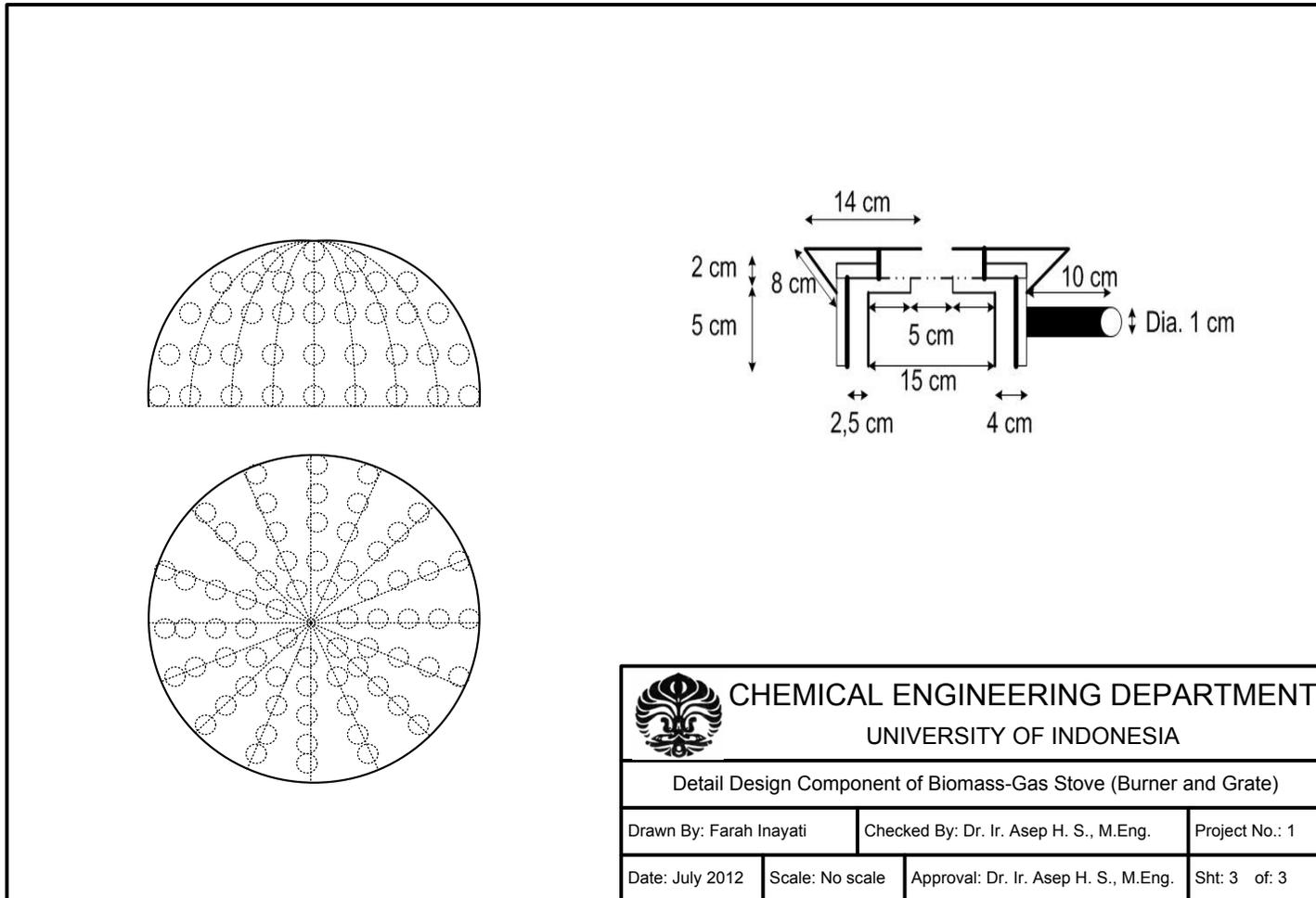
Universitas Indonesia

## LAMPIRAN 4

Desain Kompor Gas-Biomassa Tampak Depan, Samping, dan Atas

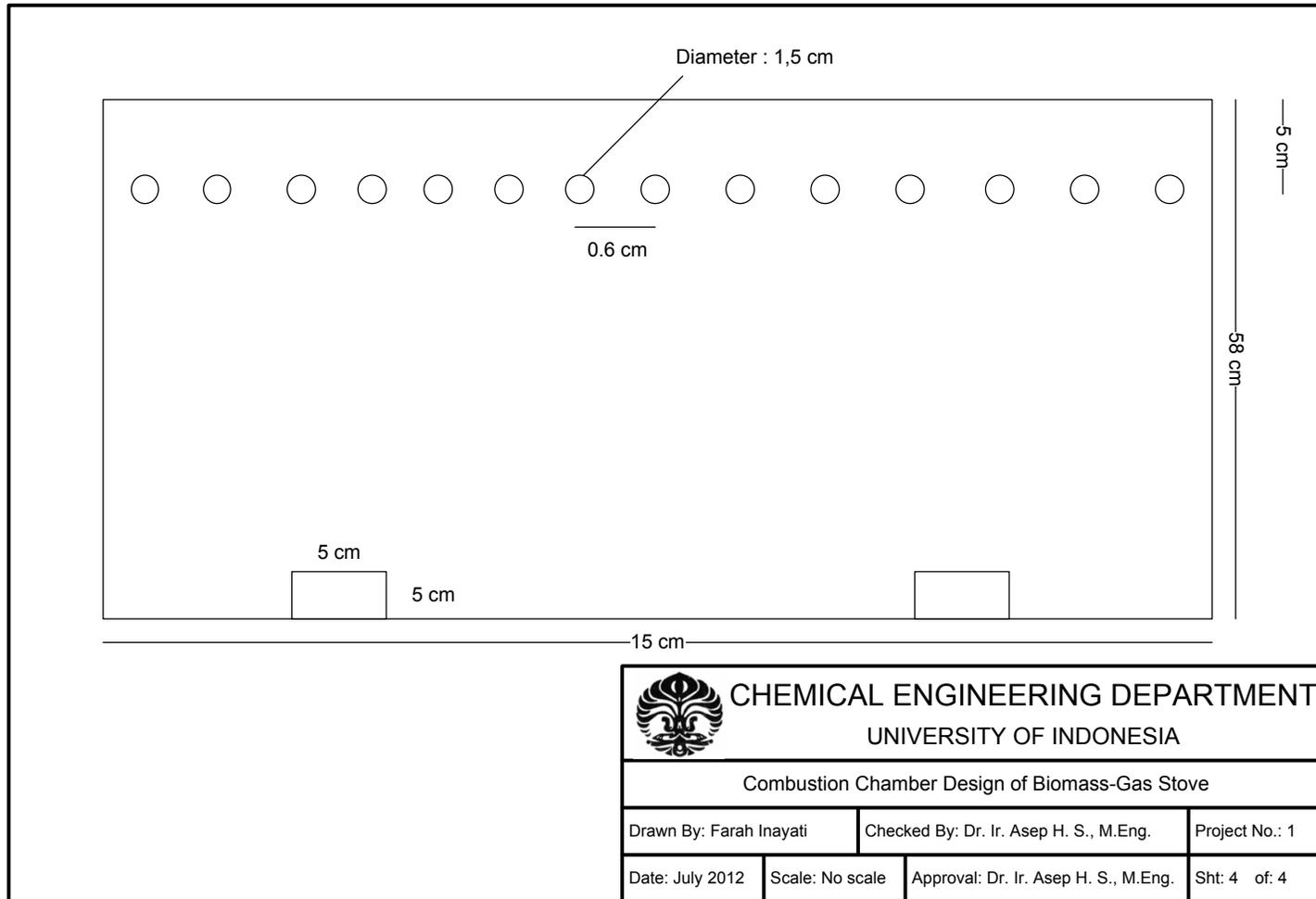
Universitas Indonesia

## LAMPIRAN 5

Desain Burner

Universitas Indonesia

## LAMPIRAN 6

Desain Ruang Pembakaran

Universitas Indonesia

## LAMPIRAN 7

Data Rasio udara

Percobaan	Udara primer (m/s)	Udara sekunder (m/s)	rasio
1	0,01	0,02	1:6,29
	0,03	0,06	
	0,07	0,5	
	0,02	0,12	
	0,06	0,2	
	0,05	Average : 0,18	
2	Average : 0,04	1,17	1:25,58
	0,03		
	0,03		
	0,02		
	0,04		
	0,08		
3	0,04	0,7	1:18,43
	0,01	0,9	
	0,02	0,13	
	0,03	0,17	
	0,08	Average : 0,475	
	Average : 0,036		
4	0,04	0,07	1:2,44
	0,03	0,04	
	0,04	0,08	
	0,05	0,06	
	Average : 0,04	0,1	
		Average : 0,07	

## LAMPIRAN 8

Perhitungan Nilai Efisiensi Termal

Data tetap yang digunakan :

$$C_p \text{ air} = 4,186 \text{ kJ/kg.K}$$

$$C_p \text{ bejana} = 0,902 \text{ kJ/kg.K}$$

$$H_c = 5009,094 \text{ kJ/kg}$$

$$H_L = 2260 \text{ kJ/kg}$$

$$M_1 = 0,18 \text{ kg}$$

$$T_a = 27 \text{ }^\circ\text{C} = 300 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$M = 1 \text{ kg}$$

Dengan menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{M_{\text{water}} \times c_{p(\text{air})} \times (T_b - T_a) + M_{\text{bejana}} \times c_{p(\text{bejana})} \times (T_b - T_a) + M_{\text{evap}} \times H_L}{H_c \times W_{\text{biomassa}}} \times 100 \%$$

Nilai efisiensi termal :

Percobaan	Rasio Kecepatan Udara Primer dan Sekunder	Efisiensi Termal
1	1:6,29	52,8
2	1:25,58	26,32
3	1:18,43	56,98
4	1:2,44	61,35

## LAMPIRAN 9

Data Temperatur Percobaan

Data temperature pada percobaan 1

Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)
291	0	43.864	703.368	440	85.412	690.245	880	85.124	548.406	1320	83.721
387.584	9	44.84	692.13	450	85.166	709.456	890	84.959	548.578	1330	84.291
442.965	19	45.93	672.217	460	85.189	708.65	900	84.865	554.286	1340	83.626
474.779	29	48.752	687.412	470	85.043	707.482	910	84.976	546.072	1349	83.959
482.905	39	47.812	684.71	480	85.146	708.512	920	84.954	544.002	1359	83.757
483.036	50	52.454	676.375	489	85.021	714.109	930	85.025	537.245	1369	84.011
491.924	60	53.123	678.902	499	85.086	720.635	939	84.909	535.299	1380	83.539
494.326	70	54.046	680.771	509	84.973	726.462	949	84.855	526.401	1389	83.694
496.065	80	56.558	673.995	519	85.073	729.711	959	84.931	517.908	1399	82.621
496.288	90	56.187	658.889	529	85.046	726.814	970	85.005	507.552	1409	82.219
487.591	100	59.187	681.922	539	85.02	735.326	979	85.025	504.803	1420	82.411
480.649	109	60.274	702.301	549	85.057	739.282	989	84.916	504.567	1430	82.598
484.35	119	62.344	701.562	560	84.972	738.498	1000	84.962	509.146	1440	83.011
481.5	130	64.353	694.928	570	84.872	732.496	1010	85.027	506.649	1450	82.41
475.783	139	65.433	675.167	580	84.915	733.196	1020	84.984	511.371	1460	81.921
479.582	149	67.825	679.642	590	84.92	738.065	1029	84.874	516.367	1470	82.165
486.459	159	69.966	678.069	600	84.988	737.727	1040	84.993	511.502	1479	82.11
494.67	170	69.823	680.056	610	84.994	736.591	1050	85.115	500.528	1489	81.855
503.139	180	71.523	671.814	620	85.012	739.174	1060	85.036	500.032	1499	81.581
513.679	190	72.424	677.821	630	84.995	721.418	1069	85.006	499.505	1509	83.104
513.175	200	73.363	683.444	640	85.041	708.89	1079	85.187	502.646	1519	81.278

Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)									
507.733	210	74.572	698.031	649	84.993	714.181	1090	85.266	504.275	1529	82.104
501.807	220	77.083	704.475	659	85.127	723.413	1099	85.37	507.696	1539	82.875
498.9	230	79.085	708.31	669	85.121	728.675	1109	85.094	507.141	1550	82.624
496.357	239	79.646	704.06	680	85.167	720.745	1119	85.074	500.436	1560	82.329
492.749	249	80.631	705.56	690	85.159	702.243	1130	85.168	482.499	1570	83.294
508.588	259	82.251	703.919	700	85.055	697.697	1140	85.309	464.432	1580	82.454
541.168	269	84.198	712.182	709	85.035	677.336	1150	85.329	469.475	1590	82.658
558.989	279	83.726	708.927	720	84.998	615.411	1160	84.995	469.45	1600	85.346
556.829	289	84.507	712.73	730	84.958	592.745	1170	84.864	465.505	1610	87.071
547.016	300	85.088	718.893	740	84.992	599.592	1180	85.225	462.346	1620	86.622
548.239	310	85.252	723.976	750	84.825	585.689	1189	85.249	462.32	1630	85.246
579.127	320	85.03	708.987	760	85.029	589.292	1200	84.567	461.978	1639	86.014
637.897	330	85.002	679.412	770	85.001	596.856	1210	84.58	461.908	1649	85.825
658.836	340	85.049	680.607	779	84.922	588.525	1220	85.149	460.089	1659	87.077
673.523	350	85.45	679.424	789	85.098	587.088	1229	84.797	460.027	1670	87.013
681.496	359	84.906	681.201	800	85.148	598.392	1239	84.266	460.023	1680	82.936
662.733	369	84.969	671.816	809	85.069	607.125	1249	84.86			
673.924	379	84.832	689.212	819	84.999	607.749	1260	84.897			
680.83	390	85.033	699.434	829	85.116	622.952	1270	84.428			
620.717	399	85.231	701.425	840	85.09	612.88	1280	84.731			
558.355	409	85.29	706.834	850	84.982	565.97	1290	84.177			
628.206	419	85.284	694.85	860	84.935	540.569	1300	84.013			
675.537	430	85.427	691.161	870	84.878	545.995	1310	84.362			

## Data temperatur percobaan 2

Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)
231.96	0	36.192	415.535	440	80.196	392.753	880	77.419	407.661	1320	85.576
350.91	10	37.237	415.891	450	80.639	399.132	890	77.054	414.233	1330	86.075
391.446	20	40.377	419.749	460	80.818	409.512	900	85.91	441.746	1340	85.804
407.285	30	39.297	407.361	470	74.329	394.106	910	77.786	415.988	1350	84.475
417.092	40	42.226	401.532	480	81.91	411.203	920	86.282	410.698	1360	85.264
419.593	50	41.643	422.41	490	82.964	407.639	930	75.405	406.553	1370	81.916
418.401	60	44.856	420.018	500	76.152	409.255	940	85.99	403.075	1380	83.006
413.72	70	46.407	400.165	510	77.756	411.135	950	86.071	410.643	1390	86.028
408.161	80	47.49	419.639	520	82.86	414.003	960	85.505	393.064	1400	81.389
397.802	90	45.442	404.877	530	85.386	412.728	970	85.72	404.741	1410	85.3
404.586	100	49.66	403.97	540	85.151	411.06	980	85.684	408.954	1420	86.196
403.311	110	50.375	417.649	550	78.528	405.291	990	85.77	407.941	1430	82.688
400.28	120	51.283	431.236	560	85.861	402.236	1000	85.108	415.779	1440	85.479
402.114	130	52.872	408.888	570	85.256	387.606	1010	79.595	403.168	1450	85.956
403.767	140	53.295	420.096	580	85.528	388.346	1020	79.516	399.434	1460	86.649
403.33	150	56.793	406.737	590	83.037	391.196	1030	85.942	408.733	1470	85.975
403.547	160	56.209	402.189	600	86.022	391.492	1040	79.3	404.789	1480	84.672
401.91	170	57.759	416.077	610	85.95	403.332	1050	85.555	395.365	1490	85.708
401.305	180	60.13	417.972	620	85.623	404.065	1060	85.727	391.567	1500	86.115
395.895	190	59.646	418.46	630	85.889	409.22	1070	84.203	384.133	1510	82.118
403.269	200	61.813	423.751	640	85.503	409.01	1080	85.123	376.935	1520	85.33
407.56	210	60.937	427.271	650	85.487	409.606	1090	85.779	379.594	1530	80.8
405.518	220	61.754	429.133	660	85.298	412.186	1100	85.628	383.939	1540	84.84

Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)	Temperatur api (°C)	waktu (s)	Temperatur air (°C)
404.105	230	62.436	427.785	670	85.977	434.951	1110	75.216	382.001	1550	85.983
404.159	240	63.35	425.431	680	85.526	429.931	1120	80.098	382.031	1560	86.437
404.523	250	65.409	420.964	690	86.146	424.097	1130	86.161	383.926	1570	85.393
405.494	260	66.48	401.842	700	84.345	416.124	1140	78.463	390.543	1580	85.57
405.894	270	67.199	427.078	710	86.027	421.696	1150	79.918	385.081	1590	81.625
408.063	280	69.571	419.112	720	77.509	420.275	1160	86.103	380.055	1600	85.564
408.307	290	69.963	418.034	730	77.81	431.343	1170	85.745	376.158	1610	85.852
411.303	300	70.203	435.069	740	85.543	430.123	1180	86.012	374.795	1620	85.735
418.234	310	72.24	439.815	750	86.147	442.866	1190	78.78	374.685	1630	85.512
415.571	320	73.215	420.026	760	77.438	446.093	1200	85.64	374.628	1640	85.993
414.772	330	71.864	449.869	770	86.144	418.271	1210	86.149	373.089	1650	86.461
414.003	340	72.196	428.746	780	86.037	419.082	1220	85.89	373.249	1660	85.774
401.123	350	75.369	414.569	790	77.289	415.467	1230	85.788	373.984	1670	85.66
409.254	360	76.726	428.355	800	85.871	423.819	1240	85.431	376.151	1680	85.817
406.763	370	76	406.113	810	77.7	409.044	1250	86.598			
408.063	380	76.943	410.562	820	82.608	405.128	1260	85.522			
408.48	390	77.108	403.325	830	84.729	401.217	1270	85.808			
409.12	400	78.492	421.164	840	82.471	400.453	1280	85.862			
411.318	410	78.212	423.456	850	85.741	399.661	1290	85.916			
410.963	420	78.677	415.593	860	74.574	403.271	1300	86.062			
411.57	430	80.056	413.521	870	78.617	406.721	1310	86.018			

Data temperature percobaan 3

temperatur api (°C)	waktu (detik)	T air (°C)
316.298	0	20
400.135	120	60
368.505	240	74
363.373	360	84
440.871	480	89
442.947	600	87
462.931	720	86
447.193	840	89
451.812	960	90
482.158	1080	93
485.531	1200	87
460.114	1320	83
477.409	1440	88
496.298	1560	95
482.433	1680	96
460.182	1800	95
460.141	1920	88
464.271	2040	90
452.262	2160	92
480.41	2280	86

Data temperature percobaan 4

temperatur api (°C)	waktu (detik)	T air (oC)
34.87	0	26
295.935	120	68
329.653	240	93
327.256	360	110
349.527	480	117
354.324	600	120
336.046	720	121
341.793	840	114
345.545	960	112
344.421	1080	106
348.797	1200	115
353.192	1320	114
356.971	1440	113
356.157	1560	114
355.074	1680	113
356.022	1800	117
359.583	1920	116
357.811	2040	119
358.949	2160	120
356.383	2280	118
351.194	2400	110
350.273	2520	118
351.016	2640	127
347.983	2760	133

