



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KOMPOR BIOMASSA UNTUK  
MASYARAKAT URBAN DENGAN PRINSIP *HEAT  
RECOVERY* DAN INTEGRASI SISTEM *KNOCK-DOWN* PADA  
CEROBONG**

**SKRIPSI**

**Nita Handayani  
0606076652**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KOMPOR BIOMASSA UNTUK  
MASYARAKAT URBAN DENGAN PRINSIP *HEAT  
RECOVERY* DAN INTEGRASI SISTEM *KNOCK-DOWN* PADA  
CEROBONG**

**SKRIPSI**

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

**Nita Handayani  
0606076652**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Nita Handayani**

**NPM : 0606076652**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 2 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Nita Handayani  
NPM : 0606076652  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Perancangan Kompor Biomassa untuk Masyarakat Urban dengan Prinsip *Heat Recovery* dan Integrasi Sistem *Knock-Down* pada Cerobong

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Widodo W. P., DEA

Pembimbing II : Ir. Dijan Supramono, M.Sc.

Penguji : Dr.rer.nat. Ir. Yuswan Muharram, MT

Penguji : Ir. Praswasti PDK Wulan, MT

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat serta karunia yang telah dilimpahkan-Nya hingga saya dapat menyelesaikan penulisan naskah skripsi yang disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari, penyelesaian naskah skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA dan Ir. Dijan Supramono, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah dengan ikhlas membagi ilmu, meluangkan waktu, dan memberikan petunjuk serta kritik yang membangun dalam penyelesaian naskah skripsi ini;
2. Dr.rer.nat. Ir. Yuswan Muharram, MT dan Ir. Praswasti PDK Wulan, MT selaku dosen penguji yang banyak memberikan banyak kritik dan saran dalam perbaikan naskah skripsi ini;
3. Bapak Johnny Widjaja selaku donatur beasiswa, serta pihak SMA Dwiwarna yang telah membantu hingga saya dapat menyelesaikan studi di tingkat universitas;
4. Orang tua dan keluarga yang tidak henti-hentinya mendoakan dan memberikan semangat serta dukungan kepada saya untuk menyelesaikan naskah skripsi ini;
5. Sahabat-sahabat terdekat saya, Fakhry, Hanani, Anindya, dan Hadi, atas semangat dan dukungan sepanjang empat tahun masa perkuliahan terutama enam bulan terakhir ini;

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga naskah skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 2 Juli 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

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

Nama : Nita Handayani  
NPM : 0606076652  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

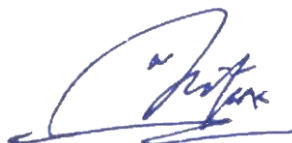
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Perancangan Kompor Biomassa untuk Masyarakat Urban dengan Prinsip  
Heat Recovery dan Integrasi Sistem Knock-Down pada Cerobong**

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 : 2 Juli 2010  
Yang menyatakan



(Nita Handayani)

## ABSTRAK

Nama : Nita Handayani  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Perancangan Kompor Biomassa untuk Masyarakat Urban dengan Prinsip *Heat Recovery* dan Integrasi Sistem *Knock-Down* pada Cerobong

Fokus utama dalam penelitian ini adalah perancangan kompor biomassa berefisiensi tinggi, rendah emisi, serta bersifat *portable* dan mudah dalam *handling*, sehingga dapat digunakan dalam lingkungan rumah urban. Penelitian ini bersifat eksperimen, diawali dengan perancangan desain, fabrikasi, kemudian uji kinerja kompor. Hasil uji menunjukkan bahwa prinsip *heat recovery* dengan mengadopsi sistem *heat exchange counter current* pada cerobong dapat mengembalikan 13% panas yang terbawa dalam gas buang kembali ke ruang pembakaran melalui aliran udara masuk. Emisi karbon monoksida (CO) yang dihasilkan masih cukup tinggi, yaitu 35 g/kg – 78 g/kg. Integrasi sistem *knock-down* pada cerobong dapat memudahkan *handling* serta meningkatkan portabilitas kompor.

Kata kunci:

Kompor, biomassa, *heat recovery*, cerobong, *knock-down*

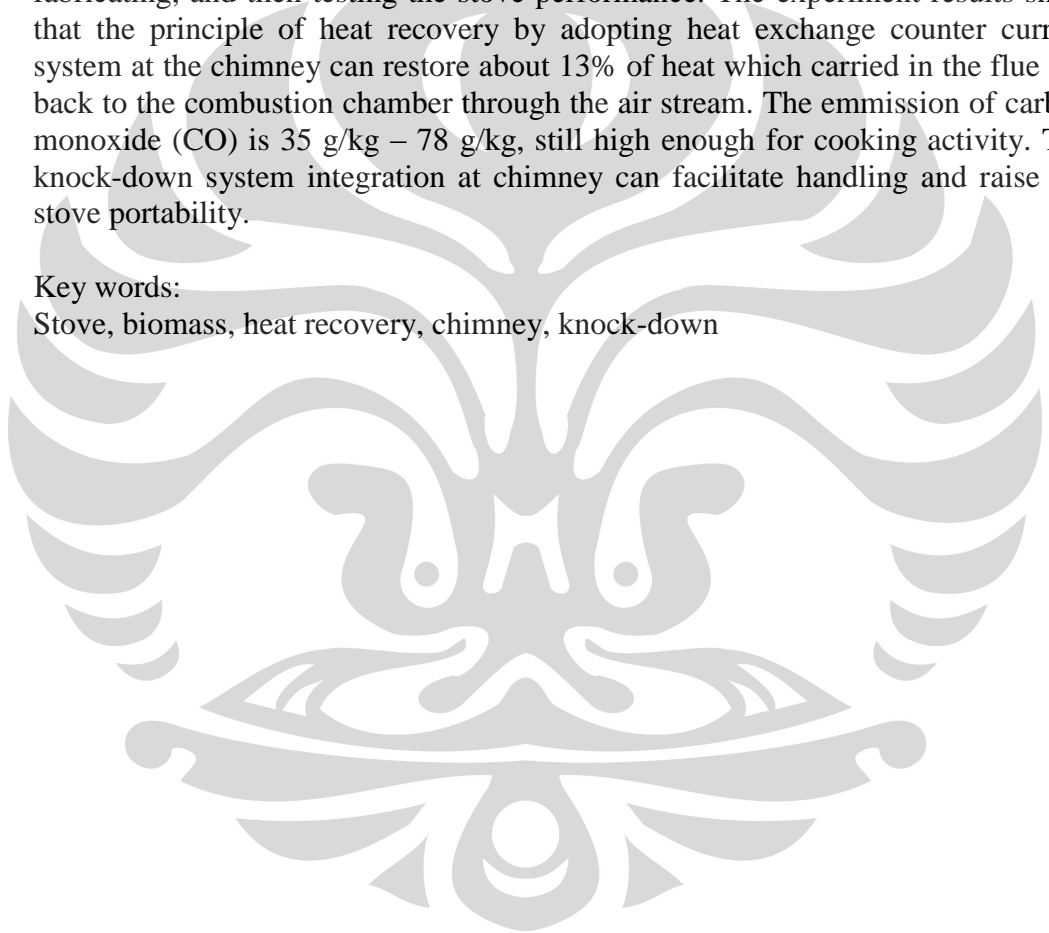
## ABSTRACT

Name : Nita Handayani  
Study Program : Teknik Kimia  
Title : Design of Biomass Stove for Urban People with the Principle  
Of Heat Recovery and Knock-down System Integration at The  
Chimney

The main focus of this research is to design a biomass stove with high thermal efficiency, low emissions, portable, and easy handling, hence it can be used in an urban neighborhood. The research is experimental type, started with designing, fabricating, and then testing the stove performance. The experiment results show that the principle of heat recovery by adopting heat exchange counter current system at the chimney can restore about 13% of heat which carried in the flue gas back to the combustion chamber through the air stream. The emission of carbon monoxide (CO) is 35 g/kg – 78 g/kg, still high enough for cooking activity. The knock-down system integration at chimney can facilitate handling and raise the stove portability.

Key words:

Stove, biomass, heat recovery, chimney, knock-down





## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR LAMPIRAN .....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1 Definisi Kompor Biomasa .....	6
2.2 Teknologi <i>Improved Cook Stove</i> (ICS) .....	6
2.3 Prinsip Perancangan ICS .....	10
2.3.1 Proses Pembakaran .....	11
2.3.2 Perpindahan Panas .....	11
2.4 Teori Pembakaran .....	14
2.4.1 Rasio Udara terhadap Bahan Bakar .....	15
2.4.2 Temperatur Nyala .....	15
2.4.3 Pembakaran Biomassa .....	15
2.5 Pengujian Efisiensi Termal (Metode <i>Water Boiling Test</i> ) .....	18
2.6 Perbandingan Kompor-kompor Biomassa .....	19
2.7 Aspek Lingkungan dan Kesehatan .....	24
BAB 3 METODE PENELITIAN .....	27
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	27
3.2 Tahap Perancangan Kompor .....	28
3.3 Tahap Fabrikasi Kompor .....	28
3.4 Tahap Preparasi Bahan Bakar .....	29
3.5 Tahap Uji Kinerja Kompor .....	29
3.5.1 Pengujian Profil Temperatur .....	29
3.5.2 Pengujian Efisiensi Termal .....	30
3.5.3 Pengujian Emisi .....	31

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	33
4.1 Hasil Rancangan Kompor .....	33
4.1.1 Penentuan Dimensi Kompor .....	33
4.1.2 Hasil Fabrikasi Kompor .....	37
4.2 Portabilitas dan Pengemasan Kompor .....	38
4.3 Hasil Uji Kinerja Kompor .....	40
4.3.1 Profil Temperatur Kompor .....	41
4.3.2 Efisiensi Termal .....	48
4.3.3 Emisi Karbon Monoksida (CO) .....	50
4.4 Evaluasi dan Rekomendasi .....	52
4.4.1 Dimensi Kompor .....	52
4.4.2 Aspek Pengoperasian Kompor .....	53
BAB 5 KESIMPULAN .....	54
DAFTAR PUSTAKA .....	55
LAMPIRAN 1. Perhitungan Dimensi Kompor .....	57
LAMPIRAN 2. Perhitungan <i>Water Boiling Test</i> (WBT) .....	59
LAMPIRAN 3. Perhitungan untuk Pembuatan Diagram Sankey .....	61

## DAFTAR TABEL

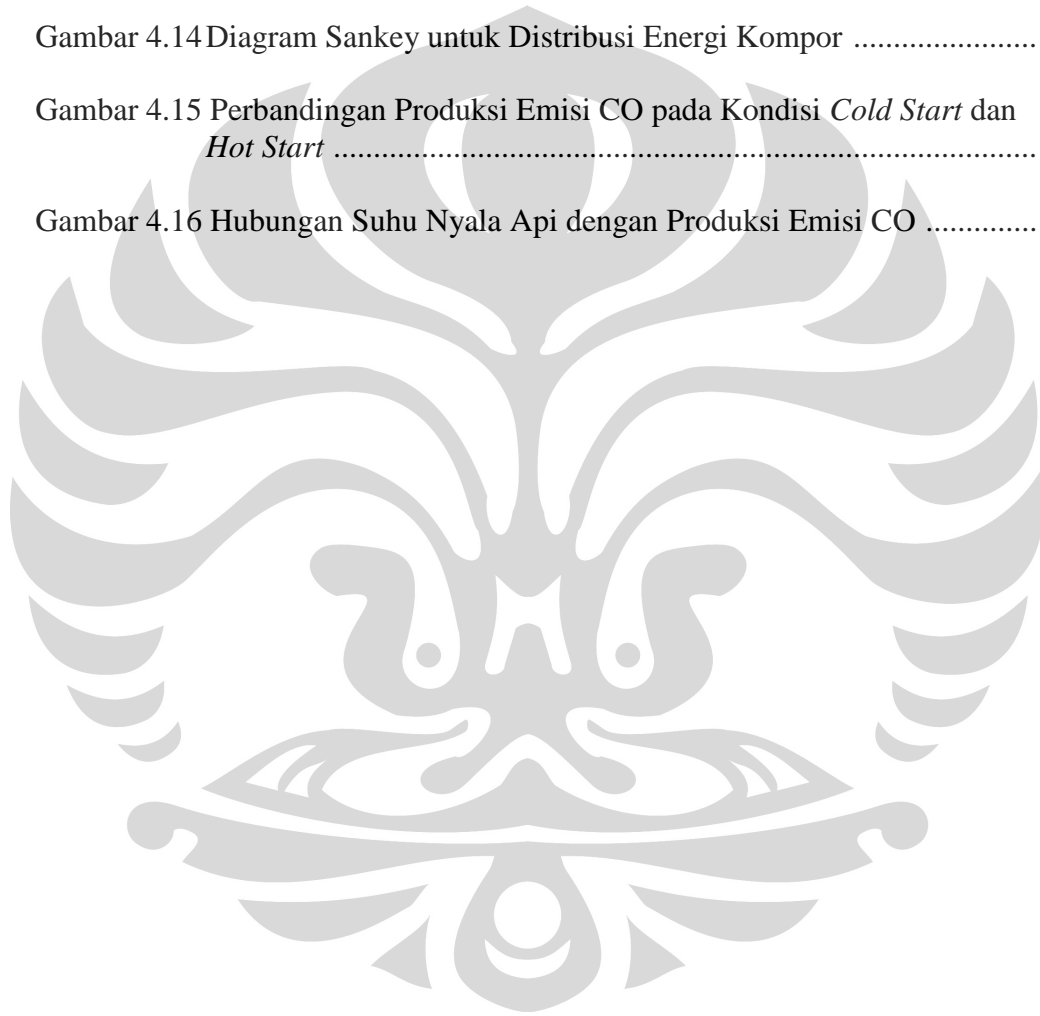
Tabel 2.1 Perbandingan Keuntungan dan Kerugian Desain Kompor Berdasarkan Jumlah Lubang (Pot) .....	9
Tabel 2.2 Perbandingan 10 Kompor Biomassa yang Telah Dikembangkan .....	20
Tabel 4.1 Data dan Hasil Kalkulasi Metode <i>Water Boiling Test</i> .....	48



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tampilan Isometrik Dhaula Dhar Chullah .....	7
Gambar 2.2	Perbandingan Udara terhadap Bahan Bakar .....	15
Gambar 2.3	<i>Three-stone Fire</i> .....	20
Gambar 2.4	<i>Rocket Stove</i> .....	20
Gambar 2.5	<i>Karve Gasifier Stove</i> .....	20
Gambar 2.6	<i>Phillips Fan Stove</i> .....	21
Gambar 2.7	<i>Charcoal Jiko</i> .....	21
Gambar 2.8	<i>QB Philippine Stove</i> .....	21
Gambar 2.9	<i>Vietnamese Improved Stove</i> .....	22
Gambar 2.10	<i>Traditional Lao-improved Stove</i> .....	22
Gambar 2.11	<i>General 2 Pot Metal Stove</i> .....	23
Gambar 2.12	<i>Himachal-Pradesh Stove</i> .....	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian .....	27
Gambar 3.2	Sketsa Penempatan Termokopel .....	30
Gambar 4.1	Komponen Cerobong dengan Sistem <i>Heat Exchanger</i> .....	34
Gambar 4.2	Komponen Ruang Pembakaran .....	35
Gambar 4.3	Komponen Badan Kompor .....	36
Gambar 4.4	Sketsa Hasil Konstruksi Kompor .....	37
Gambar 4.5	Hasil Fabrikasi Kompor .....	38
Gambar 4.6	Dimensi Kompor dengan Sistem <i>Knock-Down</i> .....	39
Gambar 4.7	Sketsa Desain Kemasan Kompor .....	39
Gambar 4.8	Perbandingan Persebaran Nyala Api pada <i>Cold Start</i> dan <i>Hot Start</i> .....	42

Gambar 4.9 Profil Temperatur pada Sistem <i>Heat Recovery</i> Kondisi <i>Cold Start</i>	44
Gambar 4.10 Profil Temperatur pada Sistem <i>Heat Recovery</i> Kondisi <i>Hot Start</i>	45
Gambar 4.11 Hubungan Suhu Api di $r = 5$ cm dengan Suhu <i>Flue Gas</i> Masuk Cerobong .....	46
Gambar 4.12 Hasil <i>Pre Heating</i> Udara pada Kondisi <i>Cold Start</i> .....	47
Gambar 4.13 Hasil <i>Pre Heating</i> Udara pada Kondisi <i>Hot Start</i> .....	47
Gambar 4.14 Diagram Sankey untuk Distribusi Energi Kompor .....	49
Gambar 4.15 Perbandingan Produksi Emisi CO pada Kondisi <i>Cold Start</i> dan <i>Hot Start</i> .....	50
Gambar 4.16 Hubungan Suhu Nyala Api dengan Produksi Emisi CO .....	51



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar sebenarnya bukanlah hal yang baru di Indonesia. Sejak zaman dahulu, sebelum bahan bakar fosil mendominasi pemenuhan energi dunia, biomassa seperti kayu bakar, limbah pertanian, dan kotoran hewan, telah menjadi pilihan utama masyarakat untuk memenuhi kebutuhan energi, terutama di sektor rumah tangga. Namun, dengan berjalannya waktu, penggunaan biomassa kian berkurang seiring dengan tuntutan masyarakat modern yang lebih menghendaki bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi mereka. Hal ini memang beralasan, selain lebih mudah dalam pengoperasian, bahan bakar fosil memiliki efisiensi tinggi dan lebih bersih dibandingkan dengan bahan biomassa yang selalu meninggalkan residu padat di akhir penggunaannya.

Akan tetapi, muncul kekhawatiran-kekhawatiran baru dalam penggunaan bahan bakar fosil. Sebagai sumber energi tak-terbarukan, lama kelamaan bahan bakar fosil akan habis tak tergantikan. Selain itu, gas buang yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil ternyata membahayakan lingkungan karena memicu terjadinya pemanasan global. Pembakaran batu bara bahkan menghasilkan senyawa sulfur yang berbahaya bagi kesehatan maupun lingkungan.

Oleh karena itu, beberapa tahun belakangan, berbagai kampanye maupun himbuan untuk melakukan penghematan dalam penggunaan sumber energi mulai digalakkan. Selain itu, masyarakat juga mulai berlaku cerdas dengan mencari sumber energi alternatif untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Untuk sektor rumah tangga sendiri, biomassa kembali menjadi suatu alternatif utama, termasuk di Indonesia. Hal ini terjadi untuk beberapa alasan, salah satunya karena ketersediaannya yang melimpah di muka bumi sehingga bahan bakar biomassa mudah diperoleh. Selain itu, biomassa juga tidak akan habis karena mengalami siklus daur ulang yang tidak berhenti. Biomassa dapat pula digunakan sebagai bahan bakar di dalam rumah atau bangunan berkonsep *eco-building*, yaitu bangunan ramah lingkungan yang menggunakan energi terbarukan.

Namun, seiring berjalannya waktu, tingkat modernitas masyarakat juga telah meningkat. Bahan bakar biomassa tidak lagi dapat digunakan dengan cara yang sama dengan masa lalu, terlebih untuk masyarakat urban perkotaan yang menuntut tingkat efisiensi dan kebersihan yang layak, selayaknya penggunaan minyak tanah atau LPG. Oleh karena itu, penggunaan biomassa sebagai bahan bakar harus disertai dengan kelayakan kompor yang mendukung tercapainya efisiensi tinggi mendekati kompor minyak tanah ataupun LPG, serta emisi dan residu padat yang kecil.

Pengembangan kompor biomassa untuk menanggulangi permasalahan efisiensi dan emisi ini telah banyak pula dilakukan, antara lain dengan pengembangan kompor biomassa berbasis ICS atau *Improved Cook Stove*. Bhattacharya dkk. pada tahun 2002 telah pula membandingkan tiga kompor biomassa dari tiga negara berbeda di Asia, yaitu Kompor Harsha dari India, Kompor tradisional dari Vietnam, dan Kompor RTFD dari Thailand. Perbandingan dilakukan terhadap beberapa parameter, yaitu kandungan air dalam bahan bakar (*moisture content*), ukuran bahan bakar (*fuel size*), ukuran lubang kompor (*pot size*), dan pengaruh metode pembakaran bahan bakar (*ignition method*). Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa *moisture content* dan *fuel size* dalam bahan bakar memberikan pengaruh paling besar dan paling banyak terhadap efisiensi maupun emisi yang dihasilkan kompor. Peningkatan *moisture content* akan menurunkan efisiensi kompor, meningkatkan emisi gas CO, menurunkan emisi gas NO<sub>x</sub>, dan menurunkan sedikit emisi gas CO<sub>2</sub>.

Selain itu, Messerer dkk. pada tahun 2007 menyatakan bahwa peningkatan efisiensi kompor dan pengurangan emisi dalam gas buang dapat dilakukan dengan mengembalikan panas yang terbawa dalam gas buang kembali ke dalam ruang pembakaran melalui aliran udara masuk (*heat recovery*). Hal ini dapat dilakukan dengan mengadopsi sistem *heat exchanger* pada aliran udara keluar dan aliran udara masuk. Dengan cara tersebut, diperoleh hasil bahwa jumlah panas yang dapat dikembalikan mencapai 70 – 85% dari total panas yang terbawa dalam gas buang. Selain itu, deposisi partikel dalam gas buang dapat mencapai 95%.

Berdasarkan kedua literatur di atas, dapat dirancang suatu desain kompor biomassa baru yang memanfaatkan panas gas buang untuk meningkatkan suhu

udara sebelum masuk ke ruang pembakaran. Pemanasan udara masuk ini pada akhirnya akan berfungsi juga untuk memanaskan bahan bakar, atau dengan kata lain dapat memenuhi proses awal dalam pembakaran biomassa, yaitu pemanasan dan penguapan kandungan air dalam bahan bakar. Selain itu, penggunaan bahan bakar untuk kompor ini juga diarahkan untuk bahan bakar berukuran kecil seperti pelet biomassa berbentuk silinder. Hal ini didasarkan pada hasil penelitian Bhattacharya dkk. bahwa semakin kecil ukuran bahan bakar, maka akan semakin kecil pula konsentrasi emisi gas buang yang dihasilkan dari pembakaran.

Selain itu, karena sasaran utama dari perancangan kompor ini adalah masyarakat urban di perkotaan, maka desain dari kompor biomassa ini harus semaksimal mungkin mendekati desain kompor-kompor yang sudah dikenal masyarakat luas seperti kompor gas atau minyak tanah, terutama dari bentuk fisik, aspek portabilitas, dan kemudahan *handling*. Integrasi sistem *knock-down* pada kompor diharapkan dapat menjadi jawaban untuk persoalan ini.

Pada akhirnya, hasil rancangan penelitian ini dimaksudkan juga untuk mengembangkan kompor biomassa yang sudah ada agar dapat menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi dan rendah emisi, sehingga tidak membahayakan kesehatan masyarakat dan lingkungan. Selain itu, hasil rancangan kompor ini juga diharapkan dapat digunakan untuk spesifikasi masyarakat urban di perkotaan, agar penggunaan bahan bakar biomassa sebagai pengganti bahan bakar fosil dapat menjangkau area masyarakat yang lebih luas.

Sementara itu, permasalahan deforestasi akibat penggunaan bahan bakar biomassa sejenis kayu dengan sendirinya dapat dikurangi dengan tingginya efisiensi termal kompor, sehingga penggunaan bahan bakar biomassa dapat lebih hemat. Namun, lebih baik lagi jika sumber bahan bakar biomassa yang digunakan berasal dari *waste biomass*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Perancangan kompor biomassa untuk masyarakat urban berbeda dengan kompor biomassa untuk masyarakat rural. Aspek kebersihan, kecepatan, kemudahan pengoperasian, serta portabilitas kompor harus diperhatikan. Oleh



karena itu, hasil rancangan kompor dalam penelitian ini harus semaksimal mungkin mendekati rancangan kompor berbahan bakar fosil yang selama ini menjadi pilihan utama masyarakat perkotaan. Selain itu, hasil rancangan kompor harus semaksimal mungkin memiliki efisiensi termal yang tinggi, sehingga dengan sendirinya kompor ini akan rendah emisi dan ramah lingkungan.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Perancangan kompor yang dilakukan dalam penelitian ini dimaksudkan untuk penggunaan dalam rumah tangga urban di perkotaan. Secara rinci, tujuan dari penelitian ini adalah:

- Menghasilkan desain kompor biomassa dengan efisiensi tinggi dan rendah emisi, serta portabilitas dan tingkat kenyamanan penggunaan yang layak untuk masyarakat perkotaan;
- Mengaplikasikan sistem *heat exchange counter current* pada cerobong asap keluaran kompor untuk *me-recover* panas yang terbawa dalam gas buang kompor.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan ruang lingkup yang akan dibahas adalah:

- Desain kompor dengan pemanfaatan panas gas buang untuk *pre heating* udara masuk dengan prinsip *heat recovery* pada cerobong yang dikonstruksi dengan mengadopsi sistem *heat exchanger*;
- Penggunaan bahan bakar biomassa berupa pelet berbentuk silinder dengan ukuran tinggi 2 cm dan diameter 0,8 cm, terbuat dari jenis *average hardwood* berupa kayu kamper;
- Uji kinerja kompor dengan menggunakan metode *water boiling test* untuk mengetahui efisiensi termal kompor, jumlah emisi CO, dan efektivitas sistem *heat recovery* pada cerobong.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan karya ilmiah ini disusun berdasarkan Pedoman Penulisan Karya Ilmiah yang diterbitkan oleh pihak universitas dan disesuaikan untuk penulisan skripsi mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik. Berikut urutan penulisan bab-bab dalam buku skripsi ini:

- Bab 1 Pendahuluan

Bab ini membahas penjelasan latar belakang, rumusan, tujuan, dan batasan masalah dalam penelitian yang dilakukan, serta sistematika penulisan hasil penelitian.

- Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas teori-teori dan studi pustaka yang mendukung dilakukannya penelitian, diantaranya dijelaskan mengenai definisi kompor biomassa, teori pengujian kinerja kompor, hingga aspek kesehatan dan lingkungan yang berkaitan erat dengan kompor biomassa.

- Bab 3 Metode Penelitian

Bab ini membahas langkah-langkah detil yang dilakukan selama penelitian berlangsung, mulai dari studi pustaka dalam pembuatan desain, tahap fabrikasi, hingga tahap pengujian kompor.

- Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini membahas hasil penelitian berupa data-data uji coba efisiensi dan emisi kompor, serta analisis setiap hasil pengolahan data sesuai dengan teori-teori yang ada.

- Bab 5 Kesimpulan

Bab ini mengemukakan simpulan dari hasil penelitian, mulai dari desain hingga analisis hasil uji coba kompor biomassa.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Definisi Kompor Biomassa

*Improved cookstove* (ICS) adalah sistem yang membakar bahan biomassa untuk memproduksi kalor melalui pembakaran, umumnya untuk penggunaan proses memasak domestik. ICS juga dapat melakukan hal-hal lain, tergantung dari tujuan perancangan sesuai dengan kebutuhan pemakai. Kompor seperti itu disebut *improved stove* (IS) yang dapat digunakan untuk banyak aplikasi seperti memasak, pengawetan makanan, pengeringan, pemanasan ruangan, serta untuk kegiatan sosial dan kultural (Barnes, 1994).

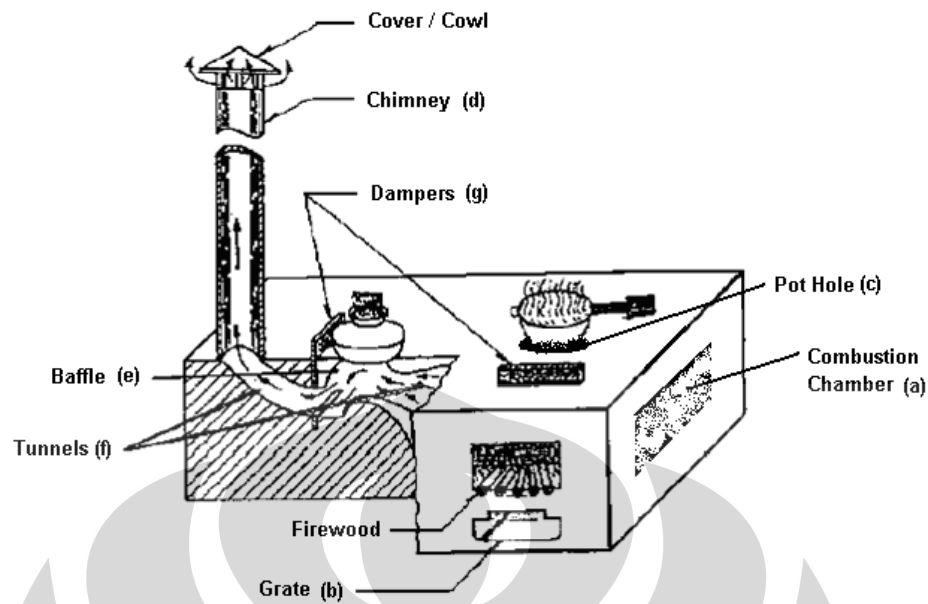
Bahan bakar biomassa (*biomass fuel*) adalah padatan biomassa dalam bentuk mentah (belum diproses), maupun jadi (sudah diproses). Hal ini termasuk bahan bakar kayu, arang, limbah pertanian, briket, dan lain-lain. Bahan bakar kayu lebih disukai untuk kompor masak domestik, namun pemakaian limbah dalam bentuk batang, daun-daun, dan bentuk granular meningkat akibat kelangkaan bahan bakar kayu. Setiap jenis biomassa memiliki sifat-sifat dan karakteristik pembakaran yang berbeda-beda.

Pembakaran (*combustion*) adalah proses interaksi bahan bakar dan udara secara kimia (reaksi) dengan temperatur tinggi. Proses pembakaran bergantung pada sifat fisika-kimia bahan bakar, kuantitas dan kondisi udara, serta kondisi lingkungan sekitar.

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses penyaluran panas yang dihasilkan dari pembakaran ke permukaan yang menyerap panas (Holman, 1981). Hanya sebagian dari panas yang dihasilkan dapat diterima oleh makanan dalam wadah pemasak, sisanya hilang melalui konduksi, konveksi, dan radiasi.

#### 1.1 2.2 Teknologi *Improved Cook Stove* (ICS)

Teknologi untuk fabrikasi sebuah ICS meliputi perancangan komponen-komponen kompor, serta bahan konstruksi kompor.



Gambar 2.1 Tampilan Isometrik Dhaula Dhar Chullah

Perancangan *ICS* menyangkut aplikasi perpindahan kalor, pembakaran, dan prinsip aliran fluida untuk memperoleh pembakaran sempurna dengan level udara berlebih yang minimal, perpindahan kalor maksimal dari api ke bejana masak, dan kalor hilang yang minimum. Seluruh kriteria tersebut dapat dicapai dengan mengoptimalkan dan menambahkan beberapa subsistem berikut.

- **Ruang pembakaran**

Ruang pembakaran merupakan komponen utama kompor tempat terjadinya pembakaran. Rancangan ruang pembakaran berdasarkan daya keluaran rata-rata  $P_{av}$  kompor dalam kW, dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{av} = \frac{\Sigma \Delta m_f \times H_c}{t_T} \quad (2.1)$$

dengan  $\Sigma \Delta m_f$  adalah jumlah total pengisian mandiri kayu selama percobaan,  $H_c$  nilai kalorifrik bersih dari bahan bakar, dan  $t_T$  total waktu pembakaran.

Ruang pembakaran dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu ruang pembakaran kayu dan ruang pembakaran zat volatil. Tinggi dan luas penampang seksi pembakaran kayu dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$h_{cc} = C_2 \times P^{1.4} \quad (2.2)$$

dengan  $P$  adalah daya keluaran, dan  $C_2$  adalah konstanta. Untuk kompor tanpa *grate*, nilai konstanta ini adalah  $75 \text{ mm kW}^{1.4}$ , dan untuk kompor dengan *grate* garangan bernilai  $110 \text{ mm kW}^{1.4}$ .

Tinggi api dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$h_{fl} = \frac{\Delta M_f}{\rho_b \times A_g} \text{ cm} \quad (2.3)$$

dengan  $\Delta M_f$  adalah masukan bahan bakar (g),  $\rho_b$  densitas bahan bakar ( $\text{g/cm}^3$ ),  $A_g$  adalah luas *grate* ( $\text{cm}^2$ ) luas penampang .

Waktu yang diperlukan untuk memasak dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$t_b = 550 \times M_f^{0.38} \quad (2.4)$$

dengan  $t_b$  adalah waktu memasak, dan  $M_f$  adalah massa makanan yang dimasak.

- **Garangan (*Grate*)**

Garangan pada kompor dapat meningkatkan efisiensi pembakaran, karena udara dapat terdistribusi dengan lebih merata ke bagian bawah bahan bakar sebagai hasil dari pencampuran udara dengan zat volatil. Hal ini meningkatkan laju pembakaran dengan api yang tetap, maka mengurangi panas yang hilang ke dinding, sebab api hampir tidak menyentuh dinding. Udara juga menjadi panas dahulu sebelum masuk ke ruang pembakaran. Garangan juga dapat mengurangi panas yang hilang lewat konduksi oleh bahan bakar, dan juga mengurangi pembentukan arang. Pembentukan gas  $CO$  dan hilangnya zat volatil yang tak terbakar juga turut berkurang.

Diameter garangan ditentukan oleh intensitas pembakaran atau power flux. Rumus yang dapat digunakan adalah:

$$A_g = \frac{P}{p} 1000 \text{ cm}^2 \quad (2.5)$$

dengan  $p = 40 \text{ W/cm}^2$  untuk kompor dengan cerobong asap (*chimney*), dan  $p = 20 \text{ W/cm}^2$  untuk kompor tanpa cerobong asap (*chimney*).

- **Lubang panci (*Pot Hole*)**

Lingkaran lubang harus dirancang sedemikian rupa sehingga gas keluaran tidak keluar melewati celah-celah bawah panci, melainkan melewati cerobong. Lubang yang memiliki pinggiran yang meruncing ke luar dapat mencegah keluarnya gas tersebut, dan juga dapat menyesuaikan berbagai diameter panci.

Ukuran panci memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi kompor. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa setiap ukuran panci membutuhkan desain kompor yang berbeda. Secara umum, ukuran panci terbagi tiga, yaitu ukuran kecil, sedang, dan besar.

Tabel berikut ini menunjukkan perbandingan keuntungan dan kerugian desain antara *single-pot* dan *double-pot*.

**Tabel 2.1 Perbandingan Keuntungan dan Kerugian Desain Kompor Berdasarkan Jumlah Lubang (Pot)**

Desain	Keuntungan	Kerugian
<i>Double-pot</i> dengan satu sistem perapian	Efisiensi termodinamika lebih tinggi	Tidak fleksibel
	Lebih mudah dalam pengaturan api	Strukturnya berat
	Waktu memasak lebih sedikit	Lebih sulit dipasarkan
<i>Single-pan</i>	Lebih fleksibel	Efisiensi termodinamika lebih kecil
	Struktur lebih ringan	
	Lebih mudah dipasarkan	

Secara umum, kompor *double-pot* yang dikombinasikan dengan *single-pan* ataupun kompor minyak tanah adalah alat yang akan berkembang di masa depan.

- **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:

**Universitas Indonesia**

- 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.

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

- **Sambungan (*Connecting Tunnels*)**

Pada kompor multi-pot, diperlukan ‘terowongan’ yang menyambungkan ruang-ruang dalam kompor. Bentuk umumnya adalah silindris, bentuknya bisa mengecil dan juga melebar.

- **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.

### 2.3 Prinsip Perancangan ICS

Performansi termal sebuah sistem *ICS* bergantung pada efisiensi dari konversi panas (konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi termal), efisiensi energi termal yang dapat ditransfer ke bejana masak (sistem dimana produk pembakaran berpindah dalam *ICS*), dan jenis-jenis bahan konstruksi kompor. Perancang harus mengerti interaksi pada tiap proses, seperti pembakaran

dan perpindahan panas yang terjadi dalam kompor, serta bagaimana konstruksi kompor mempengaruhi faktor-faktor tersebut (Bryden M, 2002).

### 2.3.1 Proses Pembakaran

Proses pembakaran bergantung dari sifat fisika-kimia bahan bakar (ukuran, bentuk, densitas, *moisture content*, *fixed carbon content*, bahan volatil, dan lain-lain), kuantitas dan mode penyediaan udara (udara primer dan sekunder), dan kondisi lingkungan sekitar (temperatur, angin, humiditas, dan lain-lain).

### 2.3.2 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.

- **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 (J. P. Holman, 1981). Pada logam, panas terkonduksi pula lewat gerakan elektron bebas berkecepatan tinggi dari area bersuhu tinggi ke area bersuhu rendah. Dari Gambar 2.1, terlihat bahwa konduksi terjadi antara lain dari panci ke isi panci, panas yang hilang lewat dinding, dari api ke dalam kayu, penyimpanan panas dalam kayu, panci, isinya, dan badan kompor.

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

$$q = -\frac{k \times A \times \Delta T}{\Delta x} \quad (2.6)$$

Dengan  $q$  adalah laju perpindahan panas,  $k$  konduktivitas termal,  $A$  luas permukaan,  $\Delta x$  ketebalan permukaan tempat terjadinya konduksi, dan  $\Delta T$



perbedaan suhu permukaan dingin dan panas.  $\Delta x/kA$  disebut 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:

$$q = \frac{A \times \Delta T}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.7)$$

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

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa kompor besar membutuhkan waktu yang lebih lama untuk memanaskan, sedangkan 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.

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°C. Perubahan jumlah total kalor yang disimpan  $\Delta Q$  dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (2.8)$$

dengan  $c_p$  adalah kalor spesifik dari bahan kompor.

- **Radiasi**

Dalam aktivitas memasak, daerah terjadinya radiasi adalah dari api ke dinding dalam, panci, dan kayu, serta dari dinding, panci, cerobong, dan bukaan kotak api, ke atmosfer.

Energi dalam bentuk radiasi dapat diemisikan oleh tiap benda yang memiliki temperatur di atas absolut. Radiasi yang teremisikan memiliki intensitas maksimum pada panjang gelombang yang dirumuskan oleh Hukum Wien, dengan  $T$  adalah temperatur absolut:

$$\text{Maximum wavelength} = \frac{2897,8}{T} \text{ microns} \quad (2.9)$$

Laju perpindahan kalor radiasi dirumuskan dengan persamaan Hukum Stefan-Boltzman untuk benda hitam:

$$q = \sigma \times A \times T^4 \quad (2.10)$$

dengan  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzman, bernilai  $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ,  $A$  luas emisi benda (dalam  $\text{m}^2$ ), dan  $T$  temperatur (dalam K).

Modifikasi rumus (2.5) dengan mempertimbangkan emisivitas bahan  $E_m$  (bernilai dari 0 hingga 1) adalah:

$$q = E_m \times \sigma \times A \times T^4 \quad (2.11)$$

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 mengemisikan dengan permukaan yang menyerap.  $VF$  merupakan fraksi dari energi teremisikan dari suatu permukaan yang ditahan oleh permukaan kedua. Hal ini dideterminasi oleh geometri relatif kedua permukaan.

Energi yang ditangkap (*intercepted*) oleh panci dapat dihitung:

$$\text{Energy intercepted by pot} = \text{Power emitted by the firebed} \times A \times VF \quad (2.12)$$

Perpindahan kalor radiasi dari dasar api (*firebed*) sebuah kompor dapat ditingkatkan dengan menaikkan suhu 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.

- **Konveksi**

Perpindahan kalor konveksi adalah perpindahan kalor oleh sirkulasi fluida (cair atau gas), dilanjutkan dengan konduksi antara fluida panas dengan bahan. Konveksi dapat dibedakan menjadi konveksi alami dan paksa. Konveksi alami disebabkan oleh daya apung (*bouyance force*) yang dihasilkan oleh perbedaan temperatur, sedangkan konveksi paksa disebabkan oleh udara paksa dari *blower*, *fan*, atau kondisi berangin (J. P. Holman, 1981).

Pada kompor, daerah terjadinya perpindahan kalor konveksi adalah *plume* gas panas dari api, titik stagnasi dari *plume* ke panci, aliran panas dari dasar dan/atau dinding panci, aliran melewati *tunnel*, cerobong, sekat, dan celah antara panci dan dinding, serta permukaan panas luar dari panci, kompor, dan cerobong. Konveksi merupakan perpindahan kalor utama yang terjadi pada kompor. Gas panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar, berkonveksi untuk memanaskan panci.

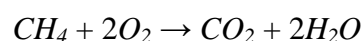
Rumus umum konveksi adalah:

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (2.13)$$

dengan  $q$  panas yang dipindahkan dari gas panas ke permukaan panci atau dinding.  $A$  luas permukaan dimana aliran panas terjadi,  $h$  koefisien perpindahan kalor konveksi, dan  $\Delta T$  perbedaan temperatur antara gas panas dengan permukaan padat.

## 2.4 Teori Pembakaran

Pembakaran atau *combustion* adalah suatu urutan kompleks reaksi kimia yang bersifat eksotermik antara bahan bakar dan oksidan yang disertai oleh produksi panas, cahaya, atau keduanya. Dalam satu reaksi pembakaran lengkap, satu campuran bereaksi dengan satu elemen pengoksidasi, seperti oksigen atau fluorin, dan produknya adalah campuran dari setiap elemen dalam bahan bakar dengan elemen oksidasi. Sebagai contoh:



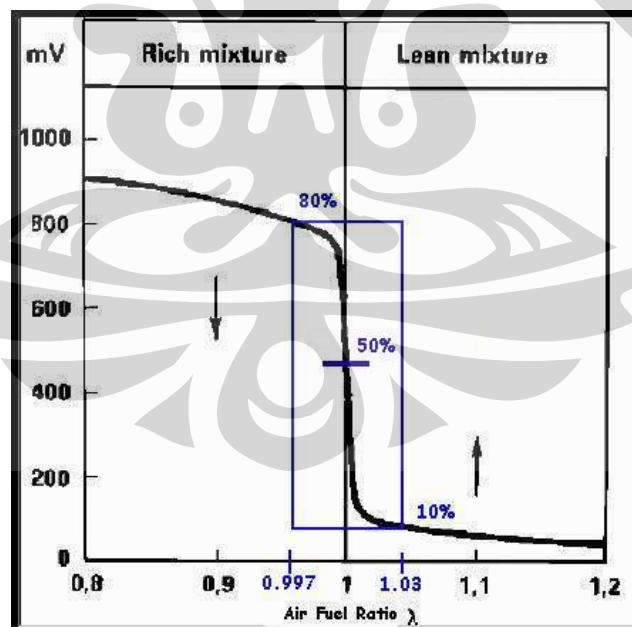
Penggunaan oksigen ( $O_2$ ) sebagai oksidan diperoleh dari udara dan hasil gas buang pembakaran juga akan berisi nitrogen:



Pada kenyataannya, proses pembakaran tidak pernah sempurna atau lengkap. Dalam gas buang dari hasil pembakaran karbon (seperti di pembakaran batubara) atau campuran karbon (seperti pembakaran hidrokarbon, kayu dan lain-lain.), kedua karbon yang tidak terbakar (sebagai jelaga) dan campuran karbon ( $CO$  dan hal lainnya) akan timbul. Juga, ketika udara adalah oksidan, beberapa gas nitrogen akan berubah menjadi berbagai oksida nitrogen ( $NO_x$ ).

#### 2.4.1 Rasio Udara terhadap Bahan Bakar

Perbandingan udara dengan bahan bakar (*Air Fuel Ratio* - *AFR*) adalah perbandingan massa udara dari bahan bakar yang digunakan selama pembakaran. Ketika seluruh bahan bakar digabungkan dengan oksigen bebas, secara tipikal di dalam ruang pembakaran, campuran seimbang secara kimiawi dan disebut campuran stoikiometrik.



Gambar 2.2 Perbandingan Udara terhadap Bahan Bakar

*AFR* adalah parameter penting untuk anti-polusi dan alasan penyetulan kinerja. Lamda ( $\lambda$ ) adalah satu cara alternatif untuk merepresentasikan *AFR*:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{stoich}} \quad (2.14)$$

$\lambda$  bernilai 1 berarti berada pada kondisi stoikiometri. Campuran kaya udara memiliki nilai  $\lambda$  lebih dari 1, dan campuran kurang udara memiliki nilai  $\lambda$  kurang dari 1. Campuran kaya udara menghasilkan gas pembakaran lebih dingin dibandingkan campuran stoikiometrik, terutama karena berlebihnya oksigen yang tidak dikonsumsi dan gas nitrogen yang terikut. Campuran kurang udara juga menghasilkan gas pembakaran yang lebih dingin dibandingkan campuran stoikiometrik, terutama sehubungan dengan jumlah karbon berlebihan sehingga membentuk  $CO$ . Reaksi oksidasi karbon untuk membentuk  $CO$  secara signifikan lebih sedikit melepaskan panas dibandingkan reaksi serupa untuk membentuk  $CO_2$ .  $CO$  mempertahankan energi kimia yang potensial. Campuran untuk efisiensi terbaik adalah sedikit berbeda dari campuran stoikiometrik.

#### 2.4.2 Temperatur Nyala

Efisiensi termodinamika pembakaran adalah  $(T_2 - T_1)/T_1$ , dengan  $T_2$  adalah temperatur tertinggi dari api, dan  $T_1$  adalah suhu keluaran gas. Temperatur nyala teoretis (TFT= *theoretical flame temperature*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$TFT = \frac{\text{sensible heat in fuel and air} + \text{heat of combustion}}{\text{total quantities of combustion products} \times \text{mean specific heat}} \quad (2.15)$$

#### 2.4.3 Pembakaran Biomassa

Prinsip pembakaran bahan bakar sejatinya adalah reaksi kimia bahan bakar dengan oksigen (O). Kebanyakan bahan bakar mengandung unsur Karbon (C), Hidrogen (H) dan Belerang (S). Akan tetapi yang memiliki kontribusi yang penting terhadap energi yang dilepaskan adalah C dan H. Masing-masing bahan bakar mempunyai kandungan unsur C dan H yang berbeda-beda.

Proses pembakaran terdiri dari dua jenis yaitu pembakaran lengkap (*complete combustion*) dan pembakaran tidak lengkap (*incomplete combustion*). Pembakaran sempurna terjadi apabila seluruh unsur C yang bereaksi dengan oksigen hanya akan menghasilkan  $CO_2$ , seluruh unsur H menghasilkan  $H_2O$  dan seluruh S menghasilkan  $SO_2$ . Sedangkan pembakaran tak sempurna terjadi apabila seluruh unsur C yang dikandung dalam bahan bakar bereaksi dengan oksigen dan

gas yang dihasilkan tidak seluruhnya CO<sub>2</sub>. Keberadaan CO pada hasil pembakaran menunjukkan bahwa pembakaran berlangsung secara tidak lengkap.

Jumlah energi yang dilepaskan pada proses pembakaran dinyatakan sebagai entalpi pembakaran yang merupakan beda entalpi antara produk dan reaktan dari proses pembakaran sempurna. Entalpi pembakaran ini dapat dinyatakan sebagai *Higher Heating Value* (HHV) atau *Lower Heating Value* (LHV). HHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam wujud cair sedangkan LHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam bentuk uap.

Pada umumnya pembakaran tidak menggunakan oksigen murni melainkan memanfaatkan oksigen yang ada di udara. Jumlah udara minimum yang diperlukan untuk menghasilkan pembakaran lengkap disebut sebagai jumlah udara teoritis (atau stoikiometrik). Akan tetapi pada kenyataannya untuk pembakaran lengkap udara yang dibutuhkan melebihi jumlah udara teoritis. Kelebihan udara dari jumlah udara teoritis disebut sebagai *excess air* yang umumnya dinyatakan dalam persen. Parameter yang sering digunakan untuk mengkuantifikasi jumlah udara dan bahan bakar pada proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar. Apabila pembakaran lengkap terjadi ketika jumlah udara sama dengan jumlah udara teoritis maka pembakaran disebut sebagai pembakaran sempurna.

Pembakaran bahan biomassa terdiri dari 4 tahapan, yaitu:

- **Tahap I: Pemanasan dan Pengeringan**

Saat api menyala dan mulai memberikan panas, kandungan air dalam bahan bakar diuapkan hingga suhu mencapai 100°C.

- **Tahap II: Devolatilisasi**

Saat bahan bakar mencapai suhu antara 200°C dan 350°C, gas volatil (komponen karbon, hidrogen, dan oksigen) mulai terlepas.

- **Tahap III: Pembakaran zat volatil**

Gas-gas volatil bercampur dengan oksigen dan terbakar pada suhu sekitar 450°C dengan nyala berwarna kekuningan dan meradiasikan panas. Sebagian dari panas ini kembali diserap oleh bahan bakar untuk melepaskan lebih banyak lagi

gas volatil. Proses ini terus berlanjut sampai seluruh zat volatil terlepas dari bahan bakar.

Gas-gas volatil membutuhkan panas, oksigen, ruang, dan waktu yang cukup untuk dapat terbakar. Jika salah satu dari keempat tersebut tidak terpenuhi, maka zat volatil akan meninggalkan ruang pembakaran tanpa terbakar terlebih dahulu. Selanjutnya pembakaran menjadi tidak sempurna dan tidak efisien, api akan berasap dan cepat mati.

Zat volatil dan oksigen akan lebih banyak tercampur jika aliran udara yang masuk ruang pembakaran bersifat turbulen. Saat seluruh zat volatil terlepas, yang tertinggal hanyalah arang.

- **Tahap IV: Pembakaran Arang**

Arang terbakar (teroksidasi) pada kondisi cukup oksigen dan suhu sekitar 800°C. Karbon monoksida diproduksi dan bereaksi dengan oksigen menghasilkan karbon dioksida. Arang biasanya akan terus terbakar dalam waktu lama. Jika oksigen tidak mencukupi, maka karbon monoksida yang diproduksi akan langsung terlepas sebagai zat berbahaya, terutama di ruang tertutup.

## 2.5 Pengujian Efisiensi Termal (Metode *Water Boiling Test*)

Metode *Water Boiling Test* (WBT) yang dikembangkan oleh *Volunteers in Technical Assistance* (VITA), sebuah lembaga di Amerika Serikat. Metode ini sangat sederhana dan mudah diaplikasikan serta data yang dibutuhkan juga relatif sedikit, tetapi menunjukkan hasil yang relatif akurat.

Secara umum, WBT dilakukan dalam dua tahap, yaitu:

- **Tahap I: *Cold Start***

Pada tahap awal ini, penguji menggunakan kompor pada suhu ruang dan sejumlah bahan bakar untuk mendidihkan sejumlah air dalam sebuah panci standar. Kemudian, penguji mengganti panci berisi air mendidih tersebut dengan panci baru yang berisi air dingin untuk melanjutkan pengujian tahap selanjutnya.

- **Tahap II: Hot Start**

Pada tahap ini, air dididihkan dengan kompor yang telah panas dengan tujuan untuk mengidentifikasi perbedaan daya guna kompor saat dingin dan saat panas.

Kombinasi dari kedua tahap pengujian ini dilakukan untuk mengukur daya guna kompor, yang merupakan salah satu indikator penting untuk mengetahui kemampuan kompor dalam mengonversi bahan bakar.

Metode WBT memberikan beberapa besaran yang dapat digunakan untuk mengevaluasi daya guna kompor, seperti efisiensi, waktu untuk mendidihkan, laju pembakaran, kekuatan api, rasio penurunan (rasio kompor dengan *high power* terhadap *low power*), serta konsumsi bahan bakar spesifik (rasio bahan bakar yang terpakai terhadap air yang dididihkan). Dalam metode ini, kalor laten penguapan air sudah termasuk dalam besar energi yang terpakai, sehingga efisiensi kompor dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\eta = \frac{(m_w \times c_{p,w} \times \Delta T) + (\Delta m_{ev} \times H_{ev})}{(m_f \times h_f)} \quad (2.16)$$




dengan subscripts *w*, *e*, *f*, dan *c* menunjukkan *water*, *evaporation*, *fuel*, dan *charcoal*.



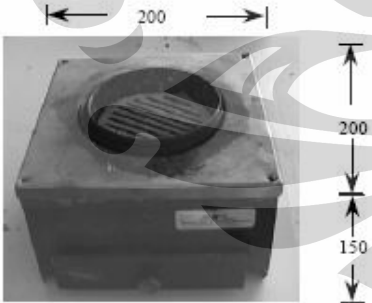
## 2.6 Perbandingan Kompor – kompor Biomassa

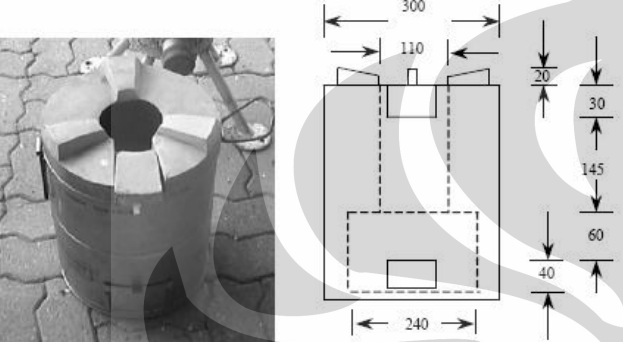
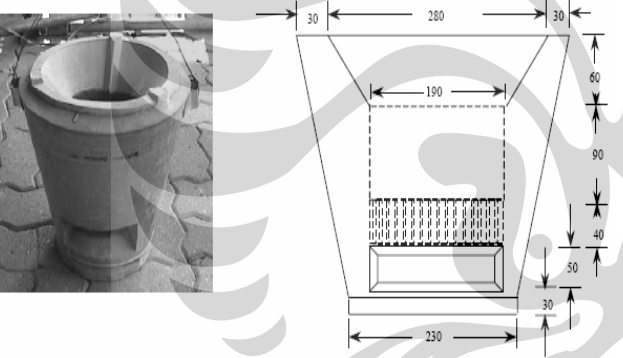
Berikut ini beberapa jenis kompor yang telah digunakan di beberapa daerah di dunia, antara lain *three-stone fire*, *rocket stove*, *Karve gasifier stove*, *Phillips fan stove*, *charcoal jiko*, *QB Philippine stove*, *Vietnamese improved stove*, *traditional Lao-improved stove*, *general 2 pot metal stove with chimney*, dan *Himachal-Pradesh improved metal stove*.

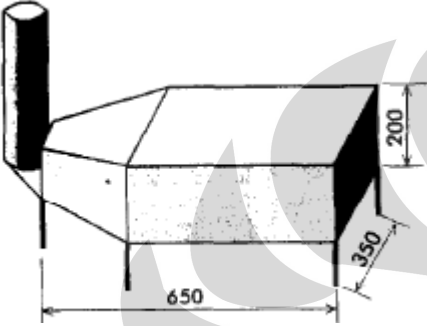
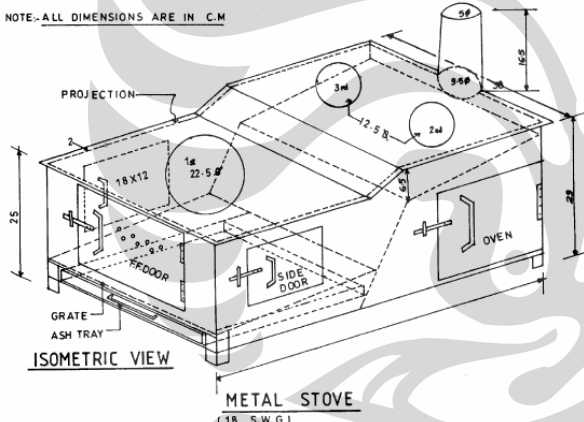


Tabel 2.2 Perbandingan 10 Kompor Biomassa yang Telah Dikembangkan

No	Peneliti/ Tahun	Desain Kompor	Deskripsi	Efisiensi/ Waktu mendidih	Emisi (g/kg bahan bakar)
1	MacCarty/ 2008	 <p><b>Gambar 2.3 Three-stone Fire</b></p>	<p>Pembakaran terbuka dengan menggunakan tiga buah batu yang disusun sebagai penyangga wadah masak. Tinggi: 22 cm Lebar: 25 cm</p>	11,6-16,8%/ 18-25 min	<p>CO: 12,9-18 TSPs: 0,65-1,08 SO<sub>x</sub>: 0,03-0,09 CO/CO<sub>2</sub>: 1,08-1,56</p>
2	MacCarty/ 2008	 <p><b>Gambar 2.4 Rocket Stove</b></p>	<p>Diameter: 10 cm Tinggi: 30 cm</p>	26%-32%/ 15-20 min	<p>CO/CO<sub>2</sub>: 1,74-3,24 TNMOC/CO<sub>2</sub>: 0,08-0,22 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>: 0,07-0,08</p>
3	MacCarty/ 2008	 <p><b>Gambar 2.5 Karve Gasifier Stove</b></p>	<p>Ruang pembakaran diisi dengan potongan-potongan kayu sepanjang 5 cm yang dimasukkan melalui bagian atas kompor; Udara sekunder masuk melalui bagian atas ruang pembakaran.</p>	25-30 min	<p>CO/CO<sub>2</sub>: 2,95-4,98 TNMOC/CO<sub>2</sub>: 0,57-0,67 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>: 0,04-0,06</p>

4	MacCarty/ 2008	 <p><b>Gambar 2.6 Phillips Fan Stove</b></p>	<p>Masukan udara dengan laju yang cepat dapat membentuk percampuran antara api, gas-gas, dan udara, yang lebih baik; Bahan bakar berupa potongan kayu sepanjang 5 cm dimasukkan melalui bagian atas kompor; Kipas berputar dengan kecepatan tinggi baik untuk daya yang tinggi maupun rendah.</p>	8-15 min	<p>CO/CO<sub>2</sub>: 0,36 TNMOC/CO<sub>2</sub>: 0,05-0,37 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>: 0,06</p>
5	MacCarty/ 2008	 <p><b>Gambar 2.7 Charcoal Jiko</b></p>	<p>Potongan-potongan <i>charcoal</i> dibakar di dalam ruang pembakaran berbentuk seperti mangkok; Terdapat lubang-lubang yang mengalirkan udara masuk ke ruang tepat di bawah bahan bakar.</p>	27-30 min	<p>CO/CO<sub>2</sub>: 20,60-35,46 TNMOC/CO<sub>2</sub>: 1,29 NO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub>: 0,05-0,07</p>
6	Bhattacharya/ 2002	 <p><b>Gambar 2.8 QB Philippine Stove</b></p>	<p>Memiliki berat 5.8 kg; Terbuat dari lembaran logam, dapat membakar kayu dan arang; Panas dalam kompor dapat diatur dengan memanipulasi <i>ash pan</i>; Memiliki garangan yang dapat dipisahkan.</p>	16%-24,7%/ 13-19 min	<p>CO: 32,7-54,4 TSPs: 0,46-1,12 SO<sub>x</sub>: 0,5-0,8 CO/CO<sub>2</sub>: 3,64-7,6</p>

7	Bhattacharya/ 2002	 <p><b>Gambar 2.9 Vietnamese Improved Stove</b></p>	<p>Diplester dengan semen hingga berbobot 12 kg lalu dilapisi besi; menggunakan <i>metal grate</i>.</p>	<p>17,2%-17,8%/ 16-18,5 min</p>	<p>CO: 38,6-55,2 TNMOC: 6,8-12,01 NO<sub>x</sub>: 0,051-0,073 CO<sub>2</sub>: 1547-1608</p>
8	Bhattacharya/ 2002	 <p><b>Gambar 2.10 Traditional Lao-improved Stove</b></p>	<p>Diplester dengan semen hingga berbobot 12 kg; memiliki <i>grate</i>; dapat menggunakan pelet atau batubara sebagai bahan bakar.</p>	<p>17,8%-18%/ 17,5-19 min</p>	<p>CO: 19,7-55,8 TNMOC: 8,88-10,04 NO<sub>x</sub>: 0,082-0,113 CO<sub>2</sub>: 1572-1605</p>

9	Tremer/ 1996	 <p style="text-align: center;"><b>Gambar 2.11 General 2 Pot Metal Stove</b></p>	<p>Berbahan insulasi keramik yang dilapisi besi luar dan dalam; adanya pemakaian <i>flue gas</i> untuk pemanasan pada lubang kedua.</p>	<p>18,1%-26,2%/ 19-25 min</p>	<p>CO: 20,1-37,5 TSPs: 0,34-0,61 SO<sub>x</sub>: 0,14-0,33 CO/CO<sub>2</sub>: 1,48-2,42</p>
10	Aggarwal/ 2004	<p>NOTE:- ALL DIMENSIONS ARE IN C.M</p>  <p style="text-align: center;"><b>Gambar 2.12 Himachal-Pradesh Stove</b></p>	<p>Garangan disediakan di bawah kotak api dengan lubang-lubang kecil berukuran sama untuk sirkulasi udara. Terdapat piringan di bawah garangan, yang berguna untuk menarik abu untuk dibuang.</p>	<p>24,97%/ <i>nd</i></p>	<p>CO: <i>nd</i> TNMOC: <i>nd</i> NO<sub>x</sub>: <i>nd</i> CO<sub>2</sub>: <i>nd</i></p>

Keterangan: *nd* = no data

TNMOC = Total Non Methane Organic Compound

TSP = Total Suspended Particle

## 2.7 Aspek Lingkungan dan Kesehatan

Aktivitas memasak dengan bahan bakar padat seperti kayu, kotoran hewan, batu bara, atau limbah pertanian dengan menggunakan kompor tanpa cerobong dapat mengakibatkan polusi udara dalam ruang (*Indoor Air Pollution*). WHO menyatakan bahwa IAP menempati peringkat ke-8 dari faktor yang paling berpengaruh dalam menyebabkan penyakit, terutama untuk *Acute Respiratory Infections* (ARI), seperti bronchitis dan pneumonia. Setiap tahun, IAP berisiko mengakibatkan kematian 1,6 juta orang (satu kematian setiap 20 detik).

Terdapat beberapa fakta yang menyatakan bahwa paparan IAP dapat menyebabkan *Acute Lower Respiratory Infections* (ALRI) terhadap anak balita, serta penyakit paru-paru kronis dan kanker paru-paru terhadap orang dewasa.

Banyaknya orang yang dapat terpapar IAP ditentukan oleh besarnya konsentrasi polutan dalam ruang (terutama ditentukan oleh jenis bahan bakar dan jenis kompor yang digunakan, serta lokasi dapur) dan yang paling penting adalah waktu yang dihabiskan seseorang dalam ruang yang terpapar IAP.

Asap dalam ruang mengandung berbagai macam polutan yang dapat merugikan kesehatan, yaitu:

- Partikel (campuran berbagai senyawa kimia kompleks dalam bentuk padatan);
- Karbon monoksida (CO);
- Nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>);
- Sulfur oksida (SO<sub>x</sub>);
- Formaldehida;
- Zat karsinogenik, seperti benzo[a]pyrena dan benzena.

Partikel kecil dengan diameter 10 mikron (PM10) atau kurang dapat masuk dan mengendap ke dalam paru-paru dan memiliki potensi merusak kesehatan yang sangat besar.

Penelitian di Asia, Afrika, dan Amerika, menunjukkan bahwa IAP dalam rumah tangga yang menggunakan bahan bakar biomassa atau batu bara memiliki level yang cukup tinggi, sebagai contoh, dalam 24 jam rumah yang menggunakan bahan bakar biomassa rata-rata menghasilkan PM10 sekitar 1000 µg/m<sup>3</sup>, melebihi

batas regulasi *United States Environmental Protection Agency* yang menetapkan batas konsentrasi PM10 sebesar  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi PM10 sebesar itu secara umum melebihi seluruh batas regulasi yang resmi.

Umumnya, wanita memiliki risiko terbesar untuk terpapar IAP dalam level tinggi karena mereka menghabiskan waktu 3 sampai 7 jam per hari di dapur sepanjang tahun. Anak-anak kecil seringkali mengikuti ibunya di dapur, sehingga mereka juga menghirup asap selama berjam-jam sepanjang masa pertumbuhan mereka.

Berikut ini beberapa penyakit yang dapat disebabkan oleh paparan IAP:

- ***Acute Lower Respiratory Infections (ALRI)***

Terdapat beberapa fakta bahwa pemaparan asap dari pembakaran biomassa meningkatkan risiko ALRI terhadap anak-anak, terutama pneumonia. Secara umum, ALRI merupakan satu-satunya penyebab kematian terbesar pada anak-anak di bawah lima tahun dan tercatat bahwa setiap tahunnya terjadi kematian paling sedikit 2 juta jiwa pada usia ini.

- **Penyakit Paru-paru Kronis (COPD)**

IAP termasuk salah satu faktor yang menyebabkan penyakit bronkhitis (CB) dan paru-paru kronis (COPD). Hubungan antara pemaparan asap hasil pembakaran biomassa dan CB/COPD terutama sekali ditemukan pada wanita.

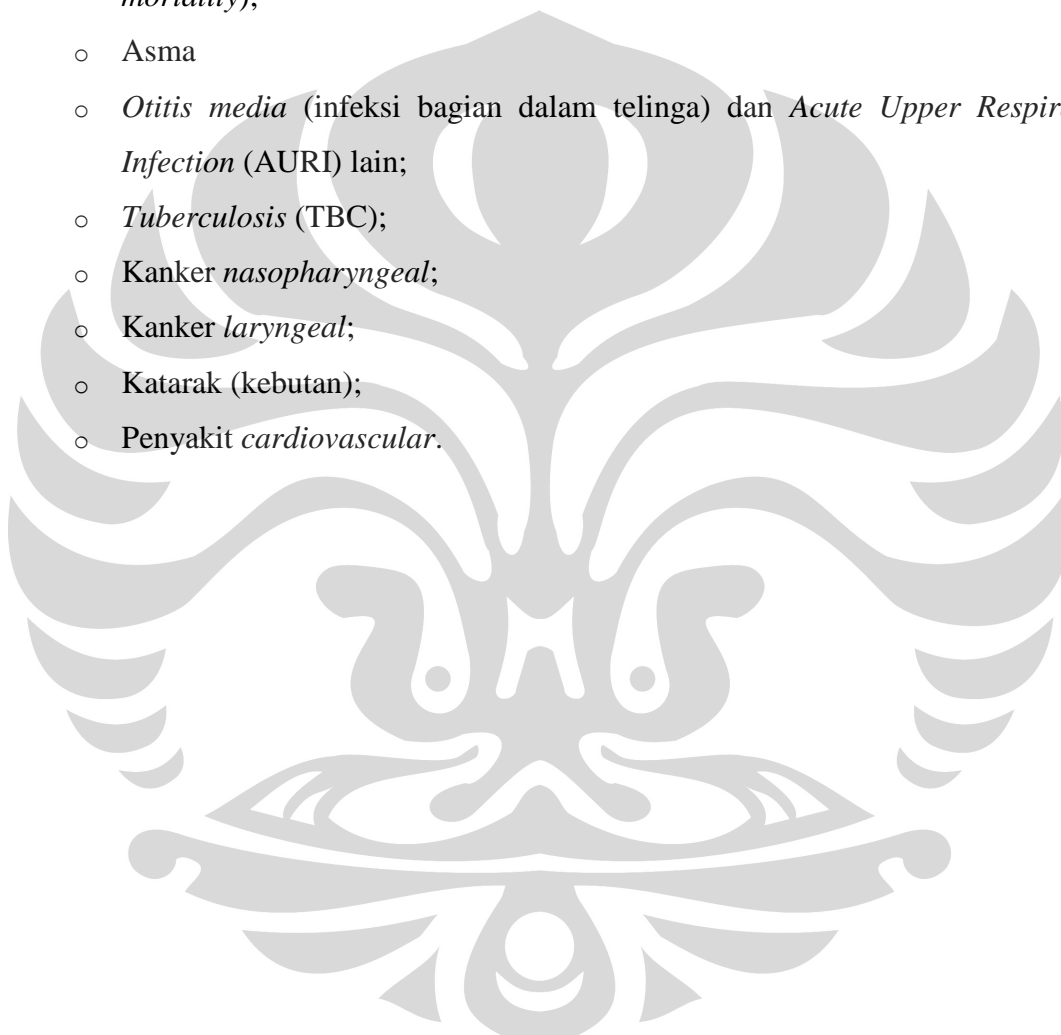
- **Kanker Paru-paru**

Asap hasil pembakaran biomassa maupun batu bara mengandung sejumlah zat karsinogenik yang dapat menyebabkan kanker. Telah terbukti bahwa wanita yang terpapar asap pembakaran biomassa ataupun batu bara dalam rumah mengalami peningkatan risiko terhadap kanker paru-paru.

- **Risiko Kesehatan Lain**

IAP di negara berkembang dapat pula meningkatkan risiko gangguan kesehatan terhadap anak-anak maupun dewasa, seperti:

- *Low birthweight* dan kematian pada minggu pertama kelahiran (*perinatal mortality*);
- Asma
- *Otitis media* (infeksi bagian dalam telinga) dan *Acute Upper Respiratory Infection* (AURI) lain;
- *Tuberculosis* (TBC);
- Kanker *nasopharyngeal*;
- Kanker *laryngeal*;
- Katarak (kebutan);
- Penyakit *cardiovascular*.

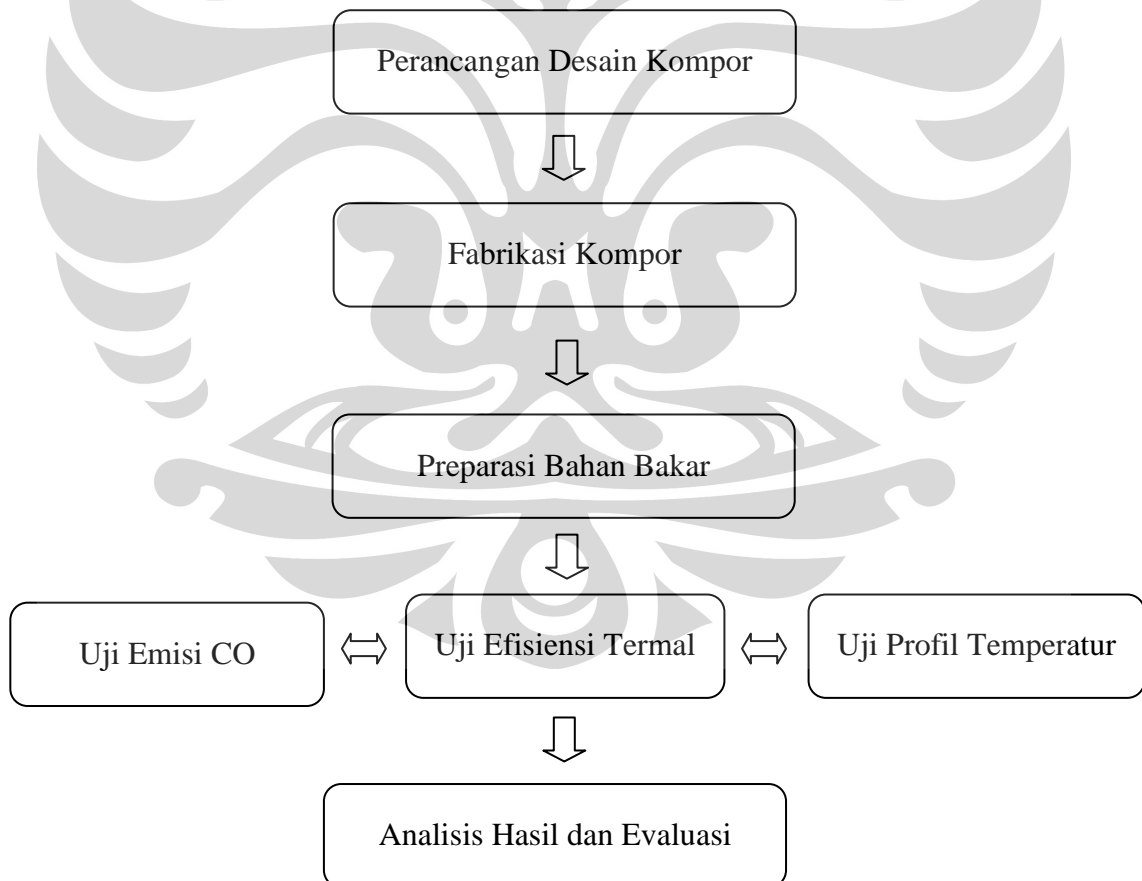


## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimulai dengan tahap pra-penelitian yaitu melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan kompor biomassa. Lalu, penelitian utamanya menyangkut tiga hal, yaitu perancangan, fabrikasi, dan pengujian. Adapun hal-hal yang diuji meliputi emisi gas buang kompor, efisiensi termal kompor, dan efektivitas system *knock-down* yang diaplikasikan pada kompor. Setelah itu, dilakukan analisa dan evaluasi hasil penelitian, dan terakhir adalah kesimpulan.

Berikut diagram alir penelitian yang akan dilakukan:



**Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian**



### 3.2 Tahap Perancangan Kompor

Perancangan kompor akan disesuaikan dengan objektif-objektif yang ingin dicapai dengan adanya kompor biomassa dan difokuskan pada perhitungan ukuran komponen-komponen kompor sesuai teori yang ada untuk mendapatkan efisiensi termal yang tinggi. Prosedur umum perancangan kompor adalah sebagai berikut:

1. Menghitung kebutuhan luas penampang dan tinggi cerobong, baik untuk pipa *fuel gas* maupun pipa udara masuk;
2. Menghitung tinggi ruang pembakaran bagian api, kemudian menyesuaikannya untuk perhitungan tinggi ruang pembakaran total dengan memperhitungkan perkiraan tinggi tumpukan bahan bakar pelet;
3. Mencari data diameter panci yang biasa digunakan di rumah tangga untuk kebutuhan masak sehari-hari, kemudian menyesuaikannya untuk penentuan diameter ruang pembakaran;
4. Menentukan bentuk dan dimensi badan kompor sesuai dengan komponen lain serta menyesuaikan dengan bahan insulasi yang akan dipakai di antara ruang pembakaran dan badan kompor;
5. Menentukan material kompor, baik material utama maupun material pendukung;
6. Menentukan bagian kompor yang akan di-*knock-down* dan menentukan sistem *knock-down*-nya;
7. Membuat gambar teknik dari kompor rancangan, sesuai penentuan dan perhitungan di atas.

### 3.3 Tahap Fabrikasi Kompor

Pada tahap fabrikasi kompor, prosedur umumnya adalah sebagai berikut:

1. Membuat bagian cerobong kompor, sesuai dengan desain *heat exchanger counter current*;
2. Membuat komponen badan kompor;
3. Membuat lubang pipa udara masuk di bagian bawah salah satu sisi badan kompor, dan lubang *flue gas* di bagian atas badan kompor pada sisi yang sama;

4. Membuat ruang pembakaran serta *grate* dengan tinggi yang sesuai;
5. Membuat sistem *knock-down* pada bagian cerobong (pipa *flue gas* dan pipa udara masuk) dengan sistem baut;
6. Melakukan pelapisan (*coating*) bagian kompor terluar dengan cat besi, untuk mencegah terjadinya korosi.

### 3.4 Tahap Preparasi Bahan Bakar

Pada waktu yang bersamaan dengan fabrikasi kompor, dilakukan pula preparasi bahan bakar yang akan dipakai hingga siap dibakar dalam kompor dan diuji. Penelitian kali ini bersamaan dengan penelitian pembuatan bahan bakar pelet biomassa, sehingga peneliti tidak melakukan secara langsung pembuatan bahan bakar dan hanya langsung memakai bahan bakar yang sudah dirancang. Bahan pelet biomassa yang digunakan adalah jenis *average hardwood* berupa kayu kamper dengan HHV 19.743 J/g dan LHV 18.414 J/g.

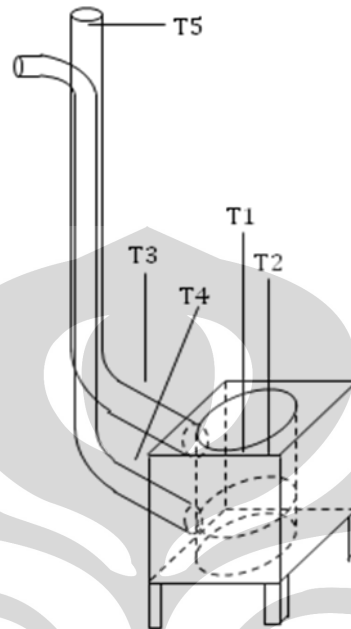
### 3.5 Tahap Uji Kinerja Kompor

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian kinerja kompor berupa efisiensi termal, uji emisi, dan analisis profil temperatur. Ketiga uji ini akan dilakukan dalam satu kali *running* dengan mengadopsi metode *water boiling test*. Metode ini pada dasarnya bertujuan untuk menghitung efisiensi termal kompor, sedangkan uji emisi dan analisis profil temperatur merupakan uji tambahan yang dilakukan untuk penelitian ini sesuai dengan objektif yang ingin dicapai.

#### 3.5.1 Pengujian Profil Temperatur

Untuk melihat profil temperatur, digunakan lima buah termokopel yang *on line* dengan alat *Portable Data Acquisition Module* yang langsung menampilkan pembacaan temperatur secara *real time* melalui *software* AdamView. Alat ini telah diatur untuk menampilkan pembacaan setiap detik. Lima buah termokopel

masing-masing diletakkan sesuai dengan tipe dan jangkauan suhunya, sehingga pembacaan lebih akurat. Skema penempatan termokopel adalah sebagai berikut.



**Gambar 3.2 Sketsa Penempatan Termokopel**

Prosedur penggunaan *Portable Data Acquisition Module* adalah sebagai berikut:

1. Menyambungkan kabel USB pada alat yang telah juga tersambungkan dengan lima buah termokopel ke komputer;
2. Membuka *software* AdamView di komputer;
3. Membuka file baru (klik file → New) dengan membuat *New Strategy*;
4. Menampilkan *icon Temperature Measurement* di *Task Designer* (jumlah *icon* disesuaikan dengan jumlah titik penempatan termokopel);
5. Pada *Temperature Measurement Properties*, klik *Select* kemudian pilih *Advantech device* yang terhubung, kemudian pilih *channel* dan *thermocouple type*;
6. Menampilkan *icon Numeric String* di *Display Designer* (jumlah *icon* disesuaikan dengan jumlah *icon Temperature Measurement*);
7. Pada *Numeric String Display Item*, klik *Select* kemudian pilih *Task/Display/Virtual* dan *Tag Name* yang sesuai (*Channel* akan terisi otomatis), selanjutnya ubah tampilan *precision* sesuai kebutuhan.

### 3.5.2 Pengujian Efisiensi Termal

Efisiensi termal ditentukan dengan menggunakan metode *water boiling test* (WBT) yang direkomendasikan oleh VITA (*Volunteers in Technical Assistance*) sebagai metode pengujian yang secara umum diterima dan dapat diaplikasikan secara universal. Metode ini akan dilakukan dalam dua tahapan, yaitu *cold start* dan *hot start*. Prosedur lengkapnya adalah sebagai berikut:

- Tahap Persiapan
  1. Mengukur suhu air yang akan digunakan dalam pengujian;
  2. Mengukur berat panci (tanpa tutup) yang akan digunakan untuk pengujian;
  3. Menyiapkan pelet biomassa untuk masing-masing pengujian *high power* dan *low power*;
  4. Mengukur dimensi pelet biomassa yang digunakan dalam pengujian;
  5. Melakukan pendidihan air untuk mengetahui titik didih lokal air (*local boiling point*).
- Tahap Pengujian *Cold Start*
  1. Menyiapkan kompor pada suhu ruang;
  2. Mengisi panci dengan air bersih, kemudian menimbang berat panci + air;
  3. Menyalakan api dengan menggunakan pelet biomassa;
  4. Menyiapkan pengukur waktu (*timer*) pada skala 0 tepat saat api mulai menyala;
  5. Mendidihkan air;
  6. Mencatat waktu yang dibutuhkan dari awal api menyala sampai air mendidih;
  7. Mematikan api dan mengambil seluruh sisa bahan bakar dan arang untuk kemudian di timbang;
  8. Menimbang panci + air.

- Tahap Pengujian *Hot Start*
  1. Mengisi kembali panci yang telah digunakan untuk *cold start* dengan air bersih, kemudian menimbang berat panci + air dan mencatat suhu awal air;
  2. Menyalakan api dengan menggunakan pelet biomassa;
  3. Mendidihkan air;
  4. Mencatat waktu yang dibutuhkan dari awal api menyala sampai air mendidih;
  5. Mematikan api dan mengambil seluruh sisa bahan bakar untuk kemudian di timbang;
  6. Menimbang panci + air yang telah mendidih.

### 3.5.3 Pengujian Emisi

Dalam suatu pembakaran, keberadaan gas karbon monoksida (CO) dan gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) selalu berbanding terbalik. Jika jumlah CO besar, maka jumlah CO<sub>2</sub> kecil, dan sebaliknya. Oleh karena itu, pengujian emisi dalam penelitian ini hanya dilakukan terhadap CO karena dinilai sudah cukup mewakili analisis terhadap CO<sub>2</sub>; selain juga disebabkan oleh keterbatasan alat detektor CO<sub>2</sub> yang dapat digunakan. Alat yang digunakan untuk uji emisi CO adalah *Portable CO Detector* dengan limit pembacaan 0 – 999 ppm dengan basis volume. Cara penggunaannya cukup mudah yaitu dengan hanya mendekatkan alat ke cerobong keluaran *flue gas* dan menekan tombol pembacaan, maka pada layar akan langsung terbaca konsentrasi CO yang terdapat dalam *flue gas*. Pembacaan ini dilakukan berkala setiap satu menit sejak api mulai menyala sampai air mendidih.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Rancangan Kompor

Perancangan kompor dalam penelitian ini harus memerhatikan beberapa aspek agar objektif yang tertulis dalam subbab 1.3 dapat tercapai. Aspek-aspek tersebut antara lain:

- aspek portabilitas kompor dengan sistem *knock-down*;
- aspek kebersihan udara ruang dengan penggunaan cerobong untuk keluaran gas buang;
- aspek efisiensi kompor dengan mengadopsi prinsip *heat recovery* pada cerobong;
- aspek keekonomisan bahan atau material agar harganya dapat bersaing dengan kompor-kompor yang sudah ada di pasaran.

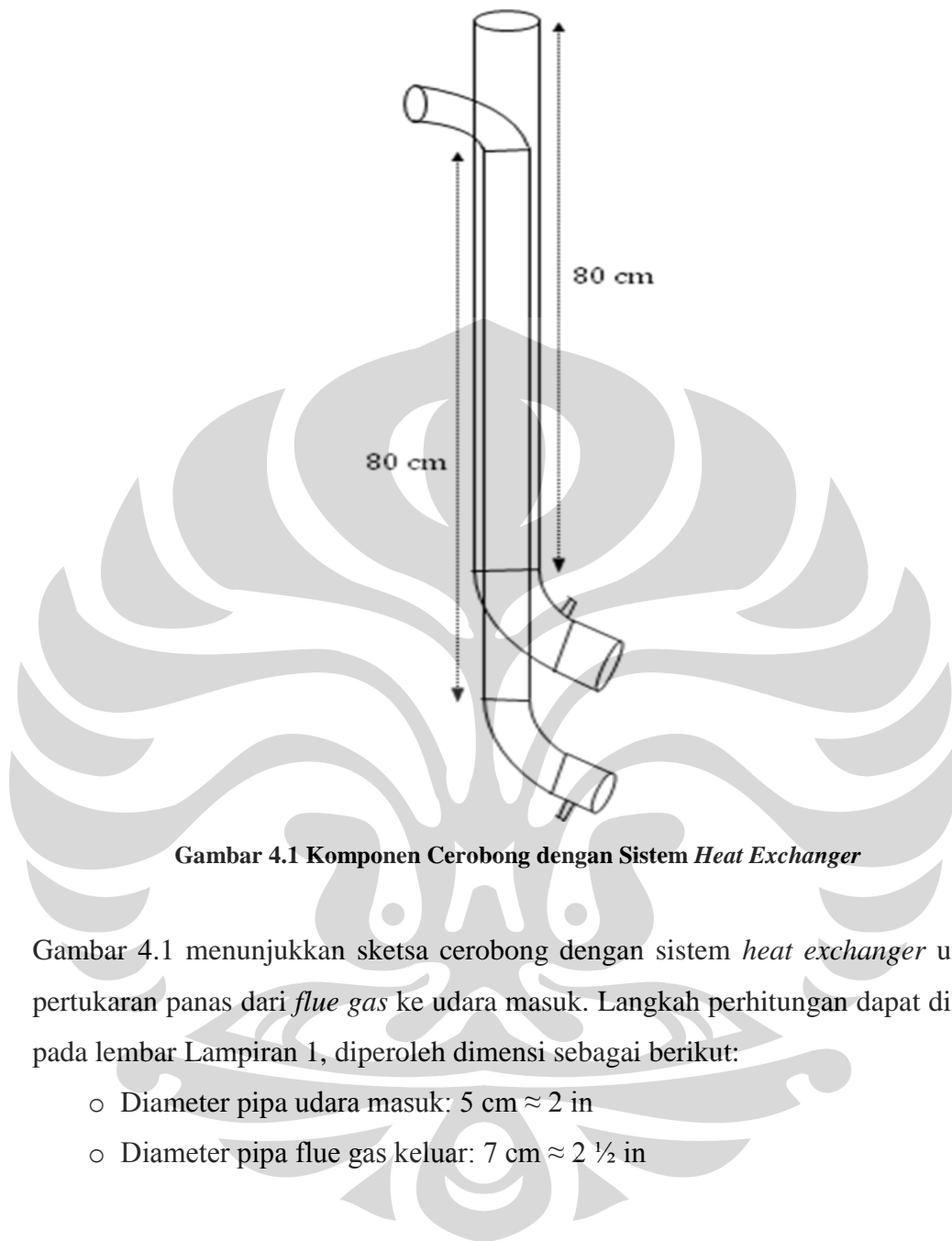
Selanjutnya akan dibahas mengenai penentuan dimensi kompor, pemilihan material, serta hasil fabrikasi kompor.

#### 4.1.1 Penentuan Dimensi Kompor

Kompor ini dibuat dengan tiga bagian utama yang saling dikonstruksi terpisah, yaitu cerobong dengan sistem *heat exchanger*, ruang pembakaran, dan badan kompor.

- **Cerobong**

Cerobong dalam kompor ini memiliki fungsi ganda yang berlaku seiring sejalan. Pertama, sebagai saluran pengeluaran *flue gas* hasil pembakaran agar kebersihan ruang tetap terjaga. Kedua, sebagai tempat terjadinya pertukaran panas antara *flue gas* dengan udara masuk. Fungsi kedua ini berkaitan langsung dengan proses *heat recovery* yang dapat menaikkan efisiensi kompor. Penentuan dimensi pipa cerobong didasarkan pada kebutuhan volum udara masuk serta perhitungan volum *flue gas* hasil pembakaran biomassa pada kondisi ideal.



**Gambar 4.1 Komponen Cerobong dengan Sistem *Heat Exchanger***

Gambar 4.1 menunjukkan sketsa cerobong dengan sistem *heat exchanger* untuk pertukaran panas dari *flue gas* ke udara masuk. Langkah perhitungan dapat dilihat pada lembar Lampiran 1, diperoleh dimensi sebagai berikut:

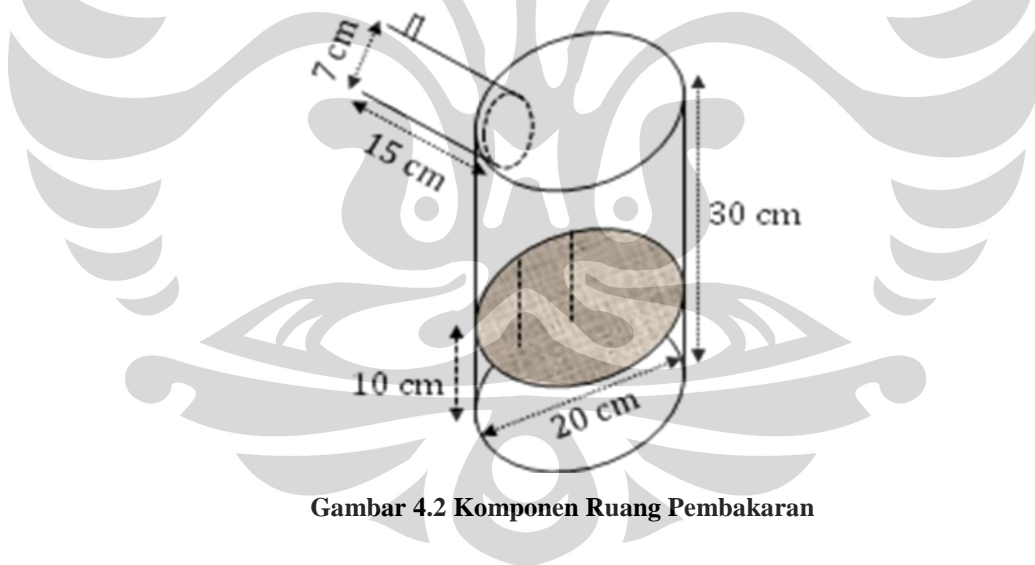
- Diameter pipa udara masuk: 5 cm  $\approx$  2 in
- Diameter pipa flue gas keluar: 7 cm  $\approx$  2 ½ in

- **Ruang Pembakaran**

Ruang pembakaran ditetapkan berbentuk silinder dengan diameter 20 cm, menyesuaikan dengan ketersediaan diameter panci masak yang biasa digunakan di rumah tangga, yaitu ukuran 18 – 40 cm. Untuk penggunaan panci dengan diameter lebih kecil dari ukuran ruang pembakaran, dapat diatasi dengan meletakkan penutup kompor tambahan berbentuk plat berrongga dengan diameter 14 cm. Tinggi ruang pembakaran didasarkan pada perhitungan tinggi api yang

dihasilkan dari pembakaran pelet biomassa. Berdasarkan perhitungan pada Lampiran 1 diperoleh tinggi api sebesar 15,47 cm, sehingga ditetapkan tinggi ruang pembakaran sebesar 20 cm dengan asumsi tinggi tumpukan pelet rata-rata sebesar 5 cm.

Pada fabrikasinya, ruang pembakaran ini dibuat dengan diameter 20 cm dan tinggi 30 cm. Pada jarak vertikal sejauh 20 cm dari atas, dibuat sekat berupa kawat berongga yang berfungsi sebagai *grate* tempat meletakkan tumpukan pelet. Kawat berongga ini selain berfungsi untuk memudahkan aliran udara menuju tumpukan pellet, juga dimaksudkan untuk menyaring sisa pelet yang telah terbakar habis (abu) agar tidak bertumpuk di ruang pembakaran. Sisa tinggi 10 cm di bawah *grate* dimaksudkan untuk menahan aliran udara yang masuk melalui sisi badan kompor agar arah aliran berbelok ke atas menuju tumpukan pelet di ruang pembakaran.



Gambar 4.2 Komponen Ruang Pembakaran

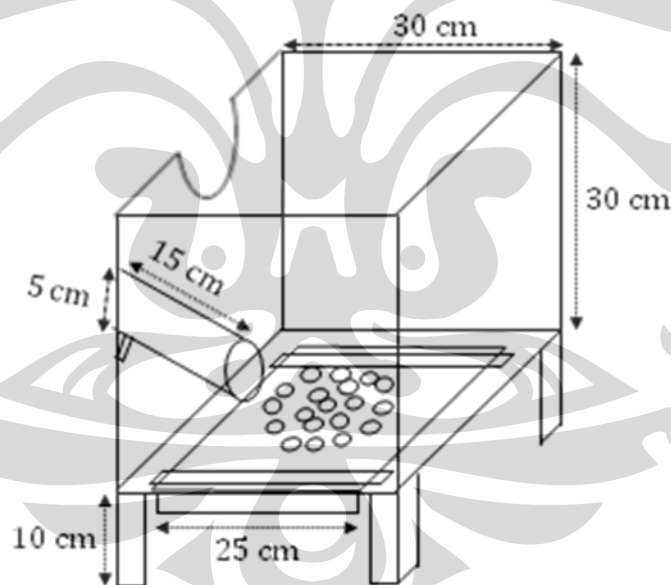
Pada jarak vertikal 5 cm dari atas ruang pembakaran ini, dibuat lubang dengan diameter 2 ½ in yang dimaksudkan sebagai lubang keluaran *flue gas*, sehingga pada lubang ini langsung disambungkan sebuah pipa berdiameter 2 ½ in sepanjang 15 cm. Pada bagian ujung pipa dibuat semacam tautan untuk mur yang akan menyambungkan pipa dengan cerobong (sistem *knock-down*).



- **Badan Kompor**

Badan kompor ditentukan berbentuk kubus dengan rusuk 30 cm, menyesuaikan dengan dimensi ruang pembakaran ditambah dengan diameter pipa udara masuk yang menembus masuk pada jarak 5 cm dari bagian bawah badan kompor. Penentuan bentuk kubus sendiri didasarkan pada kemudahan fabrikasi serta kemudahan penambahan material insulasi pada ruang kosong antara ruang pembakaran dan badan kompor. Material insulasi sendiri sebenarnya dapat berupa isolator apapun, namun dalam penelitian ini digunakan bata merah yang relatif murah dan mudah diperoleh.

Tutup kompor didesain agar dapat dibongkar pasang, dengan tujuan memudahkan dalam mengisi bahan isolator. Seperti yang juga telah dijelaskan sebelumnya, dibuat pula plat berongga dengan diameter 14 cm sebagai penutup tambahan kompor jika akan digunakan panci kecil untuk memasak.

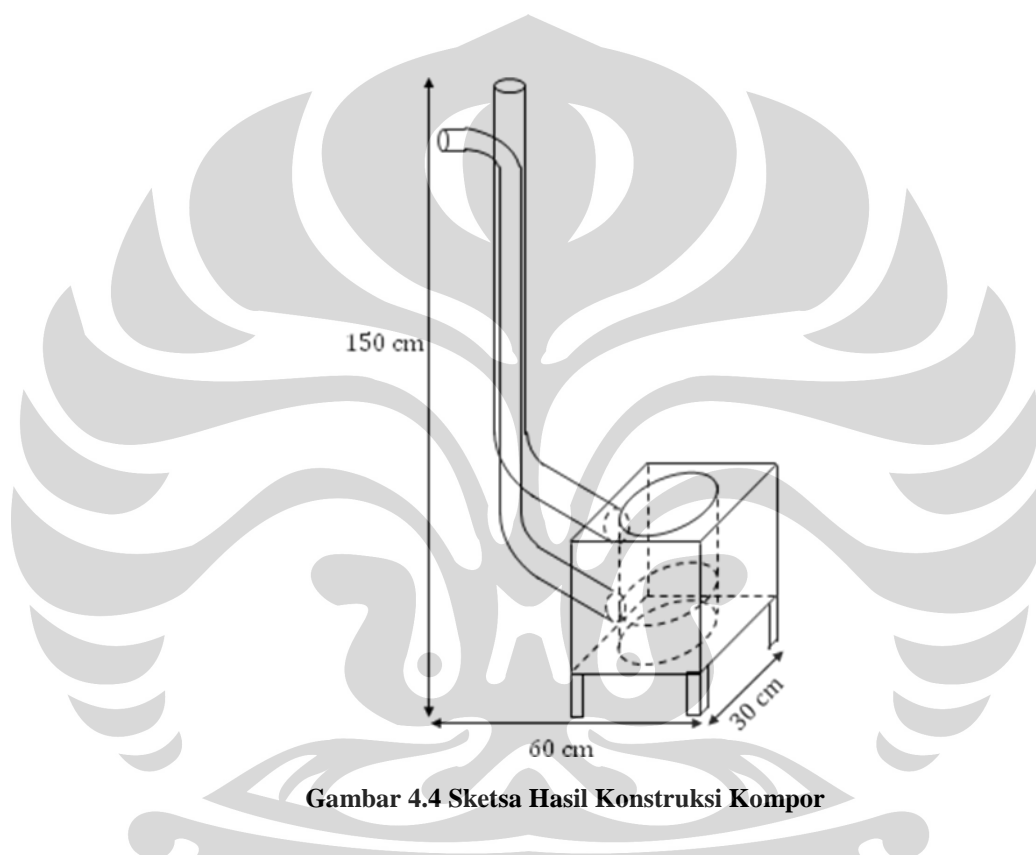


**Gambar 4.3** Komponen Badan Kompor

Pada bagian bawah badan kompor, dibuat lubang-lubang kecil sampai radius 10 cm dari pusat. Lubang-lubang kecil ini berfungsi sebagai jalan keluar bagi abu sisa pembakaran yang turun dari *grate* ruang pembakaran. Pada bagian luarnya, terdapat plat geser yang diletakkan berhimpit dengan lubang-lubang tersebut untuk menahan abu agar tidak langsung jatuh ke lantai dapur, berfungsi

juga untuk mencegah aliran udara keluar melalui lubang-lubang tersebut, sehingga udara tetap stabil mengalir ke ruang pembakaran. Untuk menampung abu, dapat diletakkan sebuah wadah tepat di bawah plat geser dengan dimensi yang disesuaikan.

Selanjutnya, ketiga komponen tersebut dikonstruksi hingga membentuk kompor biomassa bercerobong sebagai berikut:



**Gambar 4.4 Sketsa Hasil Konstruksi Kompor**

Dimensi total yang dihasilkan adalah tinggi 150 cm, lebar 30 cm, dan panjang 60 cm. Namun, untuk skenario pengemasan kompor, dimensi ini akan berkurang akibat sistem *knock-down* pada cerobong.

#### **4.1.2 Hasil Fabrikasi Kompor**

Hasil fabrikasi kompor memiliki dimensi panjang 50 cm, lebar 30 cm, dan tinggi 110 cm; dengan massa total 9,192 kg tanpa penambahan material insulasi. Jika digunakan material insulasi berupa bata merah pejal, maka diperlukan 16 bata merah dengan massa masing-masing 1,3 kg; sehingga massa tambahan kompor



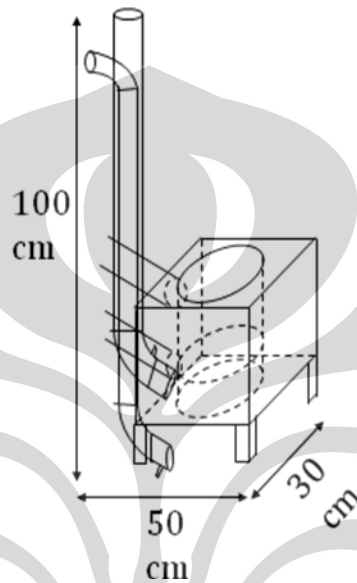
(a) (b)  
**Gambar 4.5 Hasil Fabrikasi Kompor**  
 [(a) Tampak samping; (b) Tampak depan]

menjadi 20,8 kg. Total massa kompor ditambah material insulasi menjadi 29,992 kg. Terlihat dari Gambar 4.5, cerobong kompor agak miring ke arah badan kompor akibat kesalahan dalam fabrikasi. Namun, hal ini tidak terlalu mempengaruhi kinerja kompor secara keseluruhan.

#### 4.2 Portabilitas dan Pengemasan Kompor

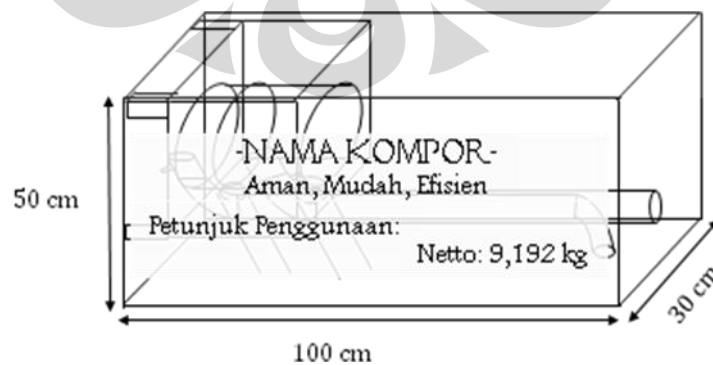
Skenario pengemasan kompor ini adalah tanpa material insulasi, sehingga portabilitas kompor untuk keperluan penjualan dapat tetap terpenuhi dengan berat kompor yang hanya 9,192 kg. Hal ini menjadi keuntungan bagi pengguna untuk bebas memilih material insulasi yang dikehendaki, sesuai dengan kebutuhan dan kondisi pengguna dan lingkungannya.

Sistem *knock-down* pada cerobong dapat memudahkan dalam pengemasan keseluruhan kompor. Dengan komponen cerobong yang dapat dibongkar pasang, maka tinggi kemasan kompor dapat direduksi. Berikut sketsa dimensi untuk skenario pengemasan kompor:



**Gambar 4.6 Dimensi Kompor dengan Sistem *Knock-Down***

Berdasarkan Gambar 4.6, terlihat bahwa sistem *knock-down* pada kompor memberikan dampak positif terhadap pengurangan tinggi ukuran untuk pengemasan kompor sebesar 50 cm, juga pengurangan panjang kompor sebesar 10 cm. Berikut sketsa desain kemasan kompor yang mungkin digunakan.



**Gambar 4.7 Sketsa Desain Kemasan Kompor**

Petunjuk penggunaan kompor dapat berisi hal-hal berikut:

- Cara pemasangan cerobong dengan sistem baut;
- Rekomendasi penyambungan pipa cerobong agar *flue gas* dapat mengalir keluar dari ruang dapur;
- Rekomendasi penggunaan kipas sentrifugal sebagai *blower* udara masuk;
- Rekomendasi penempatan kompor di ruang dapur;
- Rekomendasi penggunaan bahan bakar berupa pelet biomassa;
- Rekomendasi penggunaan material insulasi;
- Aspek keamanan.

### 4.3 Hasil Uji Kinerja Kompor

Metode *water boiling test* diaplikasikan untuk uji kinerja kompor dengan variasi *start up* berupa *cold start* dan *hot start* yang dilakukan secara berkesinambungan. Tujuan dari metode ini adalah untuk memperoleh lama waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan sejumlah air, nilai efisiensi termal kompor, laju pembakaran, konsumsi bahan bakar spesifik dengan dan tanpa koreksi suhu, serta daya keluaran kompor. Namun, dalam penelitian ini dilakukan pula pengukuran suhu di lima titik dalam kompor dengan menggunakan termokopel yang *on line* dengan *Portable Data Acquisition Module* yang secara *real time* membaca perubahan suhu di titik-titik penempatannya. Bersamaan dengan tes ini juga dilakukan pengukuran suhu air dengan termometer serta pengukuran emisi CO dengan *portable CO detector*.

Untuk alat pendorong udara, digunakan kipas sentrifugal dengan daya 45W. Kecepatan udara yang dipakai adalah 7,04 m/s yang akan sampai di ruang pembakaran dengan kecepatan 4,27 m/s. Nilai kecepatan ini dipilih setelah dilakukan kalibrasi terhadap nyala api di dalam ruang pembakaran.

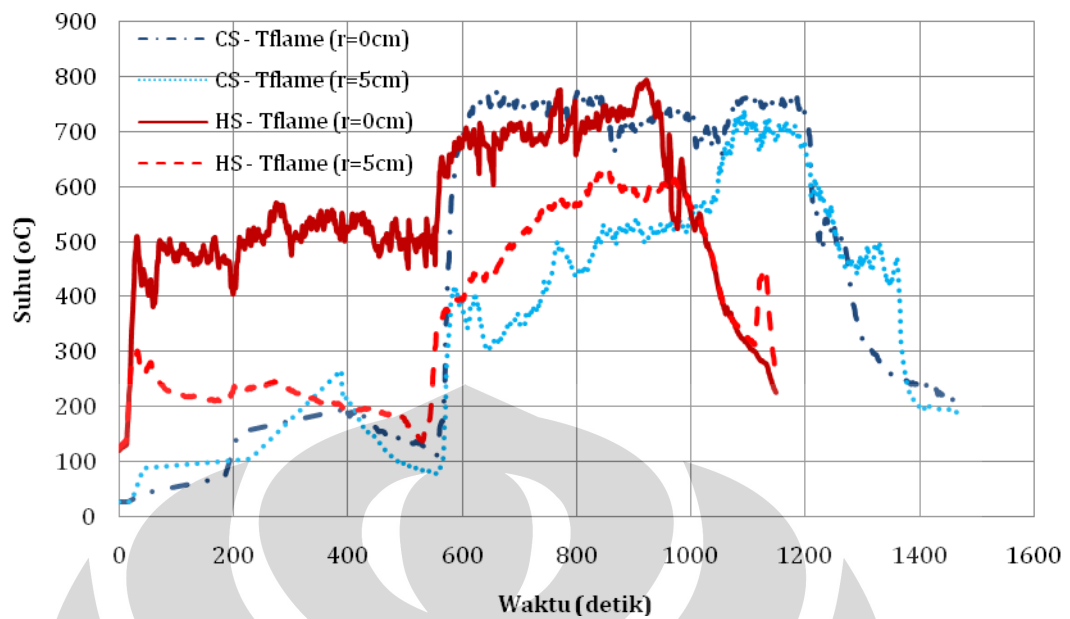
Pembahasan mengenai hasil uji kinerja kompor ini akan diawali dengan penjelasan profil temperatur kompor, kemudian diikuti dengan efisiensi termal, dan diakhiri dengan emisi CO yang terproduksi selama proses pembakaran.

### 4.3.1 Profil Temperatur Kompor

Untuk mengetahui profil temperatur kompor, ditempatkan lima buah termokopel di lima titik pembacaan sesuai sketsa pada Gambar 3.2. Penempatan termokopel pada titik-titik tersebut dimaksudkan untuk memudahkan analisis profil temperatur kompor, baik di ruang pembakaran terkait dengan temperatur api, maupun di cerobong terkait dengan proses *heat recovery*. T1 ditempatkan di pusat ruang pembakaran ( $r = 0$  cm), sedangkan T2 ditempatkan di  $r = 5$  cm. T3 disebut  $T_{flue\ gas\ inlet}$ , ditempatkan di jalur keluaran ruang bakar atau jalur masuk *flue gas* ke sistem cerobong. T4 disebut  $T_{air\ outlet}$ , ditempatkan di jalur masuk ke badan kompor atau jalur keluaran udara dari sistem cerobong. T5 disebut  $T_{flue\ gas\ outlet}$ , ditempatkan di jalur keluaran *flue gas* dari sistem cerobong. Suhu udara masuk sistem cerobong tidak diukur secara *real time* menggunakan termokopel, tetapi diukur menggunakan termometer yang ditempatkan di dekat jalur masukan udara dan dicatat setiap menit.

Termokopel T1 dan T2 merupakan detektor nyala api ( $T_{flame}$ ) berfungsi untuk melihat persebaran nyala api di ruang pembakaran. Termokopel T3, T4, T5, dan termometer suhu ruang, berguna untuk melihat efektivitas sistem *heat recovery* pada cerobong.

Uji kinerja dikerjakan dalam dua tahap, yaitu *cold start* dan *hot start*. Terlihat dari Gambar 4.8 bahwa keempat grafik membentuk pola yang sama yang dapat dibagi menjadi empat zona berdasarkan pencapaian temperatur. Zona pertama disebut tahap awal pembakaran yang merangkum terjadinya proses pemanasan dan pengeringan. Proses pengeringan terjadi bilamana panas yang diterima oleh bahan bakar akibat temperatur tinggi atau radiasi api, menguapkan air dalam bentuk *moisture* di permukaan bahan bakar dan menyebabkan air yang berada di dalam mengalir keluar melalui pori-pori partikel dan menguap. *Moisture* dalam bahan bakar padat terdapat dalam dua bentuk, yaitu sebagai air bebas (*free water*) yang mengisi rongga pori-pori di dalam bahan bakar dan sebagai air terikat (*bound water*) yang terserap di permukaan ruang dalam struktur bahan bakar (Syamsiro dan Saptoadi, 2007). Tahap pemanasan terjadi sampai bahan bakar mencapai suhu  $100^{\circ}\text{C}$  sesuai dengan suhu didih air. Selanjutnya terjadi proses pengeringan hingga semua kandungan air teruapkan.



Keterangan: CS = Cold Start  
 HS = Hot Start  
 r = radius dari pusat silinder ruang bakar

**Gambar 4.8 Perbandingan Persebaran Nyala Api pada Cold Start dan Hot Start**

Selanjutnya, zona kedua dalam grafik disebut tahap devolatilisasi atau pelepasan zat-zat volatil yang terkandung dalam bahan bakar. Setelah proses pengeringan, bahan bakar mulai mengalami dekomposisi, yaitu pecahnya ikatan kimia secara termal dan zat volatil akan keluar dari partikel bahan bakar. Zat volatil sebagai hasil dari proses devolatilisasi, terdiri dari gas-gas *combustible* dan *non combustible* serta hidrokarbon. Untuk partikel yang besar, hasil devolatilisasi berpindah dari pusat partikel ke permukaan untuk kemudian keluar. Selama perpindahan ini, hasil devolatilisasi bisa retak, mengembun, membentuk polimer dan mungkin membentuk endapan karbon sepanjang lintasannya. Ketika zat volatil keluar dari pori-pori bahan bakar padat, oksigen luar tidak dapat menembus ke dalam partikel, sehingga proses devolatilisasi dapat diistilahkan sebagai tahap pirolisis (*Stove Literatur Review*, 2001). Tahap ini terjadi saat bahan bakar mencapai suhu 200°C sampai 350°C, sedangkan zat-zat volatil dapat berupa komponen karbon, hidrogen, dan oksigen.

Zona ketiga dalam grafik adalah tahap pembakaran zat-zat volatil atau disebut juga pembakaran dalam fasa gas. Gas-gas volatil bercampur dengan oksigen dan terbakar pada suhu sekitar  $450^{\circ}\text{C}$  dengan nyala berwarna kekuningan dan meradiasikan panas. Sebagian dari panas ini kembali diserap oleh bahan bakar untuk melepaskan lebih banyak lagi gas volatil. Proses ini terus berlanjut sampai seluruh zat volatil terlepas dari bahan bakar. Semakin banyak zat volatil yang terkandung dalam bahan bakar, maka semakin panjang periode nyala api berada dalam kondisi maksimum, sehingga periode masak akan semakin cepat dan efisien. Saat seluruh zat volatil terlepas, yang tertinggal hanyalah arang. Tahap ini terjadi saat suhu mencapai  $450 - 700^{\circ}\text{C}$ .

Selanjutnya, zona keempat disebut tahap pembakaran arang. Pembakaran arang dapat terjadi pada kondisi cukup oksigen dan suhu sekitar  $700^{\circ}\text{C}$ . Arang sebagai bahan padat memiliki kapasitas panas yang besar, sehingga perlu menyerap banyak panas agar arang terignisi. Hal ini memberikan penjelasan mengenai sebab penurunan temperatur yang terjadi pada zona keempat.

Setiap grafik dalam gambar menampilkan fenomena yang sama, yaitu pergerakan perubahan temperatur sesuai dengan urutan tahapan pembakaran biomassa seperti yang dijelaskan di atas. Grafik kondisi *cold start* menunjukkan tahap pengeringan selama 9 menit di kedua titik, kemudian diikuti dengan devolatilisasi selama 1 menit pada titik  $r = 0$  cm dan 3 menit pada  $r = 5$  cm. Selanjutnya, tahap pembakaran zat volatil terjadi selama 10 menit di titik  $r = 0$  cm dan 9 menit di  $r = 5$  cm. Tahap pembakaran arang menurunkan suhu dengan cukup drastis hingga mencapai  $200^{\circ}\text{C}$ , terjadi selama 5 menit di kedua titik. Perbedaan yang cukup jelas terlihat hanya pada tahap devolatilisasi dan pembakaran zat volatil, menunjukkan bahwa persebaran api sudah cukup baik walaupun nyala api memang masih terpusat di bagian tengah ruang pembakaran.

Pada kondisi *hot start*, suhu kompor telah cukup tinggi hingga mencapai  $140^{\circ}\text{C}$ , sehingga tahap pengeringan terjadi jauh lebih cepat dibandingkan dengan kondisi *cold start*. Perbedaan suhu yang cukup mencolok terlihat pada tahap devolatilisasi, di titik  $r = 0$  cm tahap ini terjadi selama 2 menit, jauh lebih cepat daripada yang terjadi di titik  $r = 5$  cm selama 8 menit. Fenomena ini menunjukkan bahwa persebaran api pada periode awal pembakaran kurang baik sampai 10

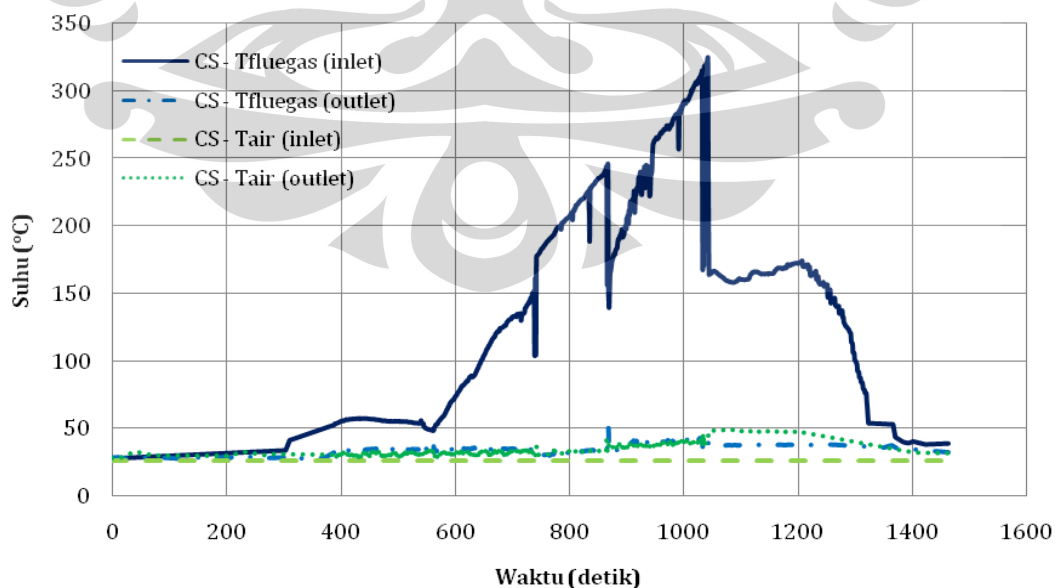


menit pertama, selanjutnya kestabilan nyala sudah mulai terlihat ditandai dengan kenaikan suhu yang signifikan terjadi pada waktu bersamaan pada menit ke-10.

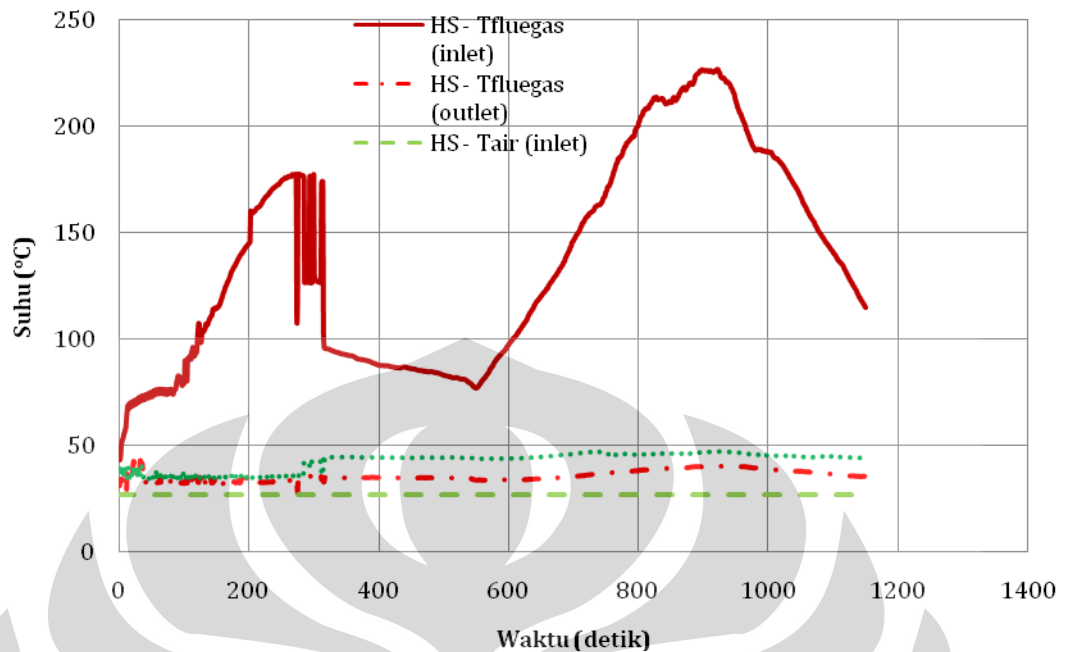
Perbedaan lain yang terlihat dalam grafik adalah rentang suhu pembakaran zat volatil yang terpaut sekitar  $100^{\circ}\text{C}$  antara titik  $r = 0$  cm dan  $r = 5$  cm. Hal ini terjadi akibat ketidakstabilan nyala pada tahap devolatilisasi, sehingga zat-zat volatil yang terlepas pada titik  $r = 5$  cm telah meninggalkan ruang pembakaran sebelum sempat terbakar sempurna. Gas-gas volatil membutuhkan panas, oksigen, ruang, dan waktu yang cukup untuk dapat terbakar. Jika salah satu dari keempat tersebut tidak terpenuhi, maka zat volatil akan meninggalkan ruang pembakaran tanpa terbakar terlebih dahulu (*Stove Literatur Review*, 2001). Dalam kasus ini, faktor yang tidak terpenuhi adalah panas.

Sebaliknya di titik  $r = 0$  cm, fenomena pembakaran terjadi cukup stabil bahkan sangat baik karena periode pembakaran zat volatil berlangsung selama 17 menit. Hal ini berdampak pada kecepatan masak yang lebih singkat dibandingkan dengan saat kondisi *cold start*. Jika nyala api tersebar dengan baik di setiap titik, maka kecepatan masak akan berlangsung lebih singkat lagi.

Selanjutnya, pembahasan mengenai *heat recovery* yang terjadi sepanjang proses pembakaran bahan bakar akan dimulai dengan pengamatan terhadap gambar profil suhu masukan dan keluaran sistem cerobong masing-masing untuk kondisi *cold start* dan *hot start*:



**Gambar 4.9** Profil Temperatur pada Sistem *Heat Recovery* Kondisi *Cold Start*

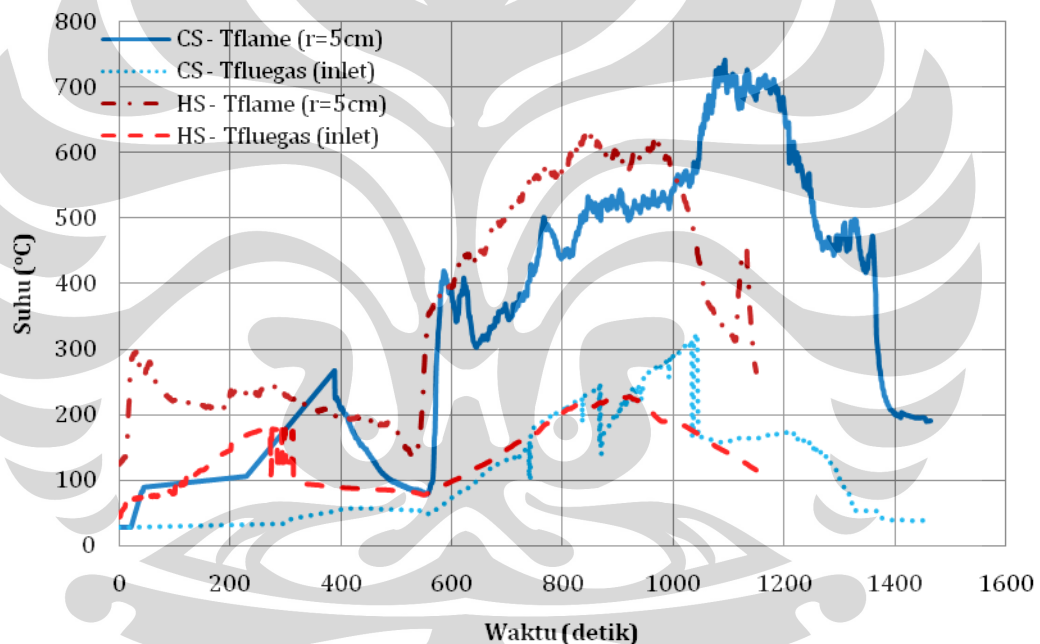


**Gambar 4.10** Profil Temperatur pada Sistem *Heat Recovery* Kondisi *Hot Start*

Gambar 4.9 menunjukkan perubahan suhu di cerobong terhadap waktu pada kondisi *cold start*, sedangkan Gambar 4.10 menunjukkan perubahan suhu di cerobong terhadap waktu pada kondisi *hot start*. Kedua gambar menunjukkan profil yang sama untuk keempat grafik. Suhu keluaran *flue gas* dan keluaran udara berubah sesuai dengan suhu masukan *flue gas* karena pertukaran panas terjadi dari *flue gas* ke udara. Semakin banyak panas yang terkandung dalam masukan *flue gas*, maka akan semakin tinggi suhu udara yang masuk ruang pembakaran. Dari grafik terlihat bahwa suhu masukan *flue gas* dan suhu keluarannya terpaut cukup jauh, begitu pula perbedaannya dengan suhu keluaran udara. Fenomena ini menunjukkan kondisi an-adiabatik, sehingga ada cukup banyak panas yang terbuang ke lingkungan. Pada kondisi adiabatik, ada dua fenomena yang mungkin terjadi. Pertama, jika sistem *heat recovery* sangat baik, maka grafik suhu udara keluar akan naik mendekati suhu masukan *flue gas*. Artinya, transfer panas yang terjadi dari *flue gas* ke udara terjadi secara signifikan, sehingga suhu keluaran *flue gas* akan rendah. Sebaliknya, jika sistem *heat recovery* kurang baik, maka suhu keluaran *flue gas* akan naik mendekati suhu masukannya karena panas yang tertransfer ke udara sangat sedikit, sehingga

panas akan terus terbawa sampai mulut keluaran *flue gas* dan akhirnya terbang ke lingkungan.

Selanjutnya, jika diperhatikan lagi dalam Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 terjadi perbedaan yang signifikan antara grafik suhu masukan *flue gas* dengan ketiga grafik lainnya. Grafik suhu masukan *flue gas* menjulang di atas sampai kisaran 300 – 350°C untuk kondisi *cold start* dan 200 – 250°C untuk kondisi *hot start*. Suhu *flue gas* yang masuk cerobong mengikuti perubahan suhu yang terbawa dari ruang pembakaran yang terukur sebagai suhu api. Suhu api yang paling representatif terhadap suhu dalam cerobong adalah suhu yang paling dekat dengan dinding ruang bakar.

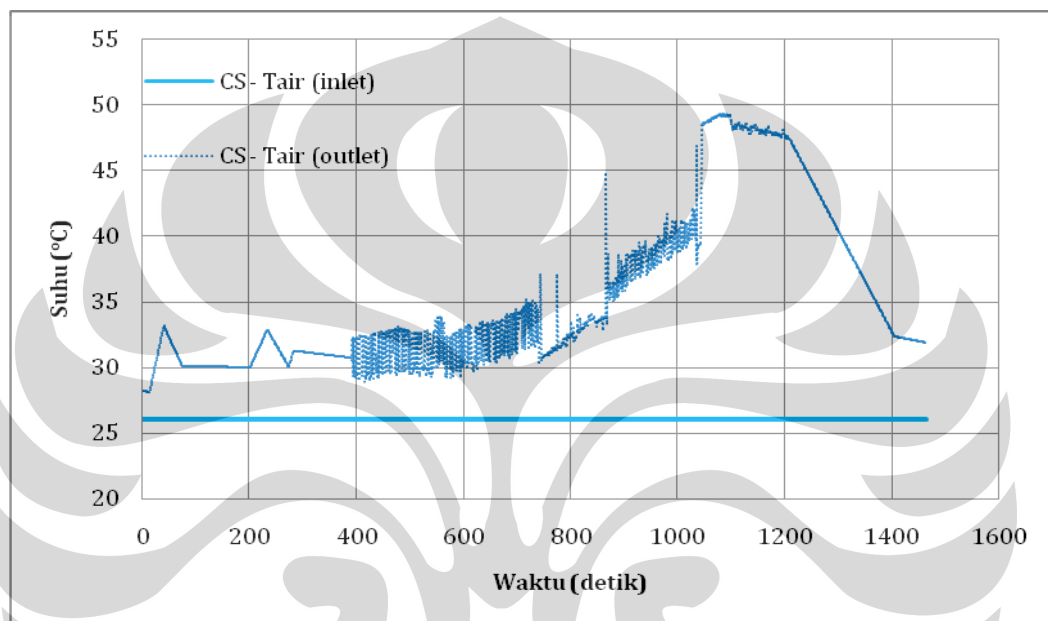


Gambar 4.11 Hubungan Suhu Api di  $r = 5$  cm dengan Suhu *Flue Gas* Masuk Cerobong

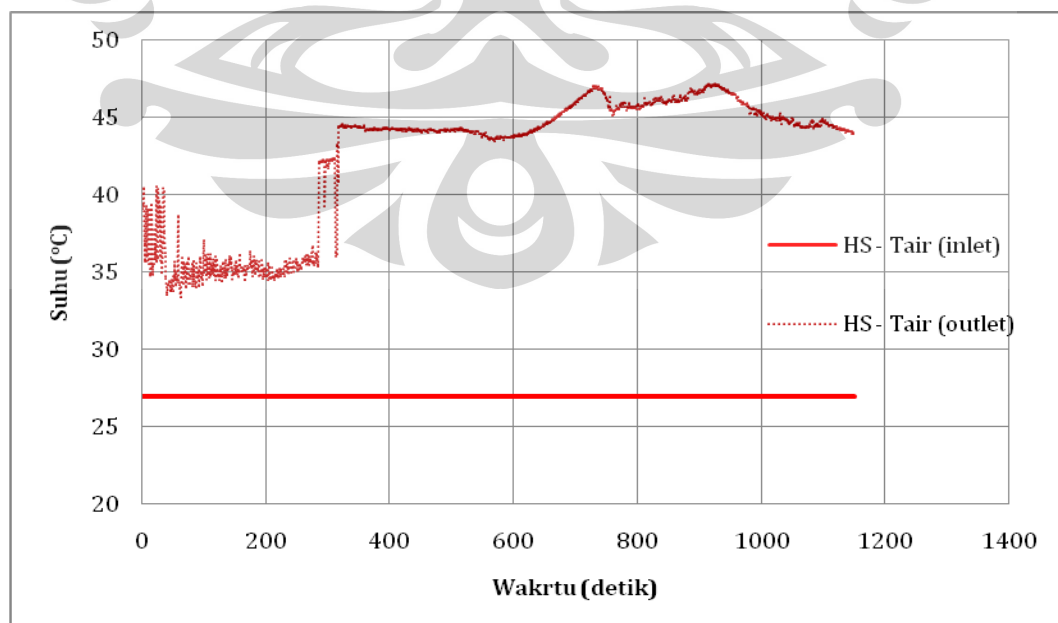
Dalam penelitian ini, suhu yang dimaksud adalah suhu api pada  $r = 5$  cm, seperti yang terlihat dalam Gambar 4.11. Terlihat bahwa suhu api *cold start* mencapai titik maksimal yang lebih tinggi hingga 100°C dibandingkan dengan suhu api *hot start*. Hal ini berdampak pada suhu *flue gas* yang masuk ke cerobong, pada kondisi *cold start* suhu ini mencapai titik maksimal lebih tinggi 100°C dibandingkan dengan kondisi *hot start*, sesuai dengan pencapaian suhu api. Adapun pada detik ke-300, suhu *flue gas* pada kondisi *hot start* mengalami

peningkatan hingga hampir mendekati suhu api. Hal tersebut dimungkinkan oleh adanya lidah api yang menjalar hingga menyentuh termokopel di masukan cerobong, sehingga yang terbaca adalah suhu api bukan suhu *flue gas*.

Pada proses *heat recovery* di cerobong, objektif yang ingin dicapai adalah menaikkan suhu udara yang akan masuk ruang pembakaran. Berikut grafik-grafik yang menampilkan keberhasilan proses *pre heating* udara masuk:



Gambar 4.12 Hasil *Pre Heating* Udara pada Kondisi *Cold Start*



Gambar 4.13 Hasil *Pre Heating* Udara pada Kondisi *Hot Start*

Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan bahwa suhu udara mengalami peningkatan sampai 20°C pada *cold start* dan 15°C pada *hot start* akibat adanya proses *heat recovery* pada cerobong. Hal ini menunjukkan proses *heat recovery* dapat terjadi dan berhasil cukup baik.

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi pada sub-subbab berikutnya, diketahui bahwa kompor dengan sistem *heat recovery* ini terbukti memiliki efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan kompor-kompor biomassa lain yang tidak menggunakan sistem *heat recovery*.

#### 4.3.2 Efisiensi Termal

Lembar data dan kalkulasi untuk uji *water boiling test* yang digunakan untuk analisis efisiensi termal dalam penelitian ini mengadopsi lembar data standar VITA (*Volunteers in Technical Assistance*). Pada tahun 1985, VITA telah mempublikasikan standar internasional untuk uji efisiensi kompor biomassa berbasis kayu (*Testing the Efficiency of Wood-burning Cookstoves: Provisional International Standards*). Hasil yang diperoleh dari uji *water boiling test* berdasarkan lembar data dan kalkulasi tersebut dapat dilihat dalam Tabel 4.1.

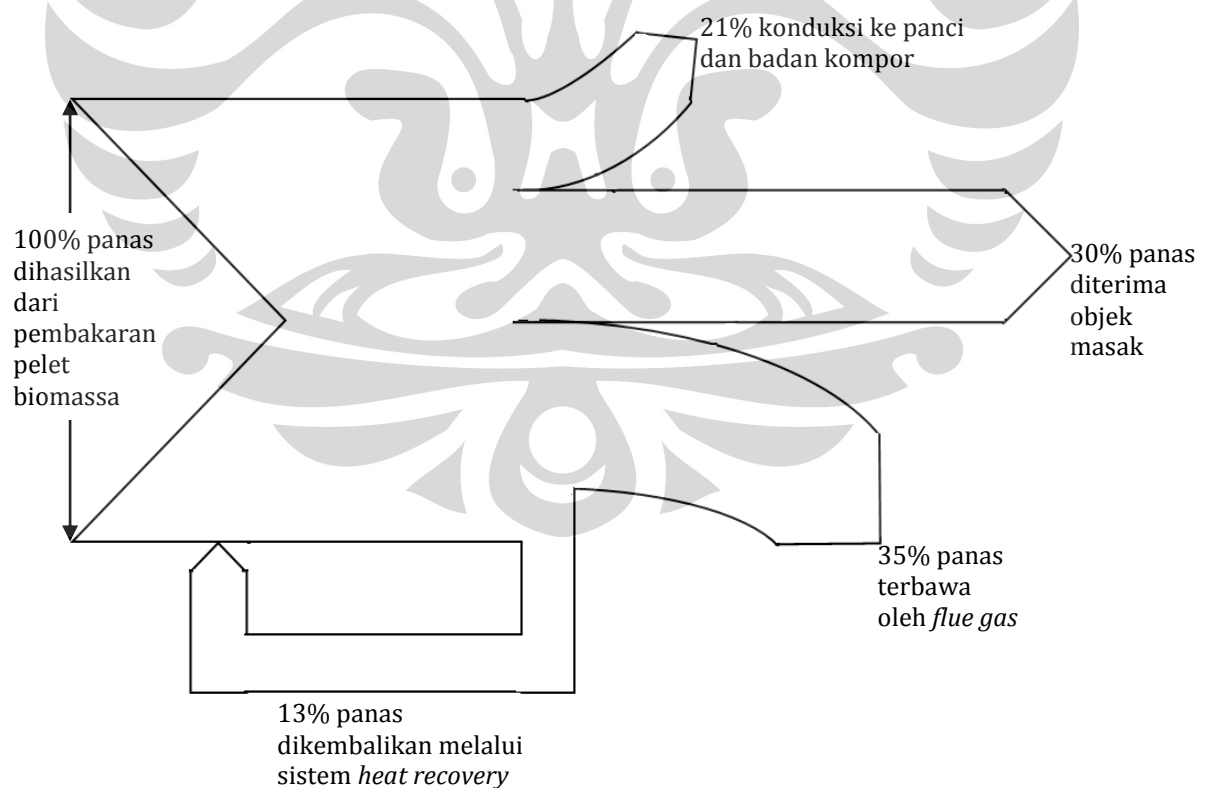
**Tabel 4.1 Data dan Hasil Kalkulasi Metode Water Boiling Test**

	Satuan	<i>Cold start</i>	<i>Hot start</i>
<b>Data</b>			
Bahan bakar dikonsumsi (basis basah)	g	200,00	200,00
Sisa arang	g	30,00	43,00
Bahan bakar dikonsumsi (basis kering)	g	120,24	100,74
Air yang teruapkan selama proses	g	86,00	91,00
Massa air efektif yang dididihkan	g	1.535,20	1.509,64
<b>Hasil Kalkulasi</b>			
Waktu untuk mendidihkan air	min	24,00	19,00
Efisiensi termal	%	30,33	36,47
Laju pembakaran	g/min	5,01	5,30
Konsumsi bahan bakar spesifik	g/liter	78,32	66,73
Konsumsi bahan bakar spesifik dengan koreksi temperatur	g/liter	83,91	71,49
Daya keluaran kompor	watts	1.537,51	1.627,14

Catatan: Tabel data dan kalkulasi lengkap serta penjelasan mengenai langkah kalkulasi dapat dilihat pada lembar Lampiran 2.

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa seluruh hasil uji *water boiling test* untuk *hot start* lebih efisien dibandingkan dengan uji *cold start*, dengan waktu didih yang lebih singkat, efisiensi termal yang lebih tinggi, serta konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit, juga daya keluaran kompor yang lebih tinggi. Pembakaran bahan bakar pada kondisi *hot start* (5,30 g/min) lebih cepat dibandingkan saat kompor dalam kondisi *cold start* (5,01 g/min). Hal ini disebabkan adanya panas yang masih tertinggal dalam ruang bakar, sehingga proses awal pembakaran berupa pemanasan dan pengeringan bahan bakar lebih cepat terjadi. Selain itu, panci yang digunakan untuk memasak air pun telah panas akibat pemasakan sebelumnya, sehingga peningkatan suhu air dapat lebih cepat terjadi.

Nilai efisiensi yang dicapai oleh kompor ini cukup tinggi dengan kisaran 30 – 36% jika dibandingkan dengan efisiensi kompor-kompor biomassa yang terdaftar dalam Tabel 2.2 yang nilai efisiensinya berkisar antara 11,6% – 24,97% untuk kompor tanpa sistem *heat recovery*, maupun kompor yang memiliki sistem *heat recovery* sebesar 18,1 – 32%.



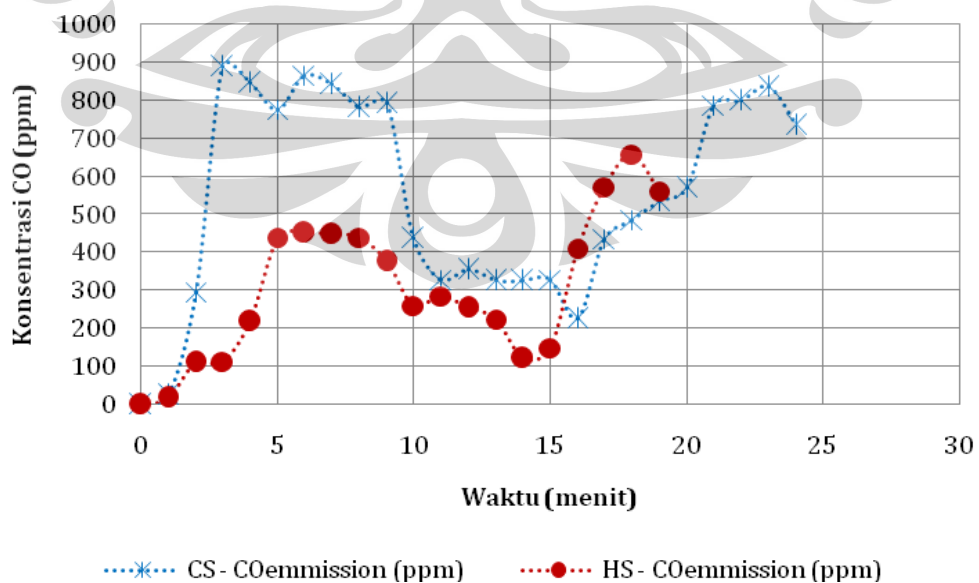
**Gambar 4.14** Diagram Sankey untuk Distribusi Energi Kompor pada Kondisi *Cold Start*

Hal ini disebabkan adanya proses *heat recovery* pada cerobong yang dapat menaikkan suhu udara masuk ruang pembakaran, sehingga pemakaian bahan bakar dapat dihemat hingga 13% pada kondisi *cold start* dengan efisiensi termal 30%. Perhitungan persentase ini dapat dilihat pada Lampiran 3. Gambar 4.14 menampilkan diagram Sankey penggunaan energi kompor pada kondisi *cold start* yang menunjukkan adanya 13% energi yang dikembalikan ke ruang bakar. Pada kondisi *hot start*, nilai ini akan berubah sesuai dengan persen efisiensi yang dicapai oleh kompor.

Berdasarkan Diagram Sankey, dapat disimpulkan bahwa sistem *heat recovery* dapat mereduksi penggunaan bahan bakar hingga 13%. Jika digunakan kompor tanpa sistem *heat recovery*, maka persentase energi yang dibutuhkan dari pembakaran bahan bakar harus memenuhi 100%. Sedangkan pada kompor dengan sistem *heat recovery*, persentase energi yang dibutuhkan dari pembakaran bahan bakar hanya sebesar 87% karena sisa kebutuhan energi sebesar 13% dipenuhi oleh energi yang dikembalikan dari aliran *flue gas* ke ruang bakar melalui aliran udara.

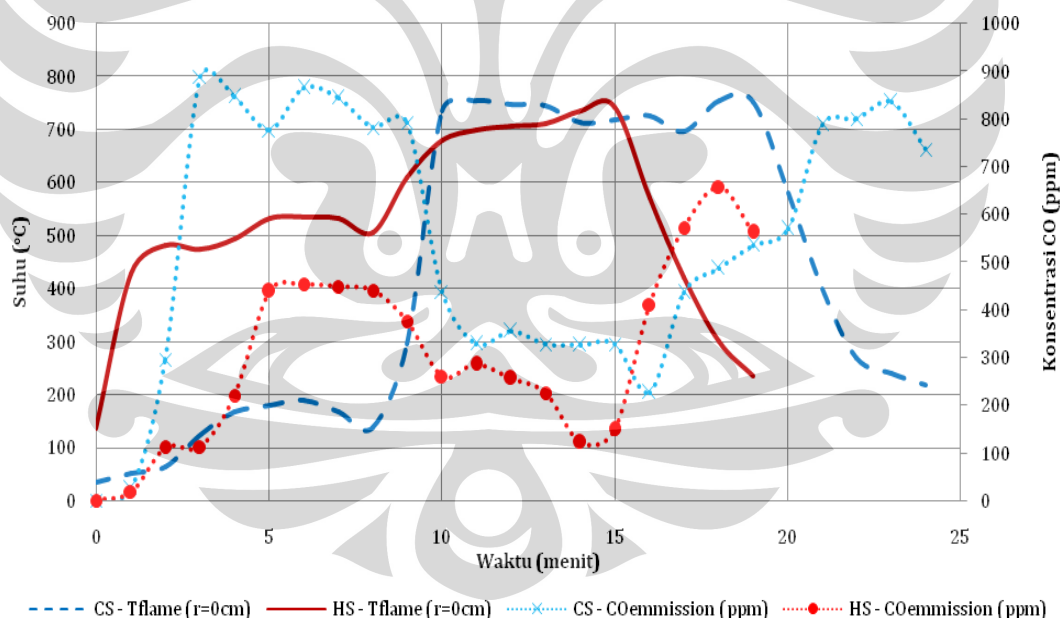
#### 4.3.3 Emisi Karbon Monoksida (CO)

Berdasarkan hasil uji kinerja kompor, perbandingan emisi CO antara kondisi *cold start* dan *hot start* dapat digambarkan dalam grafik Gambar 4.15.



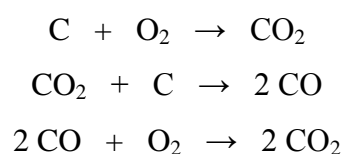
Gambar 4.15 Perbandingan Produksi Emisi CO pada Kondisi *Cold Start* dan *Hot Start*

Kedua grafik dalam Gambar 4.15 menunjukkan fenomena kemunculan CO yang sama, yaitu meningkat di awal, kemudian menurun di tengah, selanjutnya naik lagi di akhir. Tingginya konsentrasi CO di awal dan akhir proses terjadi akibat pembakaran tidak sempurna. Terdapat empat tahapan dalam pembakaran biomassa, yaitu pemanasan, pengeringan, devolatilisasi, dan pembakaran arang. Tahap awal dan akhir sangat berpotensi terhadap produksi gas CO akibat reaksi yang tidak sempurna. Ketidaktelesmpurnaan reaksi pembakaran dapat diindikasikan dengan nyala api dalam ruang bakar, sehingga produksi emisi CO juga dapat dibandingkan dengan suhu api dalam ruang bakar. Semakin tinggi suhu api mengindikasikan reaksi pembakaran yang semakin sempurna, sehingga emisi CO yang dihasilkan pun semakin rendah. Hal ini berlaku sebaliknya, seperti terlihat dalam Gambar 4.16.



**Gambar 4.16 Hubungan Suhu Nyala Api dengan Produksi Emisi CO**

Pada pembakaran arang, terjadi reaksi sebagai berikut:





Secara kumulatif, reaksi ini akan menghasilkan panas (eksotermik). Reaksi ini juga menjelaskan mengapa selalu terbentuk gas CO pada pembakaran arang.

Emisi CO yang tergambar dalam grafik merupakan hasil pembacaan terhadap *flue gas* yang tepat keluar dari cerobong. Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka disimpulkan bahwa *flue gas* keluaran kompor masih melewati ambang batas kadar CO yang diperbolehkan untuk kegiatan masak rumah tangga, yaitu 25 ppm. Oleh karena itu, perpanjangan cerobong diperlukan untuk mengalirkan *flue gas* keluar ruang dapur.

Jika dibandingkan dengan kompor biomassa lain baik dengan atau tanpa sistem *heat recovery*, maka emisi CO yang dihasilkan oleh kompor ini memang cukup tinggi. Emisi CO kompor ini mencapai 35 g/kg – 78 g/kg, sedangkan kompor biomassa lain menghasilkan emisi CO 55,7 g/kg untuk kompor tanpa sistem *heat recovery* dan 31,9 g/kg untuk kompor dengan sistem *heat recovery*. Tingginya emisi CO dari kompor ini disebabkan oleh dimensi ruang bakar yang terlalu lebar. Hal ini akan dijelaskan lebih lanjut dalam sub-subbab 4.4.1.

#### **4.4 Evaluasi dan Rekomendasi**

Dalam subbab ini akan dibahas mengenai evaluasi keseluruhan kompor serta rekomendasi perbaikannya mulai dari penentuan dimensi hingga hasil uji kinerja kompor.

##### **4.4.1 Dimensi Kompor**

Dimensi kompor ini sebenarnya sudah lebih baik dan mendekati dimensi kompor sejenis pada umumnya. Kesalahan terjadi saat penentuan dimensi ruang bakar, terutama untuk ukuran diameter sebesar 20 cm, terlalu lebar untuk ukuran sebuah kompor masak rumah tangga. Penentuan diameter hanya memperhitungkan diameter panci masak yang umum digunakan, tidak merujuk pada diameter ruang bakar kompor biomassa lain maupun kompor minyak dan kompor gas yang diameternya relatif kecil sekitar 10 cm. Diameter ruang bakar memiliki pengaruh besar terhadap aliran udara yang masuk melalui bagian bawah *grate*, maupun pencampuran nyala api dengan gas volatil yang terlepas dari bahan

bakar. Hal ini, menyambung penjelasan pada sub-subbab 4.3.3, akan menaikkan hasil emisi CO. Tingginya emisi CO dapat disebabkan oleh hal-hal berikut:

- Ruang bakar terlalu lebar, sehingga pencampuran antara zat volatil dan nyala api tidak tercampur dengan baik;
- Ruang bakar kurang tinggi, sehingga waktu tinggal yang diperlukan untuk reaksi pengubahan CO menjadi CO<sub>2</sub> tidak tercapai.

Sebenarnya, kedua aspek di atas saling berhubungan. Penentuan tinggi ruang bakar didasarkan pada hasil perhitungan tinggi api yang dihasilkan oleh bahan bakar pelet biomassa. Tinggi api sendiri, sesuai dengan Persamaan 2.3, berbanding terbalik dengan lebar ruang bakar; sehingga pengurangan diameter ruang bakar otomatis akan menambah tinggi ruang bakar.

#### **4.4.2 Aspek Pengoperasian Kompor**

Penyalan bahan bakar dapat diawali dengan membakar serbuk kayu (atau dapat juga menggunakan potongan kecil kayu sangat kering) di atas kertas koran yang diletakkan di atas tumpukan pelet biomassa di dalam ruang bakar. Hal ini akan memicu bahan bakar untuk memanas dan lama kelamaan ikut terbakar. Berdasarkan hasil penelitian, cara ini akan membutuhkan waktu 5 – 10 menit hingga pembakaran bahan bakar berlangsung stabil. Selain itu, jika memang tersedia, maka penggunaan minyak tanah lebih disarankan untuk memicu pelet biomassa agar lebih cepat terbakar.

Pemadaman api dapat dilakukan dengan menutup rapat lubang ruang bakar dan mematikan aliran udara untuk beberapa menit, kemudian menyalakan kembali aliran udara agar asap sisa hasil pembakaran dapat terdorong keluar melalui cerobong pipa *flue gas*.

Pengaturan nyala dan suhu api masih belum menjadi objektif utama dalam penelitian ini. Namun, pengaturan nyala api dapat dilakukan dengan memvariasikan tinggi *grate*; semakin jauh *grate* dari objek masak, maka nyala api yang mencapai objek masak semakin kecil. Sedangkan untuk pengaturan suhu api dapat dilakukan dengan memvariasikan jumlah udara yang masuk ke ruang bakar, yaitu dengan mengubah skala kecepatan pada mesin pengatur kipas sentrifugal.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Berikut beberapa simpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini.

1. Efisiensi kompor bervariasi pada angka 30,33% – 36,47%, lebih tinggi dari kompor-kompor biomassa lain yang tidak memiliki sistem *heat recovery* sebesar 11,6% – 24,97%, maupun kompor yang memiliki sistem *heat recovery* sebesar 18,1 – 32%.
2. Dimensi kompor biomassa yang dihasilkan:
  - Tinggi keseluruhan = 150 cm
  - Tinggi ruang bakar = 20 cm
  - Diameter ruang bakar = 20 cm
  - Diameter pipa udara masuk = 5 cm
  - Diameter pipa gas buang = 7 cm
  - Panjang penukar kalor = 80 cm.
3. Sistem *knock-down* pada cerobong memungkinkan pengemasan kompor dengan ukuran kotak kemas 100 cm (*p*) × 50 cm (*l*) × 30 cm (*t*).
4. Emisi CO mencapai 35 g/kg – 78 g/kg, lebih besar dari kompor-kompor biomassa lain yang menghasilkan emisi CO 55,7 g/kg untuk kompor tanpa sistem *heat recovery* dan 31,9 g/kg untuk kompor dengan sistem *heat recovery*.
5. Hasil uji profil temperatur kompor menunjukkan bahwa:
  - Suhu maksimal nyala api = 600 – 800°C
  - Suhu maksimal *flue gas* masuk cerobong = 200 – 350°C
  - Suhu maksimal *flue gas* keluar cerobong = 43 – 50°C
  - Suhu maksimal udara masuk cerobong = 26 – 28°C
  - Suhu maksimal udara keluar cerobong (masuk ruang bakar) = 47 – 49°C.
6. Sistem *heat recovery* berupa *heat exchange counter current* yang diaplikasikan pada cerobong dapat mengembalikan 13% panas yang terbawa dalam gas buang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aggarwal, RK., dan Chandel SS. "Review of Improved Cookstoves Programme in Western Himalayan State of India". *Journal of Biomass and Bioenergy*. Himachal Pradesh. 27 (2004): 131-144.
- Bailis, R., et al. "Water Boiling Test Simple Updated". 12 Mei 2009. <http://www.aprovecho.org/web-content/publications/assets/>
- Baldwin, S. *Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination*. VITA, USA. 1986
- Barnes, DF., et al. "What Makes People Cook with Biomass Cookstove?-A Comparative International Review of Cookstove Programs". *The World Bank Publication*. 1994.
- Bhattacharya, SC., DO Albina, and AM Khaing. "Effects of Selected Parameters on Performance and Emission of Biomass-Fired Cookstoves". *Journal of Biomass and Bioenergy*. Thailand. 23 (2002): 387-395.
- Bryden, M. "Designing Improved Wood Burning Heating Stoves". 15 Februari 2009. <http://www.repp.org/discussiongroups/resources/stoves/apro/Heat/>
- Bryden, M., et al. "Design Principles for Wood Burning Cook Stoves". *Aprovecho Research Center Publication*. 2002.
- Holman, JP. *Heat Transfer*. Singapore: McGraw Hill Book Company, 1981.
- "Hot Stove Exhaust Heat Recovery Equipment". 15 Maret 2009. <http://www.aseanenergy.org/download/projects/promeeec/td/industry/>
- "Improved Cook Stoves". 20 Februari 2009. <http://www.appropedia.org/>
- "Indoor Air Pollution: Health Impact". 18 Mei 2009. <http://www.who.int/indoorair/>
- MacCarty, N., et al. "A Laboratory Comparison of the Global Warming Impact of Five Major Types of Biomass Cooking Stoves". *Journal of Energy for Sustainable Development Journal*. 2008.
- MacCarty, Nordica. "Testing Results of The Prakti Double Pot Cooking Stove". Aprovecho Research Center. 2008.
- Messerer, A., et al. "Combined Particle Emission Reduction and Heat Recovery from Combustion Exhaust – A Novel Approach for Small Wood-Fired Appliances". *Journal of Biomass and Bioenergy*. 31 (2007): 512-521.

Petro, Fernando. "Emissions from Residential Wood Combustion". *Paper Presented at the IEA Task 32 Workshop: Recent Developments in Small Scale Combustion Devices*, Paris, 21<sup>st</sup> October 2005.

Rai, Kanchan. "Basics on Combustion: Concepts and Calculations". Nepal, Juli 2008. 11 Mei 2009. <http://www.bioenergylists.org/>

Still, D., et al. "Increasing Fuel Efficiency and Reducing Harmful Emissions in Traditional Cooking Stoves". 20 Mei 2009. <http://www.efn.org/~apro>

Suyitno, dan Tri Istanto. "Simulasi CFD Pembakaran *Non-Premixed* Serbuk Biomassa Kayu Jati." Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS. 2007.

Syamsiro, M., dan Harwin Saptoadi. "Pembakaran Briket Biomassa Cangkang Kakao: Pengaruh Temperatur Udara Preheat". Seminar Nasional Teknologi. Yogyakarta. 2007.

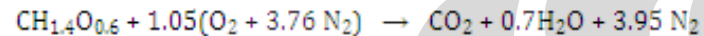
Tremeer, GB., dan Jawurek HH. "Comparison of Five Rural Wood-Burning Cooking Devices: Efficiencies and Emissions". *Journal of Biomass and Bioenergy*. Johannesburg. 11 (1996): 419-430.

Winiarski, Larry. "Ten Design Principle for Wood Burning Stoves". 15 Februari 2009. <http://www.repp.org/discussiongroups/resources/stoves/apro/designp/>

"Wood Burning Stove". 20 April 2009. <http://www.ventspecialists.co.uk/>

## LAMPIRAN 1. Perhitungan Dimensi Kompor

Reaksi pembakaran kayu:



	Koeff.	Mr	Mol	Massa (g)	Volume (m <sup>3</sup> )
<b>Reaktan</b>					
CH <sub>1,4</sub> O <sub>0,6</sub>	1,000	23	19,130	440,000	0,429
O <sub>2</sub>	1,050	32	20,087	642,783	0,450
N <sub>2</sub>	3,950	28	75,565	2115,826	1,693
<b>Produk</b>					
CO <sub>2</sub>	1,000	44	19,130	841,739	0,429
H <sub>2</sub> O	0,700	18	13,391	241,043	0,300
N <sub>2</sub>	3,950	28	75,565	2115,826	1,693

Perhitungan Desain			
Kebutuhan udara	$V_{air}$	2,164	m <sup>3</sup>
Volume CO <sub>2</sub> dr udara	$V_{CO_2}$	0,001	m <sup>3</sup>
Massa H <sub>2</sub> O dr biomassa	$m_{H_2O}$	60,000	g
Mol H <sub>2</sub> O dr biomassa	$n_{H_2O}$	3,333	mol
Volume H <sub>2</sub> O dr biomassa	$V_{H_2O}$	0,075	m <sup>3</sup>
Volume flue gas	$V_{fg}$	2,497	m <sup>3</sup>
Volume flue gas ideal	$V_{ifg}$	7,069	m <sup>3</sup>
Massa biomassa aktual	$W_{ac}$	440	g
Laju pembakaran	$v_c$	0,122	g/s
Panas yg terproduksi	$FP$	2,347	kW

Rasio			
CO <sub>2</sub> thd O <sub>2</sub>	$r_1$	0,002	
Udara thd O <sub>2</sub>	$r_2$	4,762	
Udara thd CO <sub>2</sub>	$r_3$	3125,000	
N <sub>2</sub> thd O <sub>2</sub>	$r_4$	3,714	
Udara thd (O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> )	$r_5$	1,010	
Basis			
massa biomassa	$m$	500	g
waktu pembakaran	$t$	3600	s
Data			
Molar volume (STP)	$V_m$	0,022	m <sup>3</sup> /mol
Heat content	$HC$	19,2	MJ/kg
%C dlm biomassa	$m_c$	50	%
%water dlm biomassa	$m_w$	12	%
Temperatur dlm cerobong	$T_{ch}$	500	C
Laju optimum udara	$v_a$	30	cm/s
Laju optimum flue gas	$v_{fg}$	50	cm/s

PERHITUNGAN DIAMETER CEROBONG			
Udara			
Laju volumetrik udara	$W_{air}$	0,0006	m <sup>3</sup> /s
Cross sectional area	$A_{air}$	20,039	cm <sup>2</sup>
Diameter pipa udara	$d_{air}$	5,0502	cm
Flue gas			
Laju volumetrik flue gas	$W_{fg}$	0,002	m <sup>3</sup> /s
Cross sectional area	$A_{fg}$	39,271	cm <sup>2</sup>
Diameter pipa flue gas	$d_{fg}$	7,0698	cm

PERHITUNGAN TINGGI CEROBONG			
Pressure drop	$dP$	8	kg/(m.s <sup>2</sup> )
Densitas udara	$\rho_{air}$	1,2746	kg/m <sup>3</sup>
Densitas flue gas	$\rho_{fg}$	0,461	kg/m <sup>3</sup>
Gravitasi	$g$	9,8	m <sup>2</sup> /s
Tinggi cerobong	$h_{ch}$	1,0033	m
		100,33	cm

PERHITUNGAN TINGGI API			
Konstanta C2	$C2$	110	mm/kW
Daya keluaran kompor	$FP$	2,3467	kW
Tinggi api	$h_{fl}$	154,73	mm
		15,473	cm

$$V_{udara} = (vol. O_2 + Vol. N_2) \times r_5$$

$$V_{CO_2} = V_{udara}/r_3$$

$$m_{H_2O} = n_{H_2O} \times V_m$$

$$V_{fg} = (T_{ch} + 273)/(273 \times V_{fg})$$

$$A_{udara} = V_{udara} \times 106/v_a$$

$$d_{udara} = [(A_{udara} \times 4)/(22/7)]^{0,5}$$

$$\rho_{udara} = [(m_{O_2} + m_{N_2})/1000]/V_{udara}$$

$$h_{ch} = dP/(\rho_{udara} - \rho_{fg})/g$$

$$h_{fl} = C2 \times FP^{0,4}$$

## LAMPIRAN 2. Perhitungan *Water Boiling Test*

### SHELL FOUNDATION HEH PROJECT WATER BOILING TEST DATA AND CALCULATION FORM

*Shaded cells require user input; unshaded cells automatically display outputs*

#### Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Nita handayani
	Chemical Engineering University of Indonesia
Date	June, 17 <sup>th</sup> 2010
Stove type/model	Stove with heat recovery system in its chimney
Location	Laboratorium of Sustainable Energy
	Chemical Engineering University of Indonesia
Wood species	Average Hardwood (camphor)
Wind conditions	Light Breeze

\*Note, if you are testing a multi-pot stove, the data entry places in the simmering test for pots other than the primary pot are left blank intentionally because the simmering test can not account for pots other than the primary pot.

#### Initial Test Conditions

Data	value	units	label
Air temp	27,0	°C	
Average dimensions of wood	1	cm x cm x cm	
Gross calorific value (dry wood)	19.734	kJ/kg	HHV
Net calorific value (dry wood)	18.414	kJ/kg	LHV
Wood moisture content (% - wet basis)	15,5200	%	m
Effective calorific value (accounting for moisture in the wood)	1112	kJ/kg	C <sub>eff</sub>

Data	value	units	label
Dry weight of Pot	280	g	P1
Weight of container for char (grams)	15	g	k
Local boiling point	100,0	°C	T <sub>b</sub>

Description of stove and other comments:

#### BASIC TEST DATA



Measurements	Units	HIGH POWER TEST (COLD START)				HIGH POWER TEST (HOT START)			
		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils	
		data	label	data	label	data	label	data	label
Time	min	0	$t_{c1}$	24,0	$t_{cf}$	0	$t_{h1}$	19,0	$t_{hf}$
Weight of wood	g	200	$f_{c1}$	0	$f_{cf}$	200	$f_{h1}$	0	$f_{hf}$
Water temperature	°C	30,0	$T1_{c1}$	106,0	$T1_{cf}$	30,0	$T1_{h1}$	105,0	$T1_{hf}$
Weight of Pot with water	g	1780	$P1_{c1}$	1694	$P1_{cf}$	1780	$P1_{h1}$	1689	$P1_{hf}$
Fire-starting materials (if any)	--								
Weight of charcoal+container	g			45	$c_c$			58	$c_h$

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START	
		data	label	data	label
Wood consumed (moist)	g	200,00	$f_{cm}$	200,00	$f_{hm}$
Net change in char during test	g	30,00	$Dc_c$	43,00	$Dc_h$
Equivalent dry wood consumed	g	120,24	$f_{cd}$	100,74	$f_{hd}$
Water vaporized from all pots	g	86,00	$w_{cv}$	91,00	$w_{hv}$
Effective mass of water boiled	g	1535,20	$w_{cr}$	1509,64	$w_{hr}$
Time to boil	min	24,00	$Dt_c$	19,00	$Dt_h$
Thermal efficiency	--	30,33	$h_c$	36,47	$h_h$
Burning rate	g/min	5,01	$r_{cb}$	5,30	$r_{hb}$
Specific fuel consumption	g/liter	78,32	$SC_c$	66,73	$SC_h$
Temp-corr sp consumption	g/liter	83,91	$SC_c^T$	71,49	$SC_h^T$
Firepower	watts	1537,51	$FP_c$	1627,14	$FP_h$

$$f_{cd} = f_{cm} \times [(1 - 1,12) \times (m/100)] - (1,5 \times D_{cc})$$

$$w_{cr} = (P1_{cf} - P1) \times (T1_{cf} - T1_{c1}) / (T_b - T1_{c1})$$

$$h_c = \left[ \frac{(4,186 \times (P1_{c1} - P1) \times (T1_{cf} - T1_{c1})) + (2260 \times w_{cv})}{(f_{cd} \times LHV)} \right] \times 100\%$$

$$r_{cb} = f_{cd} / Dt_c$$

$$SC_c = 1000 \times f_{cd} / w_{cr}$$

$$SC_c^T = SC_c \times 75 / (T_b - T1_{c1})$$

$$FP_c = f_{cd} \times LHV / (Dt_c \times 60)$$

**HOT START & COLD START**

### LAMPIRAN 3. Perhitungan untuk Pembuatan Diagram Sankey

Unjuk kerja suatu kompor dapat dilihat dari beberapa aspek, seperti efisiensi termal, waktu masak, serta daya keluaran kompor. Untuk membandingkan pengaruh kinerja kompor terhadap ada tidaknya sistem *heat recovery*, maka perlu dibuat Sankey Diagram yang memberikan gambaran jelas mengenai distribusi energi dalam kompor.

Sebelum membuat Sankey Diagram, perlu dibuat analisis mengenai kemungkinan distribusi energi dari total daya yang terproduksi dari pembakaran pelet biomass. Berikut distribusi energi (dominan) yang terjadi dalam aktivitas memasak dengan kompor biomassa (dalam hal ini *water boiling test*):

- 1) Energi yang terpakai untuk mendidihkan air
- 2) Energi yang hilang akibat konduksi panci
- 3) Energi yang hilang akibat konduksi dinding kompor
- 4) Energi yang hilang akibat konveksi *flue gas*
- 5) Energi yang dikembalikan ke ruang pembakaran akibat adanya sistem *heat recovery*.

Kelima jenis energi di atas dapat dihitung besarannya, sehingga dengan mengetahui besar energi yang dihasilkan oleh bahan bakar maka akan dapat diperoleh persentase dari setiap distribusi energi tersebut.

Berikut langkah perhitungan untuk mendapatkan persentasi distribusi energi dalam Sankey Diagram: (data *water boiling test* untuk *cold start*)

- Total energi yang dihasilkan dari pembakaran pelet biomassa

$$\begin{aligned}
 FP_c &= f_{cd} \times LHV \\
 FP_c &= 120,24 \text{ g} \times 18.414 \text{ J/g} \\
 FP_c &= 2.214.011 \text{ J} \qquad \qquad \qquad \rightarrow \text{persen energi} = 100\%
 \end{aligned}$$

- Total energi yang terpakai untuk mendidihkan air

$$\begin{aligned}
 h_w &= [4,186 \times (M_{p+w} - M_p) \times (T_b - T_i)] + [2260 \times w_{ev}] \\
 h_w &= [4,186 \times (1780 - 280) \times (106 - 30)] + [2260 \times 86] \\
 h_w &= 671.564 \text{ J} \qquad \qquad \qquad \rightarrow \text{persen energi} = 30\%
 \end{aligned}$$

Universitas Indonesia

- Total energi yang hilang akibat konduksi panci

$$h_p = [0,902 \times M_p \times (T_b - T_i)]$$

$$h_p = [0,902 \times 280 \times (106 - 30)]$$

$$h_p = 19.195 \text{ J} \quad \rightarrow \text{persen energi} = 1\%$$

- Total energi yang hilang akibat konduksi badan kompor

$$Q = \frac{k \times A \times (T_{cc} - T_{st})}{l}$$

$$Q = \frac{0,25 \times 0,09 \times (780 - 72)}{0,05}$$

$$Q = 318,6 \text{ W} = 458.784 \text{ J} \quad \rightarrow \text{persen energi} = 21\%$$

- Total energi yang hilang akibat konveksi *flue gas*

$$Q_{fg} = FP_c - h_w - h_p - Q$$

$$Q_{fg} = 2.214.011 - 671.564 - 19.195 - 458.784$$

$$Q_{fg} = 1.064.468 \text{ J} \quad \rightarrow \text{persen energi} = 48\%$$

- Total Energi yang dikembalikan ke ruang pembakaran akibat adanya sistem *heat recovery*

$$Q_{rec} = M_{air} \times C_{p_{air}} \times (T_{out.max} - T_{in})$$

$$Q_{rec} = 2482,74 \times 1,005 \times (49 - 26)$$

$$Q_{rec} = 57.389 \quad \rightarrow \text{persen energi thd } Q_{fg} = 13\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat dibuat Sankey Diagram untuk sistem dengan dan tanpa *heat recovery*. Pada sistem dengan *heat recovery*, terdapat 13% dari energi yang terbawa dalam *fuel gas* dapat dikembalikan ke ruang pembakaran melalui udara masuk. Hal ini tentu dapat meningkatkan efisiensi pembakaran pelet dengan adanya panas dalam aliran udara yang dapat memenuhi kebutuhan panas sensibel, sehingga pembakaran dapat lebih cepat terjadi.