



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KOMPOR BERBAHAN BAKAR PELET
BIOMASSA DENGAN EFISIENSI TINGGI DAN RAMAH
LINGKUNGAN MENGGUNAKAN PRINSIP *HEAT RECOVERY***

SKRIPSI

**R. Febry Rizqiardihatno
0405060547**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KOMPOR BERBAHAN BAKAR PELET
BIOMASSA DENGAN EFISIENSI TINGGI DAN RAMAH
LINGKUNGAN MENGGUNAKAN PRINSIP *HEAT RECOVERY***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**R. Febry Rizqiardihatno
0405060547**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
KEKHUSUSAN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

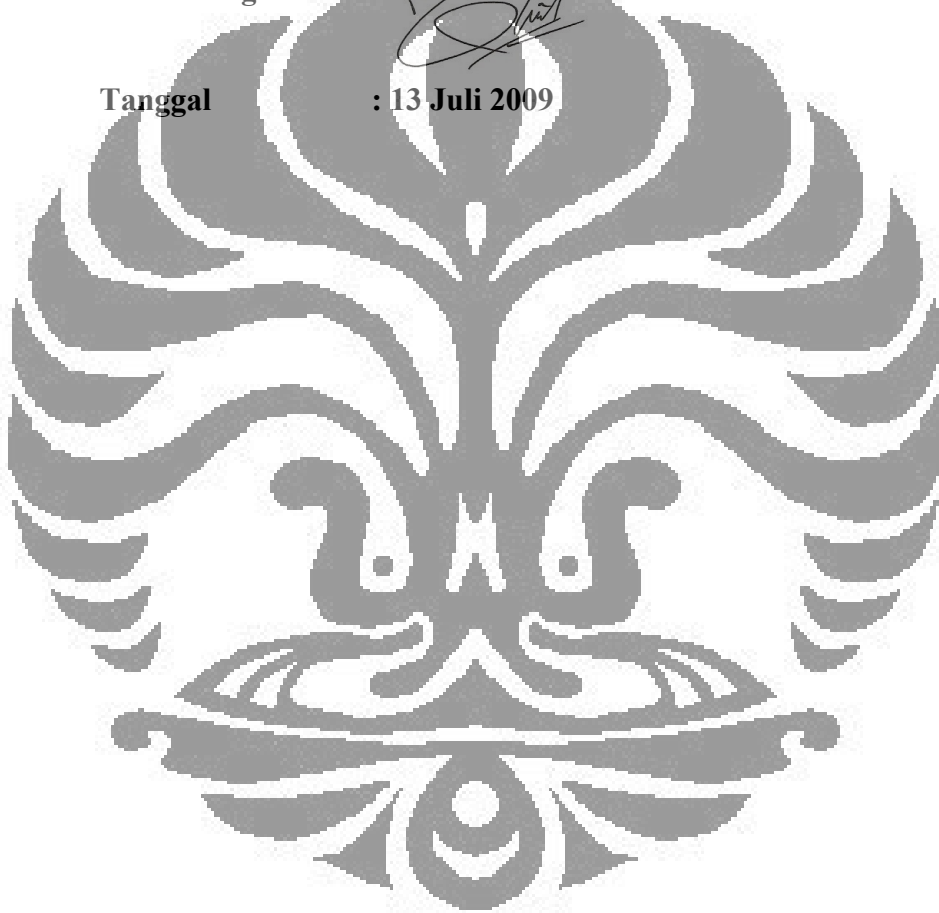
Nama : R. Febry Rizqiardihatno

NPM : 0405060547

Tanda tangan :



Tanggal : 13 Juli 2009



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : R. Febry Rizqiardihatno
NPM : 0405060172
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi :

Perancangan Kompor Berbahan Bakar Pelet Biomassa dengan Efisiensi Tinggi dan Ramah Lingkungan menggunakan Prinsip *Heat Recovery*

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA ()

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

Penguji I : Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, Ph.D ()

Penguji II : Ir. Yulianto, M.Sc, Ph.D ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 13 Juli 2009

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

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

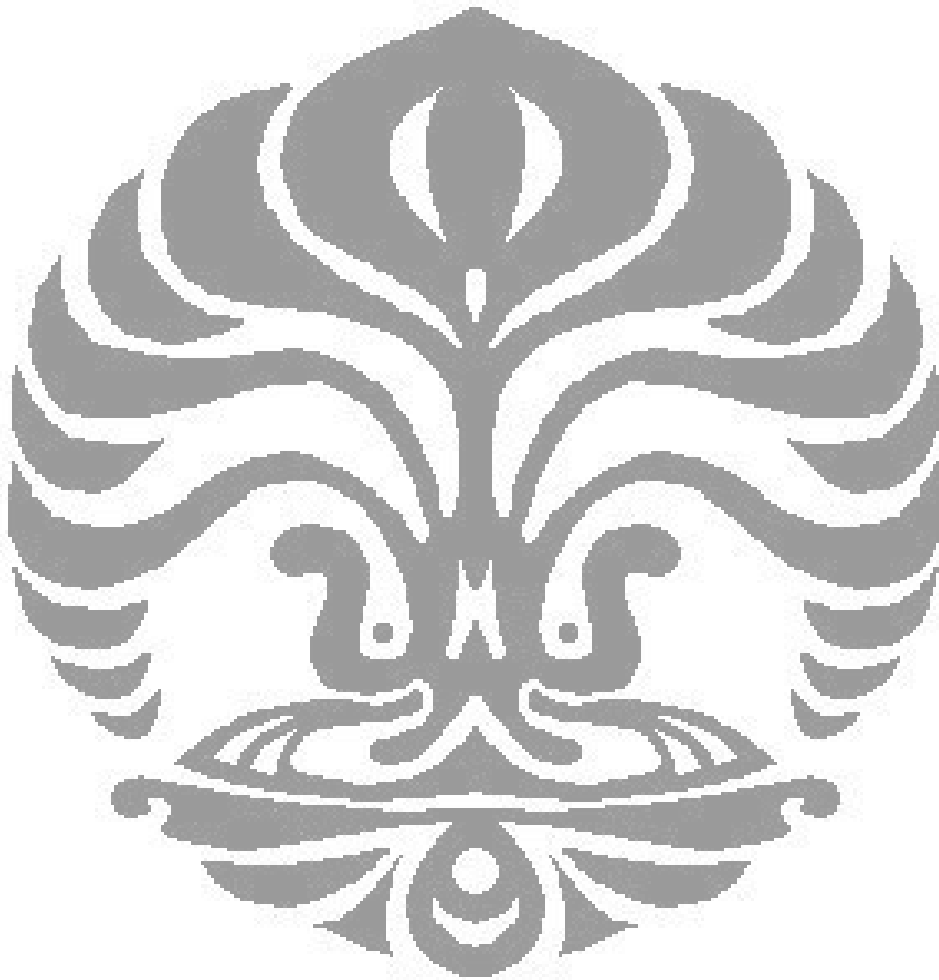
Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan nikmatnya selama penulis hidup.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI dan pembimbing skripsi
3. Ibu Ir. Dianursanti, MT. selaku pembimbing akademis penulis.
4. Seluruh keluarga atas segala perhatiannya selama ini.
5. Kepada ibu Wulan, Pak Dijan, Pak Yuswan dan Pak Yulianto atas masukan-masukannya selama jalannya skripsi saya.
6. Untuk Shantya yang terus memberikan semangat kepada penulis.
7. Teman-teman Teknik Kimia UI angkatan 2005 atas masukan, dukungan, dan bantuan apapun selama ini.
8. Teman-teman tim PKMP: Nita Handayani, Dwi Endah, Alin dan Eliana atas bantuan pengambilan data.
9. Pak Tahmid, Pak Made dan para Pekerja Balai Mekanisasi Departemen Pertanian yang membantu preparasi bahan bakar.
10. Kang Jajat dan Mang Ijal dalam memberikan bantuan pembuatan dan perbaikan alat.
11. Mas Opik atas bantuannya dalam mencari literatur serta Mas Sriyono atas segala bantuannya.
12. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu selama ini.

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

Depok, Juli 2009

Penulis



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

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

Nama : R. Febry Rizqiardihatno

NPM : 0405060547

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

PERANCANGAN KOMPOR BERBAHAN BAKAR PELET BIOMASSA
DENGAN EFISIENSI TINGGI DAN RAMAH LINGKUNGAN
MENGUNAKAN PRINSIP HEAT RECOVERY

berserta 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 : 13 Juli 2009

Yang menyatakan



(R. Febry Rizqiardihatno)

ABSTRAK

Nama : R. Febry Rizqiardihatno

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Perancangan Kompor Berbahan Bakar Pelet Biomassa dengan Efisiensi Tinggi dan Ramah Lingkungan Menggunakan Prinsip *Heat Recovery*.

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan. Biomassa dapat dijadikan bahan bakar yang antara lain: kayu, arang, kotoran hewan, dan limbah pertanian. Untuk kebutuhan domestik di Indonesia, pemakaiannya lebih sebagai bahan bakar kompor masak dengan kayu yang dibakar langsung. Permasalahan yang sering timbul yaitu efisiensi termal yang rendah sehingga menghabiskan banyak bahan bakar yang dapat memperparah deforestasi, tingginya tingkat emisi CO, hidrokarbon, dan partikulat yang dapat menyebabkan polusi udara.

Penelitian ini dilaksanakan untuk merancang, membuat, dan menguji suatu kompor biomassa berbasis bahan bakar serbuk kayu yang dipeletasi, dengan menitikberatkan pada pengambilan kembali panas yang terbuang pada cerobong asap agar menghasilkan efisiensi termal yang cukup tinggi dan emisi zat berbahaya yang rendah. Dengan tahap penelitian yang diawali perancangan, meliputi perhitungan dan desain dimensi kompor. Tahap fabrikasi, membuat kompor dengan bahan, komponen, dan ukuran sesuai rancangan. Tahap pengujian, memvariasikan kondisi *start-up*, jarak garangan dan laju masuk udara untuk menguji efisiensi termal menggunakan metode *Water Boiling Test*, lalu melakukan uji emisi CO dengan parameter zat polutan menggunakan alat *CO Detector 7701*.

Hasil yang didapatkan dari desain adalah kompor berdiameter dalam 300 mm dan luar 400 mm serta tinggi keseluruhan kompor 700 mm. Untuk sistem perpipaan menggunakan pipa \varnothing 1.5 inci dan pipa \varnothing 3 inci. Untuk kinerja kompor, efisiensi termal kompor antara 33-38 % dan emisi CO sebanyak 19-51 ppm yang lebih baik dibandingkan kompor biomassa yang sudah ada.

Kata kunci: desain, kompor, pelet, biomassa, efisiensi, emisi

ABSTRACT

Name : R. Febry Rizqiardihatno
Majoring : Chemical Engineering
Title : Designing Biomass Pellet Stove with High Efficiency and Environmental Friendly Using Heat Recovery Principle

Biomass is one of Renewable Energy resources. Kinds of biomass which can be used as a fuel are: wood, char, dung and agricultural waste. For Indonesian domestic needs, biomass usually used as a cook stove fuel by burning the wood directly but, the thermal efficiency for direct use process is low and emission of carbon monoxide, hydrocarbon, and particulate matters is high.

This research's goal are designing, fabricating and testing a pellet biomass cookstove which focus on extracting flue gas heat from exhaust chimney for giving high thermal efficiency and depositing dangerous emission. Step of this research start from designing step, covering calculation and designing stove dimension. Fabrication step is making the stove with material, component and dimension appropriate with the design. Testing step is varying start up condition, distance of grate, and air flow velocity to observe the influence of those parameters to thermal efficiency and CO emission. Thermal efficiency testing was done using Water Boiling Test method and CO Detector 7701 device for CO emission testing.

The results of designing step are ID = 300 mm, OD = 400 mm and total height = 700 mm. For piping system, using Ø 1.5 inch (37.5 mm) pipe as an air inlet pipe and Ø 3 inch (75 mm) pipe as an outlet flue gas pipe. Thermal efficiency of this cookstove are approximately 33-38% with 19-51 ppm CO emission, which better than existing biomass cookstove.

Keyword: design, cookstove, pellet, biomass, efficiency, emission

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| ABSTRAK | viii |
| ABSTRACT | ix |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiv |
| DAFTAR SINGKATAN | xv |
| DAFTAR NOTASI | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Batasan Penelitian | 3 |
| 1.5 Sistematika Penulisan | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Definisi Kompor | 5 |
| 2.2 Klasifikasi Kompor | 5 |
| 2.3 Kriteria Perancangan | 7 |
| 2.3.1 Faktor Sosial | 7 |
| 2.3.2 Daya Keluaran Kompor dan Kebutuhan Lain | 7 |
| 2.3.3 Sumber-Sumber Lokal | 7 |
| 2.3.4 Faktor Ekonomi | 8 |
| 2.3.5 Faktor Lingkungan | 8 |
| 2.4 Prinsip Perancangan | 8 |
| 2.4.1 Proses Pembakaran | 9 |
| 2.4.2 Perpindahan Panas | 9 |
| 2.5 Teori Dasar Pembakaran | 13 |
| 2.5.1 Rasio udara dengan bahan bakar | 13 |
| 2.5.2 Temperatur Nyala | 15 |
| 2.6 Teknologi <i>Improved Cook Stoves</i> (ICS) | 15 |

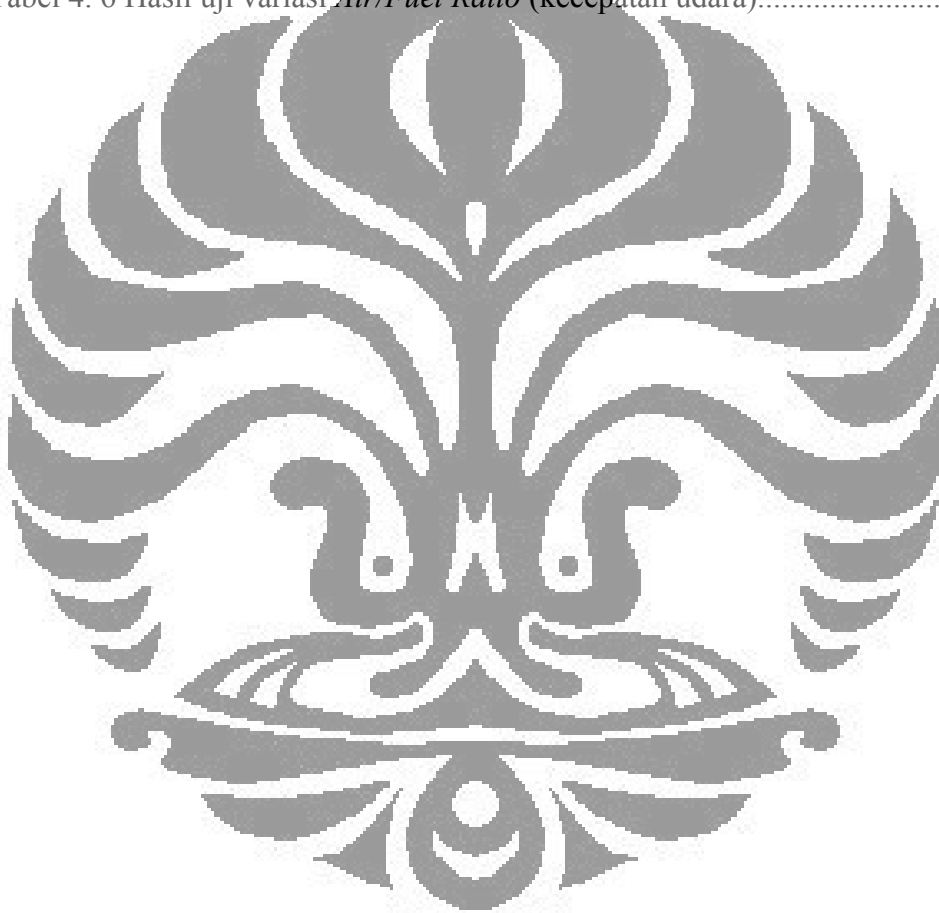
| | |
|---|----|
| 2.6.1 Komponen-Komponen ICS..... | 15 |
| 2.6.2 Bahan Konstruksi ICS..... | 18 |
| 2.7 Pengujian Efisiensi Termal..... | 19 |
| 2.8 Aspek Lingkungan dan Kesehatan..... | 20 |
| 2.8.1 Aspek Lingkungan..... | 20 |
| 2.8.2 Aspek Emisi Gas Buang..... | 21 |
| 2.8.3 Aspek Kesehatan..... | 22 |
| 2.9 Perbandingan Kompor Biomassa..... | 23 |
| BAB III METODE PENELITIAN..... | 28 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 28 |
| 3.2 Tahap Perancangan Kompor..... | 28 |
| 3.3 Tahap Fabrikasi Kompor..... | 29 |
| 3.4 Tahap Preparasi Bahan Bakar..... | 30 |
| 3.5 Tahap Pengujian..... | 31 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 35 |
| 4.1 Dimensi Kompor..... | 35 |
| 4.2 Hasil Fabrikasi Kompor..... | 37 |
| 4.3 Hasil Pengujian Efisiensi..... | 38 |
| 4.3.1 Data Pengujian dalam Bentuk Tabel..... | 38 |
| 4.3.2 Profil Temperatur Kompor..... | 39 |
| 4.4 Hasil Pengujian Emisi..... | 42 |
| 4.5 Hasil Kinerja Kompor Keseluruhan..... | 44 |
| 4.5.1 Efektivitas Penggunaan Heat Recovery..... | 44 |
| 4.5.2 Kecepatan Waktu Masak..... | 46 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 48 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 48 |
| 5.2 Saran..... | 48 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 50 |
| LAMPIRAN..... | 52 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--------------|--|
| Gambar 1. 1 | Penggunaan bahan bakar untuk rumah tangga di seluruh dunia (dari <i>World Assessment, United Nations Development Program</i> 1995) . 2 |
| Gambar 2. 1 | Konduksi, konveksi, radiasi, dan penyimpanan panas [Baldwin S., 1986]9 |
| Gambar 2. 2 | Rasio udara dengan bahan bakar14 |
| Gambar 2. 3 | Tampilan isometrik Dhaula Dhar chullah15 |
| Gambar 2. 4 | Data kadar CO ₂ di Indonesia dari beberapa sektor (EarthTrends.wri.org, 1998)22 |
| Gambar 2. 5 | Efek konsentrasi CO di udara terhadap waktu pemaparan dan kondisi kerja [Smith, Kirk R, 1987]23 |
| Gambar 2. 6 | Kompor QB Philippine24 |
| Gambar 2. 7 | Kompor Vietnam24 |
| Gambar 2. 8 | Kompor Lao tradisional25 |
| Gambar 2. 9 | Kompor WFP Rocket Stove25 |
| Gambar 2. 10 | Kompor dua panci umum dengan cerobong26 |
| Gambar 2. 11 | Kompor Himachal Pradesh26 |
| Gambar 2. 12 | Institutional rocket stove27 |
| Gambar 3. 1 | Diagram alir penelitian..... 28 |
| Gambar 3. 2 | <i>Pressure pelletizer</i> 31 |
| Gambar 3. 3 | CO Detector 7701 32 |
| Gambar 3. 4 | <i>Bagan Pengambilan Data</i> 33 |
| Gambar 4. 1 | Rancangan detail kompor biomassa 36 |
| Gambar 4. 2 | Hasil akhir fabrikasi kompor pelet biomassa sebelum dan sesudah modifikasi 37 |
| Gambar 4. 3 | Profil temperatur di beberapa titik percobaan pada tinggi variasi grate 300 mm, A/F = 1.3, dan kondisi <i>Hot Start</i> 39 |
| Gambar4. 4 | Perbandingan Flame Temperature <i>Cold Start</i> dan <i>Hot Start</i> 40 |
| Gambar 4. 5 | Perbandingan Flame Temperature terhadap tinggi grate.....41 |
| Gambar 4. 6 | Perbandingan Flame Temperature terhadap variasi A/F Ratio.....41 |
| Gambar 4. 7 | Perbandingan Emisi CO <i>Hot Start</i> dan <i>Cold Start</i> 42 |
| Gambar 4. 8 | Perbandingan Emisi CO dengan variasi tinggi grate.....43 |
| Gambar 4. 9 | Perbandingan Kadar CO pada variasi A/F Ratio..... 43 |
| Gambar 4. 10 | Sankey Diagram Memasak dengan Kompor Biomassa..... 45 |
| Gambar 4. 11 | Hubungan antara T3 dan T4 <i>Cold Start</i> fungsi waktu..... 45 |
| Gambar 4. 12 | Kecepatan Waktu Masak pada variasi kondisi <i>start up</i> 46 |
| Gambar 4. 13 | Kecepatan Waktu Masak pada variasi tinggi grate..... 46 |
| Gambar 4. 14 | Kecepatan Waktu Masak pada variasi A/F Ratio..... 47 |

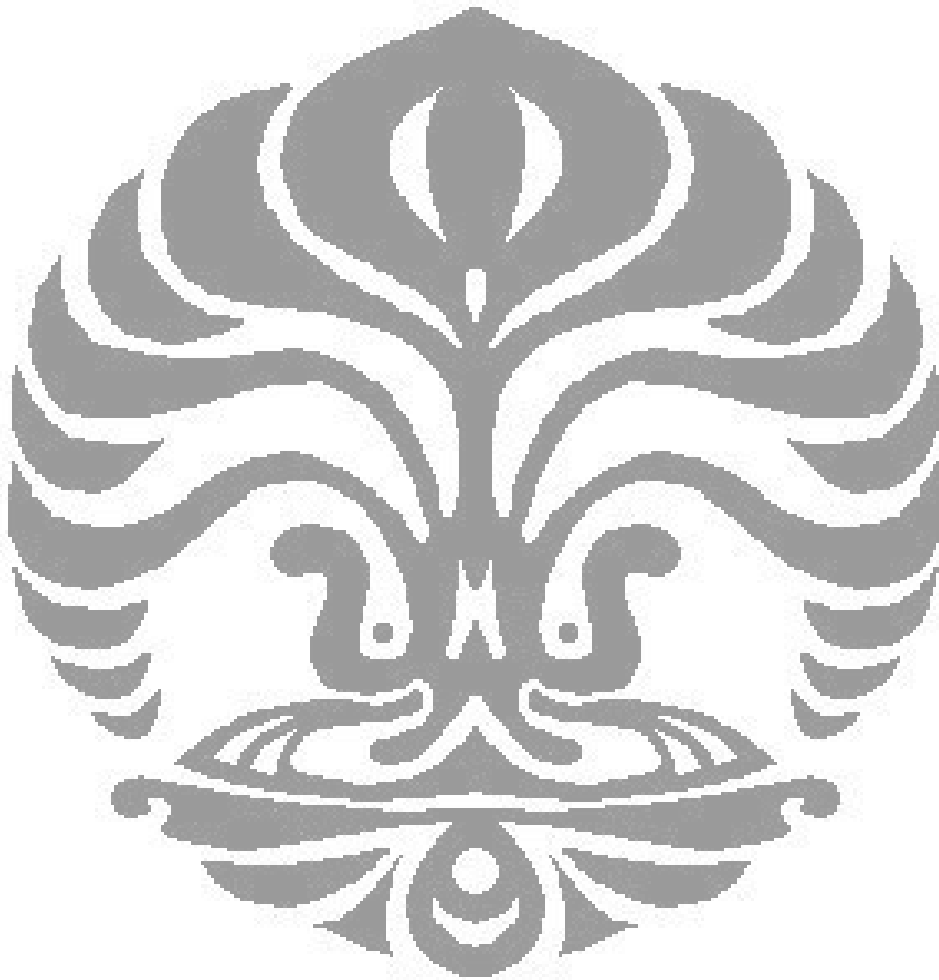
DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2. 1 Sifat bahan konstruksi kompor | 19 |
| Tabel 2. 2 Mekanisme efek kesehatan dari polutan | 22 |
| Tabel 2. 3 Perbandingan efisiensi termal dan emisi lima kompor pilihan | 27 |
| | |
| Tabel 4. 1 Hasil uji <i>cold start</i> dan <i>hot start</i> | 38 |
| Tabel 4. 2 Hasil uji variasi tinggi <i>grate</i> | 38 |
| Tabel 4. 3 Hasil uji variasi <i>Air/Fuel Ratio</i> (kecepatan udara)..... | 38 |
| Tabel 4. 4 Hasil uji <i>cold start</i> dan <i>hot start</i> | 44 |
| Tabel 4. 5 Hasil uji variasi tinggi <i>grate</i> | 44 |
| Tabel 4. 6 Hasil uji variasi <i>Air/Fuel Ratio</i> (kecepatan udara)..... | 44 |



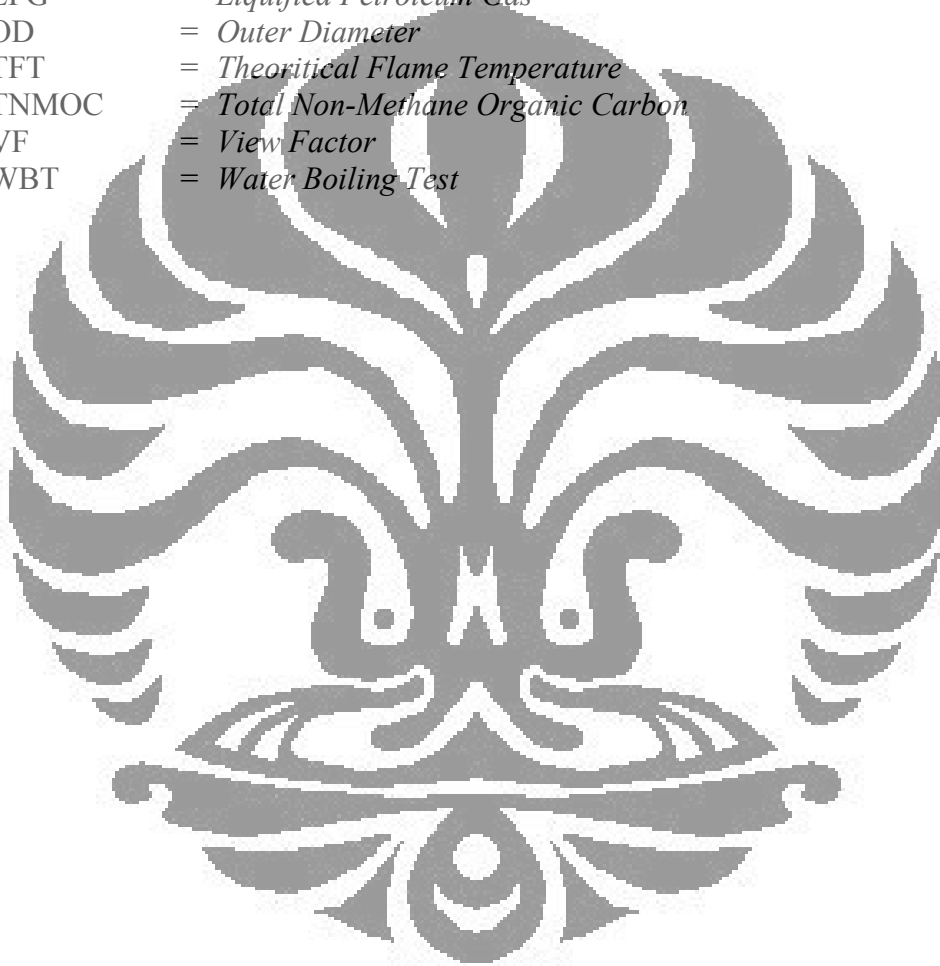
DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|------------|---|----|
| Lampiran A | Proses Perhitungan Dimensi Kompor | 53 |
| Lampiran B | <i>Water Boiling Test Data Sheet</i> | 54 |
| Lampiran C | Perhitungan <i>Heat Recovery</i> (untuk Sankey Diagram) | 55 |
| Lampiran D | Profil Temperatur Variasi <i>Start Up</i> | 56 |
| Lampiran E | Profil Temperatur Variasi <i>Grate</i> | 58 |
| Lampiran F | Profil Temperatur Variasi <i>A/F Ratio</i> | 60 |

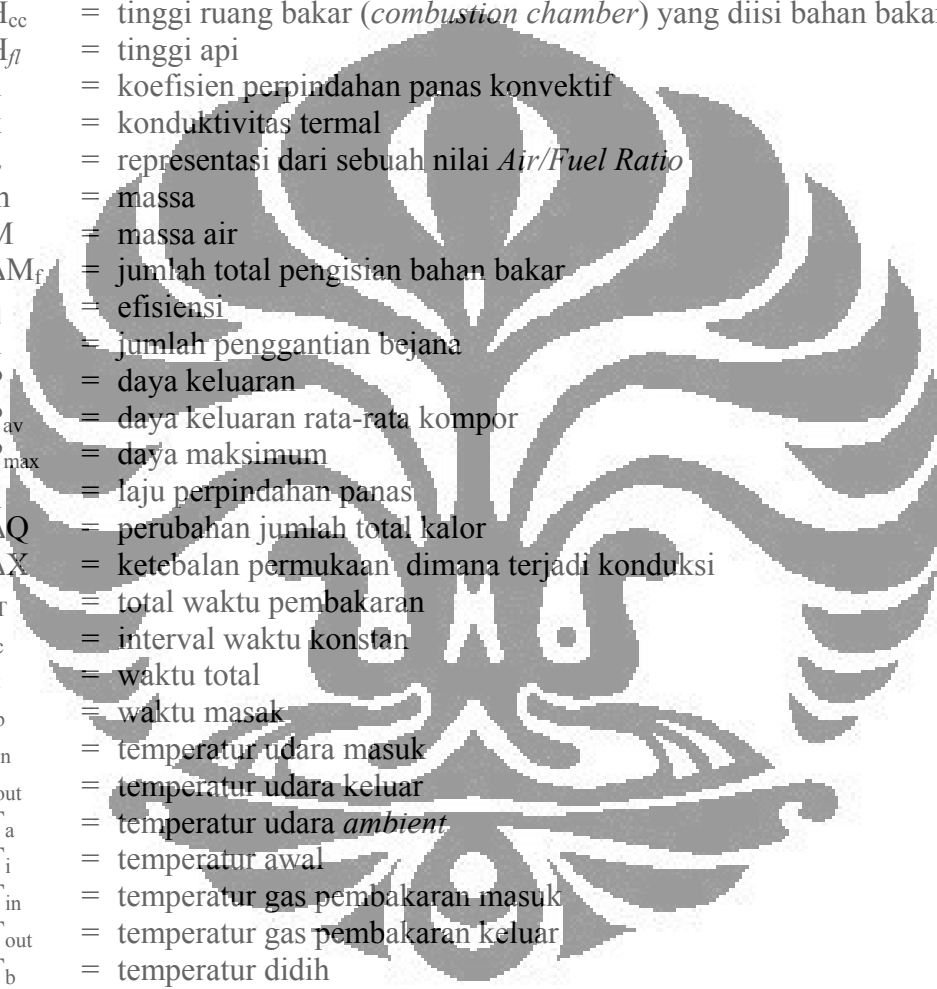


DAFTAR SINGKATAN

| | |
|-------|---|
| A/F | = <i>Air per Fuel</i> |
| AFR | = <i>Air per Fuel Ratio</i> |
| ARI | = <i>Accute Respiratory Infection</i> |
| CC | = <i>Combustion Chamber</i> |
| COLD | = <i>Chronic Obstructive Lung Disease</i> |
| ICS | = <i>Improved Cook Stove</i> |
| ID | = <i>Inner Diameter</i> |
| LPG | = <i>Liquified Petroleum Gas</i> |
| OD | = <i>Outer Diameter</i> |
| TFT | = <i>Theoretical Flame Temperature</i> |
| TNMOC | = <i>Total Non-Methane Organic Carbon</i> |
| VF | = <i>View Factor</i> |
| WBT | = <i>Water Boiling Test</i> |



DAFTAR NOTASI



| | |
|--------------|---|
| A | = luas permukaan |
| A_{cc} | = luas penampang ruang bakar (<i>combustion chamber</i>) |
| c_p | = kalor spesifik suatu bahan |
| C_2 | = konstanta tinggi api |
| E_m | = emisivitas bahan |
| H_c | = nilai kalori bersih bahan bakar |
| H_L | = nilai kalori laten penguapan air |
| H_{cc} | = tinggi ruang bakar (<i>combustion chamber</i>) yang diisi bahan bakar |
| H_f | = tinggi api |
| h | = koefisien perpindahan panas konvektif |
| k | = konduktivitas termal |
| λ | = representasi dari sebuah nilai <i>Air/Fuel Ratio</i> |
| m | = massa |
| M | = massa air |
| ΔM_f | = jumlah total pengisian bahan bakar |
| η | = efisiensi |
| n | = jumlah penggantian bejana |
| P | = daya keluaran |
| P_{av} | = daya keluaran rata-rata kompor |
| P_{max} | = daya maksimum |
| q | = laju perpindahan panas |
| ΔQ | = perubahan jumlah total kalor |
| ΔX | = ketebalan permukaan dimana terjadi konduksi |
| t_T | = total waktu pembakaran |
| t_c | = interval waktu konstan |
| t_t | = waktu total |
| t_b | = waktu masak |
| t_{in} | = temperatur udara masuk |
| t_{out} | = temperatur udara keluar |
| T_a | = temperatur udara <i>ambient</i> |
| T_i | = temperatur awal |
| T_{in} | = temperatur gas pembakaran masuk |
| T_{out} | = temperatur gas pembakaran keluar |
| T_b | = temperatur didih |
| T_{avg} | = temperatur rata-rata |
| T' | = suhu yang dicapai air saat pemanasan |
| ΔT | = perbedaan temperatur |
| U | = koefisien perpindahan kalor menyeluruh |
| σ | = konstanta Stefan-Boltzman |
| V | = laju alir volumetrik udara |
| W | = massa bahan bakar |

BAB I

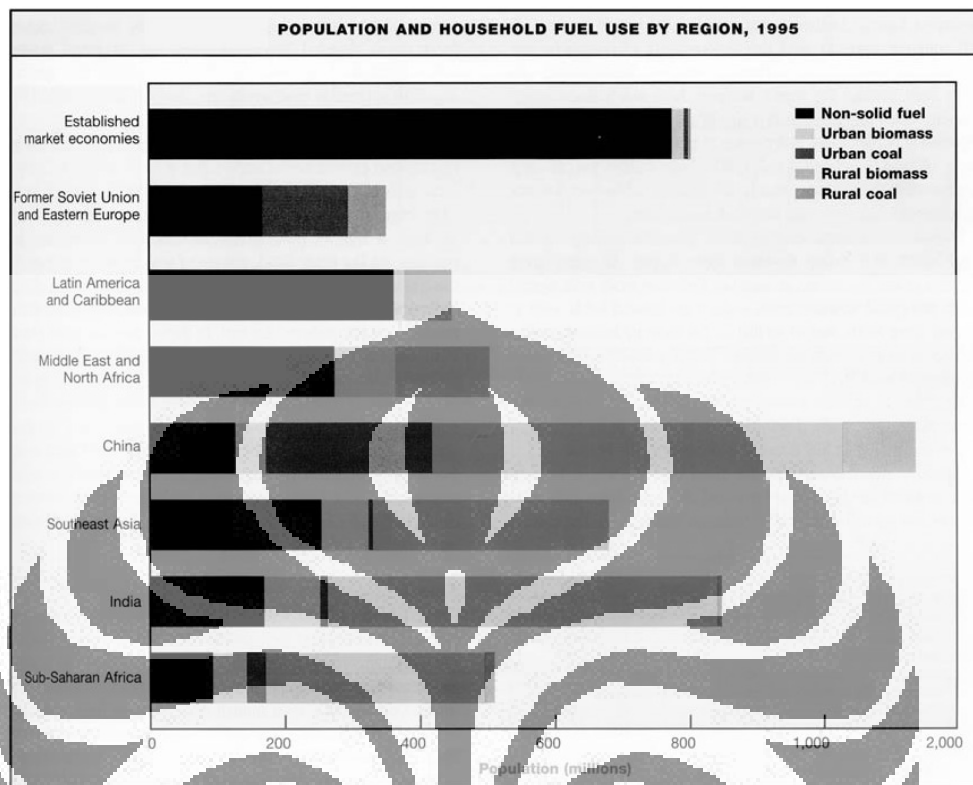
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bumi memiliki banyak sumber energi yang dapat dipergunakan. Tetapi tidak semua energi yang tersedia dapat digunakan secara terus-menerus. Secara garis besar energi dibedakan menjadi dua macam, yaitu energi tak terbarukan dan energi terbarukan. Energi tak terbarukan yang banyak dipakai saat ini adalah bahan bakar fosil berupa minyak dan gas bumi, yang dihasilkan setelah proses ratusan juta tahun secara alami. Sedangkan energi terbarukan dapat berasal dari matahari, air, angin, dan siklus biologis. Sumber energi yang berasal dari siklus biologis ini dinamakan biomassa. Contoh biomassa yang berpotensi menghasilkan energi dari pembakarannya adalah kayu, arang, kotoran hewan, dan limbah pertanian. [Kirk – Othmer, 1990]. Salah satu kegunaan biomassa adalah sebagai bahan bakar yang dibakar secara langsung karena kemudahannya, pembakaran secara langsung lebih mudah diaplikasikan dan lebih banyak penggunaannya untuk keperluan sehari-hari di rumah.

Sesuai dengan Gambar 1.1, penggunaan bahan bakar non-padat (minyak dan gas), karena hingga kini harga bahan bakar non-padat terus mengalami peningkatan, ada peluang besar terjadinya pergeseran ke arah penggunaan bahan bakar biomassa. Disamping ketersediaannya yang tidak terbatas, biomassa juga bahan bakar yang cukup dikenal masyarakat karena bahan bakar sudah dari dahulu digunakan oleh nenek moyang kita. Untuk penggunaannya tentu diperlukan sebuah alat, yang disebut kompor, yang sudah didesain untuk bahan bakar biomassa. Namun saat ini efisiensi termalnya masih rendah sampai sedang, yaitu sekitar 9.5 – 25% untuk kompor biomassa yang konvensional. Selain itu juga masih banyak mengandung partikel gas pembakaran yang cukup banyak, seperti karbon monoksida (CO) yang diatas 50 ppm (batas kandungan minimum 25 ppm), metana (CH₄), *Total Non-Methane Organic Carbon* (TNMOC), dan senyawa nitrogen oksida (NO_x) diatas 0.15 ppm (batas

kandungan minimum 0.053 ppm) yang semuanya dapat berbahaya bila dilepas ke udara dalam ruangan [Bhattacharya, 2002].



Gambar 1. 1 Penggunaan bahan bakar untuk rumah tangga di seluruh dunia (dari *World Assessment, United Nations Development Program 1995*)

Saat ini sudah didapatkan kompor biomassa yang diaplikasikan sebagai alat memasak dengan efisiensi tertinggi sebesar 25,3% bertipe Harsha dari India yang diteliti oleh Bhattacharya tahun 2002, untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi emisi sudah dikembangkan hasil gas buang yang mengadopsi sistem kerja *heat exchanger* untuk mengambil kembali panas gas buang dengan udara masuk pembakaran [A. Messerer, 2007]. Besarnya panas yang dapat diambil kembali dapat hingga mencapai 75 – 90% panas yang terbawa gas buang. Untuk menurunkan emisi, sistem kerja ini mampu mengendapkan partikel-partikel berukuran cukup besar yang berbahaya sehingga dapat mengurangi emisi dengan baik.

Sesuai peluang yang tersedia tersebut, maka penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan kompor berbahan bakar biomassa, dengan sumber energi terbarukan, menghasilkan efisiensi termal yang cukup tinggi dan ramah lingkungan atau emisi gas yang rendah. Diharapkan dari penelitian ini juga dapat menjadi

Universitas Indonesia

alternatif energi untuk keperluan rumah tangga masyarakat perkotaan yang saat ini masih memakai kompor gas LPG (*Liqufied Petroleum Gas*). Untuk bahan bakar yang dapat diterima masyarakat perkotaan pun lebih ditekankan menggunakan *biomass waste* untuk menghindari masalah deforestasi.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam merancang kompor berbahan bakar biomassa, umumnya memiliki masalah yang diantaranya.

Pertama, bagaimana mengembangkan kinerja kompor agar memiliki efisiensi tinggi dan dapat menekan partikel berbahaya akibat pembakaran.

Kedua, bagaimana merancang kompor yang baik sesuai bahan dan bentuk yang dapat diterima terutama dari segi kenyamanan pemakaian.

1.3 Tujuan Penelitian

Kompor dalam penelitian ini dirancang agar dapat digunakan dengan aman di dalam rumah ramah lingkungan yang memakai energi terbarukan (*eco-building*). Tujuan dari penelitian ini adalah:

- Merancang kompor berbahan bakar biomassa yang rendah emisi dan berefisiensi tinggi dengan sistem penukar kalor pada cerobong gas buang sehingga tidak mengancam kesehatan dan keselamatan manusia serta hemat bahan bakar.
- Merancang kompor berbahan bakar biomassa dengan bahan dan bentuk konstruksi yang nyaman, sehingga dapat diterima dengan baik.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan ruang lingkup yang akan dibahas adalah:

- Perancangan kompor berbahan bakar biomassa dengan ukuran, bentuk, dan bahan fabrikasi sesuai gambaran dibawah diadopsi dari beberapa teori kompor berefisiensi tinggi dan sistem pembuangan dengan prinsip penukar kalor (*heat exchanger*) dengan udara masuk.
- Penggunaan bahan bakar serbuk kayu yang dikompakkan menjadi pelet (*hardwood pellets*).

- Uji Kinerja menggunakan *Water Boiling Test* dan Emisi yang di ukur adalah emisi CO

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah ini adalah sebagai berikut :

Bab I : Pendahuluan

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

Bab II : Tinjauan Pustaka

Secara umum menjelaskan tentang kompor diantaranya sejarah perkembangan kompor, klasifikasi kompor, kriteria perancangan, prinsip perancangan kompor, teori pembakaran yang berhubungan dengan kompor, teknologi ICS, pengujian emisi dan efisiensi serta perbandingan dari kompor yang ada.

Bab III : Metode Penelitian

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

Bab IV : Hasil dan Pembahasan

Berisi tentang data hasil percobaan beserta analisisnya.

Bab V : Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Kompor

Improved cookstove, atau *ICS*, adalah sistem yang membakar bahan biomassa, dimana terproduksi panas melalui pembakaran, untuk penggunaan segera pada 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 DF, 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, dll. 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. Tiap biomassa memiliki sifat-sifat dan karakteristik pembakaran yang berbeda-beda.

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

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses dimana panas yang dihasilkan pembakaran ditransfer ke permukaan yang menyerap panas [JP. Holman, 1981]. Bagaimanapun, hanya sebagian dari panas yang dihasilkan dapat diterima oleh makanan dalam wadah pemasak, sisanya hilang melalui konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.2 Klasifikasi Kompor

Klasifikasi *ICS* diperlukan untuk mengidentifikasi model kompor yang sesuai dengan kelompok pengguna tertentu, wilayah target, metode produksi dan

diseminasi, dengan mempertimbangkan kebutuhan memasak dan persediaan bahan konstruksi dan bahan bakar. Maka, ICS dapat diklasifikasi dalam beberapa kategori.

a) *Fungsi*

- Kompor mono-fungsi: kompor yang hanya memiliki satu fungsi seperti untuk memasak, mengasap, memanggang, membakar, mendidihkan, dll.
- Kompor multi-fungsi: kompor yang memiliki kombinasi kegunaan seperti memanaskan air, memanaskan ruangan, mengasap ikan atau daging, menanak nasi, dll.

b) *Bahan konstruksi*

ICS umumnya terbuat dari satu bahan utama: metal, tanah liat, ceramic, batu, atau kombinasi dari beberapa bahan tersebut. Klasifikasi berdasarkan bahan membantu pemilihan rancangan yang sesuai dengan bahan yang tersedia, kemampuan fabrikasi, dan fasilitas produksi yang diperlukan. Harga sebuah ICS juga dapat bergantung pada bahan konstruksinya.

c) *Portabilitas*

Untuk basis ini, ICS dapat diklasifikasikan menjadi *fixed* atau *portable*. Kompor metal atau keramik biasanya *portable* dan dapat digunakan di dalam dan di luar ruangan. Sedangkan kompor tanah liat atau batu biasanya lebih berat, oleh sebab itu diklasifikasikan sebagai *fixed*. Berdasarkan kategori ini, kompor dapat dibedakan lagi menurut jumlah lubang (contoh: *single, double, triple*).

d) *Jenis Bahan Bakar*

Pada umumnya, kompor dirancang agar efisien terhadap satu bahan bakar tertentu saja. Misalnya kompor yang dirancang untuk kayu bakar akan memiliki performa yang buruk bila menggunakan arang. Tipe-tipe umum ICS berdasarkan kategori ini: kompor arang, kompor kayu bakar, limbah pertanian granular, limbah pertanian batangan, kompor kotoran sapi, dan kompor briket.

2.3 Kriteria Perancangan

Sebuah kompor harus dirancang secara spesifik sesuai dengan penggunaannya. Parameter teknik dan non-teknik harus diperhitungkan [Bryden M, 2002]. Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan dalam perancangan adalah: faktor sosial, daya keluaran kompor, sumber-sumber lokal, ekonomi, dan lingkungan.

2.3.1 Faktor Sosial

Dua faktor sosial yang penting dalam merancang ICS adalah kebutuhan pengguna dan sumber-sumber lokal. Perancang kompor harus mempertimbangkan target kompor yaitu: pekerjaan memasak, peralatan masak, ukuran operasi masak, dan parameter operasional lain. Pekerjaan memasak dibedakan menjadi enam macam: mendidihkan, menggoreng, membakar, memanggang, mengukus, dan memasak dengan tekanan lebih tinggi. Tipe pengguna kompor juga dapat dibedakan menjadi rural dan urban, dimana masyarakat urban sangat mementingkan kenyamanan memakai kompor tersebut, penampilan kompor dan penyediaan bahan bakar harus praktis.

2.3.2 Daya Keluaran Kompor dan Kebutuhan Lain

Waktu dan frekuensi memasak juga perlu diperhatikan. Waktu masak bergantung pada kuantitas makanan yang dimasak dan daya kompor, dan juga jumlah jenis makanan yang dimasak. Daya keluaran (*power output*) dan mode regulasinya pada berbagai lubang pot dioptimasi sesuai kebutuhan pengguna. Bentuk dan ukuran panci akan mempengaruhi karakteristik perpindahan kalor.

2.3.3 Sumber-Sumber Lokal

Sumber-sumber lokal yang mempengaruhi perancangan kompor adalah: bahan konstruksi, jenis bahan bakar, infrastruktur, keahlian produksi dan distribusi sistem ICS. Bahan bakar biomassa campuran biasanya dipakai di negara-negara berkembang, seperti kayu bakar, arang, sisa pertanian dan sisa ternak. Di lokasi yang tidak terdapat metal sheet, biasanya dipakai tanah liat, batu bata, dan keramik sebagai bahan konstruksi. Dari segi perpindahan kalor, keramik

merupakan bahan konstruksi yang baik. Namun di tempat-tempat terpencil, karena susah didapatkan, maka lebih dipakai model tanah liat.

2.3.4 Faktor Ekonomi

Biaya sebuah ICS bergantung pada bahan konstruksi dan kerumitan fabrikasi. Model yang sangat efisien biasanya melebihi kapasitas pembelian pemakai ICS seperti ini hanya dapat dipasarkan bila mendapat subsidi dari pemerintah. Kompor harus kokoh, agar tidak memerlukan perawatan yang sering. Bagian-bagian yang harus dibersihkan juga sebaiknya mudah dicapai. Hal-hal lain yang mempengaruhi biaya adalah cara mengorganisir produksi, operasi komersil, dan distribusi.

2.3.5 Faktor Lingkungan

Efisiensi termal dan efisiensi pembakaran terkadang bertolak belakang. Rancangan yang efisien secara termal, dalam kasus-kasus tertentu tidak efisien secara pembakaran, sehingga menimbulkan emisi yang lebih besar, dan merugikan lingkungan, khususnya dalam ruangan dimana kompor tidak memiliki cerobong asap. Proteksi dari api dan luka bakar perlu dipersiapkan, dengan cara menentukan bahan konstruksi yang sesuai. Kondisi meteorologi pun mempengaruhi penggunaan kompor. Pada cuaca panas dan lembab, lebih baik menggunakan kompor di luar ruangan, sedangkan pada cuaca yang lebih dingin, penggunaannya di dalam ruangan.

Secara ringkas, untuk penentuan konsep rancangan kompor biomassa, perancang harus mempertimbangkan sebanyak faktor mungkin dari yang telah dijelaskan di atas, agar dapat digunakan secara optimal oleh pengguna yang ditujukan.

2.4 Prinsip Perancangan

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, performansi termal sebuah sistem ICS bergantung pada efisiensi dari konversi panas, yaitu konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi termal, efisiensi energi termal dapat ditransfer ke bejana masak, sistem dimana produk pembakaran berpindah dalam ICS, dan juga jenis-jenis bahan konstruksi kompor. Perancang harus mengerti interaksi pada tiap

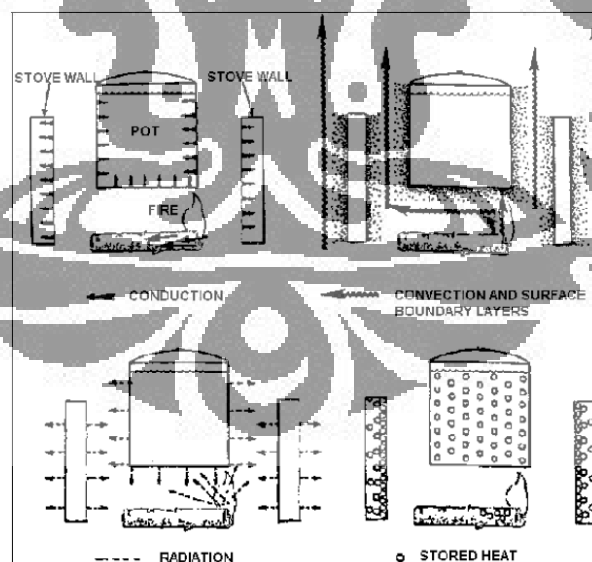
proses, seperti: pembakaran dan perpindahan panas yang terjadi dalam kompor, serta bagaimana konstruksi kompor mempengaruhi faktor-faktor tersebut [Bryden M, 2002].

2.4.1 Proses Pembakaran

Proses pembakaran bergantung dari sifat fisika-kimia bahan bakar (ukuran, bentuk, densitas, *moisture content*, *fixed carbon content*, bahan volatil, dll.), kuantitas dan mode penyediaan udara (udara primer dan sekunder), dan kondisi lingkungan sekitar (temperatur, angin, humiditas, dll.) Penjelasan lebih lengkap akan dibahas di subbab 2.5.

2.4.2 Perpindahan Panas

Sebagian dari panas yang dihasilkan melalui pembakaran akan diterima oleh makanan dalam panci. Selebihnya akan hilang melalui proses seperti gambar 2.1 yaitu 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.



Gambar 2. 1 Konduksi, konveksi, radiasi, dan penyimpanan panas [Baldwin S., 1986]

a) **Konduksi**

Molekul-molekul dalam bahan padat tersusun rapat. Bila terdapat gradien temperatur, molekul-molekul tersebut terdistribusi dan menyamakan energi

kinetiknya dengan interaksi langsung yang disebut konduksi [J.P. Holman, *Heat Transfer*, 1981]. Pada logam, panas terkonduksi pula lewat pergerakan elektron bebas berkecepatan tinggi dari area bersuhu tinggi ke area bersuhu rendah. Dari gambar 2.1, terlihat bahwa daerah dimana terjadi konduksi adalah: 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):

$$q = -\frac{k \times A \times \Delta T}{\Delta X} \quad (2.1)$$

dimana q adalah laju perpindahan panas, k konduktivitas termal, A luas permukaan, ΔX ketebalan permukaan dimana terjadi konduksi, dan ΔT perbedaan suhu dari permukaan dingin dan panas. $\Delta X/kA$ dinamakan tahanan termal.

Penggunaan persamaan di atas menghasilkan nilai yang jauh lebih besar dari nilai aktualnya, sebab tahanan udara dari lapisan batas permukaan (*surface boundary layer*), juga tahanan dari kotoran atau lapisan oksida, tidak diperhitungkan. Persamaan yang memuat tahanan-tahanan tersebut adalah:

$$q = \frac{A \times \Delta T}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta X}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.2)$$

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

Kemampuan suatu bahan untuk menyimpan panas juga penting dalam perpindahan kalor konduksi. Hal ini dihitung dari kalor spesifik (specific heat), yaitu energi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur dari 1 kg massa sebanyak 1°C. Perubahan jumlah total kalor yang disimpan ΔQ , saat temperatur dari kompor bermassa m diubah sebanyak ΔT , diberikan pada persamaan berikut:

$$\Delta Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (2.3)$$

dimana c_p adalah kalor spesifik dari bahan kompor.

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

kompot yang tidak lama, rancangan dengan dinding kompot yang tipis lebih diinginkan.

Juga dapat disimpulkan bahwa kelembaman termal (*thermal inertia*) kompot 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 kompot logam, aplikasi lapisan isolasi dapat mengurangi kehilangan kalor.

b) Radiasi

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:

$$\text{Maximum wavelength} = \frac{2897.8}{T} \text{ microns} \quad (2.4)$$

Dari gambar 2.1, daerah dimana terjadi radiasi adalah: dari api, antara dinding dalam, panci, dan kayu, dan dari dinding, panci, cerobong, dan bukaan kotak api, ke atmosfer.

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

$$\bar{q} = \sigma \times A \times T^4 \quad (2.5)$$

dimana σ adalah konstanta Stefan-Boltzman, bernilai $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, A adalah luar emisi benda (dalam m^2), dan T temperatur (dalam K).

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

$$q = E_m \times \sigma \times A \times T^4 \quad (2.6)$$

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa temperatur sangat berpengaruh terhadap emisi benda. Parameter lain yang mempengaruhi radiasi

adalah *View Factor* (VF) antara permukaan yang mengemisi dengan permukaan yang menyerap. VF merupakan fraksi dari energi teremis dari suatu permukaan yang ditahan oleh permukaan kedua. Hal ini dideterminasi oleh geometri relatif kedua permukaan.

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

$$\text{Energy intercepted by the pot} = \text{Power emitted by the firebed} \times A \times VF \quad (2.7)$$

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.

c) Konveksi

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

Pada kompor, daerah dimana terjadi perpindahan kalor konveksi adalah: plume gas panas dari api, titik stagnasi dari plume ke panci, aliran panas dari dasar dan/atau dinding panci, dimana gas pasti mengalir keluar dan ke atas, aliran melewati *tunnel*, cerobong, sekat, dan celah antara panci dan dinding, serta permukaan panas luar dari panci, kompor, dan cerobong.

Konveksi merupakan perpindahan kalor utama yang terjadi pada kompor. Gas panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar, memanaskan panci. Rumus umum konveksi adalah:

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (2.8)$$

dimana q adalah panas yang dipindahkan dari gas panas ke permukaan panci atau dinding, A adalah luas permukaan dimana aliran panas terjadi, h adalah koefisien

perpindahan kalor konveksi, dan ΔT adalah perbedaan temperatur antara gas panas dengan permukaan padat.

2.5 Teori Dasar 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 [en.wikipedia.org]. Dalam satu reaksi pembakaran lengkap, satu campuran bereaksi dengan satu elemen pengoksidasi, seperti oksigen atau fluorine, dan produknya adalah campuran dari setiap elemen dalam bahan bakar dengan elemen oksidasi. Sebagai contoh:



Pada kenyataannya, penggunaan oksigen (O_2) sebagai oksidan diperoleh dari udara dan hasil gas buang pembakaran juga akan berisi nitrogen:

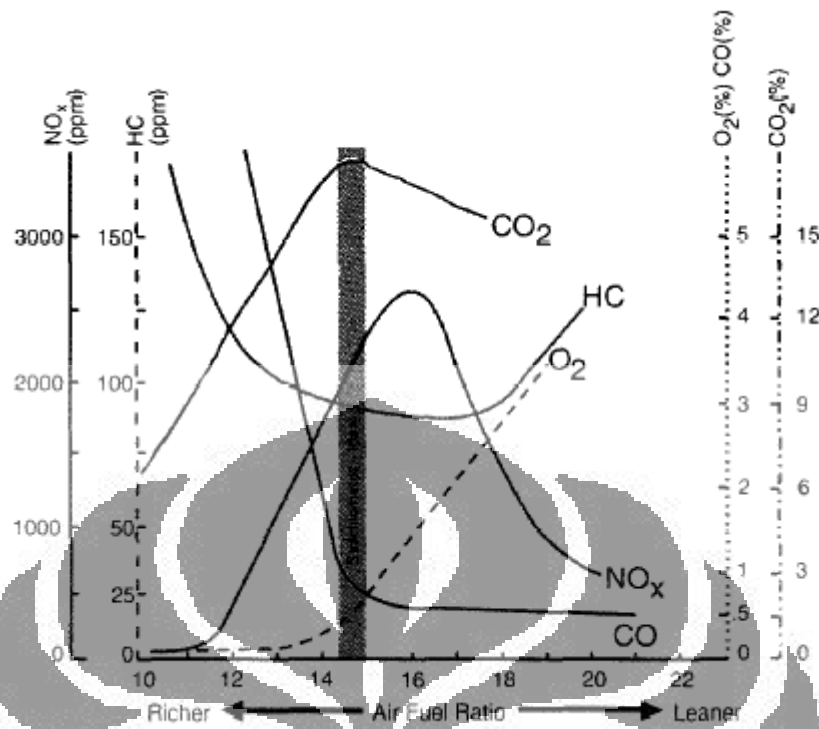


Sejalan dengan mungkin menjadi dilihat, ketika udara adalah sumber oksigen, nitrogen sejauh ini adalah bagian terbesar dari hasil gas pembakaran.

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 diorganisir pada berbagai oksida nitrogen (NO_x).

2.5.1 Rasio udara dengan 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 Rasio udara dengan bahan bakar
www.multisurfacemotorcycling.com

AFR adalah parameter penting untuk anti-polusi dan alasan penyetulan kinerja. Lamda (λ) adalah satu cara alternatif untuk merepresentasikan AFR, atau sejauh apakah menyimpang dari kondisi stoikiometri

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{stoich}} \quad (2.9)$$

Lamda bernilai 1.0 adalah berarti pada kondisi stoikiometri, campuran kaya udara adalah lebih dari 1.0, dan campuran kurang udara adalah kurang dari 1.0. Sesuai dengan Gambar 2.2, 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 karbon monoksida. Reaksi mengoksidasi karbon untuk membentuk karbon monoksida secara signifikan lebih sedikit melepaskan panas dibandingkan reaksi serupa untuk membentuk karbon dioksida.

(Karbon monoksida mempertahankan energi kimia yang potensial. Campuran untuk efisiensi terbaik adalah sedikit berbeda dari campuran stoikiometrik.

2.5.2 Temperatur Nyala

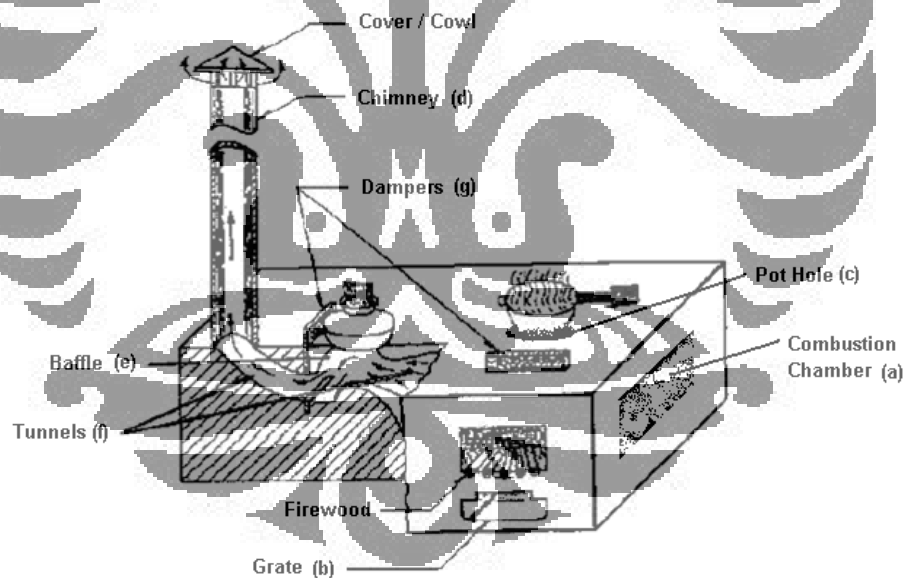
Efisiensi termodinamik pembakaran adalah $(T_2 - T_1)/T_1$, dimana T_2 adalah temperatur tertinggi dari api, dan T_1 adalah suhu keluaran gas. Temperatur nyala teoretis (TFT= *theoretical flame temperature*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{TFT} = \frac{\text{sensible heat in fuel and air} + \text{heat of combustion}}{\text{total quantities of combustion products} \times \text{mean specific heat}} \quad (2.10)$$

2.6 Teknologi *Improved Cook Stoves* (ICS)

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

2.6.1 Komponen-Komponen ICS



Gambar 2.3 Tampilan isometrik Dhuala 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 yang hilang yang minimum. Hal-hal tersebut dapat dicapai

dengan mengoptimalkan dan menambahkan beberapa subsistem berikut, yang digambarkan dalam Gambar 2.3.

a) Kotak api / ruang pembakaran

Ruang pembakaran merupakan komponen utama kompor, dimana pembakaran terjadi. Rancangan kotak api berdasarkan daya keluaran rata-rata P_{av} kompor dalam kW, dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{av} = \frac{\Sigma \Delta M_f \times H_c}{t_T} \quad (2.11)$$

dimana $\Sigma \Delta M_f$ adalah jumlah total pengisian mandiri kayu selama percobaan, H_c nilai kalorifik bersih dari bahan bakar, t_T total waktu pembakaran.

Ruang pembakaran dapat dibagi menjadi dua seksi, dinamakan: seksi pembakaran kayu, dan seksi pembakaran zat volatil.

Tinggi dan luas penampang seksi pembakaran kayu dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$H_{cc} = \frac{\Delta M_f}{x \times p_f \times A_{cc}} \quad (2.12)$$

$$A_{cc} = \frac{P_{design} [kg]}{P_{density} [kg/m^2]} \quad (2.13)$$

dimana ΔM_f adalah masukan bahan bakar (kg), x densitas packing, p_f densitas bahan bakar, A_{cc} luas penampang.

Sedangkan tinggi api dapat dihitung:

$$H_{fl} = C_2 \times P^{2/5} \quad (2.14)$$

Dimana P adalah daya keluaran, dan C_2 adalah konstanta. Untuk kompor dengan garangan, nilai konstanta ini adalah $75 \text{ mm/kW}^{0.4}$, dan untuk kompor tanpa garangan bernilai $110 \text{ mm/kW}^{0.4}$.

Waktu yang diperlukan untuk memasak dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$t_b = 550 \times M_f^{0.38} \quad (2.15)$$

dimana t_b adalah waktu memasak, dan M_f adalah massa makanan yang dimasak. Dari persamaan ini, daya maksimum dapat dihitung dengan:

$$\eta \times P_{\max} \times t_b = M_f \times C_p \times (T_b - T_i) \quad (2.16)$$

dimana η adalah efisiensi, P_{\max} daya maksimum, C_p kalor spesifik makanan, T_b temperatur didih, dan T_i temperatur inisial (awal).

Bukaan samping untuk udara masuk dapat dihitung berdasarkan laju alir volumetrik udara dengan korelasi berikut [TERI 1982]:

$$V = 29.7 \times A \times h^{1/2} \times (1 - T_a / T_i)^{1/2} \quad (2.17)$$

dimana T_a dan T_i adalah temperatur udara ambient dan temperatur rata-rata alas (*bed*), A adalah luas bukaan udara samping, dan h adalah tinggi bukaan.

b) 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.

c) 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.

d) Cerobong (*chimney*)

Pemasangan sebuah cerobong pada rancangan kompor akan membantu mengisap gas keluaran (*flue gas*), karena adanya perbedaan temperatur dari tinggi (gas panas) ke rendah (udara *ambient*). Akibatnya, gas panas akan bergerak keluar

melalui cerobong, sedangkan udara biasa dapat masuk ke dalam. Terdapat tiga gaya yang mengontrol pergerakan fluida dalam kompor, yaitu:

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

e) Penghalang (*baffle*)

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

f) 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.

g) Pengatur api (*damper*)

Pengatur api ini berupa pelat/piringan yang dapat dipindahkan dari dan ke dalam kompor, tepatnya di dalam lintasan aliran udara antar pot. Gunanya adalah untuk mengatur induksi udara dalam kompor, sehingga dapat mengatur daya keluaran kompor. Bentuk umumnya rektanguler atau trapezoidal.

2.6.2 Bahan Konstruksi ICS

Terdapat beberapa jenis bahan konstruksi kompor, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya, yang dapat dilihat dari tabel berikut.

Tabel 2. 1Sifat bahan konstruksi kompor

| Type of material | Malle-ability | Impact resistance | Thermal shock | Cost | Insulation properties | Long term stability | Production facilities |
|------------------------|---------------|-------------------|---------------|------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Cast iron | G | G | G | M | P | G | Factory |
| Steel | M | G | G | G | P | M | Artisan |
| Aluminum | G | M | G | M | P | M | Factory |
| Unfired clay | G | P | P | G | G | M | Built in situ |
| Fired ceramics | G | M | P | G | M | M | Potters |
| Cementitious materials | G | M | M | M | M | M | Fac./ Artis. |

Catatan : G = Good (baik), M = Medium (sedang), P = Poor (buruk)

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

a) Kompor logam (*metal stoves*)

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

b) Kompor tanah liat (*clay stoves*)

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

c) Kompor *ceramic / fired-clay*

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

2.7 Pengujian Efisiensi Termal

Efisiensi termal dapat dihitung dengan beberapa metode berikut:

- ***Constant heat output method***

$$\eta = n \times M \times c_p \times (T_b - T_a) + M \times \frac{c_p (T_b - T_a)}{H_c \times W} \quad (2.18)$$

dengan η efisiensi, M massa air, T' suhu yang dicapai air saat pemanasan, T_a dan T_b suhu ambient udara dan suhu maksimum panci, H_c kalor pembakaran, W massa bahan bakar, n jumlah penggantian bejana, dan c_p kalor spesifik air

- **Constant temperature rise method**

Metode ini menghitung efisiensi berdasarkan beberapa kali percobaan untuk menaikkan suhu makanan/minuman uji sebanyak ΔT yang ditentukan sendiri.

$$\eta = \frac{M \times c_p \times T_{avg}}{H_c \times W} \times \frac{t_c}{t_t} \quad (2.19)$$

- **Constant time method**

$$\eta = M \times c_p \times \frac{T_{avg}}{H_c \times W} \times \frac{t_c}{t_t} \quad (2.20)$$

Dimana t_c interval waktu konstan, dan t_t waktu total

- **Water boiling test**

$$\eta = \frac{M \times c_{p(air)} \times (T_b - T_a) + M_1 \times c_{p(bejana)} \times (T_b - T_a) + M_2 \times H_L}{H_c \times W} \quad (2.21)$$

dimana M_1 massa bejana, c_{p2} kalor spesifik bejana, M_2 massa air terevaporasi, dan H_L kalor laten penguapan.

2.8 Aspek Lingkungan dan Kesehatan

2.8.1 Aspek Lingkungan

Persoalan pokok mengenai konservasi biomassa (khususnya pohon/hutan biomassa) meliputi: generasi, pemeliharaan, dan penerusan (*sustain*). Walaupun generasi pohon terus dilakukan, namun penggunaan produk-produk pohon dianggap bermasalah untuk konservasi. Maka tiap negara harus menjamin

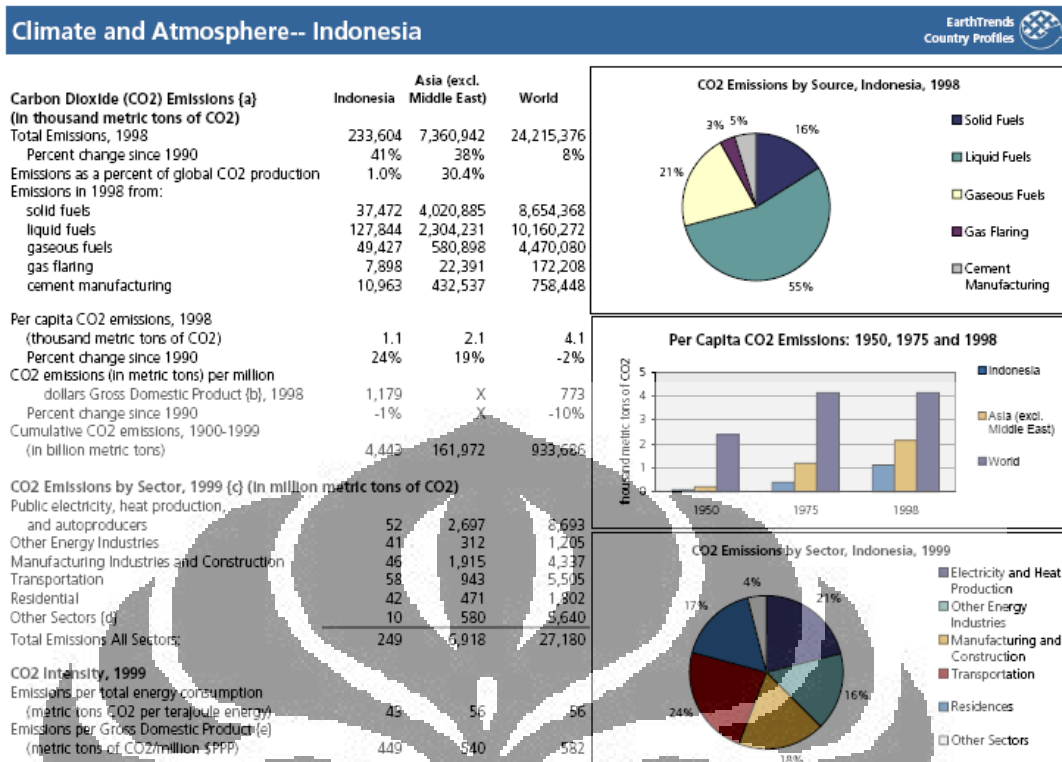
sustainability dari hutan-hutan, agar produk-produk kayu dapat terus dipakai. Bila hal ini sudah tercapai, maka akan menguntungkan juga secara ekonomi.

Ini menunjukkan kalau penggunaan biomassa yang salah satu bahan bakar padat tidak terlalu besar pengaruhnya walaupun cukup banyak pengguna bahan bakar padat di Indonesia. Berarti, masalah yang perlu diatasi adalah bagaimana menjamin ketersediaan bahan bakar kayu secara terus menerus tanpa merugikan lingkungan.

2.8.2 Aspek Emisi Gas Buang

Emisi yang bukan polutan adalah CO_2 dan H_2O sedangkan emisi yang bukan polutan antara lain bahan bakar yang tidak terbakar, nitrogen oksida (NO , NO_2 , dan N_2O , atau NO_x), sulfur oksida (SO_2 dan SO_3 , atau SO_x), produk pembakaran tak sempurna (PIC), CO dan HC tak terbakar (UHC), senyawa organik volatil (VOC) seperti etana, etilena, propana, asetilena dan pelarut, aromatik, polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH), partikulat (karbon padat atau jelaga), oksigenat (aldehida, keton, peroksida), senyawa terhalogenasi dan logam. Meskipun jumlahnya relatif kecil, dampak pada lingkungan cukup signifikan karena pemakaian pembakaran dalam jumlah besar.

Sedangkan masalah emisi CO_2 yang dapat menyebabkan pemanasan global, untuk penggunaan kompor biomassa, emisi CO_2 masih tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan pembakaran-pembakaran lain, khususnya emisi yang dikeluarkan industri besar dan kendaraan bermotor. Selain itu dari data yang dikeluarkan EarthTrends.wri.org sesuai gambar, tentang kadar emisi CO_2 yang diproduksi Indonesia ternyata menunjukkan emisi terbesar merupakan kontribusi bahan bakar cair, sedangkan bahan bakar padat menduduki urutan ketiga dibawah bahan bakar gas.



Gambar 2. 4 Data kadar CO₂ di Indonesia dari beberapa sektor (EarthTrends.wri.org, 1998)

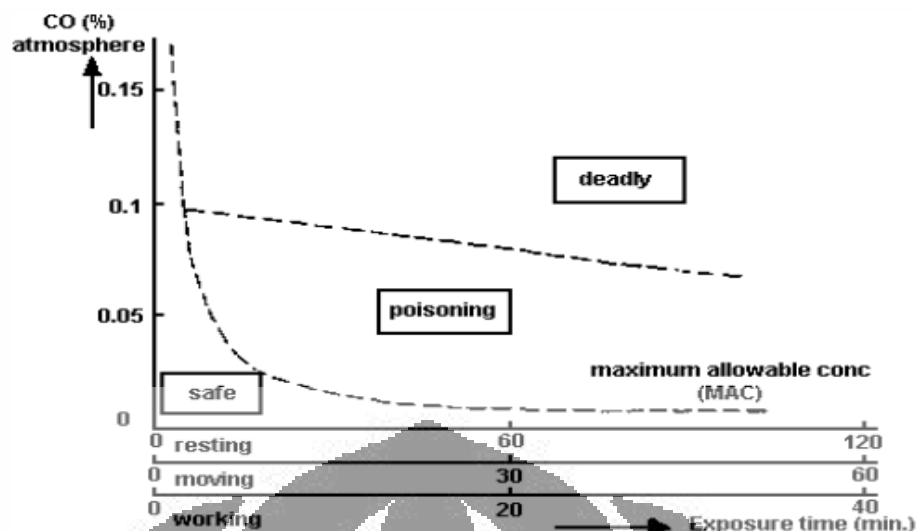
2.8.3 Aspek Kesehatan

World Health Organization (WHO), memaparkan beberapa masalah kesehatan yang dapat ditimbulkan oleh emisi dari kompor biomassa, dimana masalah utama diakibatkan oleh emisi CO dan partikulat.

Tabel 2. 2 Mekanisme efek kesehatan dari polutan

| Polutan | Mekanisme efek kesehatan |
|------------------|--|
| Karbon monoksida | <ol style="list-style-type: none"> 1. Inhalasi ke dalam sistem pernapasan 2. Absorpsi ke dalam darah melewati paru-paru 3. Level karboksihemoglobin (HbCO) meningkat 4. Oksigen dalam jaringan tubuh berkurang 5. Memungkinkan dampak <i>cilia-state</i> pada paru-paru |
| Partikulat | <ol style="list-style-type: none"> 1. Inhalasi ke dalam sistem pernapasan 2. Pengendapan dalam trakea 3. Irritasi dan toksisitas |

Untuk emisi CO, terdapat batasan-batasan tertentu dimana kadarnya masih aman, beracun, sampai mematikan.



Gambar 2. 5 Efek konsentrasi CO di udara terhadap waktu pemaparan dan kondisi kerja [Smith, Kirk R, 1987]

Dampak negatif dari emisi yang dikeluarkan kompor terhadap kesehatan manusia, antara lain dapat menimbulkan:

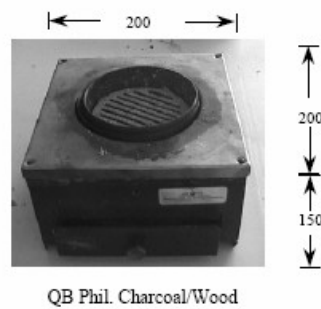
- Accute Respiratory Infection (ARI), yaitu penyakit yang menyerang sistem pernafasan.
- Chronic Obstructive Lung Disease (COLD), yaitu penyakit yang menyerang paru-paru.
- Gangguan mata akibat masuknya partikulat, kulit terbakar, akibat kurang diperhatikannya aspek keselamatan saat operasi memasak berlangsung.

2.9 Perbandingan Kompor Biomassa

Berikut ini akan dijelaskan lima kompor biomassa dari beberapa daerah di dunia, dan akan dibandingkan pula beberapa parameter, khususnya efisiensi termal dan emisi. [Bhattacharya, 2002; Ballard-Tremer, 1996; Aggarwal, 2004; James J. Jettera dan Peter Kariherb, 2007; Dr. Larry Winiarsky, 2007]

a) QB Philippine stove [Bhattacharya, 2002]

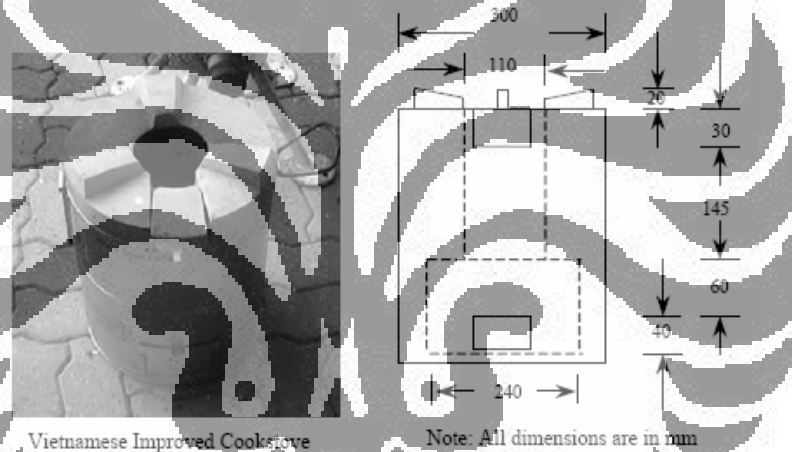
Kompor ini memiliki berat 5.8 kg, terbuat dari lembaran logam, dapat membakar kayu dan arang. Panas dalam kompor dapat diatur dengan memanipulasi *ash pan*. Kompor memiliki garangan yang dapat dipisahkan.



Gambar 2. 6 Kompor QB Philippine

b) Vietnamese improved stove [Bhattacharya, 2002]

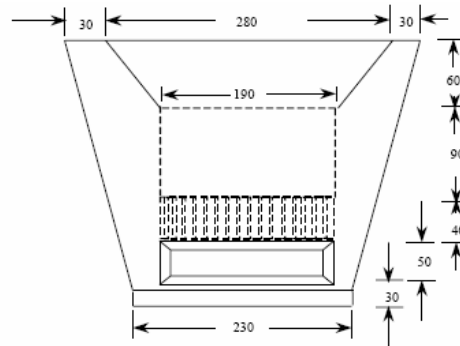
Kompor ini dikembangkan oleh institusi penelitian di Vietnam. Kompor dibuat dari lembaran logam silindris dan diisolasi dengan semen. Sistem ini memiliki garangan tetap (tidak dapat dicopot).



Gambar 2. 7 Kompor Vietnam

c) Traditional Lao-improved stove [Bhattacharya, 2002]

Kompor ini dibuat dari semen yang ditutup dengan lembaran tergalvanisasi (*galvanized sheet*). Garangan tetap memiliki 9 lubang berdiameter 3mm. Terdapat bukaan dibawah garangan untuk mengeluarkan abu. Bahan bakar masuk lewat bukaan samping, sedangkan panci yang digunakan dapat berdiameter 20-30 cm.



Gambar 2. 8 Kompor Lao tradisional

d) **WFP Rocket Stove [James J. Jettera dan Peter Kariherb, 2007]**

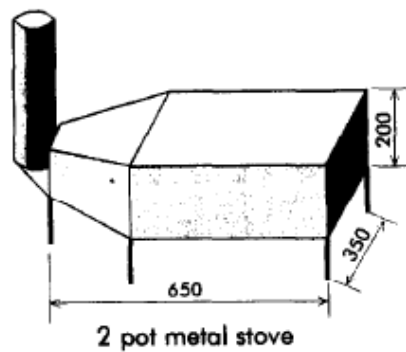
Menggunakan lapisan logam pada bagian konstruksi luarnya, memiliki penahan samping lubang kompor (skirt) dan untuk insulasinya menggunakan vermiculite. Kompor ini, memiliki keunggulan pada waktu masak yang cukup cepat sehingga dapat menghemat bahan bakar serta menghasilkan emisi yang relatif kecil. Namun kompor ini bukan jenis kompor yang tahan lama, waktu hidupnya hanya berkisar 3 bulan waktu pakai, sehingga perlu penggantian bila rusak.



Gambar 2. 9 Kompor WFP Rocket Stove

e) **General 2 pot metal stove with chimney [Ballard-Tremer, 1996]**

Kompor ini terbuat dari logam, memiliki dua lubang panci, dan juga cerobong untuk mengeluarkan *flue gas*. Dimensinya lebih besar dibandingkan ketiga kompor di atas.

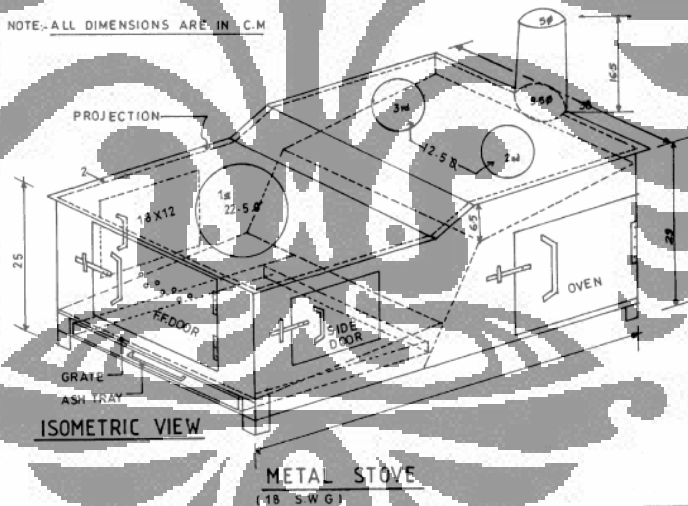


Gambar 2. 10 Kompor dua panci umum dengan cerobong

f) **Himachal Pradesh improved metal stove [Aggarwal, 2004]**

Kompor ini dikembangkan di Himachal Pradesh, Himalaya Barat, India. Kompor terdiri dari lembaran 18 gauze SWG dengan ruang pembakaran. Garangan disediakan di bawah kotak api dengan lembaran 16 gauze SWG dengan lubang-lubang kecil berukuran sama untuk sirkulasi udara. Terdapat piringan di bawah garangan, yang berguna untuk menarik abu untuk dibuang.

NOTE: ALL DIMENSIONS ARE IN C.M

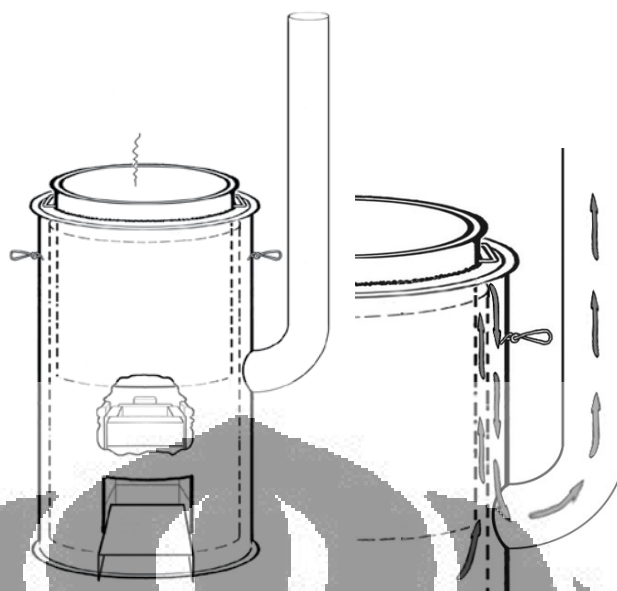


Gambar 2. 11 Kompor Himachal Pradesh

g) **Institutional rocket stove [Dr. Larry Winiarsky, 2007]**

Sama seperti jenis rocket stove sebelumnya, kompor ini tipe yang lebih kecil dengan gap side skirt sebesar 16 mm yang efektif dapat meningkatkan transfer panas ke panci. Selain itu, terdapat cerobong asap yang di pasang di samping kompor untuk menarik gas panas pembakaran sehingga terjadi aliran menurun untuk kembali meningkatkan transfer panas.

Universitas Indonesia



Gambar 2. 12 Institutional rocket stove

Perbandingan hasil efisiensi termal, dan emisi beberapa komponen gas keluaran ditabulasi sebagai berikut.

Tabel 2. 3 Perbandingan efisiensi termal dan emisi lima kompor pilihan

| Nama Kompor | Efisiensi Termal (%) | Emisi (g kg ⁻¹ bahan bakar) | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|--|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------|
| | | CO | CO ₂ | CH ₄ | TNMOC | NO _x | SO ₂ | TSP |
| QB Phil | 23 | 45.81 | 1568 | 9.7 | 9.5 | 0.2 | nd | nd |
| Vietnam | 17.5 | 47.1 | 1577 | 5.3 | 7.6 | 0.15 | nd | nd |
| Lao | 18.4 | 51.9 | 1565 | 6.0 | 10.0 | 0.19 | nd | nd |
| WFP Rocket stove | 21.01 | 2.9 | 352 | 0.026 | 0.091 | nd | nd | nd |
| 2-pot metal | 18.2-25.9 | 12.0-31.6 | nd | Nd | nd | nd | 0.17-0.42 | 1.22-1.94 |
| Himachal P | 24.97 | nd | nd | Nd | nd | nd | nd | nd |
| Institutional rocket stove | 28.89 | 5.7 | 263 | 0.037 | 0.097 | nd | nd | nd |

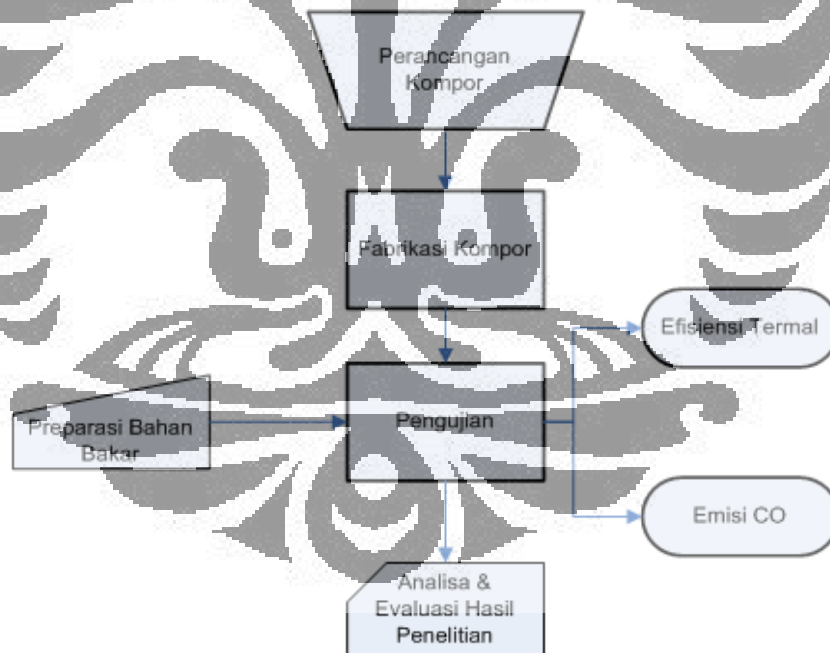
*Dengan TNMOC adalah total *non metane organic compound*, TSP adalah total *suspended particulate*, dan *nd* berarti tidak ditemukan data (*no data*).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimana tahap pra-penelitian adalah melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan kompor biomassa. Lalu, penelitian utamanya menyangkut tiga hal, yaitu perancangan, fabrikasi, dan pengujian (dipertebal dalam skema di bawah). Penyediaan alat dan bahan serta preparasi bahan bakar dapat dilakukan dalam waktu yang bersamaan sebelum fabrikasi. Adapun hal-hal yang diuji meliputi emisi gas buang CO kompor dan efisiensi termal kompor. Setelah itu, dilakukan analisa dan evaluasi hasil penelitian, dan terakhir, dibuat kesimpulan.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.2 Tahap Perancangan Kompor

Setelah studi literatur mengenai desain kompor, maka tahap berikutnya adalah penelitian, dimana pertama-tama merancang kompor yang akan

difabrikasi. Perancangan ini difokuskan pada penghitungan ukuran komponen-komponen kompor sesuai desain yang sudah direncanakan. Prosedur umum perancangan kompor adalah sebagai berikut:

1. Menghitung tinggi dan luas penampang ruang pembakaran bagian bahan bakar menggunakan rumus (2.11) dan (2.12)
2. Menghitung tinggi ruang pembakaran bagian api menggunakan rumus (2.13)
3. Menghitung tinggi total ruang pembakaran (jumlah tinggi bagian bahan bakar ditambah dengan tinggi bagian api).
4. Menghitung tinggi lubang untuk masuknya udara ke kompor, menggunakan rumus (2.16) berdasarkan laju alir udara masuk.
5. Menentukan bahan dan ukuran garangan, serta pengaturan lubang-lubang dan jarak antar lubang.
6. Menentukan ukuran dan bentuk lubang untuk meletakkan panci di atasnya, dengan pertimbangan penggunaan panci umum dan mencegah adanya *flue gas* yang keluar dari lubang tersebut.
7. Menghitung tinggi dan diameter cerobong untuk mengeluarkan asap hasil pembakaran dalam kompor serta pemasangan sistem penukar kalor terhadap udara masuk menggunakan prinsip *heat exchanger counter current gas-gas*.
8. Membuat gambar teknik dari kompor rancangan, sesuai penentuan dan perhitungan di atas.

3.3 Tahap Fabrikasi Kompor

Pada tahap fabrikasi kompor bahan dan alat yang dipakai antara lain:

Peralatan:

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

Bahan:

- Lembaran logam

- Pipa *stainless*
- Fitting: *elbow, water mur, joint, dan reducer*
- *Ceramic/cement*
- Garangan kawat kasa 5 mm
- Penampung abu
- Cat logam

Untuk prosedur umum pengerjaannya adalah sebagai berikut:

1. Membuat komponen utama kompor, yaitu ruang pembakaran, dengan bahan dan dimensi ruang dari subbab 3.2. Membuat lubang udara primer sebelum masuk ke ruang pembakaran, yaitu di bawah level bahan bakar, agar distribusi udara ke bahan bakar lebih merata. Membuat lubang untuk panci, dan mengatur tinggi ujung yang meruncing ke arah atas, agar tidak ada gas yang keluar dari lubang tersebut.
2. Membuat garangan sesuai rancangan tahap 5 subbab 3.2, dan memasangnya dalam ruang pembakaran paling bawah, tepat di atas level lubang udara masuk.
3. Membuat cerobong asap dengan bahan, tinggi, dan diameter seperti ditentukan pada tahap 7 subbab 3.2 yang dapat dilepas.
4. Melakukan pelapisan (*coating*) bagian kompor terluar dengan cat besi, untuk mencegah terjadinya korosi.

3.4 Tahap Preparasi Bahan Bakar

Di waktu yang bersamaan dengan penyediaan alat dan bahan, akan dipreparasi bahan bakar yang akan dipakai, dan dilakukan perlakuan sedemikian rupa sehingga siap dibakar dalam kompor dan diuji. Namun pada 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.

Peralatan:

- *Pressure pelletizer* hingga 10 Ton
- Cetakan *pellet*
- Besi asap yang dikeraskan sampai 50 Harden

- Alat pemotong kayu

Bahan:

- Serbuk kayu

Adapun prosedur umum dalam preparasi tiap jenis bahan bakar secara umum adalah sebagai berikut:

1. Mengumpulkan ranting-ranting kayu dari wilayah Universitas Indonesia, atau membeli bila dijual dalam bentuk potongan
2. Memotong ranting-ranting tersebut sehingga panjangnya seragam, yaitu 7-10 cm
3. Menghancurkan dengan menggunakan crusher atau mesin penepung agar halus
4. Mengeringkan kayu tersebut dengan oven
5. Memasukkan ke pencetak pelet
6. Menekan hingga terbentuk bahan bakar pelet biomassa yang padat atau kompak menggunakan alat *pressure pelletizer*



Gambar 3. 2 Pressure pelletizer

3.5 Tahap Pengujian

Tahap selanjutnya adalah pengujian kerja kompor. Di sini, akan dilakukan dua kali pengujian untuk kompor dengan instalasi cerobong dan tanpa cerobong, untuk metode pengujian efisiensi termal dengan metode *Water Boiling Test*, sedangkan emisi akan diuji dengan menggunakan *CO Gas Analyzer*.

Pengujian efisiensi termal dilakukan dengan *Water Boiling Test*, dimana air dalam panci dididihkan, lalu dengan pengukuran temperatur, massa air, dan massa bahan bakar, akan dihitung nilai efisiensinya. Untuk pengujian emisi dilakukan secara bersamaan



Gambar 3. 3 CO Detector 7701

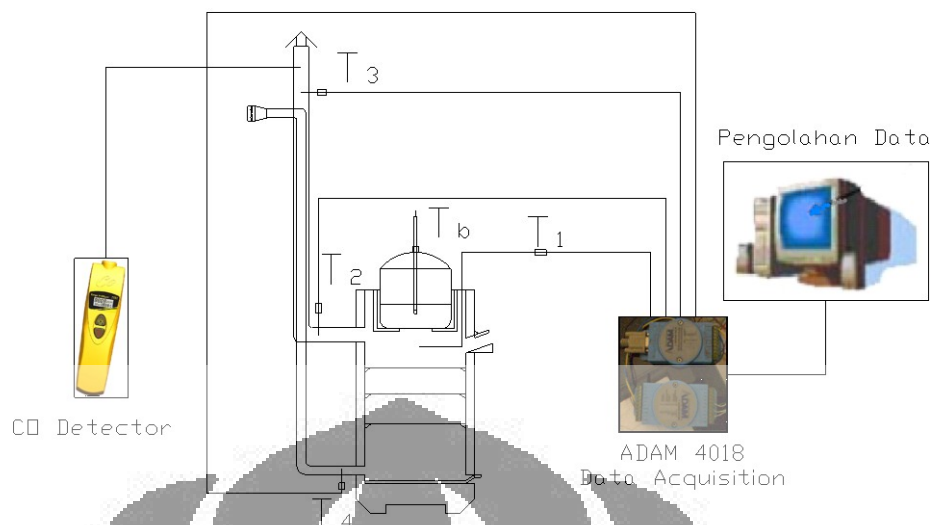
Untuk mengetahui tercapai tidaknya pengurangan emisi gas buang, digunakan alat yang dapat menganalisa kandungan CO dalam gas yaitu *CO Detector* sedangkan pengukuran temperatur digunakan termokopel jenis K. Instrumen ADAM 4018 digunakan sebagai *Module* konversi data dari termokopel ke komputer. Suhu yang dideteksi antara lain suhu api (T_1), suhu gas buang menuju cerobong (T_2), suhu gas keluaran cerobong (T_3) dan suhu masuk ruang bakar kompor (T_4).

Peralatan lainnya:

- Kompor hasil fabrikasi
- Panci
- Termometer
- *Lighter*

Bahan:

- Bahan bakar pelet biomassa
- Air
- Minyak tanah (*Inisiator* pembakaran)



Gambar 3. 4 Bagan Pengambilan Data

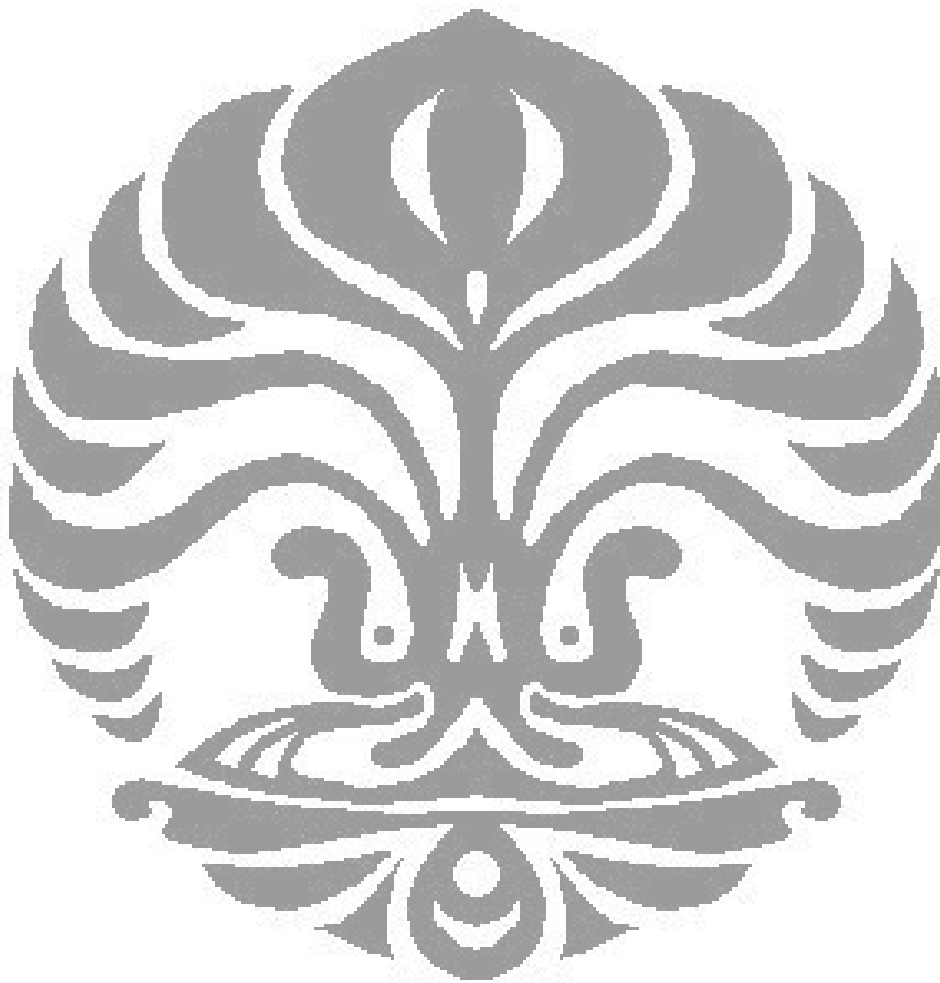
Prosedurnya pengambilan datanya, sebagai berikut.

1. Menyiapkan air sebanyak 1.5 kg, massa inisial (M), kalor jenis air (c_{p1}), dan temperatur awal air (T_a).
2. Menggunakan sebuah panci yang sudah diketahui kalor jenisnya (c_{p2}), dan massanya (M_1).
3. Menentukan sejumlah bahan bakar pelet biomassa dengan massa 0.2 kg (W) dan kalor pembakaran yang sudah diketahui (H_c).
4. Setelah proses pendidihan berakhir, menimbang massa air akhir, lalu menghitung massa air yang menguap (M_2), yaitu selisih massa air awal dengan massa air akhir. Kalor laten penguapan sudah diketahui (H_L).
5. Mengitung kadar CO menggunakan *detector* setiap 2 menit hingga bahan bakar habis serta mengukur suhu air, untuk ADAM 4018 Modules di set mengambil data tiap 30 detik untuk mengukur kondisi suhu di T_1 , T_2 , T_3 , dan T_4 .
6. Menghitung efisiensi termal menggunakan rumus (2.20).

Langkah kerja penggunaan ADAM 4018 Modules:

1. Memasang instalasi pengukuran temperatur dan mengeceknya dengan perubahan yang dapat dilihat pada program *AdamView*.
2. Menyetel program *AdamView* tersebut seperti *file* penyimpanan data.

3. Dengan *mode* yang telah ada, kemudian memulai pengambilan data dengan mengaktifkan *play* pada tampilan program tersebut.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

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

4.1 Dimensi Kompor

Bentuk *combustion chamber* di tetapkan berbentuk silinder berongga seperti *rocket stove*. Luas Area dan tinggi *combustion chamber* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$H_{cc} = \frac{\Sigma \Delta m_f}{\rho_f \times A_{cc}} \quad (4.1)$$

Daya yang dihasilkan untuk kompor ini disesuaikan dengan kebutuhan harian masyarakat yang rata-rata memasak selama 1 jam dengan daya sebesar 2.4kW, maka massa bahan bakar yang digunakan sebesar:

$$P_{av} = \frac{\Sigma \Delta m_f \times H_c}{t_T} \quad (4.2)$$

$$\Delta m_f = \frac{t_T}{H_c} \times P_{av} \quad (4.3)$$

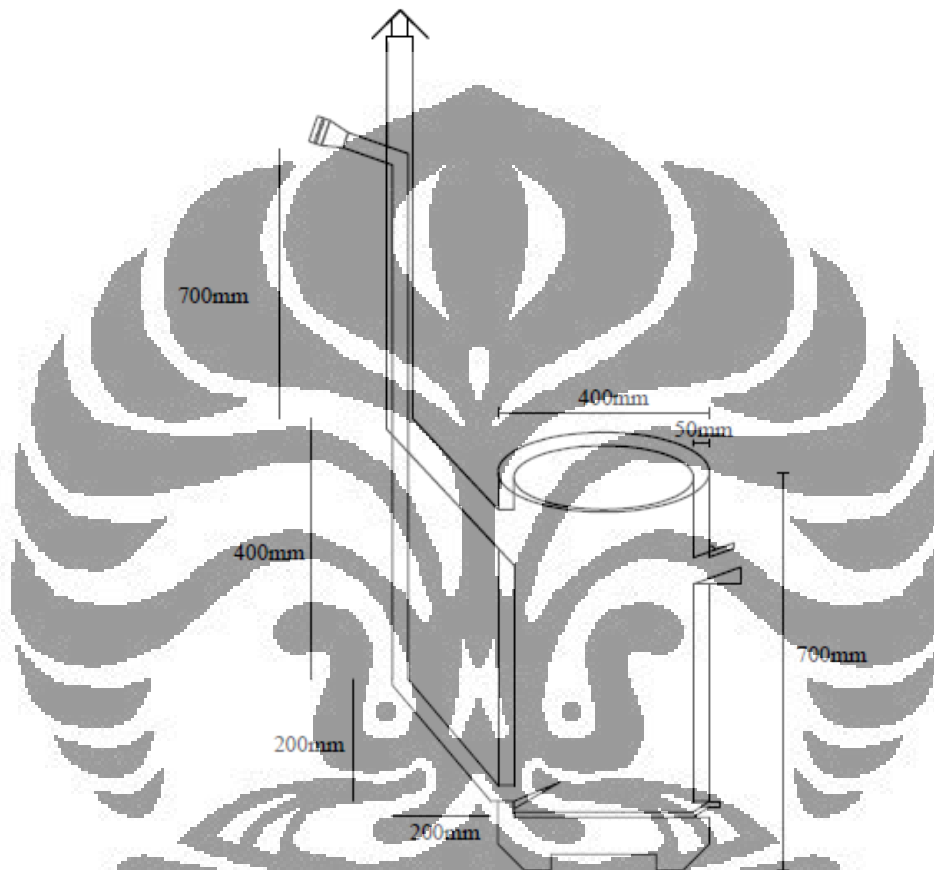
Dengan *heating value* biomassa yang digunakan rata-rata 19.2MJ/kg didapat massa bahan bakar sebanyak 0.45 kg = 450 gram.

Sesuai persamaan (4.1) dengan densitas *packing* rata-rata 1.1 kg/l dan asumsi variasi tinggi *combustion chamber* (H_{cc}) sebesar 15 – 30 cm maka jari-jari *combustion chamber* sekitar 0.15 m = 15 cm atau diameter *combustion chamber* sebesar 30 cm.

Lalu untuk penentuan diameter lubang masak (*pot hole*), disesuaikan terhadap ketersediaan panci atau wajan yang ada di pasaran. Setelah survei, variasi panci yang tersedia antara lain berdiameter: 18 cm, 20 cm, 22 cm, 24 cm, 26 cm, 28 cm, 30 cm, 31 cm, 34 cm. Kegunaan dari masing-masing diameter

berbeda, untuk diameter $< 24\text{cm}$ umumnya digunakan untuk penggunaan cepat seperti merebus mie instan atau menyeduh kopi/teh.

Perhitungan tebal kompor menggunakan persamaan perpindahan kalor untuk bentuk silinder dengan asumsi temperatur luar kompor sebesar $70\text{ }^\circ\text{C}$, maka dengan dimensi silinder didapatkan ketebalan sebesar **5 cm**.



Gambar 4.1 Rancangan detail kompor biomassa

Secara keseluruhan tinggi kompor bila ditambahkan dengan ruang dibawah *grate* dengan tinggi 25 cm dan kaki penyangga sekitar 10 cm, maka tinggi keseluruhannya **70 cm**. Dengan tebal kompor sebesar 5 cm maka diameter total kompor sebesar **40 cm** sesuai seperti Gambar 4.1.

Untuk pipa yang digunakan sebagai cerobong pembuangan dan pipa udara masuk yang akan mengambil panas cerobong pembuangan, perhitungannya menggunakan simulasi sederhana (pada Lampiran A) alat penukar kalor berlawanan arah (*counter current*) maka akan didapatkan dimensi pipa yang digunakan, antara lain:

- Dimensi Pipa udara Masuk (pipa dalam): \varnothing 1.5 inch
- Dimensi Pipa *Exhaust* Keluar (pipa luar): \varnothing 3 inch
- Panjang pertukaran kalor : 90 cm

4.2 Hasil Fabrikasi Kompor



Gambar 4.2 Hasil akhir fabrikasi kompor pelet biomassa sebelum dan sesudah modifikasi

Namun pada hasil akhir fabrikasi pada Gambar 4.2 masih ada sedikit kesalahan atau kekurangan. Hal yang paling berpengaruh adalah kemiringan pipa masuk dan keluar ruang bakar kompor yang seharusnya perlu dimiringkan sekitar 45° agar hambatan yang ditimbulkan tidak terlalu besar dan dapat memudahkan aliran udara masuk dan keluar ruang bakar. Selain itu hal penting yang perlu diperhatikan adalah pemilihan alat pendorong udara. Pendorong yang bisa mendorong udara masuk ke kompor adalah *blower* dengan aliran sentrifugal yang bertekanan (memiliki keong) sehingga daya dorong yang dihasilkan dapat melewati hambatan (*fitting*) di perpipaan. Karena apabila menggunakan kipas (*fan*) yang biasa digunakan pada CPU komputer besarnya daya dorong kurang mampu untuk melewati hambatan perpipaan, bahkan dapat memantulkan sebagian alirannya.

Dari segi mobilisasi kompor cenderung susah karena bobot kompor sangat berat. Ini disebabkan oleh bahan pasir tahan api yang berat jenisnya yang cukup tinggi, yaitu 1950 kg/m^3 . Sehingga berat kompor bisa mencapai 150 kg.

4.3 Hasil Pengujian Efisiensi

Pengujian efisiensi yang dilakukan menggunakan metode *Water Boiling Test* (WBT). Secara garis besar, metode ini menghasilkan rasio perbandingan kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar terhadap kalor yang diterima air untuk menaikkan suhunya dan menguapkannya.

4.3.1 Data Pengujian dalam Bentuk Tabel

Berikut adalah tabel dan grafik hasil pengujian untuk metode WBT:

Tabel 4. 1 hasil uji cold start dan hot start

| Type | M _{water} (kg) | W _{biomassa} (kg) | M _{evap} (kg) | T _b (°C) | H (%) |
|------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|----------|
| Cold | 1.5 | 0.189 | 0.240 | 106 | 33.75 |
| Hot | 1.5 | 0.190 | 0.270 | 104 | 35.39 |

Tabel 4. 2 Hasil uji variasi tinggi grate

| Grate (mm) | M _{water} (kg) | W _{biomassa} (kg) | M _{evap} (kg) | T _b (°C) | η (%) |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|----------|
| 250 | 1.5 | 0.194 | 0.28 | 107 | 35.85 |
| 300 | 1.5 | 0.19 | 0.27 | 104.5 | 35.39 |

Tabel 4. 3 Hasil uji variasi Air/Fuel Ratio (kecepatan udara)

| A/F Ratio | M _{water} (kg) | W _{biomassa} (kg) | M _{evap} (kg) | T _b (°C) | η (%) |
|--------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|----------|
| 0.9 | 1.5 | 0.195 | 0.31 | 107.5 | 37.84 |
| 1 | 1.5 | 0.189 | 0.3 | 106 | 38.02 |
| 1.3 | 1.5 | 0.19 | 0.27 | 104.5 | 35.39 |

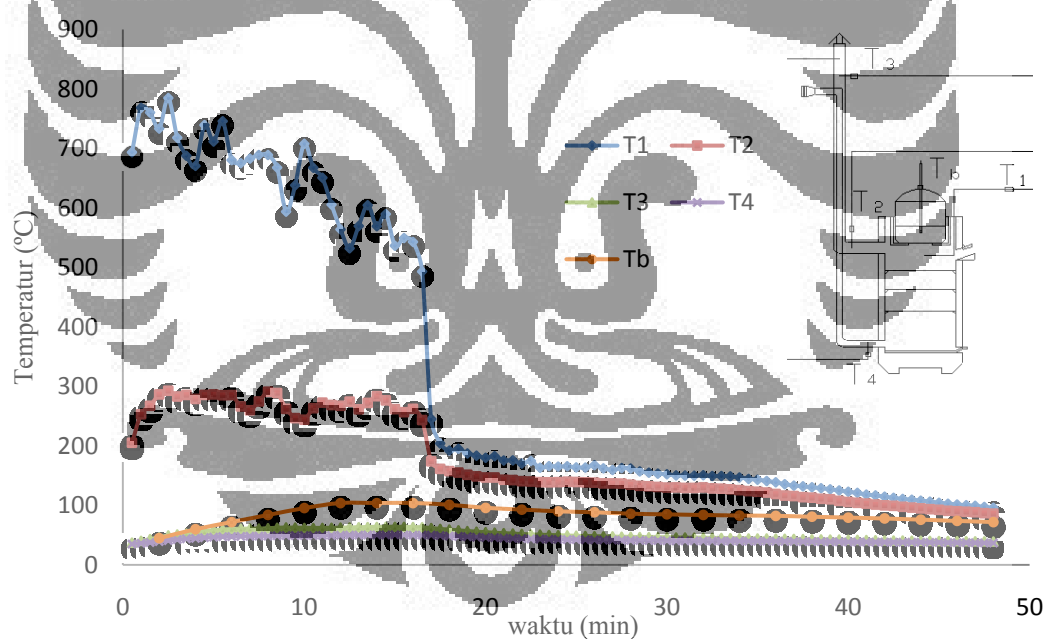
Hasil pengujian pada Tabel 4.1, Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 menunjukkan kalau efisiensi paling tinggi terjadi saat *air per fuel ratio* kondisi stoikiometrik, namun masih ada kemungkinan kenaikan diantara rasio 1 dan 1.3, karena besarnya jumlah udara eksekse bisa menaikkan temperatur nyala api sesuai teori dasar pembakaran [Yuswan, 2007] sehingga panas yang dihasilkan lebih besar bisa tersampaikan ke objek masak. Selain itu, kondisi operasi yang dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi pada saat kondisi mulai masak saat temperatur tinggi (*hot start*). Untuk tinggi bahan bakar dari *grate* hingga lubang kompor,

efisiensi lebih besar saat tinggi 250 mm, karena api yang dihasilkan bisa tersebar merata keseluruh permukaan panci dibandingkan apabila posisinya lebih jauh.

Rata-rata efisiensi yang dihasilkan cukup tinggi, hingga diatas 35%, ini disebabkan adanya *recovery* yang dihasilkan oleh pertukaran panas di cerobong gas buang.

4.3.2 Profil Temperatur Kompor

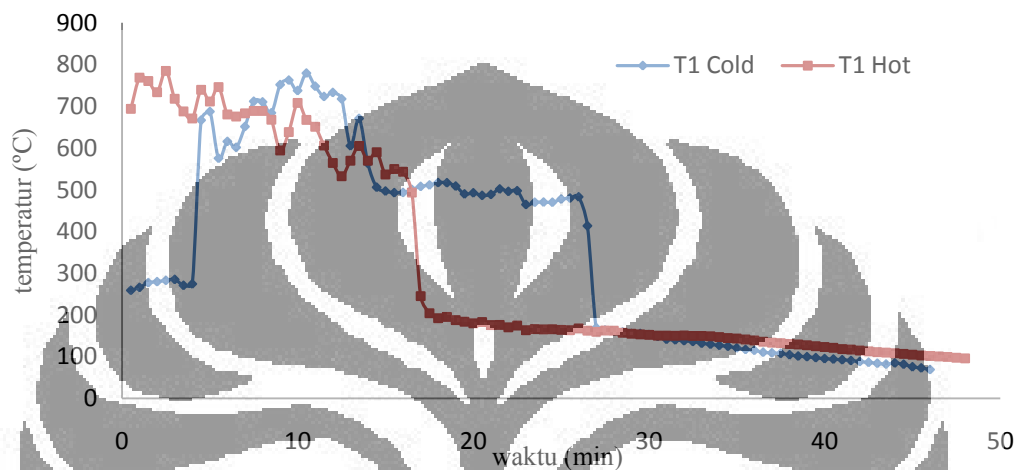
Untuk profil temperatur kompor, terutama untuk nyala api diperlukan untuk melihat pengaruhnya terhadap besarnya efisiensi yang dihasilkan serta kecenderungan pemerataan api yang dihasilkan oleh bahan bakar. Berdasarkan hasil percobaan, didapatkan ketidakstabilan api yang terbentuk karena penyebaran api yang tidak merata. Bahan bakar tidak secara langsung terbakar bersamaan, perlu rambatan panas antar partikel pelet biomassa hingga mencapai kestabilan temperatur nyala api.



Gambar 4. 3 Profil temperatur di beberapa titik percobaan pada tinggi variasi *grate* 300 mm, $A/F = 1.3$, dan kondisi *Hot Start*.

Salah satu profil temperatur secara keseluruhan atau pada beberapa titik sesuai Gambar 4. 3 menunjukkan kecenderungan perubahan temperatur yang dipengaruhi oleh temperatur nyala api, terutama pada temperatur T2 yang mengikuti T1 karena suhu gas hasil pembakaran tergantung dari suhu nyala api.

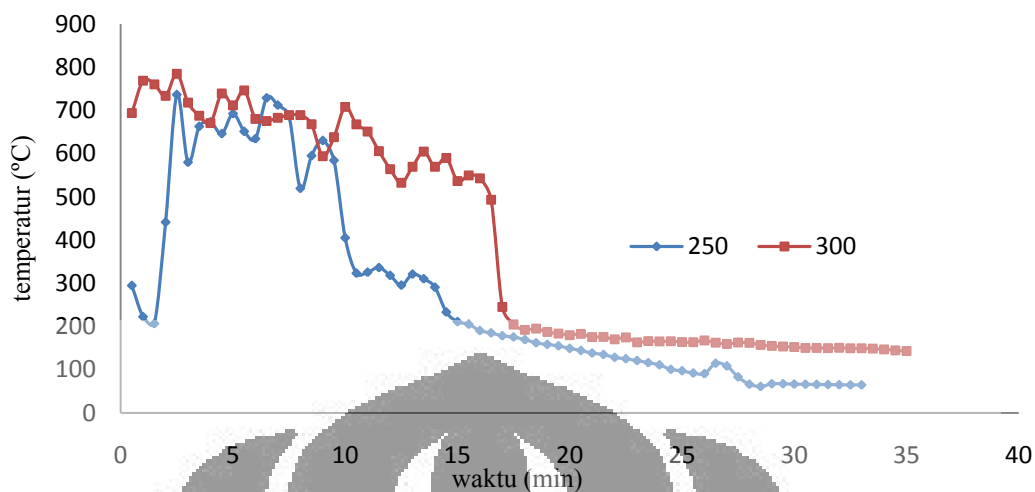
Namun, kendala lain yang dihadapi adalah kurangnya instrumen termokopel untuk secara khusus mengukur suhu api dari berbagai arah, ini dimaksudkan agar bisa diketahui suhu penyebaran api yang terjadi karena kita tidak bisa secara langsung memperhatikan penyebaran api, karena kondisi pembakaran sangat tertutup. Berikut adalah beberapa profil temperatur nyala api untuk beberapa variasi:



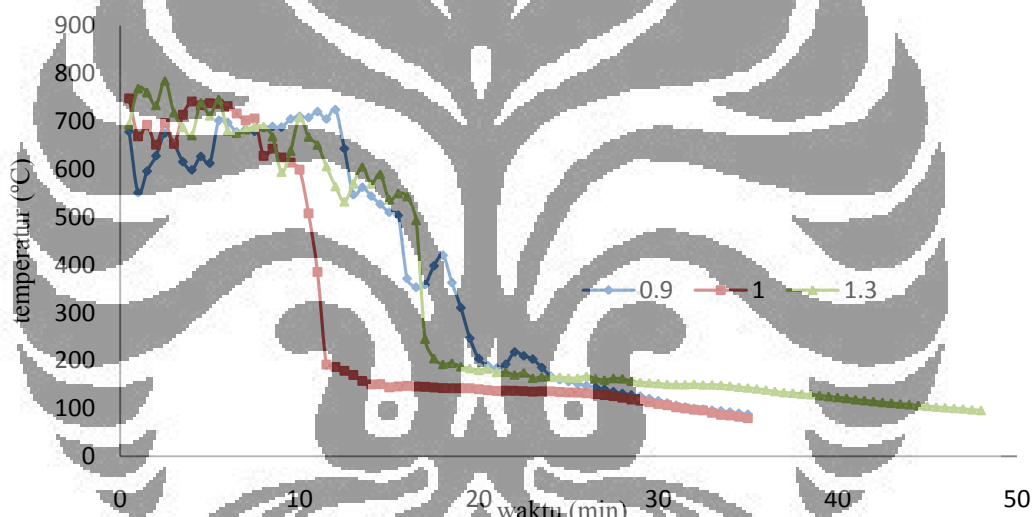
Gambar 4.4 Perbandingan Flame Temperature *Cold Start* dan *Hot Start*.

Dari Gambar 4.4 diatas terlihat kalau suhu nyala api cenderung lebih stabil saat kondisi *hot start* dibandingkan *cold start*. Hingga pada saat bahan bakar pelet biomassa hanya membentuk bara panas suhu nyala api otomatis akan turun secara tiba-tiba. Peristiwa yang sama juga terjadi saat kondisi *cold start* namun pada saat inisiasi temperatur yang timbul tidak terlalu tinggi karena panas yang dihasilkan ada sebagian yang terserap oleh dinding *combustion chamber*. Untuk pembentukkan bara api juga membutuhkan waktu kurang lebih 10 menit lebih lama dari *hot start* karena sisa bahan bakar pada *cold start* relatif lebih banyak, atau pemerataan pembakarannya kurang baik. Efisiensi yang didapatkan *hot start* lebih tinggi karena api yang dihasilkan lebih merata dan stabil hingga lebih dari 15 menit.

Faktor dari tinggi *grate*, sesuai Gambar 4.5, yang divariasikan adalah pada kecepatan bakar yang terjadi, untuk tinggi 250 mm cenderung lebih cepat habis karena pemerataan udara yang didapat jauh lebih baik dan api yang ditransfer ke panci jauh lebih banyak dan merata sehingga efisiensi termal kompor jauh lebih baik.



Gambar 4.5 Perbandingan *Flame Temperature* terhadap tinggi grate



Gambar 4.6 Perbandingan *Flame Temperature* terhadap variasi A/F Ratio

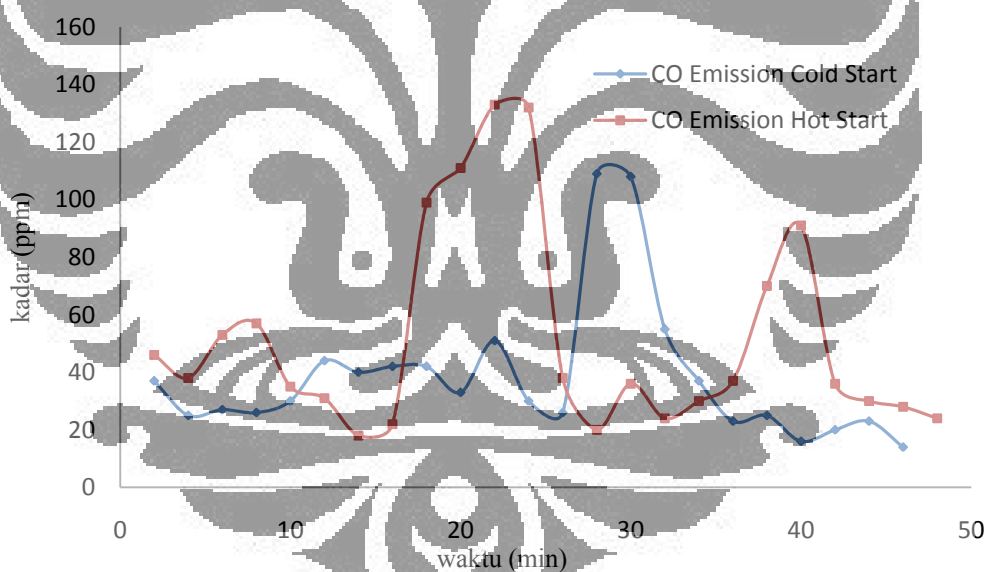
Secara teoritis, semakin tinggi udara eksek, maka temperatur nyala api akan semakin rendah, namun pada pengujian Gambar 4.6 tidak mengikuti teori yang sudah ada. Kemungkinan yang terjadi pada grafik tersebut adalah pada A/F ratio kondisi stoikiometrik lebih cepat turun karena bahan bakar yang digunakan sudah cepat terkonversi menjadi abu, sedangkan pada kondisi udara eksek 30% bahan bakar jauh lebih lama disebabkan pada pemerataan pembakaran yang kemungkinan besar kurang baik.

Faktor lain yang dapat terjadi adalah masalah deteksi suhu yang kurang baik, bila hanya menggunakan 1 buah termokopel, walaupun sudah di *setting* termokopel selalu sama lokasinya belum tentu api yang dihasilkan dapat langsung

menyentuh termokopel. Kembali ke penjelasan sebelumnya jika kondisi udara eksek 30% pemerataan pembakaran yang terjadi tidak sebaik kondisi stoikiometrik. Untuk kondisi bahan bakar rasionya lebih banyak, atau $A/F \text{ ratio} = 0.9$, sudah mengikuti kondisi yang ada yaitu waktu pembakarannya cukup lama karena udara yang digunakan untuk membakar bahan bakar biomassa tidak terlalu banyak sehingga masih ada bahan bakar yang tersisa dan baru akan habis pada waktu yang relatif lebih lama.

4.4 Hasil Pengujian Emisi

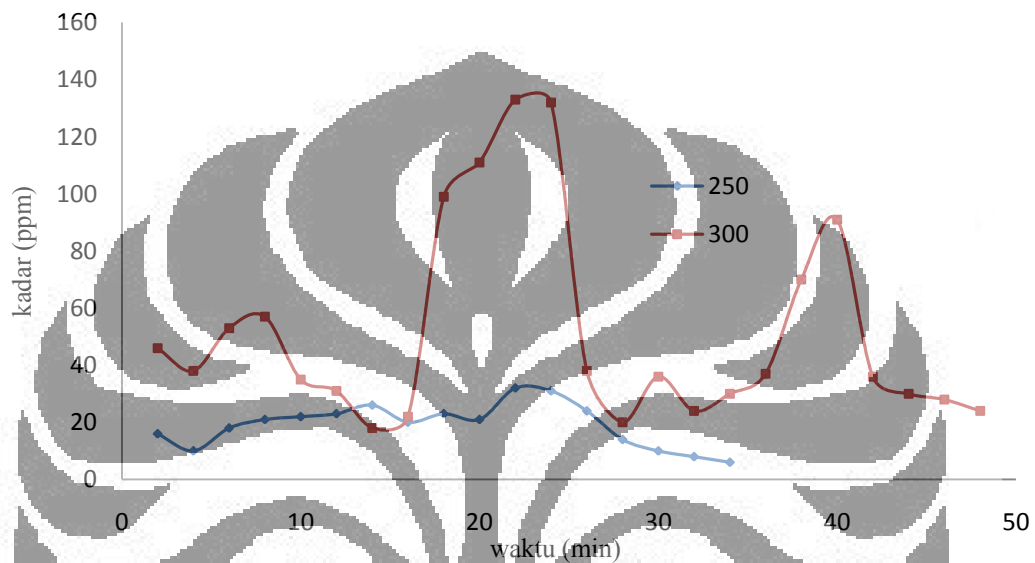
Emisi yang dideteksi hanya CO karena sudah cukup menggambarkan kesempurnaan pembakaran, yaitu saat kadar CO tinggi merupakan indikasi pembakaran yang dihasilkan tidak terlalu sempurna, sedangkan untuk gas CO_2 mengikuti *trend* dari CO, bila terbentuk CO_2 yang banyak maka gas CO akan terbentuk lebih sedikit, atau berlaku sebaliknya.



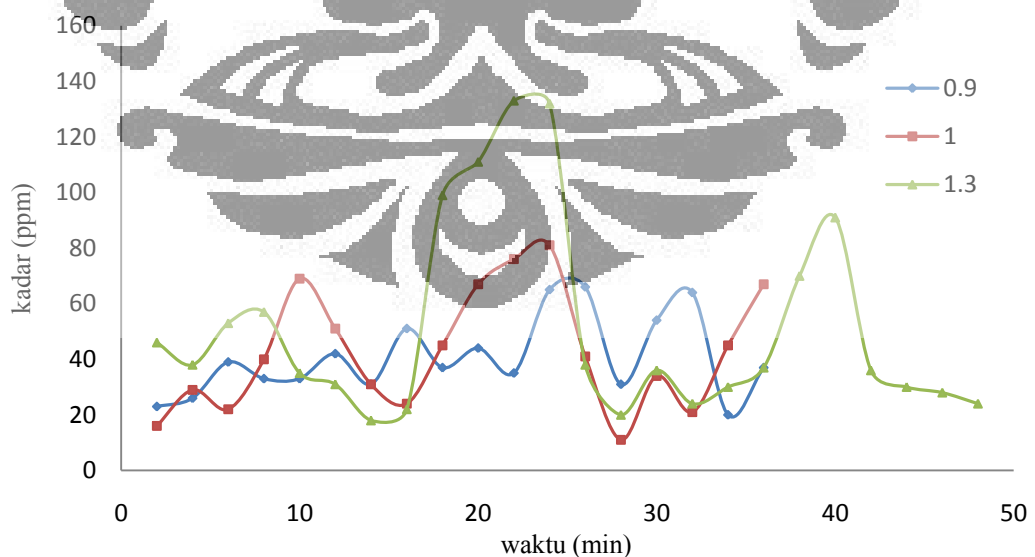
Gambar 4.7 Perbandingan Emisi CO Hot Start dan Cold Start

Emisi yang dihasilkan pada beberapa variasi sesuai Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 memiliki kecenderungan yang sama, yaitu pada saat awal pembakaran kadar CO yang dihasilkan tidak terlalu tinggi hingga terbentuk puncak kadar CO saat temperatur nyala mulai menurun. Puncak kadar CO ini terjadi karena bahan bakar mulai terbakar sebagai bara yang tidak menghasilkan api. Selanjutnya sekitar 10 menit kadar CO akan kembali menurun karena kondisi

bara sudah mulai stabil atau sudah ada sebagian bara yang habis. Namun ada kejanggalan sebelum proses pembakaran berakhir, yaitu timbulnya puncak kadar CO kembali, ini dapat dihasilkan oleh beberapa kemungkinan, yaitu bisa karena ada bahan bakar biomassa yang baru terbakar atau terpirolisis sehingga hanya menghasilkan gas CO.



Gambar 4.8 Perbandingan Emisi CO dengan variasi tinggi grate



Gambar 4.9 Perbandingan Kadar CO pada variasi A/F Ratio

Pengujian emisi yang dilakukan cenderung masih kurang stabil karena detektor yang digunakan adalah *portable detector* dengan tingkat akurasi yang tidak terlalu baik bergantung pada yang menggunakan dan kecepatan membaca gas CO yang harus ada waktu tunda sekitar 15 detik sehingga bisa mengakibatkan ketidakstabilan kondisi baca.

4.5 Hasil Kinerja Kompor Keseluruhan

Kinerja kompor secara keseluruhan adalah hasil pengujian efisiensi dan emisi rata-rata yang dihasilkan. Yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4. 4 Hasil uji cold start dan hot start

| Kondisi | η (%) | Rata-Rata Emisi CO |
|------------|------------|--------------------|
| Cold Start | 33.75 | 38.39 |
| Hot Start | 35.39 | 51.63 |

Tabel 4. 5 Hasil uji variasi tinggi grate

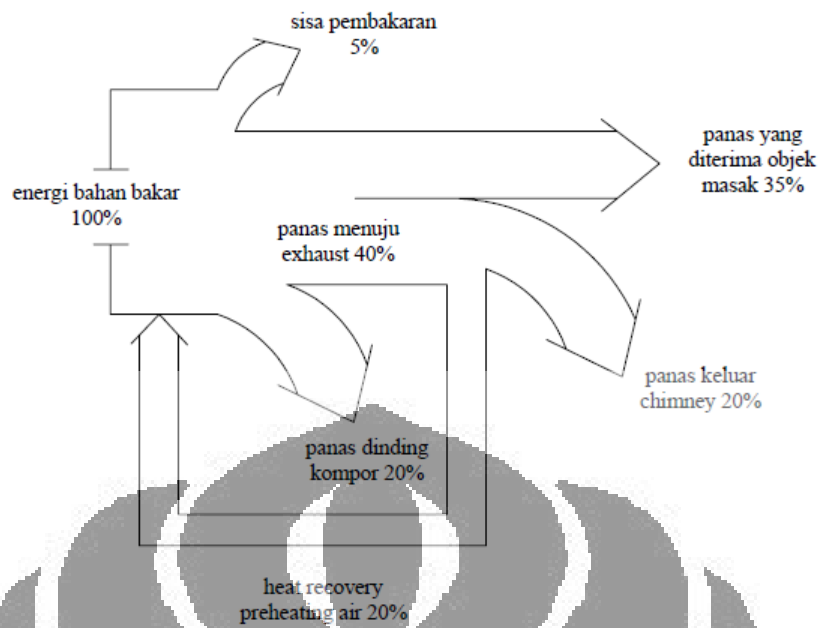
| Grate (mm) | η (%) | Rata-Rata Emisi CO |
|------------|------------|--------------------|
| 250 | 35.85 | 19.12 |
| 300 | 35.39 | 51.63 |

Tabel 4. 6 Hasil uji variasi Air/Fuel Ratio (kecepatan udara)

| A/F Ratio | η (%) | Rata-Rata Emisi CO |
|-----------|------------|--------------------|
| 0.9 | 37.84 | 40.61 |
| 1 | 38.02 | 42.78 |
| 1.3 | 35.39 | 51.63 |

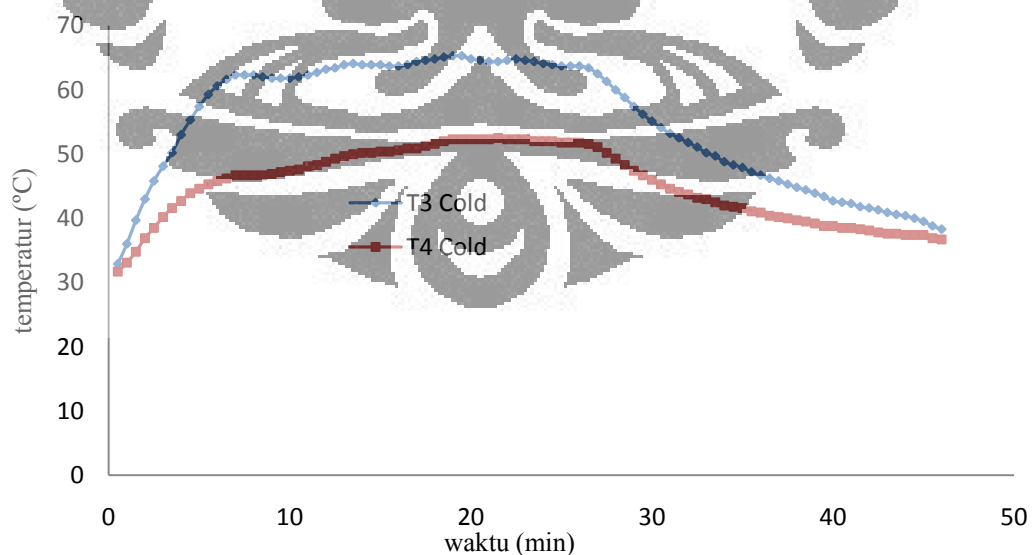
4.5.1 Efektivitas Penggunaan Heat Recovery

Sankey diagram pada Gambar 4.10 menunjukkan besarnya kalor yang hilang pada proses memasak menggunakan kompor biomassa dimana kalor keluar terbanyak sebagian besar pada gas buang yang menuju *exhaust* maka perlu *heat exchanger* yang sebagian dari panas tersebut dapat di *recovery*. Perhitungan lebih lanjut terdapat pada Lampiran C.



Gambar 4.10. Sankey Diagram Memasak dengan Kompor Biomassa

Heat recovery dapat terjadi ketika ada kontak udara panas keluar dengan udara pembakaran yang digunakan untuk mengoksidasi bahan bakar. Untuk menguji keefektifannya dapat dilihat dari tingginya suhu *preheating air* yang masuk (T4). Atau membandingkan panas suhu keluaran cerobong (T3) dengan *preheating air* (T4).

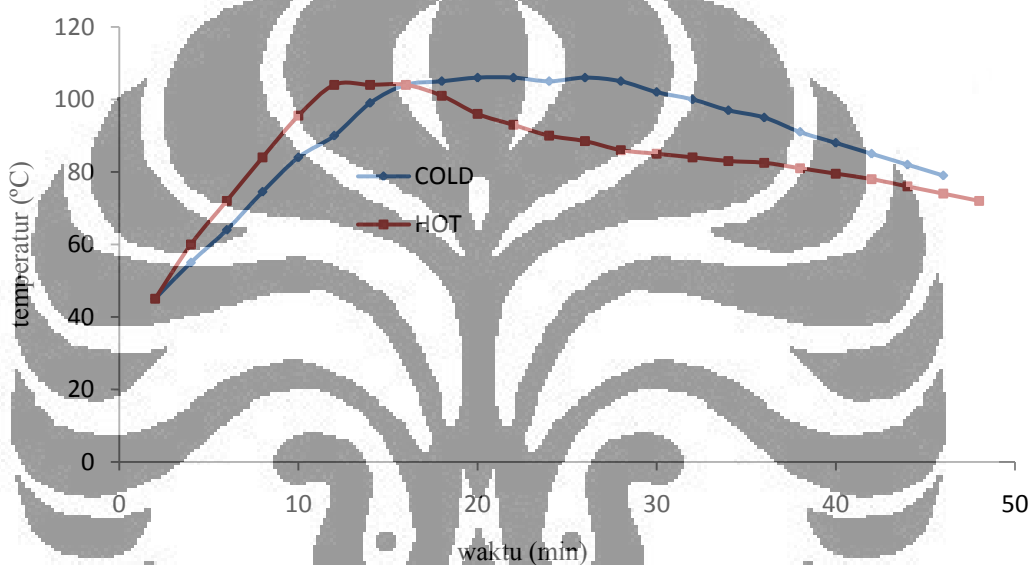


Gambar 4.11 Hubungan antara T3 dan T4 Cold Start fungsi waktu

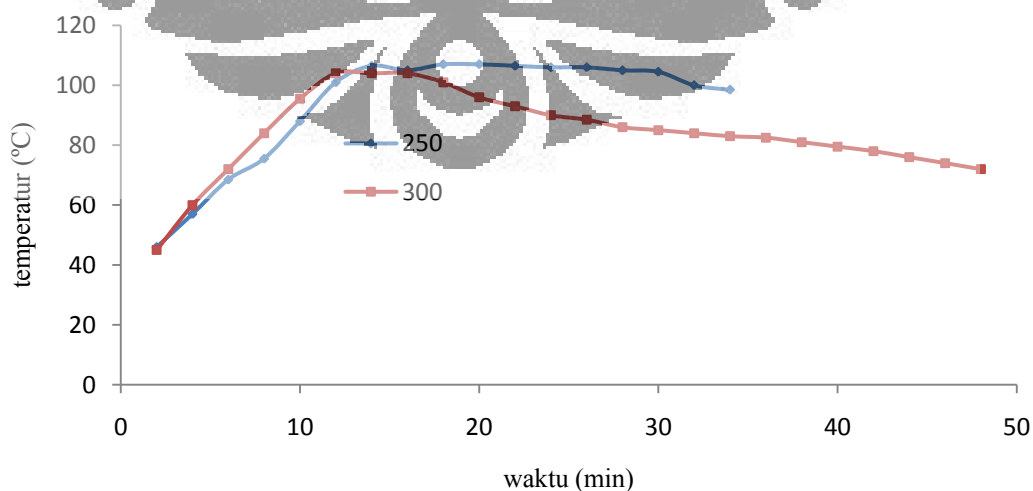
Dari Gambar 4.11 bisa melihat besarnya panas yang dapat diekstraksi dengan melihat kenaikan suhu T4. Pada Gambar 4.11, ketika panas pada grafik T3 mulai konstan, maka grafik T4 akan terus naik karena disini ada gejala pengambilan panas sehingga suhu T3 sudah sulit untuk naik kembali.

4.5.2 Kecepatan Waktu Masak

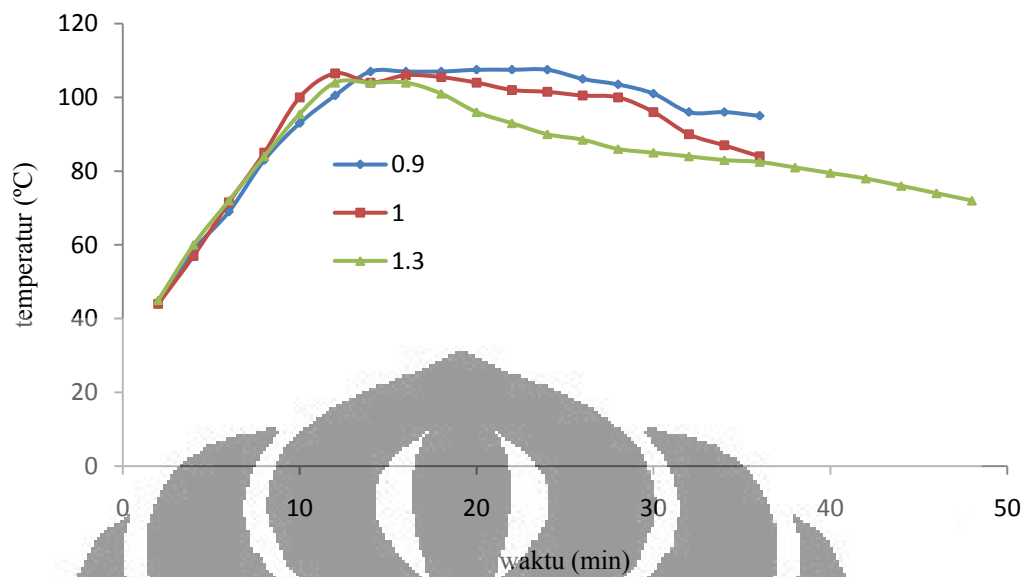
Waktu yang digunakan untuk mendidihkan atau memasak objek masak disebut kecepatan waktu masak. Untuk kondisi awal jumlah air yang sama bisa dilihat pada kondisi seperti apa objek masak bisa paling cepat didapatkan.



Gambar 4.12 Kecepatan Waktu Masak pada variasi kondisi start up



Gambar 4.13 Kecepatan Waktu Masak pada variasi tinggi grate



Gambar 4.14 Kecepatan Waktu Masak saat variasi A/F ratio

Dari Gambar 4.12, Gambar 4.13, dan Gambar 4.14 kecepatan waktu masak merupakan salah satu indikasi besarnya efisiensi yang akan dihasilkan. Seperti saat kondisi variasi *start up* dan *air fuel ratio*, berbanding terbalik saat tinggi *grate* karena ada kemungkinan semakin dekat bahan bakar dengan panci dan lubang cerobong, semakin mudah panas keluar secara besar ke cerobong, namun kondisi ini lebih stabil sehingga lebih banyak kalor yang menuju objek masak. Secara keseluruhan, kecepatan masak untuk jumlah air 1.5 liter dibawah 15 menit, ini menunjukkan kecepatan masak yang relatif lebih cepat.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan:

1. Dimensi kompor biomassa yang dihasilkan:
 - Tinggi keseluruhan = 700 mm
 - Diameter Keseluruhan = 400 mm
 - Tinggi Ruang Bakar = 300 mm
 - Diameter Ruang Bakar = 300 mm
 - Diameter pipa udara masuk = 1.5 inci (37.5 mm)
 - Diameter pipa gas buang = 3 inci (75 mm)
 - Panjang penukar kalor = 90 cm
2. Kompor yang dihasilkan memiliki efisiensi rata-rata 35.76%, lebih tinggi dari kompor biomassa yang telah ada sekitar 28.89%.
3. Emisi rata-rata CO yang dihasilkan dari setiap pengujian bervariasi dari 19 ppm hingga 51 ppm tergantung pada kondisi operasi yang diberikan. Hal ini bisa memenuhi syarat ambang batas CO di udara yaitu 25 ppm.
4. Dari hasil desain didapatkan kondisi terbaik dengan mempertimbangkan besarnya efisiensi dan rendahnya emisi yaitu kondisi tinggi *grate* 250 mm dan air fuel ratio 1.0 atau kondisi stoikiometrik.

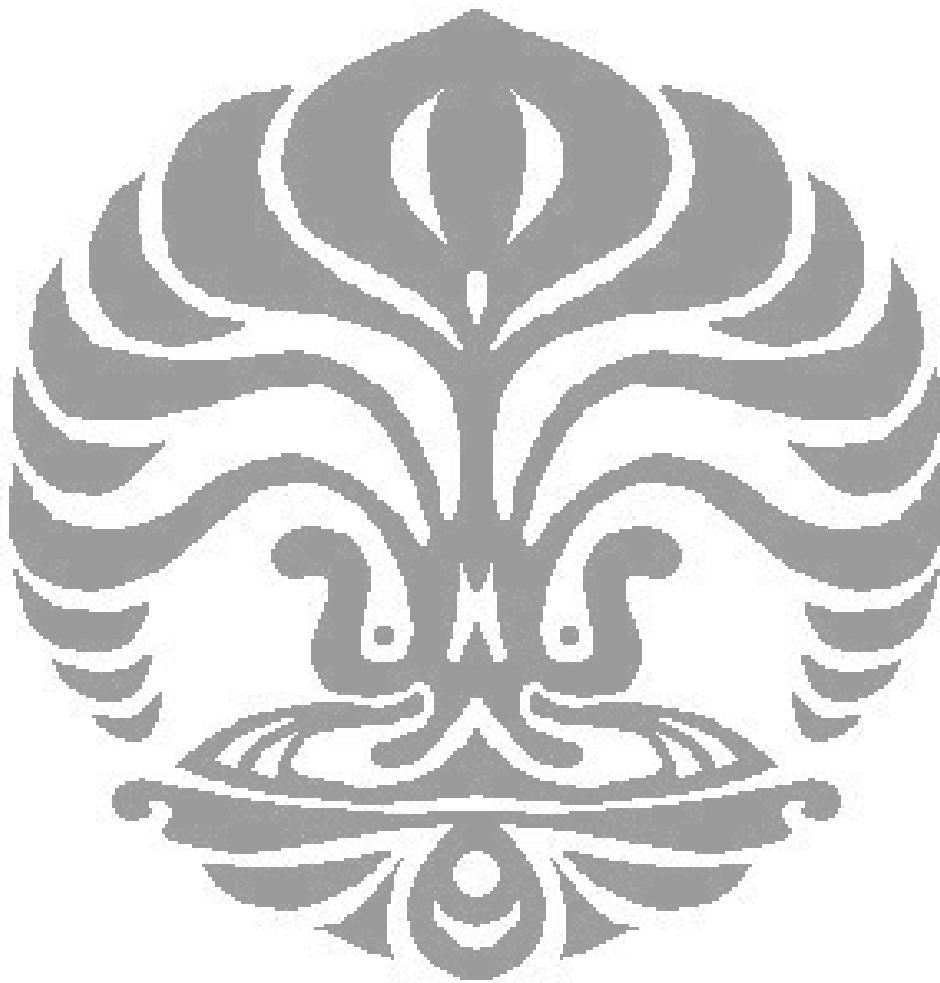
5.2 Saran

Saran dari penelitian ini kedepannya, antara lain:

1. Diharapkan untuk penelitian kedepannya bisa mempertimbangkan aspek portabilitas kompor dengan memilih bahan yang lebih ringan.
2. Untuk sistem perpipaan jangan menggunakan sistem ulir, melainkan menggunakan sistem mur dan baut agar lebih mudah dalam pemasangan.
3. Untuk pengujian disarankan menggunakan banyak termokopel pada uji suhu nyala api. Agar bisa melihat karakter penyebaran api pada kompor diperlukan

sebuah celah khusus untuk melihatnya namun tidak mengganggu sistem pembakaran.

4. Instrumen emisi sebaiknya menggunakan *Quintox flue gas analyzer* yang terintegrasi pada komputer agar akurasi data lebih baik dan perlu melihat karakter hubungan kenaikan atau penurunan kadar CO₂ dan CO.
5. Bisa melakukan analisa keekonomisan dari kompor ini.



DAFTAR PUSTAKA

- Aggarwal RK, Chandel SS. Review of Improved Cookstoves Programme in Western Himalayan State of India. Himachal Pradesh, Biomass and Bioenergy Journal. 2004, 27:131-144.
- Baldwin S. Biomass stoves: Engineering design, development and dissemination. VITA, USA. 1986
- Barnes DF, Openshaw K, Smith KR, et al. What Makes People Cook with Biomass cookstove?-A Comparative International Review of Cookstove Programs. Washington DC, The World Bank, 1994.
- Bhattacharya SC, Albina DO, Salam PA. Emission Factors of Wood and Charcoal-Fired Cookstoves. Biomass and Bioenergy Journal. Thailand. 2002, 23: 453-469.
- Bhattacharya SC, Albina DO, Khaing AM. Effects of Selected Parameters on Performance and Emission of Biomass-Fired Cookstoves. Biomass and Bioenergy Journal. Thailand. 2002, 23: 387-395.
- Bryden M, Still D, Scott P, Hoffa G, et al. Design Principles for Wood Burning Cook Stoves. Aprovecho Research Center and Shell Foundation Partnership for Clean Indoor Air, 2002.
- FAO/RWEDP. Improved Solid Biomass Burning Cookstoves: A Development Manual. Bangkok, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1993.
- FAO/RWEDP. Report on Sub-Regional Expert Consultation on Improved Cookstove Development Programmes in South Asian Countries, Udaipur, India, 2-5 April 1991, FAO-GCP/RAS/131/NET, Bangkok, 1991.
- Holman JP. Heat Transfer. Singapore: McGraw Hill Book Company, 1981.
- Incropera FP, DeWitts DP. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- Jetter, James J., Kariher Peter. Solid-fuel household cookstove: Characterization of performance and emissions. Biomass and Bioenergy Journal. USA 2008, 33:294-305.
- Kirk and Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology, "Fuels from Biomass". Third Edition. USA: John Wiley & Sons Inc. 1990, 12: 16-103.
- Kirk and Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology, "Fuels from Waste". Third Edition. USA: John Wiley & Sons In. 1990, 12:110-124.
- Kirk and Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology, "Wood". Third Edition. USA: John Wiley & Sons Inc. 1990, 25: 627-659.

- Messerer, A. et al. Combined particle emission reduction and heat recovery from combustion exhaust—A novel approach for small wood-fired appliances. *Biomass and Bioenergy Journal*. Jerman 2007, 31:512-521.
- Ramakrishna, J. Results and Analysis of the Global Survey of Improved Cookstove Programs. Project Main Report No. 1, Environment and Policy Institute of the East-West Center, Hawaii and World Bank-ESMAP, 1991.
- Rousse J. Improved Biomass Cookstove Programmes: Fundamental Criteria for Success. MA Rural Development Dissertation, The University of Sussex, 1999.
- Smith, Kirk R. Biomass Combustion and Indoor Air Pollution. in: *Environmental Management*. No. 10. 1987.
- Theuri D. Rural Energy, Stoves, and Indoor Air Quality: The Kenyan Experience. Kenya: Intermediate Technology Development Group, 2005.
- Tremeer GB, Jawurek HH. Comparison of Five rural Wood-Burning Cooking Devices : Efficiencies and Emissions. Johannesburg. *Biomass and Bioenergy Journal*. 1996, 11:419-430.
- United Nations Energy. *The Energy Challenge for Achieving the Millennium Development Goals*. UN-Energy, 2005.
- Vijay M, Medade S, Lallement D, Saghir J. Energy Services for the Millennium Development Goals. Publication by MillenniumProjects, United Nations Development Programmes, World Bank, Energy Sector Management Assistance Programme. USA, 2005.

LAMPIRAN



LAMPIRAN A

Proses perhitungan Dimensi Kompor

Penentuan komposisi Biomassa

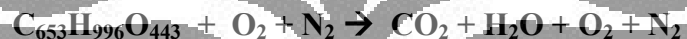
Rumus Kimia untuk masing-masing komponen kayu:

- Selulosa ($C_6H_{10}O_5$) x
- Hemiselulosa ($C_5H_8O_4$) y
- Lignin ($C_9H_{10}O_3(CH_3O)_{0.9-1.7}$) $z \rightarrow 0.9 - 1.7$ diambil nilai 1

Basis nilai untuk x, y, z diatas adalah 100, dengan variasi nilai tersebut menurut referensi¹ antara 60-1000

Maka rumus kimia disederhanakan menjadi $C_xH_yO_z$ didapat nilai $x = 653, y = 996, z = 443$ atau dengan rumus kimia $C_{653}H_{996}O_{443}$ dengan $Mr = 15920 \text{ gr/mol}$

Reaksi Pembakaran:



Asumsi yang digunakan saat pembakaran adalah

- 30% eksek udara² berdasarkan kondisi optimum pada sebuah penelitian
- Rasio komposisi udara 20% O_2 dan 80% N_2
- Reaksi pembakaran sempurna tanpa ada hasil sampan CO

Maka didapatkan koefisien reaksi masing-masing komponen sehingga menjadi



Basis penggunaan bahan bakar sebesar 450gr = 0.45kg

$$\text{Maka mol biomassa} = \frac{m}{Mr} = \frac{0.45}{15920} = 0.0282 \text{ mol}$$

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

$$n.O_2 = 25.0058 \text{ mol}$$

$$n.N_2 = 100.2032 \text{ mol}$$

$$n.CO_2 = 18.45791 \text{ mol}$$

$$n.H_2O = 14.07663 \text{ mol}$$

$$n.O_2 \text{ eksek} = 5.771 \text{ mol}$$

¹ en.wikipedia.com/biomass

² Basic Combustion, 2005

untuk mencari massa menggunakan persamaan $m = \frac{m}{Mr}$

massa $O_2 = 800.1859$ gr

massa $N_2 = 1400.325$ gr

massa $CO_2 = 812.1482$ gr

massa $H_2O = 253.3794$ gr

massa O_2 eksek = 184.6583 gr

untuk mencari volum yang dihasilkan, menggunakan data volum spesifik masing-masing komponen³:

| Gas | ft ³ /lb | cm ³ /gr |
|--------|---------------------|---------------------|
| O_2 | 22.416 | 1399.385459 |
| N_2 | 25.546 | 1594.785017 |
| H_2O | 367.008 | 22911.56578 |
| CO_2 | 8.151 | 508.8504138 |
| Udara | 12.39 | 773.4825945 |

Maka volume udara masuk = massa total udara ($N_2 + O_2$) × volum spesifik udara
 = 1702057.195 cm³

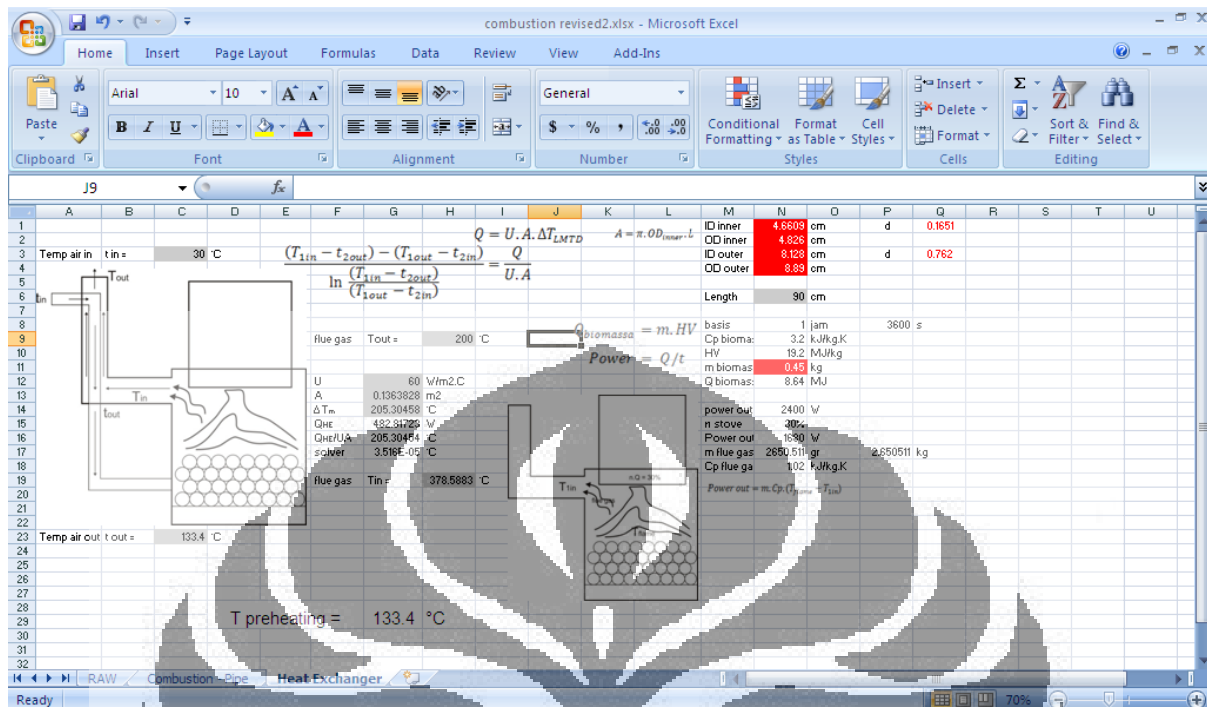
Atau laju udara yang dibutuhkan selama 1 jam adalah 472.7936651 cm³/s = 4.72×10^{-4} m³/s

Volume *flue gas* keluar = massa CO_2 × volum spesifik CO_2 + massa H_2O × volum spesifik H_2O + massa eksek O_2 × volum spesifik eksek O_2 + massa N_2 × volum spesifik N_2
 = 8710207 cm³

Atau laju udara yang dibutuhkan selama 1 jam adalah 2419.502 cm³/s = 2.42×10^{-3} m³/s

³ www.cookstove.net

Tahap Sizing Perpipaan



Pipa udara masuk

Laju udara yang digunakan harus mempertimbangkan kestabilan api yang dihasilkan, bila laju yang masuk tidak cepat maka jumlah udara akan sedikit, namun bila terlalu cepat api yang dihasilkan akan cepat mati karena tertiuip udara yang banyak dan cepat. Menurut literatur⁴, agar nyala api dapat terjaga kecepatan masuk yang diperbolehkan antara 0.13 – 1.3 m/s dan yang dipilih untuk penelitian ini dengan laju sekitar 0.3 m/s karena ada faktor kesesuaian pipa yang akan disizing

Untuk mencari *cross sectional area* yang dilalui udara masuk, dengan membagi laju volumetrik udara dengan kecepatan yang diinginkan ketika melalui pipa tersebut, maka didapat luas area sebesar 15.76 cm^2 atau $1.576 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

Dengan menggunakan persamaan luas lingkaran maka bisa didapatkan besar diameter dalam pipa sebesar **4.48 cm**. Ukuran pipa yang mendekati adalah pipa **1 ½ inchi Schedule 5** dengan nilai aktual ID = **4.6609 cm** dan aktual OD = **4.826 cm**.

Pipa flue gas keluar

Untuk pipa keluar pertimbangan laju yang digunakan adalah kadar polutan yang keluar ke udara lingkungan, selain itu juga untuk menjaga aliran udara tetap keluar. Namun untuk

⁴ www.engineeringtoolbox.com

kadar polutan yang keluar tidak bisa digunakan sebagai landasan perhitungan karena baru bisa dihitung setelah diameter pipa didapatkan. Untuk itu pertimbangan yang digunakan hanya agar aliran udaranya dapat berjalan lancar menuju udara lingkungan. Menurut literatur⁵, antara 0.1 – 2 m/s, untuk perhitungan yang digunakan adalah 0.6 m/s.

Untuk mencari *cross sectional area* yang dilalui *flue gas*, dengan membagi laju volumetrik udara dengan kecepatan yang diinginkan ketika melalui pipa tersebut, namun dengan menambahkan *cross sectional area* pipa dalam (pipa udara masuk) menggunakan diameter luarnya, maka didapat luas area sebesar **40.325 cm²** atau **4.033 x 10⁻³ m²**.

Dengan menggunakan persamaan luas lingkaran maka bisa didapatkan besar diameter dalam pipa sebesar **8.641 cm**. Ukuran pipa yang mendekati adalah pipa **3 inchi Schedule 80** dengan nilai aktual ID = **8.128 cm** dan aktual OD = **8.89 cm**.

Sizing Heat Exchanger

Tujuan dari sizing adalah ingin mengetahui seberapa besar panas *flue gas* keluaran dapat *direct recovery* oleh aliran udara masuk.

Dengan menggunakan persamaan umum alat penukar kalor:

$$Q = U \times A \times \Delta T_{LMTD} \quad (4)$$

$$Q = U \times A \times \left(\frac{(T_{in} - t_{out}) - (T_{out} - t_{in})}{\ln \left(\frac{T_{in} - t_{out}}{T_{out} - t_{in}} \right)} \right) \quad (5)$$

Keterangan:

- Q merupakan besar kalor yang berpindah
- U merupakan Koefisien menyeluruh perpindahan kalor
- A luas kontak fluida panas menuju fluida yang lebih dingin
- T_{in} = suhu flue gas masuk, T_{out} = suhu flue gas keluar
- t_{in} = suhu udara masuk, t_{out} = suhu udara keluar

Dari persamaan tersebut parameter yang akan dicari adalah suhu udara masuk ke combustion chamber. Untuk mengetahui seberapa efisiensi penambahan heat exchanger pada kenaikan temperatur udara masuk.

Tahap pertama yang dikerjakan adalah mencari temperatur nyala api (*flame temperature*) yang dihasilkan bahan bakar biomassa. Karena komposisi biomassa yang karakteristik

⁵ www.engineeringtoolbox.com

termofisikanya yang bervariasi dan sulit didefinisikan ditentukan maka data yang digunakan adalah yang sudah pernah dipublikasikan. Menurut literatur⁶ menggunakan suhu **1000°C**.

Setelah itu perlu mencari daya keluaran kompor dengan jumlah bahan bakar biomassa 450 gram, dengan nilai kalor pembakaran sebesar 19.2 MJ/kg dan rata-rata waktu pembakaran selama 1 jam maka didapatkan nilai sebesar **2.4 kW**. Dengan asumsi rata-rata untuk kompor yang baik sekitar 30% maka nilai kalor yang terbuang sebesar **1.68 kW**.

Maka bisa didapatkan suhu keluaran *flue gas* menggunakan persamaan kalor yaitu

$$Power\ out = m \cdot Cp \cdot (T_{flame} - T_{in}) \quad (6)$$

Dengan nilai Cp *flue gas* sebesar 1.02 kJ/kg.K dan massa pembakaran yang dihasilkan 2.65 kg maka didapat besarnya $T_{in} = 378.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Selanjutnya menentukan besarnya *preheating* dari udara masuk pembakaran. Prinsip yang digunakan adalah alat penukar kalor sederhana dengan persamaan penukar kalor:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LMTD} \quad (7)$$

Dengan nilai ΔT_{LMTD} sebagai berikut:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{in} - t_{out}) - (T_{out} - t_{in})}{\ln \frac{(T_{in} - t_{out})}{(T_{out} - t_{in})}} \quad (8)$$

Nilai U merujuk pada www.engineeringtoolbox.com didapatkan range antara 60 – 180 W/m².K namun diambil untuk nilai terendah yaitu 60 W/m².K. Untuk nilai A menggunakan luas permukaan diameter luar pipa dalam dan panjang sebesar 90 cm untuk memudahkan instalasi dan menyesuaikan kondisi ruang rumah. Setelah itu udara masuk diasumsikan pada suhu **30 °C** dan suhu *flue gas* keluaran diharapkan pada **200 °C** karena secara umum yang dilepaskan ke udara lingkungan sekitar 200 °C⁷. Untuk nilai kalor yang akan ditukar menggunakan massa *flue gas* sebanyak 2.65kg dan Cp *flue gas* sebesar 1.02 kJ/kg.K dengan perubahan temperatur dari 378.6 °C menuju 200 °C.

Maka dengan persamaan diatas maka bisa didapatkan panas yang terambil dapat menaikkan temperatur udara hingga **133.4 °C**

⁶ Changkok Ryu dkk. Effect of Fuel Properties on Biomass Combustion. Elsevier – Fuel. 2005

⁷ A. Messerer dkk. Combined particle emission and heat recovery from combustion exhaust. Elsevier – Biomass and Bioenergy 2007

LAMPIRAN B

Water Boiling Test Data Sheet

Fixed Data:

| | | | | | |
|------------|----------------------|----|-----------------------|---------|----------------|
| Cp(air) | 4.186 kJ/kg.K | Hc | 16797.44 kJ/kg | Mbejana | 0.28 kg |
| Cp(bejana) | 0.902 kJ/kg.K | HL | 2260 kJ/kg | Ta | 25 C |

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

Start up variation, Grates 300 mm, A/F 1.3

| Variation | M _{water} (kg) | W _{biomassa} (kg) | M _{evap} (kg) | T _b (K) | η (%) |
|-----------|-------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|----------|
| cold | 1.5 | 0.189 | 0.24 | 106 | 33.74967 |
| hot | 1.5 | 0.19 | 0.27 | 104.5 | 35.38945 |

Average efficiency : 34.56956

Grates variation, A/F = 1.3, hot start

| height | M _{water} (kg) | W _{biomassa} (kg) | M _{evap} (kg) | T _b (K) | η (%) |
|--------|-------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|----------|
| 250 | 1.5 | 0.194 | 0.28 | 107 | 35.85438 |
| 300 | 1.5 | 0.19 | 0.27 | 104.5 | 35.38945 |

Average efficiency : 35.62191

A/F ratio variation, grates 300 mm, hot start

| Ratio | M _{water} (kg) | W _{biomassa} (kg) | M _{evap} (kg) | T _b (K) | η (%) |
|-------|-------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|----------|
| 0.9 | 1.5 | 0.195 | 0.31 | 107.5 | 37.84013 |
| 1 | 1.5 | 0.189 | 0.3 | 106 | 38.02092 |
| 1.3 | 1.5 | 0.19 | 0.27 | 104.5 | 35.38945 |

Average efficiency : 37.0835

LAMPIRAN C

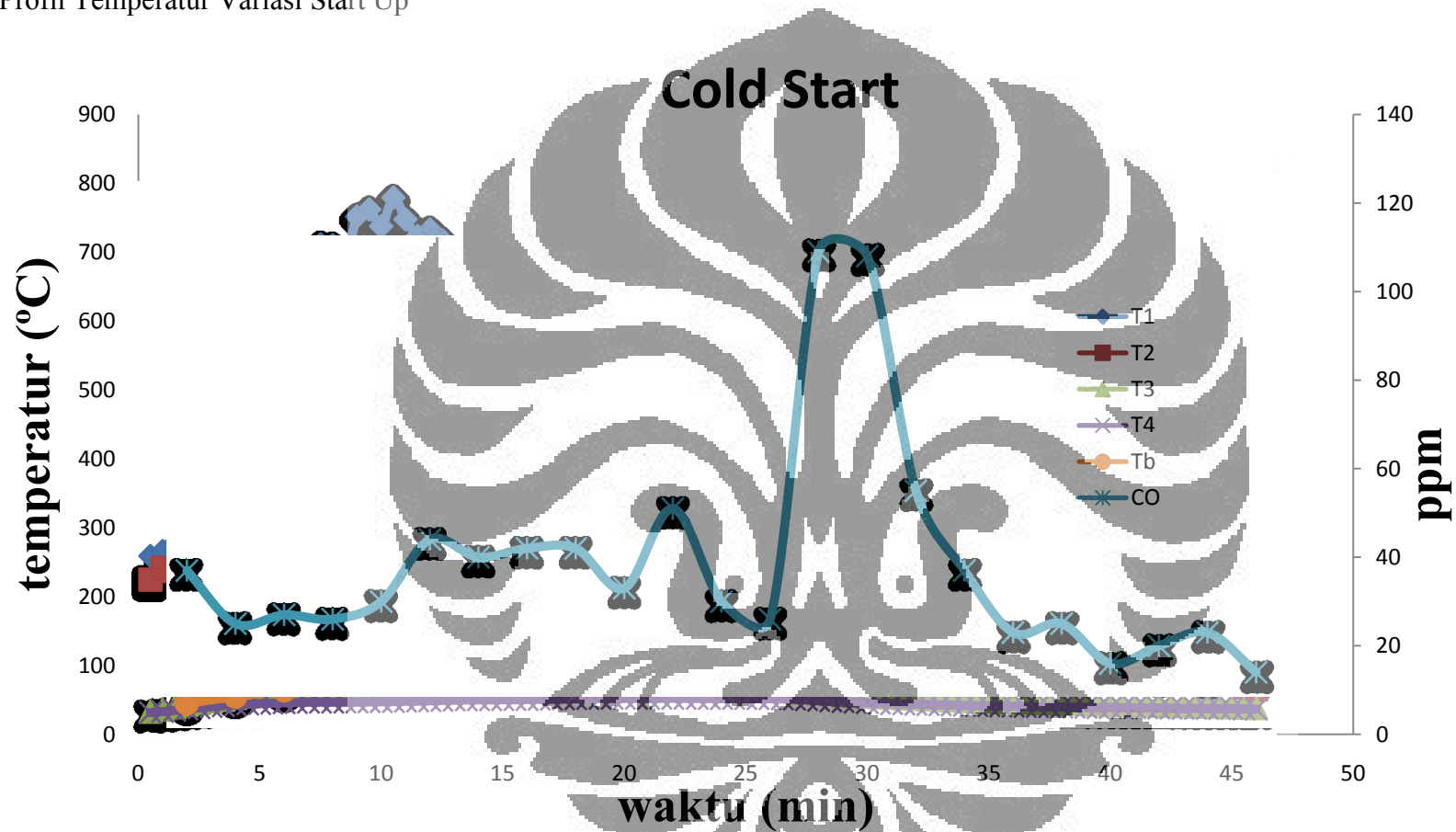
Perhitungan Heat Recovery (untuk Sankey Diagram)

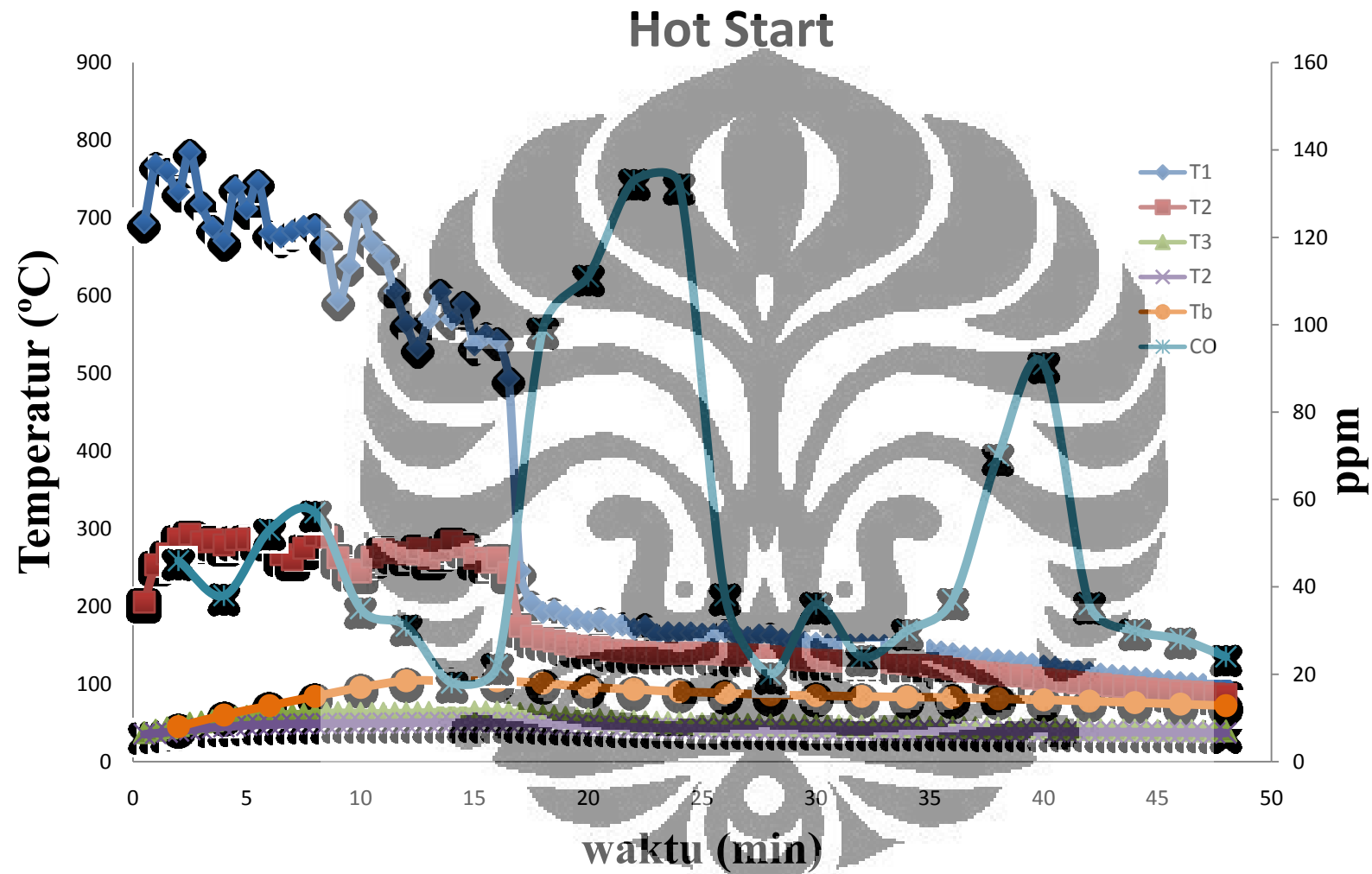
- Panas yang dihasilkan:
 - $200 \text{ gr} \times 16 \text{ MJ/kg} = 3200 \text{ kJ}$ (100%)
 - Waktu pembakaran = 40 menit
 - Daya keluaran kompor = $1.3 \text{ kJ/s} = 1.3 \text{ kW}$
- Panas yang diterima Panci:
 - $35\% \times 3200 \text{ kJ} = 1120 \text{ kJ}$
- Panas dinding kompor:
 - $\Delta T = 50^\circ\text{C} - 29^\circ\text{C} = 21^\circ\text{C}$
 - $C_p = 0.75 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$
 - Berat = 47.25 kg
 - Panas yang diterima = 744.3 kJ (20%)
- Panas Masuk Chimney:
 - $Q_{\text{keluar}} = 1335.7 \text{ kJ}$ (40%)
 - Kenaikan T udara masuk = 53°C
 - Mass = 23 kg
 - $Q_{\text{udara terhadap gas buang}} = 670 \text{ kJ} = 50.1\%$
- Kalor sisa pembakaran:
 - 10 gram sisa pembakaran = $10 \text{ gr} \times 16 \text{ MJ/kg} = 160 \text{ kJ}$ (5%)



LAMPIRAN D

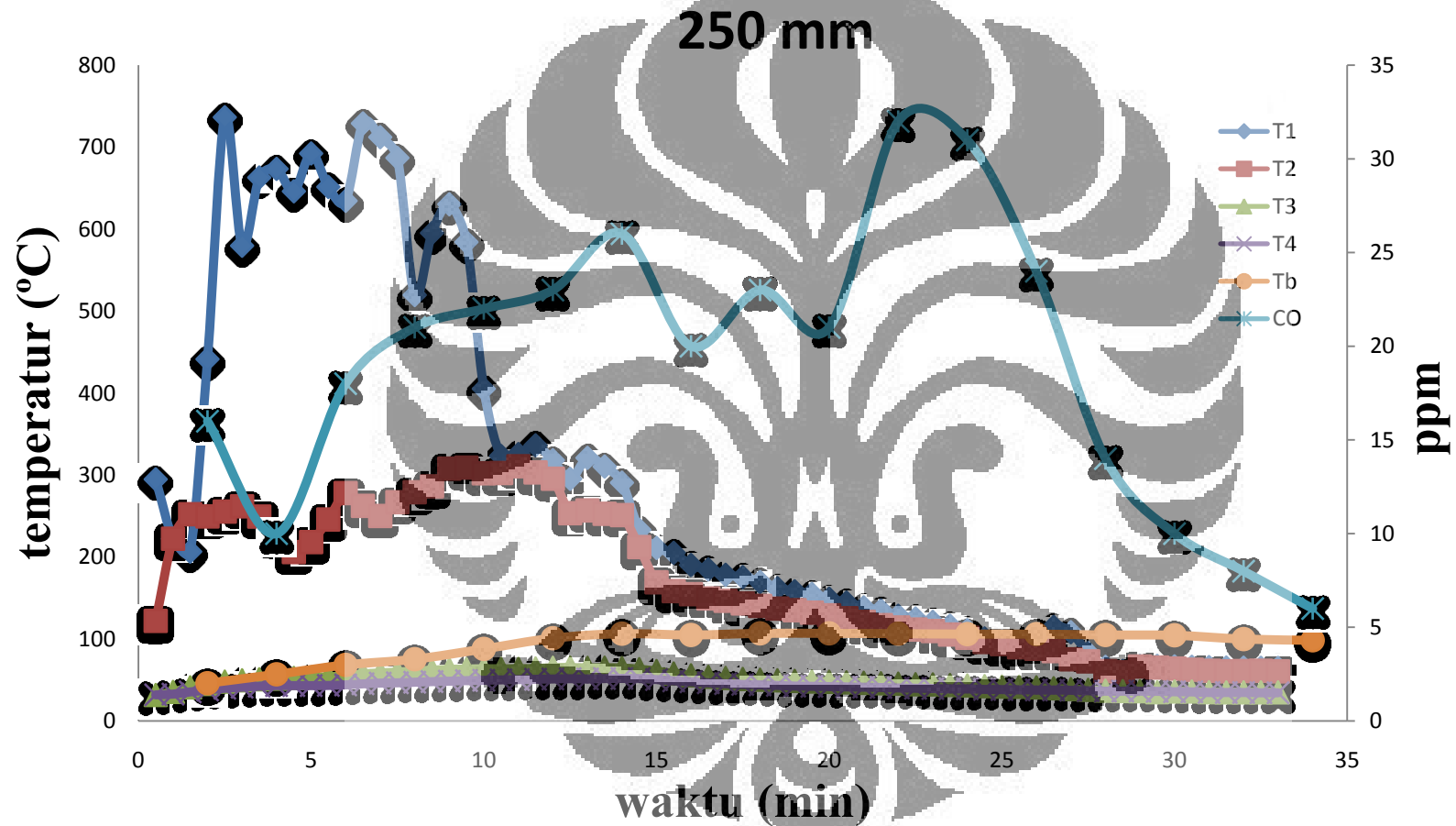
Profil Temperatur Variasi Start Up

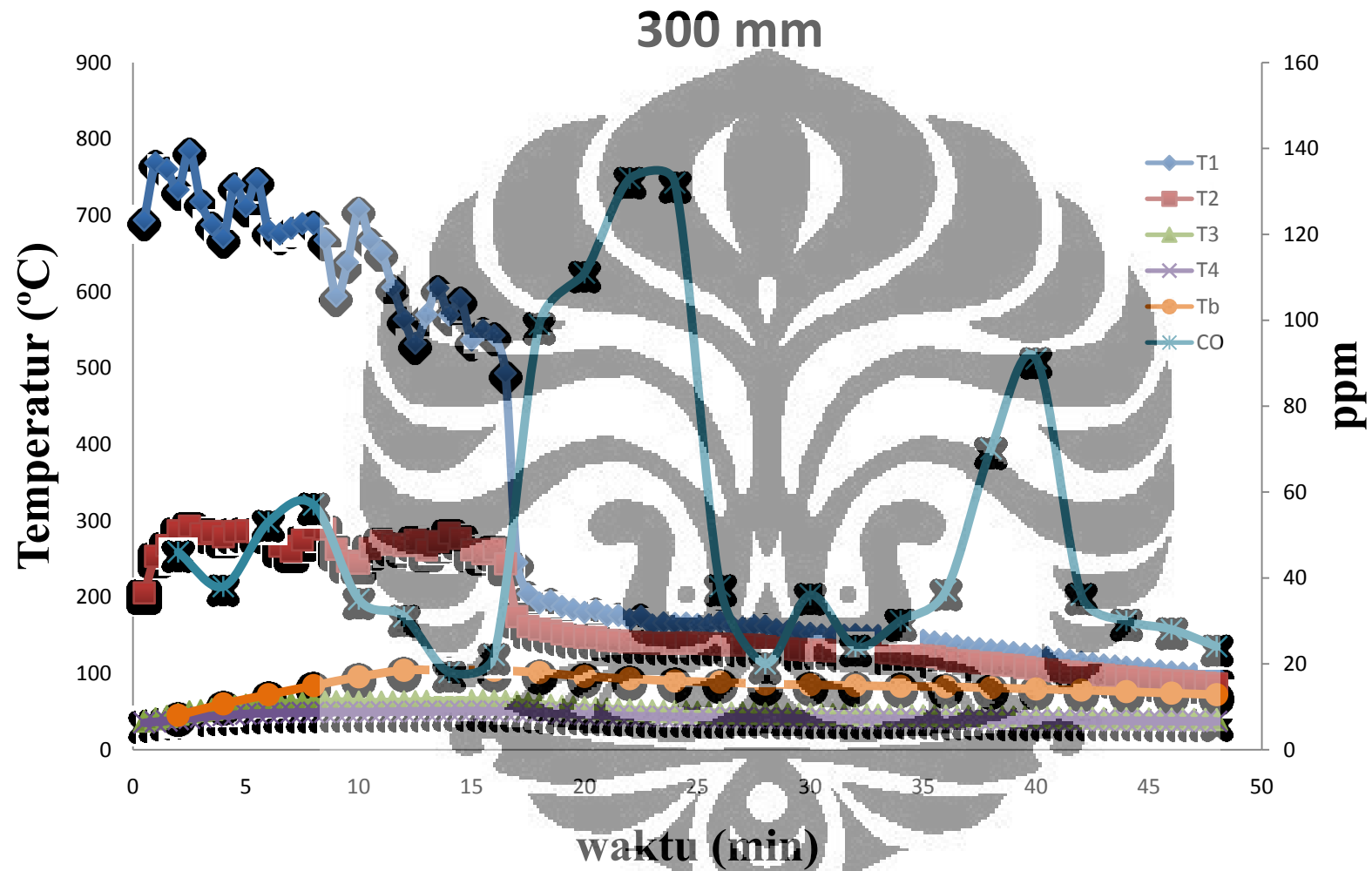




LAMPIRAN E

Profil Temperatur dan Emisi Variasi Tinggi Grate





LAMPIRAN F

Profil temperatur dan emisi variasi air per fuel ratio

