



UNIVERSITAS INDONESIA

**KINERJA PEMBAKARAN BIOBRIKET YANG TERBUAT DARI
CAMPURAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN
BATUBARA SUB-BITUMINUS DALAM KOMPOR BRIKET**

SKRIPSI

AGUSTINA RAHAYU

0806456354

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KINERJA PEMBAKARAN BIOBRIKET YANG TERBUAT DARI
CAMPURAN TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DAN BATUBARA
SUB-BITUMINUS DALAM KOMPOR BRIKET**

SKRIPSI


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

**AGUSTINA RAHAYU
0806456354**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Agustina Rahayu
NPM : 0806456354
Tanda Tangan : 
Tanggal : 21 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Agustina Rahayu
NPM : 0806456354
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Kinerja Pembakaran Biobriket yang Terbuat dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Batubara Sub-bituminus dalam Kompiler Briket

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

DEWAN PENGUJI

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

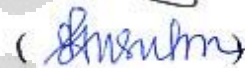
Penguji : Dr. Ir. Praswasti PDK Wulan, MT

Penguji : Dr. Ir. Asep Handaya Saputra, M.Eng.

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.

Ditetapkan di : Depok .

Tanggal : 29 Juni 2012



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT berkat limpahan rahmat-Nya skripsi dengan judul “**Kinerja Pembakaran Biobriket yang Terbuat dari Campuran Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Batubara Sub-bituminus dalam Kompor**”, dapat selesai dengan baik dan tepat pada waktunya. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang skripsi.

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 selalu melimpahkan rahmat dan kasih sayang-Nya.
2. Bapak Ir. Dijan Supramono, M.Sc selaku dosen pembimbing dalam penelitian ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir.Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
4. Keluarga tercinta, Bapak dan Ibu, Mbak Fitri, dan Mas Ivan atas doa yang tiada henti dalam setiap solat serta dukungan yang tidak pernah letih diberikan saat seolah tidak mungkin menyelesaikan skripsi ini
5. Teman satu bimbingan, Glifanny Ramadhani atas kesabaran, pengertian, dan bantuannya dalam menjalankan penelitian ini.
6. Bapak Sukrisdianto dan Bapak Hendri Tjen dari Ajagri atas bantuannya dalam penyediaan Tandan Kosong Kelapa Sawit.
7. Bapak Tri Saksono dari BPPT, Serpong atas bantuannya dalam analisa dan preparasi batubara.
8. Bapak Tahmid dari Balai Mekanisasi Pertanian atas bantuannya dalam preparasi biomassa dan pembuatan pellet biomassa.
9. Mang Ijal dan Kang Jajat atas kesabarannya membenarkan alat penelitian yang rusak dan selalu punya solusi di saat yang tepat.

10. Teman terbaik Muharza, yang selalu sabar menjadi tempat berkeluh kesah, memberi dukungan nyata, dan selalu mendoakan untuk kelancaran skripsi ini serta teman-teman pondok biru yang membantu preparasi biomassa (Tomi, Jaka, Rizal).
11. Teman-teman Lab Energi Berkelanjutan, Gina, Haryo, Tias, Maria, Farah, Rersi, Desy, Dirga, Marco atas bantuannya selama di Lab, kesediaannya berasap-asap selama penelitian ini berlangsung dan keceriaan yang diberikan di lab.
12. Teman-Teman asrama haji, Kanya, Inggit, Dara, Mondy, Mita, Ima atas perhatian dan keberadaannya selama ini mengiringi perjalanan untuk sampai pada tahap ini.
13. Teman-Teman Teknik Kimia yang membantu penelitian ini secara tidak langsung, Ivan, Ilyin, Kenny, Nandy, Tania, Alif Kupur, Fatima, Kak Mutia, Arif walaupun tidak besar tapi bantuan itu menunjukkan ada kepedulian ditengah keputusasaan serta semua tekim 08 lainnya yang menyusun skripsi di semester ini.
14. Teman-teman Fast Track 2008, Fakhrian, Farah, Ivan, Agas, Kenny, Merisa, dll atas bantuannya selama semester yang luar biasa ini.
15. Teman sepanjang masa Dean, Gita, Arga, Dika, Anes, Alfi, Wicak, Udin, Pipit, Giwang, dan Dwi kalian tidak pernah selalu ada, tapi kalian tidak pernah benar-benar pergi yang menjadikan kalian selalu berarti di setiap keberadaannya.
16. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian dan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penelitian ini masih terdapat banyak kekurangan. Untuk itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan untuk memperbaiki penulisan di masa yang akan datang menjadi lebih baik.

Depok, Juni 2012

Agustina Rahayu

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

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

Nama : Agustina Rahayu

NPM : 0806456354

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**Kinerja Pembakaran Biobriket yang Terbuat dari Tandan Kosong Kelapa
Sawit dan Batubara Sub-bituminus dalam Kompor Briket**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari 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 : Juni 2012

Yang menyatakan



(Agustina Rahayu)

ABSTRAK

Nama : Agustina Rahayu
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Kinerja Pembakaran Biobriket yang Terbuat dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Batubara Sub-bituminus dalam Kompor Briket

Pencampuran biomassa dengan batubara dewasa ini dianggap menjadi solusi bagi lamanya waktu penyalaan batubara dan besarnya emisi CO yang dihasilkan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kinerja dari pencampuran batubara dan biomassa tandan kosong kelapa sawit pada pembakaran di dalam kompor dilihat dari waktu penyalaan briket pemasakan, emisi CO yang dihasilkan, dan efisiensi termal pembakaran. Komposisi biomassa divariasikan pada 50%, 75%, dan 100% biomassa serta kecepatan superfisial 0,29 m/s, 0,42 m/s, dan 0,54 m/s. Hasil penelitian menunjukkan baik waktu penyalaan maupun emisi CO dipengaruhi oleh komposisi biobriket dan kecepatan forced. Waktu penyalaan tersingkat dialami oleh pembakaran biobriket dengan komposisi 100% biomassa pada kecepatan 0,42 m/s (0,5 menit). Sedangkan, emisi CO terendah didapat dari pembakaran biobriket dengan komposisi 100% biomassa dengan kecepatan 0,54 m/s (rata-rata 312,81 ppm). Serta efisiensi termal tertinggi dicapai oleh pembakaran biobriket pada komposisi 50% biomassa, (1,27%). Perhitungan entalpi pembakaran membuktikan bahwa pembakaran biobriket di semua komposisi pada kecepatan superfisial 0,54 m/s terjadi pembakaran yang lebih sempurna sehingga menghasilkan emisi CO terendah dan entalpi pembakaran tertinggi.

Kata kunci : biobriket, efisiensi termal, emisi CO, tandan kosong kelapa sawit, waktu ignisi

ABSTRACT

Name : Agustina Rahayu
Study Program : Chemical Engineering
Title : Combustion Performance of Biobriquettes from Empty Palm Bunches and Sub-Bituminous Coal in Briquette Stove

Nowadays, mixture of biomass and coal has been considered to solve the problem of long ignition delay and high CO emissions in coal combustion. This research aims to study combustion performance in mixture of empty palm bunches and coal concerning of its ignition delay, CO emissions, and thermal efficiency. The content of biomass in biobriquettes was varied at 50%; 75%; and 100% biomass content; and superficial air velocity at 0.29 m/s; 0.42 m/s; and 0.54 m/s. The result showed that both ignition delay and CO emissions were influenced by biomass composition and superficial air velocity. The shortest ignition delay occurred at combustion involving biobriquettes 100% biomass content with superficial air velocity at 0.42 m/s (0.5 minutes). The lowest CO emissions was obtained by burning biobriquettes 100% biomass content with 0.54 m/s superficial air velocity (average 312.81 ppm). The highest thermal efficiency was reached by burning of biobriquettes with 50% biomass content (1.27%). Combustion enthalpy calculation showed that compared to those at low air velocity 0.54 m/s had higher enthalpy and produced lowest CO emission at all combustion runs.

Key words: *Biobriquette, CO emissions, empty bunches palm, ignition delay, thermal efficiency.*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	III
HALAMAN PENGESAHAN	IV
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	VII
ABSTRAK.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
DAFTAR ISI.....	X
DAFTAR GAMBAR	XII
DAFTAR TABEL.....	XIV
DAFTAR LAMPIRAN.....	XV
BAB I	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian.....	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB II	7
2.1 Biomassa	7
2.1.1 Potensi Produksi Biomassa di Indonesia.....	7
2.1.2 Karakterisasi Pembakaran Biomassa.....	8
2.1.3 Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit	10
2.2 Batubara	11
2.2.1 Karakterisasi Pembakaran Batubara.....	11
2.2.2 Batubara Sub-bituminus.....	13
2.3 Biobriket	14
2.3.1 Proses Pembuatan Biobriket.....	14
2.3.2 Karakteristik Pembakaran Biobriket	15
2.3.2.1 Waktu Ignisi Biobriket	15
2.3.2.2 Efisiensi Termal.....	18
2.3.2.3 Emisi CO dari Pembakaran Biobriket	19
2.3.3 Perekat/Binder untuk Biobriket.....	22
2.4 Mekanisme Pembakaran Briket sebagai Bahan Bakar Padat.....	24
2.4.1 Pengeringan.....	24
2.4.2 Devolatilisasi.....	24
2.4.3 Pembakaran Zat Volatil.....	25
2.4.4 Pembakaran <i>Char</i>	26
2.5 Faktor yang Mempengaruhi Waktu Penyalaan Briket.....	28
2.5.1 Kadar Air	28
2.5.2 Ukuran dan Bentuk Bahan Bakar	28
2.5.3 Ketersediaan Udara.....	28
2.5.4 Kandungan Volatile Matters pada Permukaan Bahan Bakar	29
2.5.5 Besar Pori-Pori pada Permukaan	30

2.4 <i>State of The Arts</i> Biobriket.....	31
BAB III	35
3.1 Alur Pikir Penelitian	35
3.2 Diagram Alir Penelitian	39
3.3 Variabel Penelitian.....	39
3.4 Alat dan Bahan.....	40
3.5 Tahapan Penelitian.....	42
3.5.1 Perancangan Biobriket	43
3.5.2 Persiapan awal Biomassa dan batubara sub-bituminus.....	43
3.5.2.1 Analisa Proksimat Batubara Sub-bituminus dan Biomassa.....	43
3.5.2.2 Persiapan Biomassa	43
3.5.2.3 Persiapan Batubara	43
3.5.3 Preparasi Bahan Perekat.....	43
3.5.4 Preparasi Pellet Promotor (dengan kanji sebagai perekat dan ethanol sebagai oksigenat).....	44
3.5.5 Preparasi Biobriket.....	44
3.5.6 Pengujian biobriket	45
3.5.6.1 Pengujian pembakaran biobriket	45
3.5.6.2 Pengujian Emisi	45
3.5.6.3 Pengujian efisiensi termal.....	46
3.5.6.4 Pengujian Suhu Ignisi.....	47
3.5.7 Analisa dan Evaluasi Hasil Penelitian.....	47
BAB IV	48
4.1 Pemilihan Alat dan Bahan	48
4.2 Pembuatan Biobriket.....	48
4.3 Pengujian Pembakaran Biobriket.....	52
4.4 Hasil Uji Proksimat dan Nilai Kalor Batubara dan Biomassa	55
4.5 Pengukuran Waktu Penyalaan	57
4.5.1 Pengaruh Komposisi Biobriket terhadap Waktu Penyalaan dan Temperatur Pembakaran	58
4.5.2 Pengaruh Kecepatan Superfisial terhadap Waktu Penyalaan.....	63
4.6 Pengukuran Emisi Pembakaran	68
4.6.1 Fenomena Pembentukan Emisi CO pada Proses Pembakaran terhadap Temperatur Pembakaran.	68
4.6.2 Pengaruh Komposisi biomassa pada Biobriket terhadap Emisi CO	76
4.6.2 Pengaruh Kecepatan Superfisial pada Emisi Pembakaran	78
4.7 Pengukuran Efisiensi Termal Pembakaran	79
4.8 Rekomendasi.....	90
BAB V	91
5.1 Kesimpulan	91
5.2 Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Negara penghasil kelapa sawit dunia	2
Gambar 2. 1 Emisi CO ₂ pada Beberapa Bahan Bakar	12
Gambar 2. 2 Efek Komposisi Biomassa terhadap Temperatur Pembakaran	16
Gambar 2. 3 Hubungan Emisi CO yang Dihasilkan dengan Kandungan Air pada Beberapa Jenis Kompor	21
Gambar 2. 4 Pengaruh Ukuran Biobriket terhadap Emisi CO yang Dihasilkan	22
Gambar 2. 5 Hubungan Komposisi Binder terhadap Breaking Strength dari Briket..	23
Gambar 2. 6 Deskripsi Penyalaan <i>Volatile Matter</i> pada Permukaan Material Briket	25
Gambar 2. 7 Analisis Termogravimetri untuk Menentukan Tahap-Tahap dalam Pembakaran (1) Batubara JW; (2) Batubara US; (3) Biogran; (4) Kayu gergaji.	26
Gambar 2. 8 Contoh Hasil Analisis FTIR untuk Mendeteksi Senyawa yang Terkandung dalam <i>Volatile Matters</i>	26
Gambar 2. 9 Mekanisme Pembakaran pada Batubara	27
Gambar 2. 10 Fenomena Timbulnya <i>Eddy</i> karena Turbulensi yang Memudahkan Difusi Oksigen ke Permukaan <i>Char</i>	29
Gambar 2. 11 Fluks Massa Gas dan Tar dari Permukaan Partikel (Kurva Putus-Putus) dan Fraksi Energi yang Dikeluarkan dari Gas Tar pada <i>Flame</i>	30
Gambar 2. 12 Mekanisme untuk <i>Ignition</i> pada Briket Setelah Inisiasi. Flux <i>Volatile</i> yang Terlalu Tinggi dapat Menyebabkan <i>Diffusion Flame</i> Terbentuk Di <i>Boundary Layer</i> yang Jauh dari Permukaan Padatannya	31
Gambar 2. 13 Efek Turbulensi pada <i>Dimples Biobriquette</i>	34
Gambar 3. 1 Kompot Briket Batubara yang Akan Digunakan (a); Perforated Hood yang Digunakan Di atas Kompor (b)	35
Gambar 3. 2 Skema Kompor Untuk Pengujian Biobriket	36
Gambar 3. 3 Sketsa Grafik untuk Data Waktu Ignisi biobriket	37
Gambar 3. 4 Sketsa Grafik untuk Data Emisi CO	38
Gambar 3. 5 Diagram Alir Penelitian	39
Gambar 3. 6 (a) Mesin <i>Crusher</i> ; (b) Alat Pengepres; (c) Anemometer	41
Gambar 3. 7 (a) <i>Mould</i> (Pencetak Briket); (b) <i>Gas Analyzer</i> ; (c) Bunsen dan Penjepit Besi	41
Gambar 3. 8 Kompor Briket yang Digunakan pada Penelitian dan Blower	42
Gambar 3. 9 (a) Batubara Sub-bituminus; (b) Binder Kanji; (c) Cacahan TKKS	42
Gambar 4. 1 Kurva Pengeringan TKKS	50
Gambar 4. 2 Dari Kiri Ke Kanan: Biobriket 50% TKKS : 50% Batubara; 75% TKKS : 25% Batubara; 100% TKKS	51
Gambar 4. 3 Fenomena Aliran Udara Melewati Bola	51
Gambar 4. 4 Abu Sisa Pembakaran Briket 100% Biomassa	57
Gambar 4. 5 Pengaruh Kandungan Volatile Matters terhadap Suhu Ignisi Biobriket	59
Gambar 4. 6 Pengaruh Kandungan Volatile Matters terhadap Waktu Penyalaan Biobriket	60
Gambar 4. 7 Pengaruh Komposisi terhadap Waktu Ignisi	61
Gambar 4. 8 Kandungan <i>Ash</i> Tiap Komposisi Biobriket	62

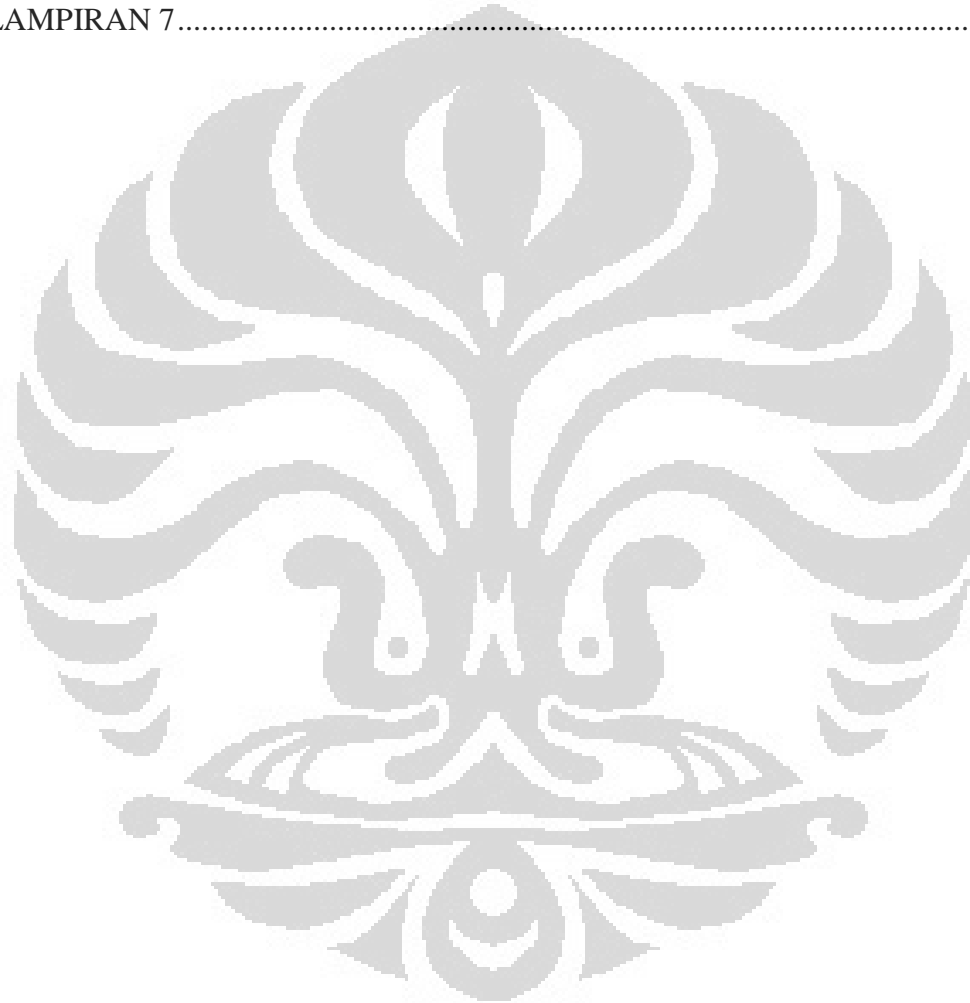
Gambar 4. 9 Temperatur Penyalaan pada Masing-masing Kecepatan Superfisial untuk Tiap Komposisi Biobriket.	64
Gambar 4. 10 Temperatur Unggun pada Komposisi 50% Biomassa	65
Gambar 4. 11 Temperatur Unggun pada Komposisi Biobriket 75% Biomassa pada Tiap Kecepatan <i>Blower</i>	66
Gambar 4. 12 Temperatur Unggun pada Komposisi Biobriket 100% Biomassa pada Tiap Kecepatan <i>Blower</i>	67
Gambar 4. 13 Emisi Pembakaran pada Kecepatan 0,29 m/s: (a) 50% Biomassa, (b) 75% Biomassa, (c) 100% Biomassa	70
Gambar 4. 14 Emisi Pembakaran di Kecepatan 0,42 m/s: (a) 50% Biomassa, (b) 75% Biomassa, (c) 100% Biomassa	73
Gambar 4. 15 Emisi Pembakaran di Kecepatan 0,54 m/s: (a) 50% Biomassa, (b) 75% Biomassa, (c) 100% Biomassa	75
Gambar 4. 16 Pengaruh Komposisi Biomassa terhadap Emisi CO	76
Gambar 4. 17 Pengaruh Kecepatan Superfisial terhadap Emisi CO.....	78
Gambar 4. 18 Profil Kenaikan Temperatur Air pada Pengukuran Efisiensi Termal. .	81
Gambar 4. 19 Emisivitas Bahan Refraktori pada Berbagai Suhu	85
Gambar 4. 20 Grafik Perbandingan Komposisi Biobriket terhadap Efisiensi Termal	86

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Kebutuhan Energi Indonesia.....	1
Tabel 1. 2 Perbandingan Kandungan Air pada Batubara Lignit dan Sub-bituminus Berdasarkan Metoda ASTM.....	4
Tabel 2. 1 Jenis Sumber Biomassa yang Berpotensi Sebagai Bahan Bakar.....	8
Tabel 2. 2 Analisa Proksimat dan Ultimat Beberapa Biomassa	9
Tabel 2. 3 Uji Proksimat Tandan Kosong Kelapa Sawit	10
Tabel 2. 4 Analisa proksimat dari batubara sub-bituminus	13
Tabel 2. 5 Pengaruh <i>Moisture Content</i> terhadap Efisiensi pada Beberapa Jenis Kompor.....	19
Tabel 2. 6 <i>State of The Arts</i> Biobriket.....	32
Tabel 3. 1 Tabel Pengambilan Data Pengujian Biobriket.....	40
Tabel 4. 1 Hasil Uji Proksimat dan Nilai Kalor Batubara dan Biomassa	55
Tabel 4. 2 Suhu Ignisi Tiap Komposisi Biobriket	58
Tabel 4. 3 Ringkasan waktu nyala dan suhu pembakaran pada tiap kecepatan.....	59
Tabel 4. 4 Rerata dan Puncak Emisi CO pada Tiap Komposisi dan Kecepatan Flow Udara	76
Tabel 4. 5 Data Perhitungann Efisiensi Panas Pembakaran Biobriket pada Kecepatan 0,42 m/s	83
Tabel 4. 6 Data Entalpi Pembakaran.....	87
Tabel 4. 7 Rangkuman Rekomendasi Penggunaan Komposisi Biobriket dan Kecepatan <i>Blower</i>	90

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1.....	96
LAMPIRAN 2.....	97
LAMPIRAN 3.....	107
LAMPIRAN 4.....	109
LAMPIRAN 5.....	119
LAMPIRAN 6.....	120
LAMPIRAN 7.....	121



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, kebutuhan energi khususnya bahan bakar minyak di Indonesia semakin meningkat. Permintaan terbesar salah satunya datang dari sektor rumah tangga seperti tertera di Tabel 1.1

Tabel 1. 1 Kebutuhan Energi Indonesia

Sektor	1990		2000		2010	
	Giga Joule	%	Giga Joule	%	Giga Joule	%
Industri	117683,33	68	282740	69	611296,66	70
Rumah Tangga	32883,33	19	741306,66	18	135963,33	16
Fasilitas Publik	12113,33	7	22436,66	6	42343,33	5,5
Komersial	10383,33	6	29370	7	72896,33	8,5
Total	173063,33	100	408676,66	100	862490	100

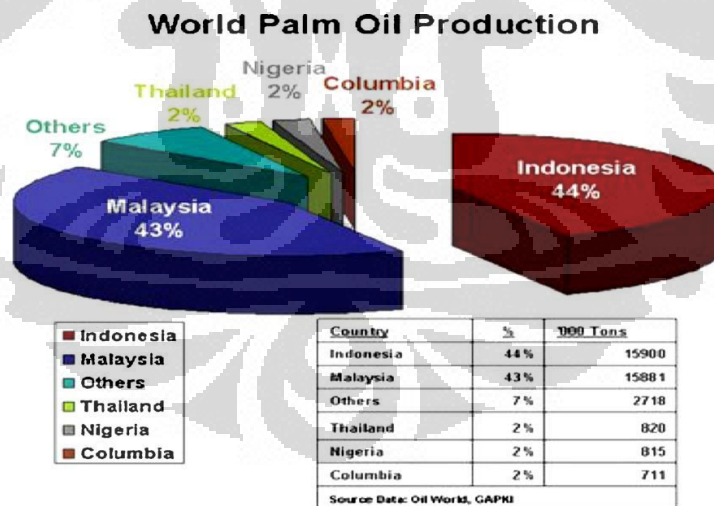
Sumber: (RIPEBAT, 1997)

Meningkatnya permintaan bahan bakar minyak di Indonesia saat ini tidak diimbangi oleh produksi minyak yang memadai. Terlebih cadangan minyak Indonesia semakin menipis tiap tahunnya dan membutuhkan waktu yang lama untuk memperbaruinya. Untuk mencukupi kebutuhan energi yang semakin meningkat perlu dilakukan pembaruan sumber energi terutama untuk mengatasi ketergantungan sektor rumah tangga terhadap bahan bakar minyak. Salah satu alternatif yang dipilih untuk mengatasi permasalahan ini adalah menggunakan briket batubara sebagai pengganti minyak bumi.

Penggunaan briket batubara sangat cocok dengan kondisi rural area seperti Indonesia karena tidak membutuhkan tekanan tinggi serta dapat menghasilkan volume panas yang tinggi. Berdasarkan data statistik pada tahun 2005, briket batubara sebagian besar digunakan oleh industri kecil peternakan ayam sebagai bahan

bakar pemanas, industri rumah tangga, dan warung makan sebagai pengganti minyak tanah (DESM, 2005). Untuk memenuhi kebutuhan akan briket batubara Indonesia memiliki potensi batubara yang sangat besar, yaitu 6759 milyar ton yang tersebar di pulau Sumatera dan Kalimantan. Batubara yang banyak terdapat di Indonesia merupakan batubara jenis lignit (43,88%) dan batubara jenis sub-bituminus (36,1%). Jenis batubara ini memiliki kandungan *volatile matter* yang rendah dan masih memiliki kandungan air sehingga penggunaannya pada briket secara mandiri dapat menimbulkan masalah seperti waktu ignisi yang lama dan emisi CO yang tinggi (Rumalasari, 2008).

Disamping potensi batubara yang cukup besar, Indonesia memiliki potensi biomassa yang cukup besar. Saat ini sumber energi biomassa tengah mencuri perhatian publik karena potensinya yang besar di Indonesia dan kemudahannya untuk diperbarui. Salah satu potensi biomassa yang cukup besar di Indonesia merupakan perkebunan kelapa sawit. Menurut data tahun 2009, Indonesia merupakan Negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia mengungguli Malaysia dengan jumlah produksi sebesar 159 juta ton.



Gambar 1. 1 Negara penghasil kelapa sawit dunia (KBRI, 2009)

Pada periode tahun 1980 hingga 1990an luas area perkebunan kelapa sawit di Indonesia meningkat 11% seiring dengan meluasnya area produksi CPO sebesar 9,4%. Hingga tahun 2010 produksi CPO meningkat 5-6% dan diperkirakan pada

periode tahun 2010-2020 akan meningkat sebesar 3-4% (ITB, 2011). Peningkatan luas area produksi CPO tentu saja berbanding lurus dengan produksi limbah kelapa sawit. 70-75% hasil pengolahan industri kelapa sawit berupa residu atau limbah (Eka, 2010). Berdasarkan data yang didapat dalam setahun Indonesia dapat memproduksi ± 7 juta ton limbah kelapa sawit berupa tandan kosong dan serat kelapa sawit yang berasal dari industri pengolahan minyak kelapa sawit (Indarti, 2001). Hingga saat ini, pemanfaatan kelapa sawit hanya terbatas pada pengelolaan limbah cair dan potensi minyak yang terkandung didalamnya. Pengelolaan limbah padat kelapa sawit menjadi sumber energi saat ini masih jarang dilakukan. Limbah padat kelapa sawit kemudian digunakan sebagai bahan campuran pembuatan dari briket batubara. Penggunaan limbah padat kelapa sawit diharapkan dapat meningkatkan kualitas briket dari segi waktu penyalaan dan emisi CO yang dihasilkan. Pembuatan briket dari material alam ini masih menimbulkan masalah karena memiliki *heating value* yang rendah. Untuk itu dalam pembuatan briket biomassa diperlukan campuran antara material alam (biomassa) dengan batubara yang fungsinya saling melengkapi, dimana batubara berfungsi meningkatkan *heating value* karena batubara memiliki *fixed carbon* yang tinggi sedangkan, biomassa dapat mempersingkat waktu penyalaan karena memiliki *volatile matter* yang tinggi dan ukuran pori yang besar. Ukuran pori yang besar mengakibatkan lapisan batas laminar yang terjadi setelah *volatile matter* di permukaan briket terbakar akan berubah menjadi turbulen sehingga mempercepat terjadinya perpindahan panas secara konveksi. Dengan waktu penyalaan yang lebih pendek dapat menurunkan kadar asap yang terbentuk yang merupakan *volatile matter* yang tidak sempat terbakar serta menurunkan emisi CO pada awal penyalaan karena terlambatnya penyalaan.

Biomassa yang digunakan pada penelitian ini merupakan limbah padat berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan batubara yang digunakan merupakan batubara jenis sub-bituminus. Pemilihan biomassa tandan kosong kelapa sawit didasarkan pada potensinya yang cukup besar di Indonesia dan sedikitnya industri pengolahan limbah padat kelapa sawit. Selain itu, TKKS memiliki kandungan *volatile matter* yang cukup tinggi, yaitu 68,67%. Pemilihan jenis batubara didasarkan pada

kandungan *volatile matter* pada batubara jenis sub-bituminus yang lebih tinggi dibanding batubara lignit dan kandungan air batubara sub-bituminus yang lebih rendah dibanding batubara lignit. Kandungan air yang tinggi berpengaruh menurunkan heating value yang dimiliki oleh batubara sub-bituminus (Quaak, 1999).

Tabel 1. 2 Perbandingan Kandungan Air pada Batubara Lignit dan Sub-bituminus Berdasarkan Metoda ASTM

Coal sample	VM	MC	FC	Ash
Lignit	25,7	38,8	29,4	6,1
Sub-bituminus	32,3	21,8	37,3	8,6

Sumber: (Instrument, 1997)

Beberapa penelitian mengenai briket telah banyak dikembangkan seperti pengujian bahan bakar dan *control pollutant* (Lu, 2000), pengujian karakterisasi briket biomassa berdensitas rendah (Chaney, 2006), peningkatan panas pembakaran pada biobriket dari bambu, pengujian karakteristik fisik dan kimia dari biomassa dan pengaruhnya terhadap pembakaran (Oberberger and Thek, 2004), uji karakteristik preparasi campuran biomassa dan batubara terhadap kinerja tungku (Supriyatno, 2010). Berdasarkan penelitian terdahulu mengenai pengaruh komposisi biobriket terhadap pembakaran penelitian ini dirancang untuk mendapatkan bahan bakar biobriket yang memiliki waktu penyalaan yang lebih cepat, emisi CO yang lebih rendah, dan efisiensi termal yang tinggi dengan menggunakan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan biomassa.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam memproduksi biobriket sebagai bahan bakar kompor terdapat beberapa masalah, diantaranya:

1. Pengaruh komposisi batubara sub-bituminus dan limbah padat kelapa sawit terhadap waktu penyalaan biobriket relatif terhadap waktu penyalaan briket batubara.

2. Pengaruh komposisi batubara sub-bituminus dan limbah padat kelapa sawit terhadap emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran biobriket.
3. Pengaruh komposisi batubara sub-bituminus dan limbah padat kelapa sawit terhadap efisiensi panas ketika pembakaran biobriket.
4. Pengaruh kecepatan *blower* terhadap emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran biobriket.
5. Pengaruh bentuk biobriket terhadap efisiensi termal pembakaran biobriket.

1.3 Tujuan Penelitian

Biobriket yang dihasilkan pada penelitian ini dirancang agar menghasilkan bahan bakar kompor briket yang memiliki waktu penyalaan yang cepat, tingkat emisi CO yang rendah, dan efisiensi thermal yang tinggi. Untuk itu penelitian dilakukan dengan tujuan:

- Membuat biobriket yang memiliki suhu penyalaan yang rendah dan waktu penyalaan yang singkat sehingga mengefisienkan waktu penggunaan dan mencegah terbentuknya gas CO terlalu tinggi di awal pembakaran.
- Membuat biobriket dengan emisi CO yang rendah sehingga aman bagi kesehatan pengguna.
- Membuat biobriket yang memiliki efisiensi panas yang tinggi ketika dilakukan pembakaran sehingga baik untuk pemasakan.

Disamping tujuan khusus di atas, penelitian ini juga memiliki tujuan umum yaitu, memanfaatkan limbah kelapa sawit yang memiliki potensi cukup besar untuk digunakan sebagai bahan bakar kompor briket

1.4 Batasan Penelitian

Batasan ruang lingkup yang akan dibahas pada penelitian ini diantaranya,

- Limbah padat kelapa sawit yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit yang berasal dari perkebunan kelapa sawit Provinsi Bangka Belitung
- Batubara yang digunakan adalah jenis batubara sub-bituminus yang berasal dari PT. Bukit Asam, Provinsi Lampung.
- Penggunaan kanji sebagai perekat

- Biobriket yang akan digunakan berbentuk bola.
- Pengujian biobriket ini menggunakan kompor biomassa yang dirancang untuk penelitian.
- Pada uji pembakaran digunakan pellet promotor yang diharapkan dapat mempercepat waktu penyalaan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, serta sistematika penulisan yang digunakan pada penelitian ini

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi informasi dan tinjauan lebih lanjut mengenai jenis batubara yang digunakan, biomassa dan limbah tandan kosong kelapa sawit, ketersediaan biomassa dan batubara yang digunakan, karakteristik pembakaran briket dalam kompor, dan perekat briket

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian bab ini berisi mengenai penjelasan tentang metodologi, tahap-tahap penelitian yang dilakukan dari awal hingga akhir, serta alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini mencakup prosedur penelitian

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dimuat hasil pengujian kinerja bahan bakar serta pembahasan mengenai fenomena yang terjadi.

BAB V : KESIMPULAN

Pada bagian ini dimuat kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil pengujian dan pembahasan terkait dengan tujuan penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa berkenaan dengan segala sesuatu yang berasal dari alam termasuk di dalamnya tanaman yang masih hidup dan limbah organik yang berasal dari kotoran hewan, tanaman, maupun manusia. Dewasa ini, biomassa dikenal sebagai istilah yang menggambarkan segala jenis biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi (bahan bakar). Seperti halnya limbah kayu, arang, kotoran hewan, limbah pertanian, dan limbah padat yang dapat terdegradasi. Biomassa merupakan produk fotosintesis yang tersusun atas unsur karbon, hidrogen, dan oksigen yang berbentuk polimer makroskopik kompleks seperti,

- Selulosa $(C_6H_{10}O_5)_x$
- Hemiselulosa $(C_5H_8O_4)_y$
- Lignin $(C_9H_{10}O_3(CH_3O)_{0.9-1.7})_z$

Pemanfaatan biomassa pada umumnya dengan dilakukan pembakaran. Ketika dilakukan pembakaran, biomassa pada umumnya memiliki nilai HHV sebesar 20.400 kJ/kg dalam basis kering (*moisture content* \pm 15%). Nilai HHV dari suatu jenis biomassa bergantung pada kandungan *moisture* yang menunjukkan seberapa besar panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air yang terkandung didalam biomassa tersebut.

2.1.1 Potensi Produksi Biomassa di Indonesia.

Indonesia memiliki potensi produksi biomassa yang sangat baik. Hal ini didukung dengan luas wilayah yang besar, kondisi tanah, dan iklim yang baik. Diperkirakan Indonesia memiliki potensi energi yang berasal dari biomassa sebesar 50.000 MW yang tersebar di seluruh wilayah di Indonesia. Potensi energi yang berasal dari biomassa ini ditinjau dari tiga sektor utama, yaitu hutan, pertanian, dan perkebunan (Indarti, 2001). Berikut adalah beberapa jenis biomassa yang potensial untuk diterapkan sebagai sumber energi.

Tabel 2. 1 Jenis Sumber Biomassa yang Berpotensi Sebagai Bahan Bakar

Sumber Biomasa	Limbah	Rasio Limbah (%)	Jumlah Limbah (Juta ton/Tahun)	LHV (MJ/kg)	Potensi Energi (Juta GJ/ Tahun)	Crude Oil Equivalen t (10^6 toe/ Tahun)
Tebu	Bagas	32	8,5	18,1	78,00	1,87
	Daun dan Pucuk Tebu	30	1,3	15,81	20,55	0,49
Kelapa Sawit	TKKS	27	12,9	8,16	105,26	2,53
	Serat	15	6,7	11,34	75,98	1,82
	Tempurung	9	3,5	18,83	65,91	1,58
Pohon Karet	Limbah Kayu Karet		2,8	-	46,45	1,11
Kelapa	Serabut		6,7	18,62	124,75	2,99
	Tempurung	16	3	16,78	50,34	1,21
Padi	Sekam Padi	23	13,5	12,69	171,32	4,11
	Jerami	40	49	10,9	534,10	12,82
Ubi Kayu	Limbah Cair Pabrik Tapioka	-	7,3	-	133,13	3,20
Industri Kayu	Limbah Kayu	-	8,3	-	70,11	1,68
TOTAL					1475,90	35,42

Sumber: (ZREU, 2000)

2.1.2 Karakterisasi Pembakaran Biomassa

Pemanfaatan biomassa dapat dilakukan dengan melakukan pembakaran langsung. Proses ini banyak dimanfaatkan oleh rumah tangga jauh sebelum teknologi kompor minyak ditemukan. Proses pembakaran biomassa untuk keperluan memasak pada rumah tangga akan menghasilkan arang sebagai sisa pembakaran. Karakteristik pembakaran biomassa sangat terkait dengan sifat dan karakteristik biomassa. Untuk mengetahui karakteristik biomassa perlu dilakukan analisa proksimat dan ultimat. Berikut adalah contoh karakterisasi beberapa biomassa.

Tabel 2. 2 Analisa Proksimat dan Ultimat Beberapa Biomassa

Sr. no.	Raw material	Proximate analysis			Ultimate analysis					Measur- ed HHV Dry basis	Calcula- ted HHV MJ/kg
		[% by wt. dry basis]			[% by wt. dry basis]						
		FC	VM	ASH	C	H	O	N	S	MJ/kg	MJ/kg
<i>1 Coals/coke</i>											
1	Northumber land no. 8-Anth. coal	84.59	7.09	8.32	83.67	3.56	2.84	0.55	1.05	32.856	30.951
2	German-Anna	79.60	12.00	8.40	82.62	3.02	3.66	0.92	0.73	33.000	29.952
3	Coal sample	30.00	30.00	40.00	—	—	—	—	—	14.772	14.973
4	German Braunkohole lignite	46.03	49.47	4.50	63.89	4.97	24.54	0.57	0.48	25.100	23.953
5	L01	27.72	38.32	33.96	—	—	—	—	—	15.630	15.511
6	L14	39.37	52.05	8.58	—	—	—	—	—	24.080	21.969
7	Charcoal	89.10	9.88	1.02	92.04	2.45	2.96	0.53	1	34.388	33.038
8	Coke	91.47	0.92	7.61	89.13	0.43	0.98	0.85	1	31.124	32.428
<i>2 Manufactured fuel/wood</i>											
9	Cotton shells briquettes	17.10	77.80	5.10	—	—	—	—	—	19.055	18.136
10	Lantana briquettes	11.90	20.80	67.30	—	—	—	—	—	7.687	6.926
11	Press mud briquettes	8.60	54.70	36.70	—	—	—	—	—	11.972	11.282
12	Block wood	14.59	83.32	2.09	46.9	6.07	43.99	0.95	0	18.261	18.132
13	Ply wood	21.80	74.20	4.00	—	—	—	—	—	19.720	19.245

Sumber : (Parikh, Chaniwala et al., 2004)

Analisa proksimat dilakukan untuk mengetahui kadar *fixed carbon*, *volatile matters*, *moisture content*, dan *ash* dari biomassa. Sedangkan, analisa ultimat dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terkandung di dalam biomassa. Pada umumnya, biomassa memiliki kandungan *volatile matters* dan *moisture content* yang tinggi serta *fixed carbon* yang rendah pada kondisi *wet basis*. *Volatile matter* merupakan material yang mudah terbakar yang dikandung oleh biomassa. *Moisture content* adalah kandungan air pada biomassa. *Fixed carbon* merupakan pembangkit utama panas ketika pembakaran berlangsung, *fixed carbon* kemudian menjadi indikasi terhadap nilai panas suatu material. Tingginya kandungan *moisture content* dan rendahnya *fixed carbon* menyebabkan biomassa memiliki nilai panas yang rendah sehingga menghasilkan panas pembakaran yang tidak stabil. Hal ini disebabkan panas yang seharusnya digunakan untuk volatilisasi kandungan *volatile matters* digunakan untuk menguapkan kandungan air terlebih dahulu. Untuk itu, penggunaan biomassa sebagai bahan bakar perlu dilakukan pengolahan terlebih dahulu seperti dilakukan pengeringan dan pencampuran dengan material lain. Berdasarkan penelitian sebelumnya pengeringan akan menaikkan kandungan *volatile matters* dan *fixed carbon* sebesar 7-50%. Selain berupa analisa proksimat dan ultimat, terdapat unsur kimia lain yang juga terkandung didalam biomassa seperti ikatan C-H, N-S-L, Si-Al-Fe-Na-Ti, dsb. Kandungan unsur kimia tersebut sedikit banyak

mempengaruhi waktu penyalaan dan emisi yang dihasilkan dari pembakaran biomassa. Kuantitas unsur kimia tersebut berbeda-beda pada tiap jenis biomassa

2.1.3 Biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit

Indonesia merupakan negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia. Dengan meluasnya area perkebunan kelapa sawit di Indonesia, semakin besar pula industri pengolahan kelapa sawit di Indonesia, salah satunya industri CPO. Industri pengolahan kelapa sawit pada umumnya menghasilkan limbah seperti halnya industri CPO (*crude palm oil*) akan dihasilkan cangkang sawit, tandan kosong dan serabut, serta industri minyak kelapa akan dihasilkan tempurung kelapa. Telah disebutkan di atas, bahwa Indonesia merupakan penghasil minyak kelapa sawit yang cukup potensial sehingga keberadaan limbah hasil pengolahannya seperti tandan kosong kelapa sawit cukup potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Selain daripada potensinya yang cukup besar, pemilihan kelapa sawit sebagai bahan biomassa pada pembuatan biobriket ini disebabkan kandungan *biofuel* pada kelapa sawit (Yusoff, 2006) yang dapat mempercepat pembakaran pada biobriket. Dalam hal ini bagian dari kelapa sawit yang akan digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan potensi sebesar 3,4 juta ton/tahun. Berikut karakteristik tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan biobriket:

Tabel 2. 3 Uji Proksimat Tandan Kosong Kelapa Sawit

<i>Analisis Proximate (wt%)</i>	Nilai
<i>Fixed Carbon</i>	17,45
<i>Volatile Matter</i>	68,67
<i>Ash</i>	3,43
<i>Moisture Content</i>	58,6

Sumber: (Purwanto, Supramono et al., 2010)

Dari hasil analisa proksimat pada Tabel 2.3, diketahui bahwa kandungan *fixed carbon* dari TKKS yang belum mengalami pengolahan (pengeringan) sangat rendah dan masih memiliki kandungan air yang tinggi sehingga nilai kalornya menjadi cukup rendah. Namun, TKKS memiliki kandungan *volatile matter* yang cukup tinggi.

Volatile matter dapat menghasilkan panas ketika pembakaran hal ini berpotensi untuk dapat mempersingkat waktu ignisi.

2.2 Batubara

Batubara adalah salah satu bahan bakar fosil yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik yang tertimbun selama ratusan tahun. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen. Batubara berupa materi padat karbon bertingkat, berpori, dan mengandung sejumlah air yang berasal dari puing-puing tanaman yang biasanya ditemui di antara sejumlah kecil bahan anorganik di bawah batu sedimen. Batubara memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk.

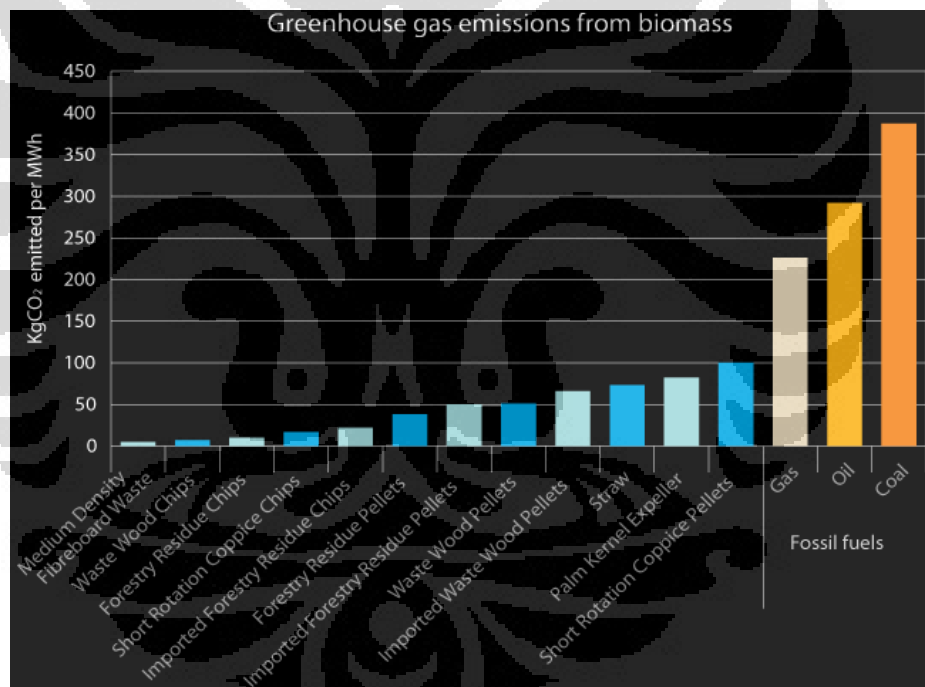
2.2.1 Karakterisasi Pembakaran Batubara

Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi dapat dilakukan dengan metode pembakaran. Namun, pembakaran briket batubara menemui beberapa masalah seperti waktu pembakaran yang lama dan dihasilkannya emisi CO dari pembakaran briket batubara. Paparan emisi CO yang dihasilkan pada pembakaran briket batubara dapat mengakibatkan gangguan kesehatan pada manusia, seperti pusing, lemas, bahkan kematian sehingga berbahaya bagi penggunaanya (Diah, Rasyid et al., 2009).

Pada umumnya, batubara dimanfaatkan dalam bentuk briket batubara, dimana briket batubara merupakan bahan bakar padat yang tersusun atas batubara dengan bentuk dan ukuran tertentu. Oleh karena itu, briket batubara tersusun oleh unsur yang sama dengan batubara, yaitu karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur. Unsur penyusun batubara yang dianggap yang lain adalah material logam jarang seperti raksa (Hg) dan timbal (Pb) serta material logam oksida seperti SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , K_2O dan Na_2O . Unsur-unsur tambahan diatas dianggap sebagai zat pengotor yang terdapat pada sisa pembakaran batubara (abu).

Secara umum batubara sub-bituminus memiliki kandungan air yang cukup rendah, *fixed carbon* yang tinggi, dan *volatile matter* yang rendah bergantung pada jenisnya. Nilai kandungan air yang rendah menjadikan batubara memiliki nilai kalor yang tinggi sehingga pembakaran batubara dapat menghasilkan panas pembakaran

yang stabil. Sebaliknya kandungan *volatile matter* yang rendah menjadikan batubara mempunyai temperatur penyalaan yang tinggi (Lu, 2000) sehingga waktu ignisi dari pembakaran batubara cukup lama. Untuk itu, pemanfaatan batubara secara langsung dapat menimbulkan masalah sehingga dibutuhkan proses pencampuran batubara dengan material tertentu untuk meningkatkan kandungan *volatile matters* nya. Selain itu, dengan tingginya kandungan *fixed carbon* dari batubara proses pembakaran batubara menghasilkan emisi berupa gas seperti (CO , CO_2 , CH_4 , NO_x , dan SO_2) dan partikulat. Emisi ini dapat pula terjadi pada pembakaran material lain yang mengandung unsur karbon seperti minyak bumi, gas alam, dan biomassa namun dengan komposisi yang berbeda. Komposisi emisi CO_2 pada beberapa jenis bahan bakar tergambar pada grafik Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2. 1 Emisi CO₂ pada Beberapa Bahan Bakar (EPA, 2009)

Emisi gas hasil pembakaran dapat mengganggu kesehatan pengguna (manusia) serta kualitas udara di lingkungan. Emisi CO dihasilkan dari reaksi oksidasi yang tidak sempurna antara unsur karbon yang terdapat pada batubara dan oksigen yang disuplai pada saat terjadi pembakaran. Kinetika reaksi CO menjadi CO₂ jauh lebih rendah dibanding dengan reaksi oksidasi hidrokarbon atau karbon menjadi

CO sehingga reaksi CO menjadi CO₂ menjadi pengontrol reaksi oksidasi ini. Untuk itu, pemanfaatan batubara dengan metode pembakaran batubara murni perlu dilakukan peninjauan karakteristik pembakaran dari batubara seperti waktu ignisi dan emisi yang dihasilkan.

2.2.2 Batubara Sub-bituminus

Belakangan dengan semakin menipisnya cadangan minyak bumi, potensi batubara di Indonesia mulai banyak diperhatikan. Indonesia memiliki cadangan batubara yang cukup besar, yaitu sebesar 6759 juta ton (Purwanto, Supramono et al., 2006). Dari empat jenis batubara, yaitu lignit, sub-bituminus, bituminous, dan antrasit, yang pada umumnya digunakan sebagai bahan pembuat briket batubara adalah batubara jenis lignit dan sub-bituminus. Hal ini disebabkan pada umumnya batubara jenis lignit dan sub-bituminus memiliki kandungan karbon kurang dari 40% (Instrument, 1997). Namun, penggunaan batubara jenis sub-bituminus lebih disarankan karena kandungan airnya yang lebih rendah daripada batubara jenis lignit, kandungan *volatile matter* yang lebih tinggi serta kandungan *fixed carbon* yang juga lebih tinggi. Dengan kandungan *moisture*, *volatile matter*, dan *fixed carbon* yang sedikit lebih tinggi menyebabkan batubara sub-bituminus dapat terbakar dengan waktu yang lebih cepat dan suhu yang lebih rendah dibanding batubara lignit. Berikut adalah analisa proksimat dari batubara sub-bituminus yang berasal dari PT. Bukit Asam, Sumatera Selatan.

Tabel 2. 4 Analisa proksimat dari batubara sub-bituminus

<i>Analisis Proximate dry fuel (wt %)</i>	Nilai
<i>Fixed Carbon</i>	55,86
<i>Volatile Matter</i>	26,03
<i>Ash</i>	12,88
<i>Moisture Content</i>	5,23

Sumber : (Supramono, 2009)

Berdasarkan analisa proksimat dari batubara sub-bituminus diatas dapat terlihat bahwa batubara jenis ini memiliki kandungan *fixed carbon* yang cukup tinggi, *moisture content* yang rendah, namun *volatile matter* yang tidak terlalu tinggi. Dengan kandungan *volatile matter* yang dimiliki oleh batubara sub-bituminus maka dibutuhkan material campuran untuk meningkatkan *volatile matter* agar mempersingkat waktu pembakaran briket batubara.

2.3 Biobriket

Biobriket adalah bahan bakar dalam bentuk briket yang merupakan campuran antara batubara dan biomassa. Biomassa yang dapat digunakan telah disebutkan pada Tabel 2.2 di atas. Persen komposisi pencampuran biomassa terhadap batubara dapat mencapai 50% atau bahkan lebih. Pengembangan teknologi biobriket ini melibatkan penggunaan material lain yaitu perekat antara biomassa dan batubara (binder).

2.3.1 Proses Pembuatan Biobriket

Briket dipilih sebagai bentuk akhir pencampuran biomassa dan batubara karena proses pembuatan briket tidak membutuhkan tekanan yang besar. Menurut standar operasi pembuatan briket bertekanan rendah dibutuhkan tekanan sebesar 5 Mpa (Grover and Mishra, 1996) sedangkan, untuk membuat pellet dibutuhkan tekanan terendah sebesar 17,2 Mpa (Finney, 2009). Perbandingan tekanan ini berdampak pada energi yang digunakan untuk memproduksi briket. Briket membutuhkan daya yang lebih rendah dibanding pembuatan pellet sehingga briket lebih cocok diterapkan pada sektor rumah tangga yang mengandalkan kemudahan dalam proses produksi.

Proses pembuatan biobriket melibatkan dua material penting, yaitu biomassa dan batubara. Produksi briket terbagi menjadi dua, briket bertekanan rendah dan briket bertekanan tinggi. Perbedaan tekanan yang diberikan akan berpengaruh pada ketahanan biobriket dan jenis binder yang digunakan. Proses briketisasi dengan tekanan tinggi akan menghasilkan briket yang lebih kuat, berdensitas tinggi sehingga tidak membutuhkan perekat (binder) lebih, cukup dengan menggunakan binder alami.

Lain hal nya dengan proses briketisasi dengan tekanan rendah, menghasilkan briket dengan densitas rendah sehingga membutuhkan perekat tambahan, biasanya membutuhkan perekat sintesis. Namun, briket bertekanan rendah ini memiliki kelebihan yaitu densitasnya yang rendah dapat meningkatkan *burning rate* sehingga dapat mempersingkat waktu pembakaran (Chaney, 2006).

Pada proses pembuatan briket sebelum dilakukan pencampuran, biomassa melalui proses *pre-treatment* seperti proses pengeringan hingga *moisture content* nya hanya 10%. *Moisture content* 10% merupakan kadar air maksimum dari biomassa yang distandarkan untuk membuat briket. *Moisture content* yang melebihi 10% akan menimbulkan masalah pada proses penggilingan dan membutuhkan energi yang lebih untuk pengeringan serta menghasilkan biobriket yang mudah rapuh (Grover and Mishra, 1996). Biomassa kemudian dicacah hingga menjadi partikel dengan ukuran 6-8 mm sehingga dapat dibentuk. Ukuran ini merupakan ukuran yang terbaik untuk menghasilkan briket yang berkualitas. Sedangkan, batubara dapat mengalami proses pencacahan langsung ataupun melalui proses pengeringan. Kemudian biomassa dan batubara dicampur dengan binder di dalam *mixer* untuk kemudian mengalami *briquetting* dengan tekanan sedang dan dicetak dengan alat cetak briket (*mould*).

2.3.2 Karakteristik Pembakaran Biobriket

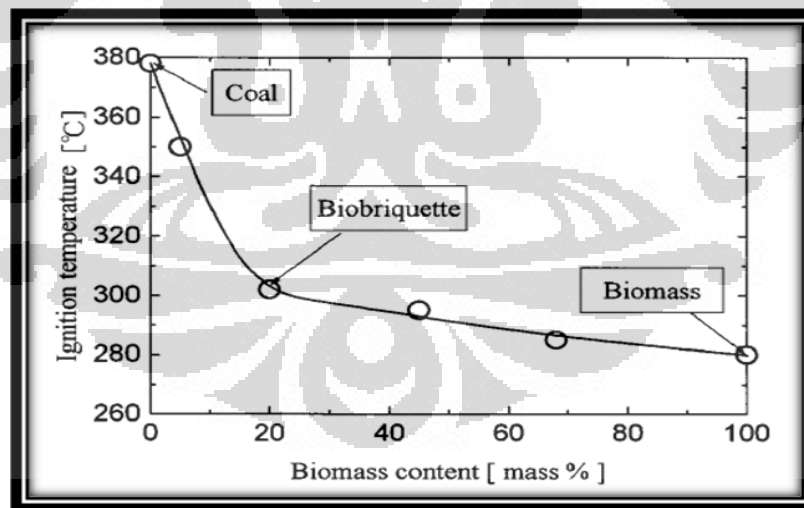
Secara umum, karakteristik pembakaran biobriket akan menghasilkan kombinasi dari hasil pembakaran biomassa dan batubara. Berdasarkan acuan tersebut, karakteristik pembakaran biobriket akan dievaluasi berdasarkan waktu ignisi biobriket, efisiensi termal, dan emisi yang dihasilkan dari pembakaran biobriket.

2.3.2.1 Waktu Ignisi Biobriket

Pada biobriket, biomassa dan batubara akan terbakar secara bersamaan pada proses pembakaran. Dimana penambahan biomassa akan memberi efek mempersingkat waktu pembakaran biobriket sehingga waktu penyalaan (ignisi) dari biobriket akan lebih singkat dibandingkan briket batubara. Beberapa faktor yang mempengaruhi waktu ignisi dari biobriket adalah

- Kandungan *volatile matter*
- Ukuran diameter pori
- Keberadaan briket/pellet promotor

Salah satu faktor yang mempengaruhi adalah kandungan *volatile matter* dari biomassa dan batubara. Material biomassa memiliki kandungan *volatile matter* yang lebih tinggi dibanding batubara. *Volatile matter* merupakan zat-zat yang mudah terbakar terdiri dari berbagai unsur dan senyawa kimia yang berbeda jenis dan banyaknya pada masing-masing jenis biomassa. *Volatile matter* memberikan pengaruh mempersingkat tercapainya temperatur pembakaran karena sifatnya yang mudah terbakar (Supramono, 2009). Pembakaran *volatile matter* pada briket akan membentuk efek awan *volatile matter*. Awan *volatile matter* ini dapat memberikan panas radiasi pada material briket. Panas radiasi ini dapat digunakan untuk memulai penyalaan material karbon biobriket sehingga mempersingkat waktu pembakaran (Supramono, 2009). Pengaruh ini diberikan ketika campuran biomassa dan batubara mencapai komposisi tertentu. Pengaruh komposisi biomassa dan batubara terhadap temperatur pembakaran dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Efek Komposisi Biomassa terhadap Temperatur Pembakaran (Lu, 2000).

Berdasarkan Gambar 2.2, temperatur pembakaran biobriket akan menurun drastis saat komposisi biomassa 20% biobriket dan akan semakin menurun mendekati

temperatur pembakaran biomassa dengan penambahan komposisi biomassa, seperti tertera pada gambar di atas (Lu, 2000).

Faktor lain yang berpengaruh adalah ukuran pori dari partikel biobriket. Biomassa memiliki ukuran pori yang jauh lebih besar dibanding batubara. Ukuran pori yang lebih besar ini akan meningkatkan efek turbulensi yang diberikan ketika dilewati aliran udara. Aliran turbulen akan meningkatkan kemampuan konveksi panas pada saat proses devolatilisasi *volatile matter* briket sehingga panas diberikan pada pembakaran akan lebih merata. Selain itu, setelah proses devolatilisasi *volatile matter* selesai, ukuran pori dari biobriket menjadi lebih besar. Hal ini dapat memudahkan oksigen dari udara berdifusi ke permukaan biobriket (Lu, 2000) sehingga proses pembakaran menjadi lebih cepat dan efisien karena kandungan oksigennya terpenuhi (Singh, 2009).

Faktor lainnya adalah keberadaan briket atau pellet promotor. Briket atau pellet promotor adalah bahan bakar yang dengan sengaja dipersiapkan untuk mempercepat pembakaran material karbon dari briket, dapat berupa briket atau pellet yang memiliki cekukan di bagian permukaannya. Briket/pellet promotor terlebih dahulu ditambahkan oksigenat, dapat berupa hidrokarbon yang mengandung gugus alkohol (-CHO), aldehyd (-CH₂O), atau senyawa kimia lain yang mengandung oksigen, kemudian dinyalakan di luar kompor untuk membentuk bara pada permukaannya. Ketika ditempatkan di dalam kompor, awan *volatile matter* promotor memberikan panas pembakaran awal pada briket pemasakan. Setelah *volatile matter* habis, promotor melanjutkan pembakaran karbon dengan oksigen dimana oksigen dapat berasal dari dalam briket (oksigenat) maupun dari luar (udara). Untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi dari briket atau pellet promotor setelah *volatile matter* habis, permukaan briket atau pellet promotor dibuat cekukan yang dapat mengubah *boundary layer* laminar udara menjadi turbulen. Seperti pada prinsip perpindahan kalor, *boundary layer* turbulen dapat meningkatkan perpindahan kalor secara konveksi. Penggunaan briket atau pellet promotor ini cocok untuk pengujian briket pemasakan dengan menggunakan kompor.

2.3.2.2 Efisiensi Termal

Efisiensi termal pembakaran didefinisikan sebagai rasio energi panas yang diterima bahan masakan terhadap energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar (Battacharya, Albina et al., 2002). Terkadang efisiensi pembakaran didefinisikan juga sebagai rasio karbon yang terbuang dalam bentuk CO₂ terhadap total karbon yang dimiliki oleh bahan bakar (biobriket) (Demirbas, 2008). Pembakaran yang sempurna akan mengekstrak seluruh energi yang tersedia pada bahan bakar. Meskipun tidak mungkin ada efisiensi pembakaran yang mencapai 100%. Pada umumnya efisiensi pembakaran hanya mencapai angka 10% - 95%. Untuk kompor metal dengan bahan bakar briket batubara yang telah diterapkan oleh rumah tangga di China menghasilkan efisiensi pembakaran total sebesar 37% (Edwards, Smith et al., 2004).

Energi yang memasuki kompor atau ruang pembakaran akan menghasilkan dua pengaruh, yaitu kenaikan suhu air hingga menuju titik didihnya dan evaporasi air menjadi fasa gas. Untuk itu, efisiensi pembakaran kemudian dapat ditentukan dengan menggunakan *water boiling test* (WBT). Pada perhitungan *water boiling test* standar sejumlah air yang telah diketahui massanya dipanaskan pada sebuah kompor. Jumlah air yang terevaporasi ditentukan untuk menghitung efisiensi pembakaran dengan menggunakan persamaan efisiensi termal pada perpindahan kalor.

Efisiensi termal pembakaran biobriket dapat dipengaruhi oleh *moisture content* biobriket dan insulasi kompor dan konveksi panas dari gas hasil pembakaran ke dasar tempat pemasakan. Pengaruh yang diberikan dengan meningkatnya *moisture content* dari bahan bakar biobriket adalah menurunnya efisiensi termal pembakaran dari biobriket. Menurunnya efisiensi termal pembakaran disebabkan oleh sejumlah besar panas yang dilepaskan pada pembakaran biomassa kering digunakan untuk menguapkan *moisture content* dari biobriket. *Moisture content* yang tinggi juga dapat menurunkan temperatur pembakaran dan laju transfer panas pembakaran. Berikut adalah data penurunan efisiensi termal pembakaran yang disebabkan oleh meningkatnya *moisture content* dari bahan bakar biobriket.

Tabel 2. 5 Pengaruh *Moisture Content* terhadap Efisiensi pada Beberapa Jenis Kompor

	Efficiency ^b (%)	
	Moisture content	
Indian "Harsha" stove	9.78	26.1
	12.1	25.2
	14.9	25.3
	21.3	20.1
	24.5	19.7
Vietnamese traditional	9.5	17.5
	11.7	17.6
	14.5	17.2
	21.0	14.3
	24.5	14.0
RTFD improved stove	9.8	17.1
	11.5	14.9
	14.7	14.7
	21.0	10.1
	24.5	9.7

Sumber: (Battacharya, Albina et al., 2002)

2.3.2.3 Emisi CO dari Pembakaran Biobriket

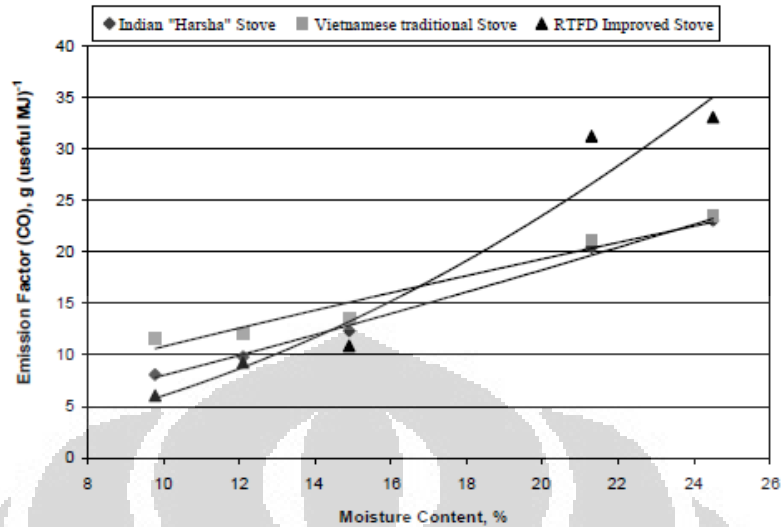
Secara teoritis, pembakaran bahan bakar yang terdiri dari unsur hidrokarbon hanya akan menghasilkan H₂O dan CO₂. Namun, pada kenyataannya, terdapat zat-zat lain yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut. Zat-zat tersebut dapat berupa CO, NO_x, SO_x, hidrokarbon, partikel debu, hingga timah (Sulistyanto, 2006). Analisa terhadap emisi gas CO yang dihasilkan oleh pembakaran dipilih karena gas CO dapat mengindikasikan peristiwa pembakaran yang terjadi secara tidak sempurna dan oleh karena itu, emisi gas CO dianggap dapat mewakili keberadaan polutan lainnya seperti hidrokarbon (Supramono, 2007).

Gas CO terbentuk ketika terjadi oksidasi yang tidak sempurna dari material hidrokarbon dan karbon yang terkandung di dalam briket. Untuk mendapatkan reaksi oksidasi yang sempurna dalam artian menghasilkan sedikit emisi CO, proses pembakaran harus memenuhi tiga hal (Supramono, 2007) berikut: (Lu, 2000)

- Waktu tinggal reaksi yang cukup lama
- Jumlah oksigen yang cukup untuk reaksi oksidasi
- Temperatur yang tinggi untuk meningkatkan kinetika reaksi oksidasi.

Ketiga hal tersebut memberikan pengaruh yang berkesinambungan terhadap emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran biobriket. Pembakaran biobriket termasuk ke dalam reaksi oksidasi hidrokarbon atau material karbon yang terakandung pada biobriket. Untuk mendapatkan reaksi oksidasi sempurna yang menghasilkan CO₂ sebagai gas sampingnya dibutuhkan jumlah oksigen yang cukup dan temperatur reaksi yang tinggi. Namun, kondisi yang sebenarnya berlangsung adalah sulit untuk mendapatkan temperatur reaksi yang sesuai. Hal ini disebabkan oleh absorpsi panas dari permukaan biobriket oleh material biobriket berukuran besar. Hal ini kemudian mengakibatkan temperatur permukaan, dimana terjadi konversi CO menjadi CO₂, dari biobriket menjadi sangat rendah. Kondisi ini kemudian menjadi kondisi yang tidak diinginkan dalam reaksi oksidasi. Waktu tinggal reaksi yang cukup lama dari gas hasil pembakaran di atas unggun briket diperlukan untuk meningkatkan konversi CO menjadi CO₂. Untuk mengurangi emisi CO pada pembakaran biobriket pada umumnya dievaluasi dari desain kompor yang digunakan agar memungkinkan gas CO yang dihasilkan dapat tinggal lebih lama sehingga terjadi konversi dari CO menjadi CO₂ dan penambahan oksigenat pada biobriket untuk meningkatkan jumlah oksigen pada reaksi oksidasi.

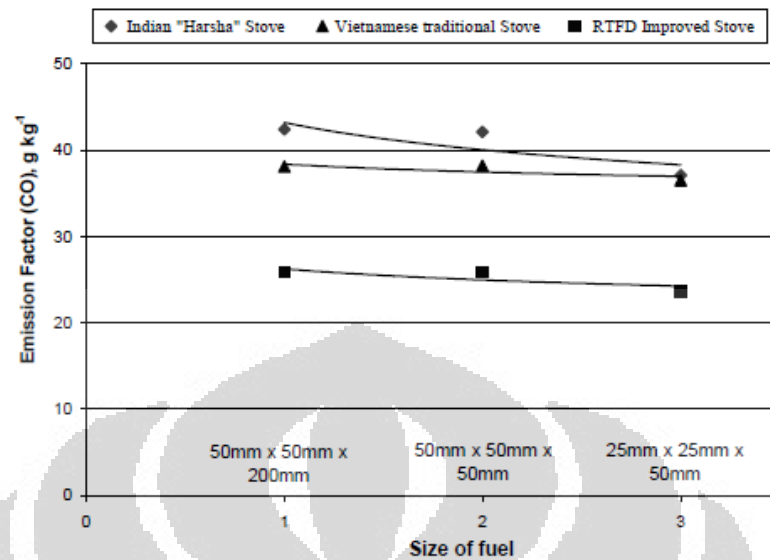
Beberapa hal yang dapat mempengaruhi jumlah emisi yang dihasilkan oleh pembakaran biobriket diantaranya, kandungan air pada biobriket dan ukuran dari biobriket. Dengan meningkatnya kandungan air pada biobriket maka emisi CO yang dihasilkan akan meningkat. Meningkatnya emisi CO yang dihasilkan menunjukkan reaksi yang terjadi tidak sempurna. Hal ini disebabkan oleh rendahnya reaksi oksidasi dengan fasa gas yang terjadi karena temperatur pembakaran yang berkurang disebabkan tingginya kandungan air dalam biobriket. Untuk melihat hubungan antara emisi CO yang dihasilkan dengan kandungan air pada biobriket dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut:



Gambar 2. 3 Hubungan Emisi CO yang Dihasilkan dengan Kandungan Air pada Beberapa Jenis Kompor.

(Battacharya, Albina et al., 2002)

Ukuran bahan bakar yang dalam hal ini merupakan biobriket dapat mempengaruhi emisi CO yang dihasilkan. Telah dilakukan penelitian bahwa semakin kecil ukuran biobriket yang digunakan maka dapat menurunkan emisi CO yang dihasilkan. Menurunnya emisi CO yang dihasilkan terjadi karena adanya intensifikasi dari proses pembakaran, yang ditandai dengan meningkatnya *burning rate*, ketika ukuran biobriket berkurang. Hal ini menyebabkan meningkatnya temperatur di dalam kompor yang mengakibatkan reaksi oksidasi berjalan sempurna dan sedikit menghasilkan emisi gas CO. Untuk mengetahui hubungan ukuran biobriket dengan emisi CO yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2. 4 Pengaruh Ukuran Biobriket terhadap Emisi CO yang Dihasilkan (Battacharya, Albina et al., 2002).

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan bahwa semakin kecil ukuran bahan bakar (biobriket) pada semua kondisi kompor akan menurunkan emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran.

2.3.3 Perekat/Binder untuk Biobriket

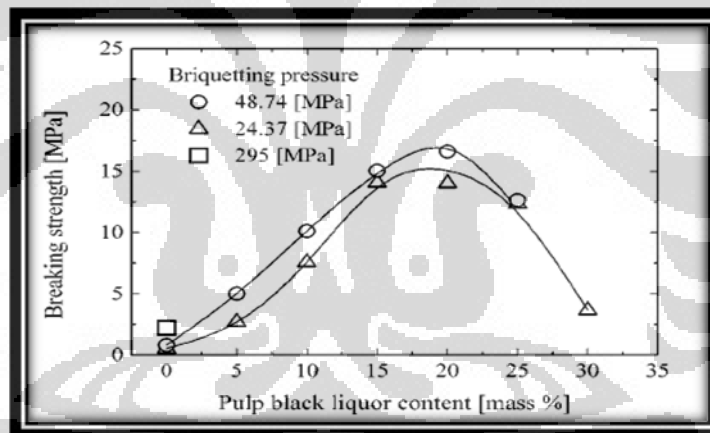
Binder dalam proses pembuatan biobriket berfungsi sebagai perekat material biomassa dan batubara. Binder atau perekat sangat berperan dalam karakteristik fisik dari biobriket, seperti halnya sensitifitas dan kelembapan, ketahanan terhadap kerapuhan (solid), kandungan mineral biobriket, serta faktor ekonomi seperti harga jual dari biobriket (Jean, 2006). Berdasarkan tingkat penekanan biobriket jenis binder dapat dibagi menjadi dua, yaitu binder alami dan binder tambahan berupa binder sintetis. Kedua jenis binder ini digunakan pada tekanan yang berbeda.

Binder alami pada umumnya digunakan untuk memproduksi biobriket bertekanan tinggi. Tekanan yang digunakan pada mesin briketisasi pada umumnya lebih dari 50 Mpa (Kaliyan, 2010). Perekat alami akan teraktivasi seiring dengan meningkatnya tekanan, tingginya temperatur yang digunakan, serta kandungan air didalam perekat. Ketika proses kompresi telah selesai dan tekanan dilepaskan,

perekat akan mengalami pendinginan dan mulai mengeras. Contoh binder alami diantaranya, lignin, lemak, protein, dan karbohidrat.

Berbeda dengan binder alami, binder tambahan pada umumnya digunakan untuk mengatasi rendahnya tekanan pada saat briketisasi yang menyebabkan fenomena *natural binding* tidak dapat terjadi. Binder tambahan digunakan pada tekanan kompresi yang rendah hingga 5 Mpa (Finney, 2009). Perekat tambahan ini berfungsi meningkatkan aglomerasi dan mengatasi ketidaksolidan pada produk biobriket. Contoh binder tambahan yang sering digunakan adalah kanji, NaOH, dan Pulp.

Penambahan binder atau perekat pada pembuatan biobriket secara teori akan meningkatkan ketahanan biobriket terhadap kerapuhan. Namun, pada kenyataannya hubungan antara penambahan binder dengan *breaking strength* dari briket tidak terjadi secara linear seperti terlihat pada Gambar 2.5:



Gambar 2.5 Hubungan Komposisi Binder terhadap Breaking Strength dari Briket (Kim, 2002)

Berdasarkan grafik pada Gambar 2.5 penambahan binder berupa *pulp black liquor* akan menghasilkan kondisi optimum pada komposisi 20% briket. Lebih dari itu, penambahan binder akan berdampak buruk seperti terlihat pada grafik dapat menurunkan tingkat breaking strength dari briket.

2.4 Mekanisme Pembakaran Briket sebagai Bahan Bakar Padat

Terjadinya penyalaan dapat dilihat sebagai tercapainya beberapa kondisi: (1) jumlah energi dari sumber ignisi cukup tinggi untuk mengatasi hambatan aktivasi; (2) laju panas yang terbentuk melebihi laju panas yang hilang; (3) durasi nyala atau sumber ignisi lainnya cukup lama untuk mengawali perambatan nyala (*flame propagation*) (Chigier, 1982). Dibandingkan dengan bahan bakar cair atau LPG, bahan bakar padat seperti briket biomassa atau batubara memiliki mekanisme pembakaran yang berbeda yang berlangsung seiring pertambahan temperatur (Smoot, 1991). Urutan mekanisme pembakaran briket sebagai bahan bakar padat dapat terbagi menjadi beberapa proses, yaitu pengeringan, devolatilisasi, pembakaran zat *volatile*, dan pembakaran *char*.

2.4.1 Pengeringan

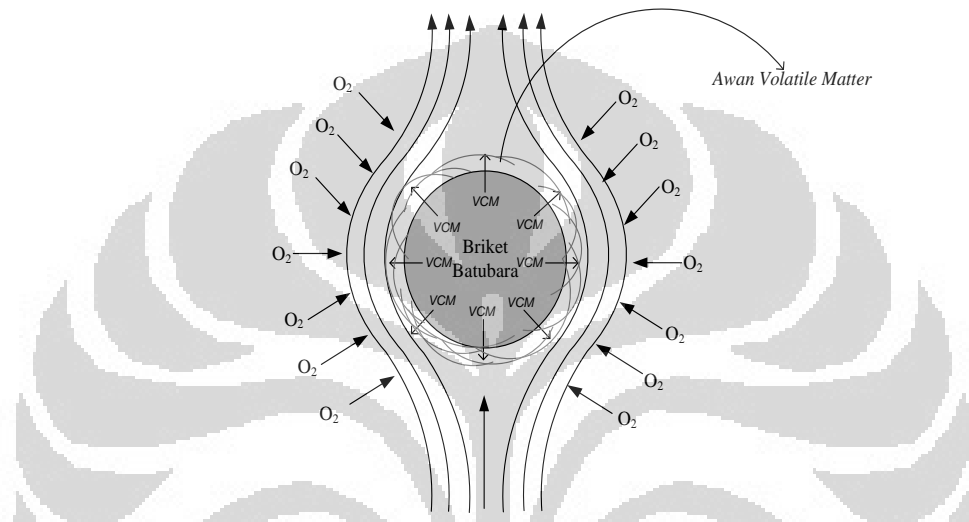
Pada tahap ini dilakukan pengeringan pada biomasa sehingga air yang terkandung dalam biomasa akan keluar dan membentuk uap air. Lamanya tahap ini tergantung pada tingkat kandungan air dalam batubara atau biomasa. Semakin tinggi kandungan air yang terdapat di dalam biomasa, maka akan semakin lama pula waktu yang dibutuhkan untuk proses pengeringan ini.

2.4.2 Devolatilisasi

Proses ini terjadi pada batubara yang dipanaskan pada lingkungan inert. Devolatilisasi dapat diawali dengan induksi atau *ignition delay time*. Devolatilisasi hampir bersamaan dengan lepasnya gas dan *volatile matters* (material yang mudah menguap) termasuk tar dari permukaan dan pori-pori partikel material karbon sehingga terbentuk *char* (arang). Partikel yang ada menjadi lebih lunak dan bersifat plastik.

Volatile matters diyakini berasal dari spesi turunan dari putusnya ikatan $-H_2$, $-CH$, $-CH_2$, $-CH_3$, dan $-OH$ yang terdapat pada sekeliling batubara. Spesi-spesi ini memiliki berat molekul yang ringan. Proses devolatilisasi ini diikuti dengan difusi cepat spesi-spesi tersebut dari permukaan partikel dan juga oksidasi fasa-gas yang terjadi berikutnya.

Mekanisme devolatilisasi pada partikel yang kecil (kurang dari 100 μm) berbeda dengan yang terdapat pada partikel yang besar. Untuk partikel kecil, reaksi permukaan heterogen akan lebih dominan dibandingkan dengan difusi yang terjadi. Sedangkan sebaliknya pada partikel yang lebih besar dari 100 μm , difusi menjadi lebih berpengaruh pada devolatilisasi yang terjadi.



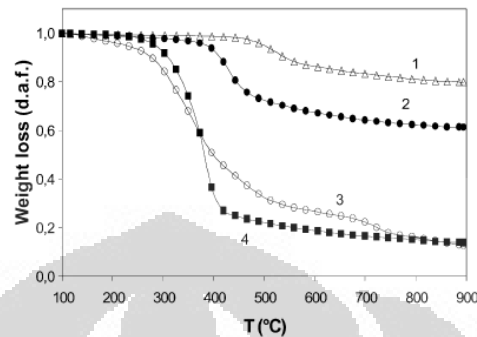
Gambar 2. 6 Deskripsi Penyalaan *Volatile Matter* pada Permukaan Material Briket (Supramono, 2009)

2.4.3 Pembakaran Zat Volatil

Bahan bakar padat mengandung komponen penyusun yang sangat kompleks dimana zat-zat volatil yang ada di dalamnya berbeda untuk tiap jenis batubara atau biomasnya. Panas yang dihasilkan oleh reaksi eksotermis sangat penting dalam pelepasan zat volatil dan penyalaan api pada arang (karbon).

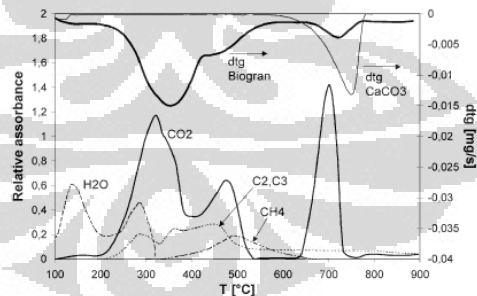
Proses devolatilisasi pada pembakaran bahan bakar padat seperti briket dapat dianalisis dengan seksama menggunakan analisis termogravimetri (TGA Analysis) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Pada gambar tersebut terlihat pengurangan massa di setiap fasa pembakaran bahan bakar. Tahap devolatilisasi ditandai dengan pengurangan massa (penurunan slop grafik) pada suhu tertentu. Pengurangan massa ini mengindikasikan hilangnya komponen *volatile matters* pada

bahan bakar padat yang terjadi secara gradual diikuti dengan pembakaran komponen lain (zat karbon padat) pada komponen bahan bakar (Biagini and Lippi, 2002).



Gambar 2. 7 Analisis Termogravimetri untuk Menentukan Tahap-Tahap dalam Pembakaran (1) Batubara JW; (2) Batubara US; (3) Biogran; (4) Kayu gergaji (Biagini, 2010)

Apabila telah diketahui proses devolatilisasi terjadi pada suhu berapa, kemudian kita dapat melanjutkan proses analisis kandungan zat *volatile matters* apa saja yang dilepaskan bahan bakar padat selama pembakaran dengan menggunakan analisis FTIR (*Fourier Transform Infra Red*). Sebagai contoh, Gambar 2.8 memaparkan secara jelas komponen apa saja yang terlibat dalam proses devolatilisasi seperti H_2O , CO_2 , CH_4 , C_2 , dan C_3 . Dengan analisa ini maka akan lebih mudah mengetahui peranan zat *volatile matters* dalam proses pembakaran bahan bakar padat.



Gambar 2. 8 Contoh Hasil Analisis FTIR untuk Mendeteksi Senyawa yang Terkandung dalam *Volatile Matters* (Biagini, 2010)

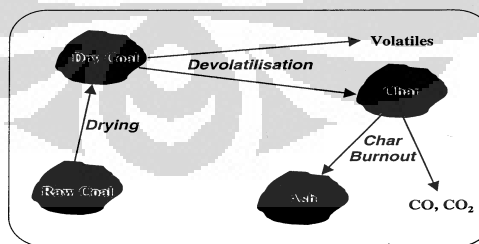
2.4.4 Pembakaran Char

Char merupakan bahan residu yang kaya akan karbon namun miskin akan oksigen dan hidrogen. *Char* masih mengandung N dan S dan beberapa kandungan

mineral lainnya. Partikelnya terkadang memiliki patahan dan lubang yang disebabkan oleh hilangnya gas dan *volatile matter* serta terdapat kemungkinan ukurannya membesar dari sebelumnya. Char memiliki porositas yang tinggi (~ 0.7) dan luas permukaan spesifik yang tinggi juga ($\sim 100 \text{ m}^2/\text{g}$). Sifat yang dimiliki char dipengaruhi oleh proses pirolisis yang terjadi sebelumnya.

Dalam pembakaran *char*, terjadi reaksi heterogen antara *char* dan oksigen yang terjadi pada *gas-solid interface*. Produk utama dari reaksi permukaan ini berupa CO. CO nantinya bereaksi dalam fasa gas untuk membentuk CO₂ (sangat eksotermis). Tahap ini relatif lebih lama dibanding devolatilisasi. Proses reaksi yang terjadi diawali dengan difusi spesi pengoksidasi ke permukaan partikel dan selanjutnya ke dalam struktur pori internal. Ini diikuti dengan *chemisorption* reaktan gas ke permukaan internal dan eksternal. Setelah reaksi terjadi pada permukaan partikel, gas produksi reaksi yang terbentuk harus didesorpsi dan didifusikan keluar dari permukaan.

Laju pembakaran char awalnya tergantung dari suhu yang ditransfer oleh radiasi, konveksi, dan konduksi dari lingkungan sekitar. Setelah itu, laju reaksi akan lebih tergantung pada kondisi suhu setempat yang ditentukan dari reaksi karbon-oksigen pada permukaan dan juga laju difusi O₂. Reaktivitas char juga bergantung pada jenis batubaranya, suhu, tekanan, dan karakteristik char (ukuran, luas permukaan, dan lain-lain), dan konsentrasi O₂. Gambar 2. 9 mengilustrasikan mekanisme pembakaran batubara.



Gambar 2. 9 Mekanisme Pembakaran pada Batubara (Smoot, 1991)

2.5 Faktor yang Mempengaruhi Waktu Penyalaan Briket

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi penyalaan dari campuran briket batubara dengan biomassa di dalam kompor. Beberapa faktor tersebut akan dijelaskan dalam sub bab berikut:

2.5.1 Kadar Air

Semakin tinggi kadar air dalam batubara atau biomasa menyebabkan temperatur pembakaran menurun dan kadar H₂O meningkat. Dengan semakin tingginya kadar air juga mengakibatkan waktu penyalaan bahan bakar padat menjadi lebih lama karena panas yang suplai dari sumber panas terlebih dahulu digunakan untuk menguapkan air yang terkandung pada briket. Hal ini mengakibatkan briket sulit dibakar sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna dan terbentuk CO yang tinggi di awal proses pembakaran.

2.5.2 Ukuran dan Bentuk Bahan Bakar

Dalam suatu penelitian diketahui bahwa pelet bentuk bola mempunyai luas permukaan yang paling kecil sehingga perpindahan panas terjadi dengan laju yang lebih lambat dibandingkan pelet berbentuk silindris dengan besar volum dan massa yang sama. Ukuran pellet biomassa yang dibakar mempengaruhi besar temperatur yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran pellet maka temperatur pembakaran akan semakin besar dan lamanya waktu pembakaran semakin cepat. Hal ini berkaitan dengan laju perpindahan panas dari udara sekitar ke dalam biomasa yang semakin besar.

2.5.3 Ketersediaan Udara

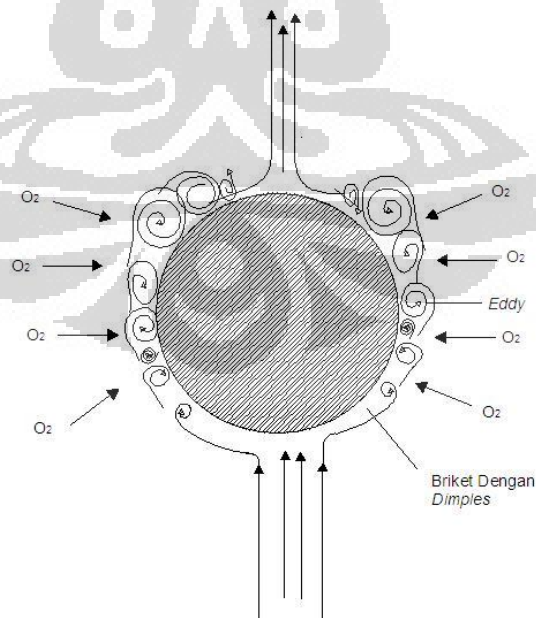
Udara yang masuk dari bagian bawah garangan (*grate*) disebut udara primer, sedangkan udara yang masuk ke bagian atas bahan bakar dan bereaksi dengan zat *volatil* disebut udara sekunder. Dengan adanya udara, berarti menunjukkan adanya suplai oksigen pada ruang pembakaran. Suplai oksigen ini menentukan dapat berlangsungnya pembakaran bahan bakar padat (briket). Jika suplai oksigen terpenuhi

maka briket dapat mengalami pembakaran yang menghasilkan panas yang dapat ditransfer ke sekitar sehingga dapat mempercepat ignisi pada bahan bakar padat.

2.5.4 Kandungan *Volatile Matters* pada Permukaan Bahan Bakar

Berdasarkan penelitian, telah dibuktikan bahwa semakin banyak kandungan *volatile matter*, maka akan semakin rendah suhu *ignition* yang dibutuhkan (Grotkjær dkk., 2003). Hal ini antara lain diakibatkan oleh adanya energi panas yang dilepaskan seiring dengan lepasnya *volatile matter* dari permukaan. Energi panas ini dapat memicu ignisi lainnya pada permukaan secara radiasi (Chigier, 1982).

Selain itu, dengan devolatilisasi *volatile matter* dalam jumlah banyak akan memperbesar porositas *char* yang terbentuk, sehingga akan memudahkan oksigen untuk berdifusi lebih lanjut ke permukaan (Lu, 2000) dan mengakibatkan pembakaran menjadi lebih sempurna dan efisien (Singh, 2009). Membesarnya porositas *char* ini akan berperan saat di mana kandungan *volatile matter* sudah terbakar habis dan mulai terjadi pembakaran pada permukaan *char*. Gambar 2.10 mengilustrasikan fenomena ini. Hal ini dikarenakan porositas yang terbentuk akan mengakibatkan aliran udara yang melewatinya menjadi turbulen, sehingga timbul ulakan (*eddy*) yang memudahkan oksigen untuk berdifusi melewati *eddy* tersebut.

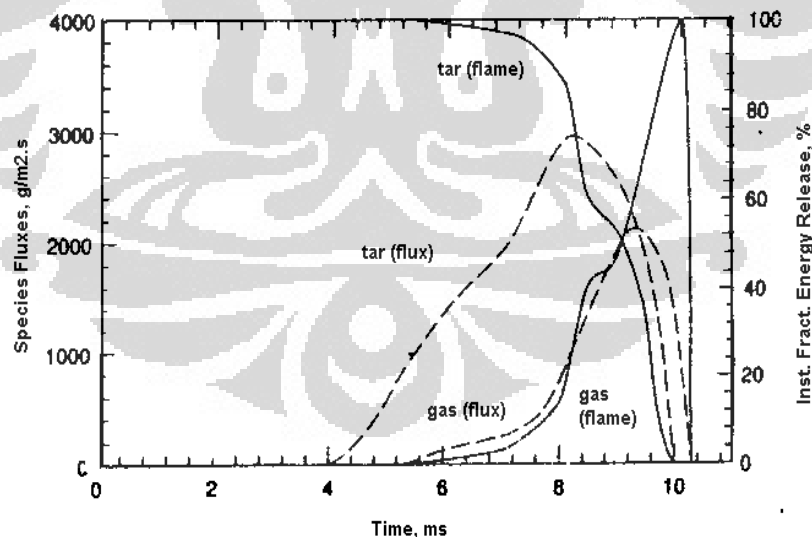


Gambar 2. 10 Fenomena Timbulnya *Eddy* karena Turbulensi yang Memudahkan Difusi Oksigen ke Permukaan *Char*

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, luas permukaan dan volume pori akan membesar setelah dipanaskan menjadi *char* seiring dengan terlepasnya *volatile matters* dari partikel. Dalam hal ini, laju peningkatan luas permukaan setelah dipanaskan yang lebih tinggi terjadi pada biomassa, yaitu 583 kali dibanding laju pada batubara, yaitu 12 kali. Hal ini disebabkan kandungan *volatile matter* yang lebih tinggi serta struktur yang longgar pada biomassa (Myung Won Seo, 2010).

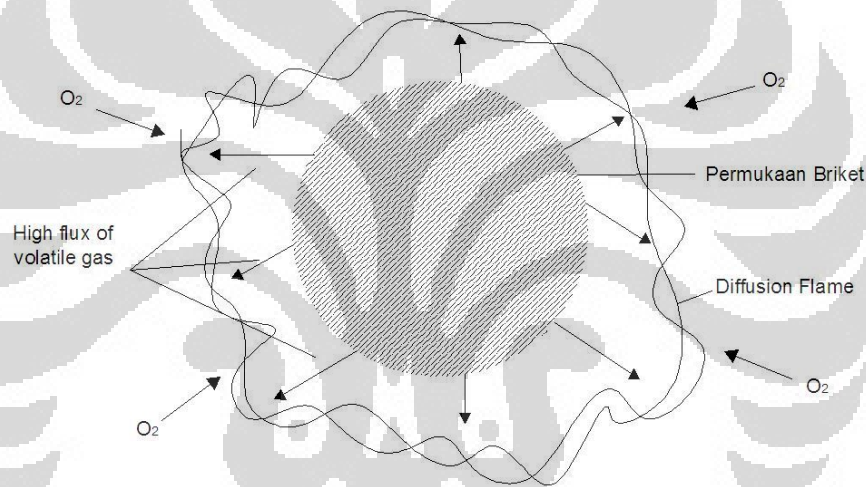
2.5.5 Besar Pori-Pori pada Permukaan

Pada saat devolatilisasi, *volatile matters* akan membentuk suatu flux *volatile* (gas pirolisis). Gambar 2.11 menunjukkan dua macam fluks *volatile matter*, yaitu tar dan gas (Lau and Niksa, 1992). Pada awalnya, tar terlepas dari permukaan partikel. Hal ini mempertahankan adanya *flame* di sekitar partikel. *Flame* ini berperan dalam memberikan panas ke sekitarnya. Setelah beberapa waktu, baru kemudian gas yang terdevolatilisasi dan menggantikan tar yang lama kelamaan habis untuk mempertahankan adanya *flame*. Tar, yang densitasnya lebih besar dari gas, dapat menghalangi terjadinya devolatilisasi gas.



Gambar 2. 11 Fluks Massa Gas dan Tar dari Permukaan Partikel (Kurva Putus-Putus) dan Fraksi Energi yang Dikeluarkan dari Gas Tar pada *Flame* (Lau and Niksa, 1992)

Flux *volatile* bila terlalu besar akan mendorong *flame sheet* menjauhi permukaan dan *diffusion flame* akan terbentuk jauh dari permukaan. Bila ini terjadi, oksigen menjadi tidak dapat terdifusi melalui *boundary layer* tersebut ke permukaan (Grotkjaer and Johansen, 2003). Selain itu, hal ini dapat mengakibatkan juga pengurangan panas yang dapat diterima oleh permukaan partikel. Karena flux merupakan laju alir massa yang melewati suatu luas penampang (dalam hal ini besar pori), kondisi di atas dapat diminimalisasi dengan menggunakan bahan yang diameter pori-porinya besar sehingga dihasilkan flux *volatile matters* yang tidak terlalu besar. Sifat ini berperan pada saat terjadinya devolatilisasi pada permukaan briket. Fenomena ini dapat dilihat seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Mekanisme untuk *Ignition* pada Briket Setelah Inisiasi. Flux *Volatile* yang Terlalu Tinggi dapat Menyebabkan *Diffusion Flame* Terbentuk Di *Boundary Layer* yang Jauh dari Permukaan Padatannya (Grotkjaer and Johansen, 2003)

2.4 State of The Arts Biobriket.

Berbagai penelitian mengenai biobriket telah banyak dikembangkan baik dalam lingkup dalam negeri maupun luar negeri. Penelitian mengenai biobriket telah berkembang dari segi teknologi, bahan yang digunakan, dan variabel yang diamati. Penelitian terdahulu mengenai biobriket dirangkum pada Tabel 2.6 berikut.

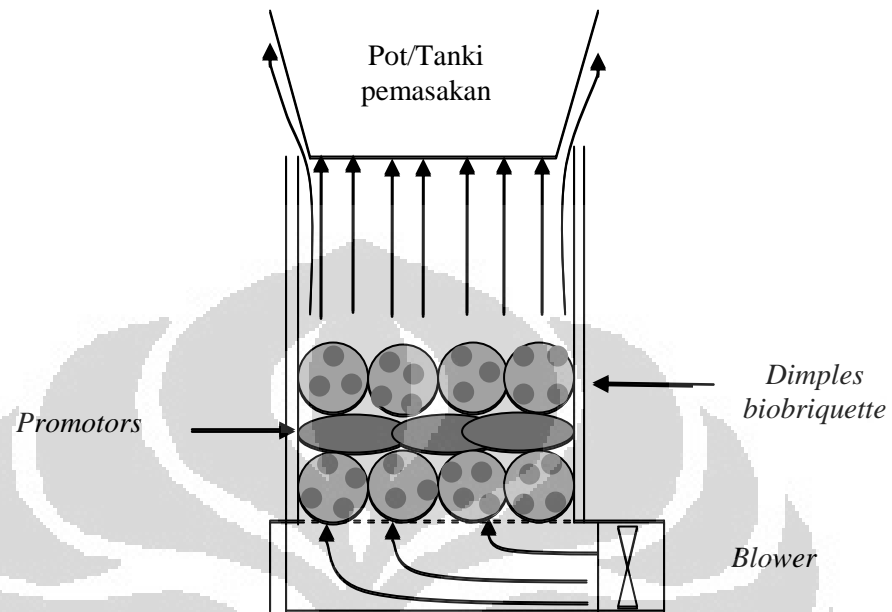
Tabel 2. 6 *State of The Arts* Biobriket

Pembanding Peneliti	Tekanan/ Teknologi	Variabel yang Diinvestigasi	Penggunaan Binder	Bahan yang Digunakan
Watanabe, 1996	Tinggi/ <i>High roller pressure</i>	Emisi, karakteristik pembakaran, dan ketahanan mekanis	Tidak ada	Serbuk gergaji
	Batubara Nanton asal China			
Lu, 2000	Tinggi <i>High roller pressure</i>	Temperatur ignisi, emisi partikulat, <i>Self Desulfurization</i>	Tidak Ada	Serbuk gergaji
	Batubara Berperingkat Rendah			
Kim, 2002	Sedang-Tinggi <i>Roller press</i>	Pengaruh binder terhadap ketahanan mekanis dan karakteristik pembakaran	Pulp Black Liquor	Serbuk gergaji
	Batubara Berperingkat Rendah			
Jean, 2006	Tinggi <i>Rotor Press dan Carbonization</i>	Karakteristik pembakaran (<i>ignition time, burning rate, dan viability test</i>)	Kanji dan Tanah Liat	Kayu
	Charcoal			
Sulistiyanto, 2006	Tinggi <i>Dongkrak Hidraulik</i>	Pengaruh komposisi terhadap laju pengurangan massa, temperatur pembakaran, dan emisi.	Pati	Sabut Kelapa
	Batubara Lignite			
Singh, 2009	Tinggi	Temperatur ignisi, Desulfurization, dan Calorific Value	Tidak Ada	Crofton weed, Eupatorium adenophorum
	<i>Roller press</i>			Indian Coal
Hendra, 2011	Pompa hidraulik manual	Pengaruh komposisi binder terhadap nilai kalor dan moisture content.	Tapioka/ Kanji	Serbuk enceng gondok
				Arang eceng gondok
Agustina, 2012	Rendah	Temperatur Ignisi, Emisi, dan <i>Thermal Efficiency</i>	Kanji	Tandan Kosong Kelapa Sawit
	Besi pengepres (<i>mould</i>)			Batubara Sub- Bituminuos

Berdasarkan data pada tabel di atas, sebagian besar peneliti masih menggunakan teknik briketisasi dengan tekanan tinggi. Hal ini kurang cocok apabila

diterapkan dalam sektor rumah tangga sebagaimana briket kebanyakan digunakan. Selain itu, kebanyakan dari peneliti masih terfokus terhadap temperatur ignisi dan emisi yang dihasilkan, dan ketahanan briket. Padahal terdapat faktor efisiensi termal yang juga sangat penting untuk ditinjau untuk mengetahui seberapa efisien panas yang dihasilkan bahan bakar ini digunakan untuk pembakaran sehari-hari dengan menggunakan kompor biomassa.

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah diuraikan di atas, campuran batubara dengan biomassa dapat membantu mengatasi permasalahan waktu penyalaan yang lama pada briket batubara. Namun, pencampuran ini juga memiliki satu kelemahan, yaitu *heating value* yang lebih rendah dari briket batubara, dimana *heating value* berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran biobriket. Untuk itu, penelitian ini difokuskan untuk merancang biobriket dari campuran TKKS dan batubara Sub-bituminus serta peningkatan efisiensi pembakaran dari biobriket ini. Peningkatan efisiensi pembakaran pada biobriket campuran TKKS dengan batubara sub-bituminus dilakukan dengan memanfaatkan ukuran pori TKKS yang cukup besar dan membentuk bola briket dengan cekukan (*dimples*) yang dapat meningkatkan efek turbulensi aliran panas pembakaran sehingga konveksi panas yang terjadi dari gas hasil pembakaran ke tangki/pot untuk memasak menjadi lebih besar. Dengan alasan di atas, hipotesis yang diusulkan penulis adalah dengan penambahan biomassa pada komposisi tertentu dan pembentukan *dimples* pada permukaan biobriket, di atas kecepatan superficial tertentu diduga akan didapatkan nilai efisiensi termal pembakaran yang yang lebih besar dibanding biobriket dengan permukaan halus. Posisi biobriket bercekuk dalam kompor secara skematis ditunjukkan di Gambar 2.13:



Gambar 2. 13 Efek Turbulensi pada *Dimples Biobriquette*

Pada Gambar 2.13 terlihat bahwa biobriket yang telah diberi cekukan akan menghasilkan efek turbulensi aliran udara yang melewatinya sehingga perpindahan panas secara konveksi pada pot pemasakan akan semakin besar.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Pikir Penelitian

Pada penelitian ini akan diuji tiga karakteristik pembakaran biobriket yaitu waktu ignisi, emisi CO yang dihasilkan, dan *thermal efficiency*. Ketiga hal tersebut akan dievaluasi dengan melihat hasil pembakaran bahan bakar biobriket dalam kompor. Media kompor dipilih karena kompor merupakan aplikasi nyata dari penggunaan bahan bakar biobriket. Disamping itu, dengan menggunakan media pembakaran kompor dapat dilihat pengaruh aspek mekanika fluida seperti kecepatan superfisial udara terhadap pembakaran di dalam kompor dan interaksi antar biobriket di dalam kompor yang dapat mempercepat dan mengefisiensikan pembakaran.

Media kompor yang digunakan merupakan kompor briket batubara dengan *blower* pada bagian bawahnya sehingga memungkinkan terjadinya *forced updraft* untuk menjamin kecukupan udara ketika pembakaran terjadi dan memperbesar transfer panas secara konveksi. Kompor briket tersebut dibuat berdasarkan rujukan kompor hasil penelitian Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Pada penelitian ini akan digunakan kompor yang telah dimodifikasi dengan menambahkan *perforated hood* untuk memperpanjang waktu tinggal dari reaksi oksidasi sehingga dapat memperkecil emisi CO yang dihasilkan (Sumarni, 2009).

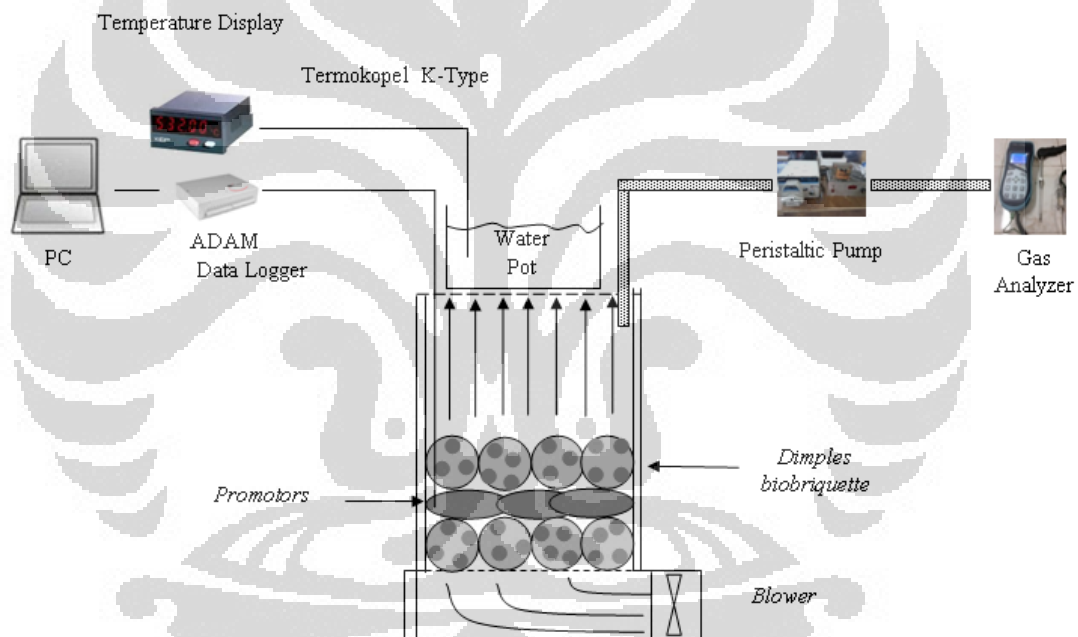


(a)

(b)

Gambar 3. 1 Kompor Briket Batubara yang Akan Digunakan (a); Perforated Hood yang Digunakan Di atas Kompor (b)

Pada penelitian ini juga digunakan pellet promotor dari biomassa TKKS. Dimana diketahui pada penelitian sebelumnya, pellet yang terbuat dari biomassa 100% memiliki waktu penyalaan yang lebih tinggi dibanding pellet promotor campuran biomassa dan batubara. Penggunaan pellet promotor yang terbuat dari biomassa TKKS bertujuan untuk melihat kinerja biomassa TKKS secara seragam baik sebagai briket pemasakan maupun pellet promotor. Pellet promotor diletakkan pada lapisan kedua dari susunan bahan bakar biobriket didalam kompor. Pada penelitian sebelumnya telah diteliti bahwa pada lapisan ini merupakan posisi yang optimum bagi pellet promotor untuk membantu pembakaran biobriket (Sumarni, 2009). Gambar 3.2 memberikan visualisasi mengenai susunan briket pemasakan



Gambar 3. 2 Skema Kompor Untuk Pengujian Biobriket

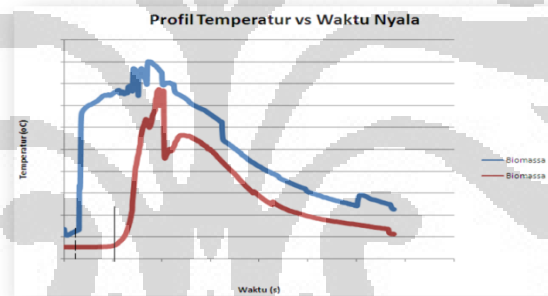
Dari Gambar 3.2 diketahui skema kompor yang digunakan untuk penelitian ini. Pada Gambar 3.2 juga diketahui penyusunan briket pemasakan dan pellet promotor di dalam kompor. Temperatur pembakaran briket di dalam kompor dan temperatur air diukur dengan menggunakan termokopel ADAM Data Logger, serta gas CO hasil pembakaran dilewatkan pada pipa tembaga yang disambung dengan selang karet untuk dipompakan menggunakan pompa peristaltik. *Gas analyzer*

diletakkan pada output keluaran pompa peristaltik. Tujuan melewati *flue gas* ke dalam pipa tembaga adalah untuk mendinginkan *flue gas* agar sesuai dengan syarat temperatur penggunaan *Gas Analyzer*.

Data Penelitian

1. Waktu Ignisi

Pada grafik, pengukuran waktu ignisi ditandai oleh lonjakan suhu secara drastis dari menit ke nol hingga ke menit tertentu dan dikatakan selesai dengan garis putus-putus pada biomassa A dan garis penuh pada biomassa B sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3.3. Waktu ignisi dari biobriket diidentifikasi dengan menggunakan temperatur ignisi dari masing-masing komposisi biobriket. Waktu ignisi adalah waktu yang dibutuhkan dari suatu parameter suhu tertentu, dalam hal ini 60 °C, hingga mencapai suhu ignisi.

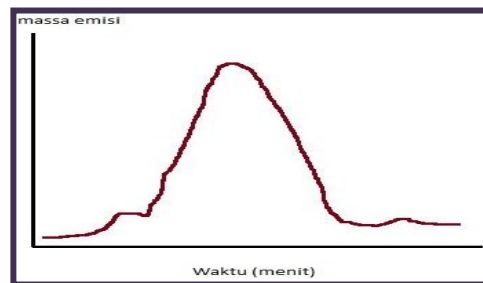


Gambar 3. 3 Sketsa Grafik untuk Data Waktu Ignisi biobriket

(Tanto, 2011)

2. Emisi CO

Mengacu pada peneliti sebelumnya emisi gas CO akan meningkat pada beberapa waktu tertentu (Lestari, 2009). Hal ini dapat terlihat dari Gambar 3.4, di mana *peak-peak* pada data emisi CO yang tertangkap pada *CO analyzer* atau *gas analyzer* biasa akan terjadi pada suatu titik waktu pada pembakaran, pada umumnya berada di tengah-tengah masa pembakaran.



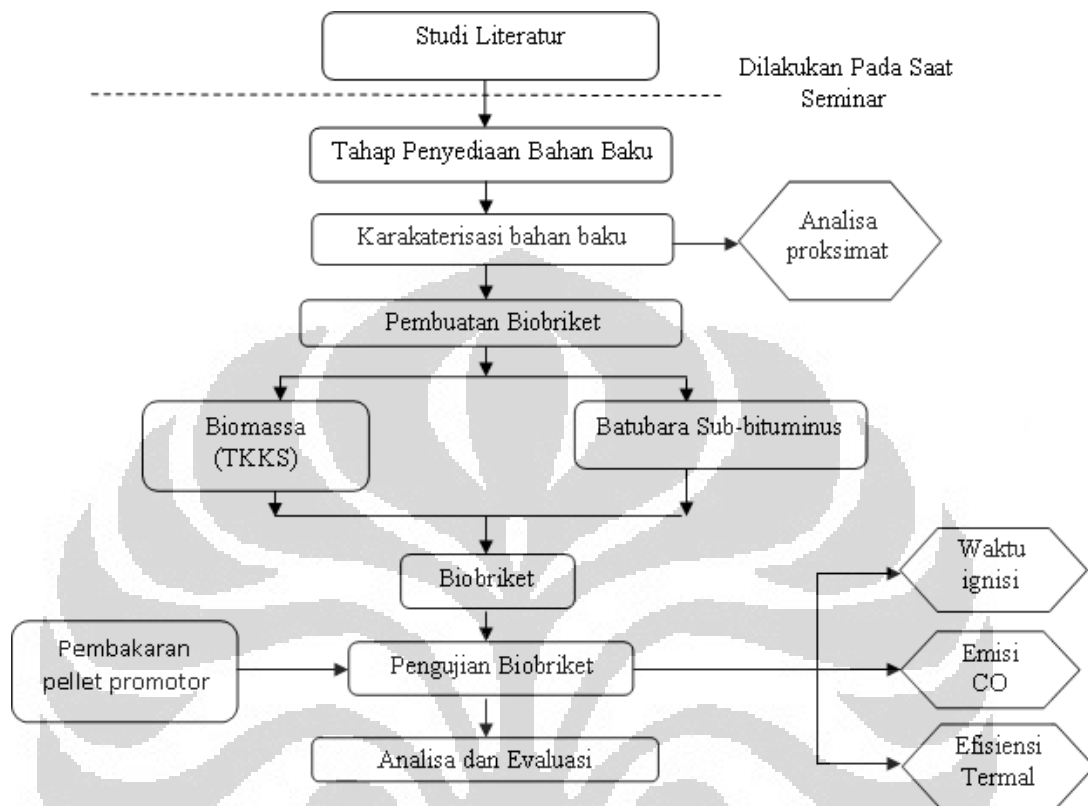
Gambar 3. 4 Sketsa Grafik untuk Data Emisi CO

(Lestari, 2009)

3. Efisiensi Termal

Pada penelitian ini, nilai efisiensi termal dapat ditentukan dengan menggunakan *water boiling test*. Efisiensi termal akan teridentifikasi dengan menghitung kalor yang terserap oleh air dibagi dengan nilai kalor yang dimiliki oleh biobriket. Data yang didapat pada pengamatan mengenai efisiensi termal adalah suhu dan massa air setelah dipanaskan. Data mengenai efisiensi termal akan dievaluasi dalam variasi permukaan biobriket. Berdasarkan tinjauan pustaka dan hipotesa yang diusulkan sebelumnya, diduga cekukan pada permukaan biobriket dapat meningkatkan efisiensi termal pembakaran.

3.2 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 5 Diagram Alir Penelitian

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari;

- Variabel tetap:

Variabel tetap pada penelitian ini adalah jenis biomassa, batubara, media pembakaran yang digunakan, dan komposisi pellet promotor. Biomassa yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit, jenis batubara yang digunakan adalah batubara sub-bituminus, media pembakaran yang digunakan adalah kompor briket yang dibuat berdasarkan penelitian di DTK UI, dan komposisi pellet promotor yang digunakan adalah 100% biomassa TKKS dengan ethanol sebagai oksigenat sebesar 15% berat pellet (Tanto, 2011).

- Variabel bebas:

Variabel bebas pada penelitian ini adalah komposisi biomassa dan batubara dalam biobriket dan kecepatan superfisial udara yang diatur dalam kecepatan *blower*. Perbandingan komposisi biomassa dan batubara yang digunakan adalah,

- Variabel terikat

Variabel terikat pada penelitian ini adalah waktu ignisi, emisi CO yang dihasilkan, serta *thermal efficiency* dari pembakaran biobriket.

Tabel 3. 1 Tabel Pengambilan Data Pengujian Biobriket

Data	50% Biomassa			75% Biomassa			100% Biomassa		
	0,29 m/s	0,42 m/s	0,54 m/s	0,29 m/s	0,42 m/s	0,54 m/s	0,29 m/s	0,42 m/s	0,54 m/s
t_{ig}									
C_{CO}									
t_{air}									

3.4 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini beserta fungsinya, diantaranya:

- Mesin *crusher* : Menghaluskan biomassa
- *Mould* (pencetak) briket : Mencetak briket
- Besi penekan : Memberikan tekanan pada cetakan briket sebesar 3-5 ton sehingga briket dapat tercetak dan merekat
- Kompor briket : Alat uji pembakaran biobriket
- Termokopel tipe K : Mengukur suhu briket di dalam kompor briket
- Data akuisisi ADAM : Menyimpan data suhu selama *running* data pembakaran briket
- CO Analyzer : Mengukur kadar emisi CO (ppm)
- Panci : Wadah air untuk pengukuran efisiensi termal
- *Blower* : Mengalirkan udara ke dalam kompor
- Anemometer : Mengukur besarnya kecepatan udara yang

disuplai ke dalam kompor

- *Exhaust fan* : Mengalirkan *flue gas* ke luar ruangan bakar sehingga laboratorium tidak penuh asap
- Pembakar Alkohol : Sebagai alat penyulutan pellet promoter
- Penjepit Besi : Memegang pellet promoter ketika penyulutan



Gambar 3. 6 (a) Mesin *Crusher*; (b) Alat Pengepres; (c) Anemometer



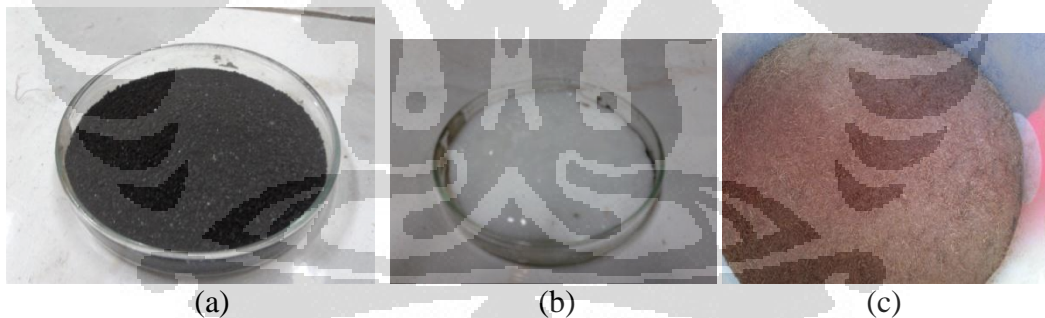
Gambar 3. 7 (a) *Mould* (Pencetak Briket); (b) *Gas Analyzer*; (c) Bunsen dan Penjepit Besi



Gambar 3. 8 Kampor Briket yang Digunakan pada Penelitian dan Blower

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini, diantaranya:

- Tandan Kosong Kelapa Sawit (*empty bunches palm*)
- Batubara sub-bituminus
- Binder (Tapioka)
- Air
- Ethanol



Gambar 3. 9 (a) Batubara Sub-bituminus; (b) Binder Kanji; (c) Cacahan TKKS

3.5 Tahapan Penelitian

Tahapan proses penelitian ini sebagian besar akan dilakukan pada Laboratorium Energi Berkelanjutan Departemen Teknik Kimia, FT-UI, Depok. Beberapa lokasi lain seperti Balai Mekanisasi Pertanian, Serpong dan Laboratorium uji Balai Pengkaji Penerapan Teknologi (BPPT), Serpong.

3.5.1 Perancangan Biobriket

1. Menentukan dimensi biobriket berbentuk bulat dengan diameter 4 cm.
2. Menentukan tekanan kompresi konstan 5-20 Mpa
3. Menentukan komposisi binder yang digunakan, yakni Kanji 10% wt/v

3.5.2 Persiapan awal Biomassa dan batubara sub-bituminus

3.5.2.1 Analisa Proksimat Batubara Sub-bituminus dan Biomassa

Analisa proksimat dilakukan di awal persiapan batubara sub-bituminus dan biomassa untuk mengetahui kandungan masing-masing bahan sebelum pencampuran sehingga dapat diperkirakan kondisi ketika pencampuran. Analisa proksimat dilakukan secara terpisah di Balai Pengkaji Penerapan Teknologi (BPPT), Serpong.

3.5.2.2 Persiapan Biomassa

1. Mengeringkan biomassa dengan oven pada suhu 105°C (Samuelson, 2006) hingga mencapai 10% *moisture content* dengan melakukan variasi lama pengeringan agar didapat kecenderungan waktu pemanasan menggunakan kurva pengeringan.
2. Mencacah biomassa menggunakan mesin *crusher* hingga berukuran ± 50 Mesh dengan mempertahankan bentuk serat.

3.5.2.3 Persiapan Batubara

1. Batubara tidak perlu dikeringkan karena batubara yang digunakan adalah batubara sub-bituminus yang *moisture content* nya tidak terlalu tinggi dan telah cukup kering untuk langsung digunakan.
2. Mencacah batubara sub-bituminus dengan menggunakan mesin *grinder* hingga berukuran ± 20 Mesh.

3.5.3 Preparasi Bahan Perekat

1. Menyiapkan perekat biobriket berupa kanji

2. Membuat campuran tepung kanji dengan menggunakan air panas hingga kental
3. Menyiapkan kadar kanji untuk campuran briket sebesar 10% berat briket.

3.5.4 Preparasi Pellet Promotor (dengan kanji sebagai perekat dan ethanol sebagai oksigenat)

1. Mempersiapkan biomassa berupa kayu karet dengan melakukan pengeringan hingga 10% *moisture content* dan pencacahan biomassa hingga ukuran \pm 50 Mesh dengan serat.
2. Mempersiapkan perekat berupa tepung kanji yang dilarutkan ke dalam air panas hingga kental dan lengket
3. Memasukkan sampel biomassa dalam bentuk serbuk ke dalam alat pencetak
4. Memosisikan alat pencetak di bawah besi penekan.
5. Memompa mesin *cold press* hingga tekanan yang ditunjukkan mencapai 5 metric ton.
6. Menunggu selama 2 menit untuk mengaktivasi lignin yang terkandung di dalam biomasa
7. Mengeluarkan pelet yang berada di dalam alat pencetak.
8. Membakar pellet promotor dengan menggunakan pembakar alkohol selama 5 menit untuk membentuk bara api pada permukaan pellet yang akan menjadi sumber panas pada kompor briket.

3.5.5 Preparasi Biobriket

1. Melakukan pencampuran biomassa dan batubara dengan komposisi 50 biomassa : 50 batubara , 75 biomassa : 25 batubara,dan 100 biomassa.
2. Menambahkan Kanji sebanyak 10% berat biobriket sebagai perekat
3. Melakukan Proses pencetakan biobriket dengan menggunakan *mould* briket
4. Melakukan proses kompresi sesuai pada tekanan 3 metric ton.
5. Melakukan pengukuran *moisture content* campuran setelah menjadi biobriket

3.5.6 Pengujian biobriket

Pada proses ini, pellet promotor diletakan pada lapisan ke dua di dalam kompor briket eksperimen seperti pada Gambar 3.2. Setelah biobriket (briket pemanasan) dan pellet promotor tersusun seperti Gambar 3.2, baru dapat dilakukan pengujian terhadap variabel yang ingin diketahui pengaruhnya yang telah disebutkan di atas.

3.5.6.1 Pengujian pembakaran biobriket

Waktu ignisi dipengaruhi oleh tiga hal yaitu, briket pemanakan, briket promotor, dan kecepatan udara. Pengujian waktu ignisi menggunakan *thermokopel* yang kemudian dihubungkan dengan *dataloger* pada komputer. Berikut adalah prosedur dari pengujian waktu ignisi:

1. Menghubungkan corong kompor dengan *thermokopel* yang telah dihubungkan dengan *dataloger* pada computer
2. Meletakkan susunan biobriket pemasakan dengan komposisi tertentu (mis. 50:50) pada layer 1 dan 2
3. Memasukkan pellet promoter yang telah berbara pada *layer 2* secara merata.
4. Meletakkan termokopel pada briket yang paling dekat dengan promoter di *layer* ke dua
5. Memasukkan biobriket pemasakan pada *layer 3*.
6. Menyalakan *blower* dengan kecepatan superfisial tertentu (mis. 0,29 m/s)
7. Menekan perintah *run* pada komputer yang menandakan dimulainya proses pengukuran data suhu pada kompor.
8. Menunggu sampai pembakaran biobriket selesai ditandai oleh emisi CO yang berkurang, suhu yang terukur menunjukkan temperature $\pm 60^{\circ}\text{C}$.

3.5.6.2 Pengujian Emisi

Emisi yang akan di uji pada penelitian ini adalah gas CO. Pengujian emisi ini dilakukan di Departemen Teknik Kimia dengan menggunakan *CO analyzer* yang terdapat di DTK.

Berikut adalah prosedurnya:

1. Menyalakan *exhaust fan* agar asap yang dihasilkan tidak memenuhi ruangan

2. Menghubungkan pipa tembaga, selang karet dengan pompa peristaltik dan alat CO analyzer.
3. Meletakkan bahan bakar pada kompor dengan susunan seperti pada pengujian pembakaran biobriket.
4. Membakar 1 kg bahan bakar biobriket (limbah tandan kosong kelapa sawit), dengan komposisi tertentu (mis: 25-75)
5. Meletakkan mulut pipa tembaga pada keluaran *flue gas* dari kompor
6. Mencatat konsentrasi CO yang keluar dari selang karet hasil pemompaan *flue gas* pada kompor menggunakan pompa peristaltik.
7. Mengulangi percobaan menggunakan bahan bakar biobriket dengan komposisi dan kecepatan udara yang berbeda.

3.5.6.3 Pengujian efisiensi termal

Pengujian efisiensi termal dilakukan dengan *Water Boiling Test*, dimana air dalam panci dipanaskan, lalu dengan pengukuran temperatur, massa air, dan massa bahan bakar, akan dihitung nilai efisiensinya. Prosedurnya adalah sebagai berikut.

1. Menghubungkan termokopel dengan *temperature display* untuk mengetahui temperatur yang terukur.
2. Meletakkan biobriket pada kompor dengan susunan seperti telah dijelaskan pada tahap pengujian pembakaran biobriket.
3. Membakar ± 1 kg biobriket dengan komposisi tertentu (mis: 25-75)
4. Meletakkan panci berisi 100 ml air di atas kompor.
5. Meletakkan termokopel hingga menyentuh badan air
6. Mencatat kenaikan suhu yang terjadi pada air.
7. Mengukur massa air setelah pembakaran selesai untuk mengetahui
8. Pengukuran efisiensi termal dilakukan sampai biobriket habis untuk setiap satu kali pembakaran. Menghitung efisiensi termal menggunakan Persamaan 3.1

$$\eta = \frac{M \times c_{p1} \times (T_b - T_a) + M_1 \times c_{p2} \times (T_b - T_a) + M_2 \times H_L}{H_c \times W} \quad (3.1)$$

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

9. Mengulangi percobaan 1-8 menggunakan bahan bakar biobriket dengan komposisi berbeda.

3.5.6.4 Pengujian Suhu Ignisi

1. Meletakkan briket di atas pembakar alkohol
2. Meletakkan termokopel di permukaan briket
3. Menyulut briket dengan cara membakarnya dengan menggunakan etanol hingga terbentuk bara api
4. Saat bara api terbentuk, maka suhu tersebut diidentifikasi sebagai suhu ignisi dan segera dicatat untuk diambil datanya.

3.5.7 Analisa dan Evaluasi Hasil Penelitian

Hasil dari penelitian akan dibahas setelah dilakukan penelitian. Analisa pada penelitian ini akan dibahas ke dalam tiga aspek yang ditinjau dalam dua faktor yang divariasikan, yaitu komposisi campuran biobriket dan kecepatan superfisial udara yang ditunjukkan dengan kecepatan *blower*. Beberapa faktor yang harus dievaluasi diantaranya,

- Waktu ignisi
- Emisi CO yang dihasilkan
- *Thermal efficiency*

Analisa aspek-aspek diatas akan dievaluasi pada variabel berikut.

Komposisi biobriket

Menurut analisa, semakin banyak komposisi biomassa, maka semakin sedikit CO yang dihasilkan (Sulistyanto, 2006) .

Kecepatan superfisial

Kecepatan *superfisial* dalam penelitian ini mempengaruhi pembentukan emisi CO dan efisiensi thermal yang dihasilkan. Analisa yang dilakukan mencakupi analisa secara mekanika fluida dan *heat transfer*.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemilihan Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan batubara sub-bituminus. Pemilihan biomassa tandan kosong kelapa sawit disebabkan oleh potensi limbahnya yang besar di Indonesia. Selain didasarkan pada potensi limbah yang cukup besar di Indonesia pemilihan tandan kosong kelapa sawit sebagai biomassa yang akan di uji adalah kandungan *volatile matters* nya yang cukup tinggi (Fisafarani, 2010). Batubara sub-bituminus dipilih karena sebagian besar batubara yang dimiliki Indonesia berjenis lignit dan sub-bituminus. Jika dibandingkan dengan batubara lignit, batubara sub-bituminus lebih unggul dari faktor umur yang lebih tua, kandungan karbon yang lebih banyak serta *moisture content* yang lebih sedikit.

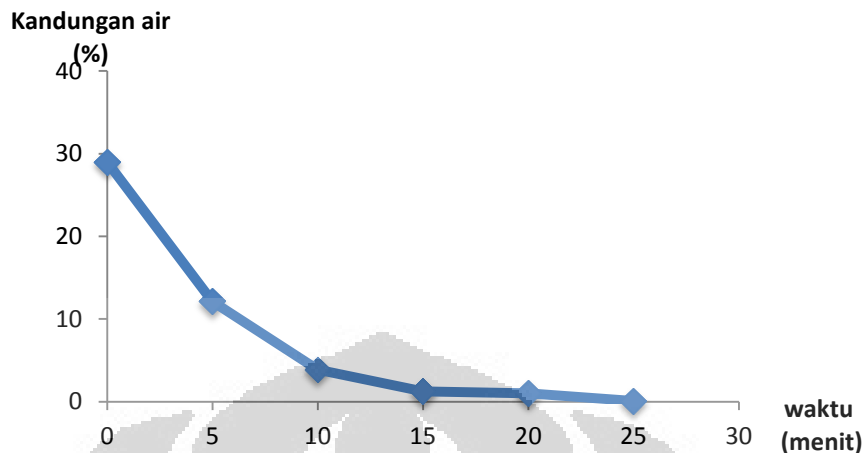
4.2 Pembuatan Biobriket

Biobriket adalah briket campuran antara batubara sub-bituminus dan biomassa yang mana dalam penelitian ini digunakan tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Pembuatan biobriket diawali dengan tahap preparasi biomassa TKKS dan batubara. Tahap preparasi diawali dengan tahap pencacahan batubara dan biomassa TKKS. Pencacahan dilakukan terpisah dan menggunakan alat yang berbeda. Pencacahan batubara dilakukan dengan menggunakan grinder hingga ukuran lolos 20 Mesh sedangkan, pencacahan biomassa (TKKS) dilakukan secara bertahap yaitu pencacahan secara kasar dengan menggunakan tangan, pemotongan bagian-bagian serat dengan menggunakan gunting, dan tahap penghalusan dengan mesin penghancur biji kopi ukuran 50 mesh hingga terbentuk serat halus dengan serbuk TKKS. Biomassa TKKS tetap dipertahankan dalam bentuk serat dengan tujuan mempertahankan kekasaran yang ditimbulkan dari pencampuran biomassa pada briket batubara. Kekasaran yang dimiliki biomassa dapat meningkatkan

turbulensi udara *blower* yang melewati briket pemasakan pada kompor selain efek kekasaran yang diciptakan dari bentuk *dimples* pada briket itu sendiri. Pencacahan bertujuan untuk memperkecil ukuran partikel batubara dan biomassa TKKS sehingga pencampuran keduanya menjadi lebih mudah dan dapat menghasilkan briket yang homogen dan kompak.

Sebelum memasuki tahap pencampuran, terdapat satu tahap lagi yang dilakukan terhadap biomassa TKKS, yaitu tahap pengeringan. Pengeringan dilakukan untuk mengurangi kadar air biomassa yang pada umumnya sangat tinggi. Untuk menyeragamkan kondisi biomassa pada penelitian ini kekeringan biomassa dibuat sama, yaitu $\pm 10\%$ *moisture content*. Untuk mendapatkan kekeringan yang sama, biomassa perlu melalui tahapan pengeringan lebih lanjut. Pengeringan biomassa dilakukan dengan menggunakan oven pada suhu 105°C (Samuelson, 2006). Suhu pengeringan dipilih dengan pertimbangan bahwa secara normal air akan menguap pada suhu 100°C namun, air yang terkandung pada biomassa terikat di dalam pori-pori biomassa sehingga dibutuhkan suhu lebih tinggi untuk menambahkan gaya adsorpsi molekul air hingga menguap dan keluar dari pori-pori biomassa. Pada suhu 105°C telah cukup memenuhi energi adsorpsi air untuk dapat menguap dan keluar dari pori biomassa, di mana suhu yang lebih tinggi dapat menguapkan *volatile organic compound* (VOC) yang terkandung di dalam biomassa dimana hal ini seharusnya dihindari dalam proses pengeringan karena dapat mempengaruhi karakteristik pembakaran biomassa tersebut.

Lama waktu pengeringan didapat dengan terlebih dahulu melakukan perhitungan dan membuat kurva pengeringan. Dimana kurva pengeringan dibuat dengan melakukan beberapa tahap prosedur, yaitu mengeringkan 10 gram biomassa yang telah dicacah, kemudian menimbang beratnya setiap 5 menit hingga didapat pengurangan massa biomassa TKKS yang hampir membentuk garis asimtot. Kurva pengeringan biomassa TKKS dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dari kurva pengeringan ini kemudian dapat ditentukan lama waktu pengeringan optimum untuk memperoleh *moisture content* $\pm 10\%$.



Gambar 4. 1 Kurva Pengeringan TKKS

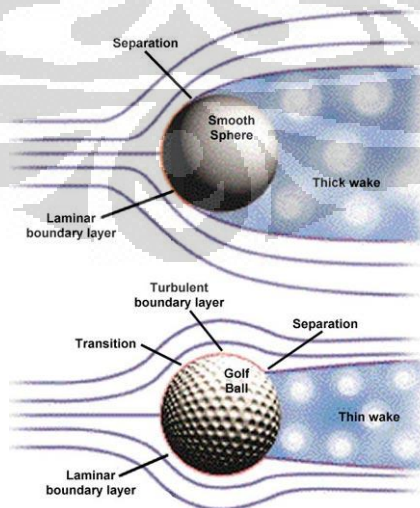
Berdasarkan kurva pengeringan TKKS pada Gambar 4.1 didapat bahwa untuk mendapatkan waktu optimum pengeringan TKKS untuk mendapatkan *moisture content* sebesar 10% adalah 6,5 menit.

Selanjutnya adalah tahap pembuatan biobriket, dimana biobriket dibuat dengan mencampurkan batubara sub-bituminus dan biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan kanji sebagai binder. Biobriket dibuat dengan variasi komposisi biomassa (50; 75; 100) dengan tujuan melihat pengaruh variasi komposisi biomassa dan batubara di dalamnya terhadap waktu penyalaan batubara, emisi CO yang dihasilkan, dan efisiensi termal dari pembakaran di dalam kompor. Kanji ditambahkan dalam proses pembuatan biobriket sebanyak 10% dengan tujuan sebagai perekat dalam proses pencetakan. Biobriket kemudian dicetak pada alat pencetak briket dengan diameter 4 cm yang telah terlebih dahulu ditambahkan cetakan *dimples* dan ditekan dengan menggunakan alat pengepres hidraulik. Setelah dicetak, biobriket kemudian melewati tahap pengeringan kedua yaitu menghilangkan molekul air yang disebabkan oleh pencampuran kanji. Pengeringan dilakukan di udara terbuka selama 2 hari untuk mendapatkan briket yang kering dan kompak. Pengeringan dengan matahari dipilih karena matahari memberikan panas radiasi yang kontinu dan uap air yang teruapkan dapat terbawa oleh angin (sirkulasi udara) (Arslan and Özcan, 2010) sehingga tidak terkonsentrasi disekitar briket yang dapat menyebabkan kejenuhan dan kembalinya uap air ke dalam briket.



Gambar 4. 2 Dari Kiri Ke Kanan: Biobriket 50% TKKS : 50% Batubara; 75% TKKS : 25% Batubara; 100% TKKS.

Briket dibuat berbentuk *dimples* dengan tujuan membentuk aliran turbulen yang melewati briket. *Dimples* menyebabkan adanya resirkulasi udara pada cekukan sehingga waktu tinggal udara di dalam kompor menjadi lebih lama. Pada dasarnya aliran udara disekitar bola terjadi karena adanya friksi yang menyebabkan fenomena *flow separation*, yaitu aliran terpisah dan menjauh dari permukaan bola yang menyebabkan terjadinya *wake* pada bagian belakang bola karena didominasi oleh aliran resirkulasi. Pada permukaan bola tanpa *dimples* dengan laju alir yang rendah, udara disekitar bola mengalir secara laminar sedangkan, pada bola dengan *dimples*, udara tersirkulasi pada cekukan sehingga membentuk aliran turbulen. *Boundary layer* laminar diinginkan karena dapat memperkecil gaya gesek. *Boundary layer* turbulen menyebabkan terjadinya gaya gesek yang lebih tinggi, namun hal ini dapat meningkatkan kecepatan aliran udara sehingga *boundary layer* yang terbentuk dapat menahan gradient tekanan lebih lama. Fenomena aliran udara yang melewati bola dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Fenomena Aliran Udara Melewati Bola

Pada aliran udara pada bola tanpa *dimples*, *boundary layer* laminar terpisah secara cepat sehingga terbentuk *wake* yang besar di belakang permukaan bola. *Wake* yang besar menyebabkan kenaikan daerah tekanan rendah, sehingga perbedaan tekanan meningkat dan gaya gesek meningkat. Sedangkan, pada bola dengan *dimples*, udara yang mengalir akan membentuk aliran turbulen karena tersirkulasi pada cekukan. Pada daerah transisi menuju *boundary layer* turbulen terdapat energi tambahan yang mengakibatkan aliran terpisah lebih lama dari permukaan bola. Fenomena ini mengakibatkan *wake* yang terbentuk lebih kecil dibanding bola tanpa *dimples* sehingga gaya gesek yang dihasilkan lebih kecil. Gaya gesek berpengaruh terhadap panas yang ditransfer. Dengan gaya gesek yang lebih kecil, maka kehilangan panas akibat gaya gesek akan semakin kecil. Selain itu, dengan permukaan *wake* yang semakin kecil dibelakang permukaan bola, maka kontak antara udara dengan bola akan semakin banyak. Hal ini baik untuk penetrasi oksigen ke permukaan briket.

4.3 Pengujian Pembakaran Biobriket

Pengujian pembakaran biobriket dilakukan di dalam kompor briket dengan tujuan mengetahui fenomena pembakaran biobriket di dalam kompor. Dimana kompor merupakan media umum yang digunakan sektor rumah tangga untuk melakukan pembakaran briket untuk tujuan pemasakan. Untuk itu penggunaan kompor pada penelitian ini untuk mendekati penelitian ini dengan kondisi nyata yang akan dialami di sektor rumah tangga. Pengujian pembakaran dilakukan di dalam kompor briket yang dilengkapi *blower* di bagian bawahnya, berfungsi sebagai suplai aliran udara masuk yang dibutuhkan pada saat proses pembakaran. Briket pemasakan merupakan biobriket yang divariasikan komposisinya, diletakkan pada lapisan 1, 2, dan 3. Dimana pada lapisan 2 briket pemasakan dikombinasikan dengan pellet promotor yang berfungsi sebagai pemicu awal pembakaran briket pemasakan.

Pada penelitian ini parameter yang divariasikan adalah komposisi biomassa TKKS pada briket pemasakan dan laju aliran udara yang masuk ke dalam kompor. Variasi komposisi biomassa yang digunakan adalah (50; 75; 100). Pemilihan komposisi ini adalah penelitian ini hendak memfokuskan pada kinerja pembakaran

biobriket dalam kompor berdasarkan waktu penyalaan, emisi CO, dan efisiensi termal pembakaran. Berdasarkan penelitian (Sari, 2011) diketahui bahwa pembakaran briket tunggal dengan komposisi 100% biomassa memiliki waktu penyalaan paling singkat namun, temperatur pembakarannya sangat rendah. Penelitian tersebut kemudian mengusulkan biobriket dengan komposisi 50% biomassa dengan waktu penyalaan yang sedikit lebih lama dari briket 100% dengan temperatur pembakaran yang cukup tinggi. Berdasarkan penelitian yang sama diusulkan kombinasi komposisi 75% biomassa sebagai komposisi yang menghasilkan emisi CO paling rendah. Untuk itu, digunakan referensi tersebut untuk melihat fenomena pembakaran briket dalam kompor dimana di dalamnya terdapat faktor interaksi antar briket dan mekanika fluida dengan menganggap karakteristik pembakaran biomassa yang tidak jauh berbeda. Selain variasi komposisi biomassa, penelitian ini juga memvariasikan kecepatan aliran udara masuk kompor atau kecepatan superfisial sebesar 0,29 m/s; 0,42 m/s; dan 0,54 m/s.

Sebagai sumber panas dari pembakaran di dalam kompor ini digunakan pellet promotor. Bentuk pellet dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya dinyatakan waktu penyalaan briket pemasakan dengan menggunakan pellet promotor sebagai sumber panas lebih singkat dibanding menggunakan briket promotor (Tanto, 2011). Selain itu pemilihan bentuk pellet juga disebabkan *bulk density* pellet yang lebih rendah dibanding briket (Tanto, 2011). Diketahui bahwa densitas berbanding terbalik dengan porositas suatu material. Dengan porositas yang besar dari biomassa menyebabkan peluang untuk terbentuknya *turbulent layer* pada biomassa semakin besar sehingga resirkulasi udara pada pori-pori permukaan pellet akan semakin banyak terjadi. Hal ini menguntungkan karena dapat mempersingkat waktu pembentukan bara serta meningkatkan transfer panas ke briket sekitarnya pada kompor. Pellet promotor yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 17 pellet dengan menganalogikannya dengan penggunaan briket promotor (Tanto, 2011).

Pellet promotor terlebih dahulu disulut dengan api untuk menghasilkan bara sebagai sumber panas dari kompor. Proses penyulutan dilakukan di atas pembakar alkohol dimana pellet terlebih dahulu ditambahkan oksigenat berupa ethanol.

Penambahan oksigenat pada dilakukan dengan tujuan memberikan suplai oksigen internal ketika proses devolatilisasi berlangsung. Pada saat proses devolatilisasi akan terbentuk awan *volatile matters* yang menghalangi masuknya suplai oksigen ke dalam pellet. Untuk itu, penambahan oksigenat dilakukan untuk memberikan suplai oksigen internal di awal penyulutan. Oksigen internal akan bereaksi dengan karbon pada pellet promotor dalam reaksi oksidasi. Reaksi oksidasi ini berlangsung secara eksotermis sehingga dapat meningkatkan temperatur pembakaran pellet, yang mana kenaikan temperatur dapat meningkatkan energi hasil reaksi mendekati energi aktivasi pembakaran pellet sehingga pellet akan lebih mudah menyala dan terbentuk bara.

Oksigenat yang dipilih adalah ethanol dimana ethanol memiliki volatilitas yang lebih rendah dibanding methanol. Hal ini menguntungkan dalam dua sisi, secara ketahanan etanol akan lebih lama bertahan di dalam pellet promotor karena titik didih etanol 78°C, lebih tinggi dari methanol 64,7°C. Secara keamanan (*safety*), lebih aman menggunakan etanol karena titik didihnya yang lebih tinggi sehingga meminimisasi kemungkinan terjadi kecelakaan kerja yang diakibatkan tersulutnya etanol. Ditinjau dari perbandingan C:O etanol memiliki perbandingan 2:1 di mana perbandingan ini tidak terlalu jauh signifikan dibanding methanol.

Blower diletakkan di bagian bawah kompor briket. Hal ini dilakukan untuk menciptakan *forced updraft* pada aliran udara. Hal ini dapat menimbulkan turbulensi yang sangat menguntungkan bagi pembakaran biobriket di dalam kompor serta mempersingkat waktu penyalaan biobriket dalam kompor.

4.4 Hasil Uji Proksimat dan Nilai Kalor Batubara dan Biomassa

Tabel 4. 1 Hasil Uji Proksimat dan Nilai Kalor Batubara dan Biomassa

Parameter Uji	TKKS	Batubara	
<i>Moisture Content</i> (%wt/adb)	13,64	12,71	Metode ASTM D-5142
<i>Volatile Matters</i> (%wt/adb)	65.86	41,03	
<i>Fixed Carbon</i> (%wt/adb)	15,56	42,38	
<i>Ash</i> (%wt/adb)	4,88	3,89	
Caloric Value (kkal/kg)	3826	5416	ASTM D 5865

Uji proksimat dan nilai kalor batubara dilakukan di BPPT LIPI Serpong dengan hasil tertera pada Tabel 4.1. Berdasarkan Tabel 4.1 terdapat perbedaan antara nilai *moisture content* yang seharusnya tertera dalam perhitungan dengan hasil analisa. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai *moisture content* seharusnya telah mencapai angka 10% namun, berdasarkan data yang tertera pada hasil analisa terlihat bahwa *moisture content* biomassa TKKS masih berada pada angka 13,64%. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi perbedaan *moisture content* tersebut. Pengaruh kelembapan udara sekitar tempat penyimpanan TKKS dan metode pengeringan TKKS menjadi faktor yang memungkinkan perbedaan nilai *moisture content*. Metode pengeringan TKKS dengan menggunakan oven dengan suhu 105°C menguapkan *unbond water* yang berada pada pori-pori biomassa (Galle, 2001). Hal ini memungkinkan terdapat kandungan air yang masih tersisa pada biomassa sehingga terjadi perbedaan nilai *moisture content* pada hasil analisa dan perhitungan dengan menggunakan kurva pengeringan. Oleh karena, besarnya perbedaan tidak terlalu jauh dan kadar *moisture content* masih berada pada *range* yang tidak menghalangi proses gasifikasi biomassa (5-25%) (Kavalov and Peteves, 2005) maka *treatment* pengeringan dengan menggunakan oven tetap dipertahankan karena keunggulannya yaitu cepat dan mampu mengkondisikan panas dan kelembapan udara yang fluktuatif jika menggunakan pengeringan dengan matahari.

Dalam hal ini kadar air sangat dijaga karena kadar air sangat berpengaruh terhadap nilai kalor suatu bahan bakar. Suatu material yang memiliki kadar air yang tinggi pada umumnya memiliki nilai kalor yang rendah. Air tidak memiliki nilai kalor dan cenderung menghambat proses pembakaran karena panas yang diberikan sumber panas akan digunakan untuk menguapkan kandungan air di dalam biobriket di awal pembakaran. Selain kandungan air dari suatu bahan bakar, kandungan *fixed karbon* juga mempengaruhi besarnya nilai kalor dari suatu bahan bakar. Nilai *fixed karbon* menunjukkan jumlah unsur karbon yang terkandung pada bahan bakar. Semakin banyak unsur karbon yang terkandung pada suatu bahan bakar akan semakin banyak pula zat yang dapat bereaksi pada reaksi pembakaran dan memungkinkan reaksi berjalan lebih baik dibanding bahan bakar dengan unsur karbon yang lebih sedikit. Batubara memiliki nilai *fixed carbon* sebesar 42,38% lebih banyak dibanding dengan TKKS 15,56%. Hal ini dapat berarti batubara memiliki panas pembakaran yang lebih baik jika dibanding TKKS, dibuktikan dengan nilai kalor batubara yang lebih tinggi dibanding TKKS, yaitu 5416 kkal/kg (batubara) dan 3826 kkal/kg (biomassa).

Kemudian nilai *volatile matters* (bahan yang mudah menguap), berdasarkan data hasil uji di atas, TKKS memiliki nilai *volatile matters* lebih tinggi (65,86%) dibanding batubara (41,03%). *Volatile matters* menunjukkan kadar bahan yang mudah menguap dari suatu bahan bakar, ketika kandungan *volatile matters* dari suatu bahan bakar lebih banyak menunjukkan bahwa bahan bakar tersebut mudah terbakar atau mudah ketika dilakukan penyalaan. Berdasarkan hasil uji tersebut, seharusnya briket biomassa TKKS lebih mudah dalam penyalaan dibanding dengan briket batubara. Faktor lainnya adalah kadar abu dari bahan bakar, berdasarkan data hasil uji di atas, TKKS memiliki kadar abu yang lebih banyak (4,88%) dibanding batubara (3,89%). Kadar abu sangat terakait dengan hasil pembakaran, dengan mengacu pada data hasil uji tersebut pembakaran briket 100% biomassa akan menghasilkan abu paling banyak dibanding komposisi lainnya. Hal ini terbukti ketika dilakukan uji pembakaran, briket 100% biomassa menghasilkan abu dan partikulat di dasar peletakan bahan bakar (*gate*).



Gambar 4. 4 Abu Sisa Pembakaran Briket 100% Biomassa

4.5 Pengukuran Waktu Penyalaan

Waktu penyalaan adalah waktu dari masuknya bahan bakar hingga terbentuk nyala api pada temperatur pembakaran (Koestoer, 1997). Untuk menguji waktu penyalaan biobriket di dalam kompor ini digunakan termokopel jenis K pada *layer* kedua. Termokopel diupayakan diletakkan pada briket yang letaknya paling dekat dengan pellet promotor. Hal ini bertujuan untuk mengetahui proses perambatan panas pertama kali terjadi di dalam kompor antara pellet promotor dengan briket pemasakan sebelum akhirnya terjadi interaksi antara briket yang mengakibatkan fluktuasi temperatur pembakaran. Pengukuran waktu penyalaan dilakukan saat semua bahan bakar telah dimasukkan ke dalam kompor (hingga memasukkan briket pemasakan pada *layer* ketiga) hingga terjadi nyala api pertama kali yang diakibatkan perambatan panas oleh pellet promotor pada briket pemasakan terdekat yang berada di *layer* ke dua. Akan tetap, karena suhu awal penyalaan yang tidak seragam maka diambil suhu acuan untuk menghitung lamanya penyalaan briket pemasakan. Suhu acuan yang diambil adalah 60°C. Artinya lama penyalaan diukur sejak briket bersuhu 60°C hingga briket mencapai suhu ignisinya. Nyala api diukur dengan membakar briket di luar kompor dan mengamati suhu pada saat terbentuk nyala pertama kali. Adapun suhu ignisi dari masing-masing komposisi biobriket tertera pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4. 2 Suhu Ignisi Tiap Komposisi Biobriket

Komposisi	Suhu ignisi (°C)
50% TKKS : 50% batubara	280
75% TKKS : 25% batubara	187
100% TKKS	154

Waktu penyalaan biobriket di dalam kompor dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti keberadaan pellet promotor, komposisi biobriket di dalam kompor, dan kecepatan *flow* udara pada *blower*. Karena faktor pellet promotor dibuat sama untuk penelitian ini, maka yang berpengaruh tinggal komposisi biobriket dan kecepatan udara *blower* yang mana kedua faktor ini merupakan parameter yang divariasikan pada penelitian ini. Baik komposisi biobriket maupun kecepatan udara pada *blower* memberikan pengaruh pada waktu penyalaan. Keduanya tidak dapat berdiri sendiri sehingga analisa keduanya akan saling berkaitan kelak.

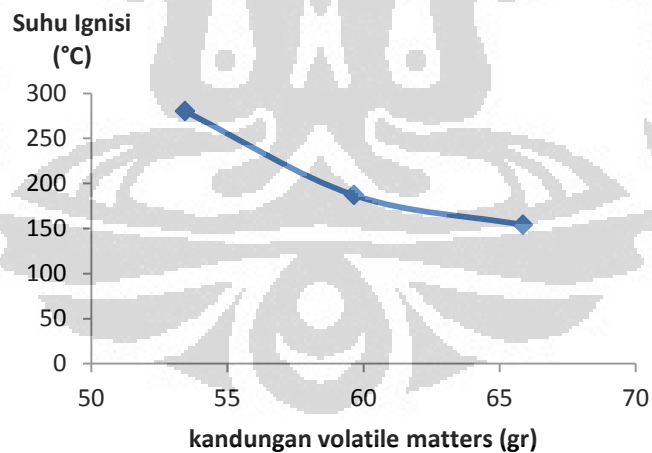
4.5.1 Pengaruh Komposisi Biobriket terhadap Waktu Penyalaan dan Temperatur Pembakaran

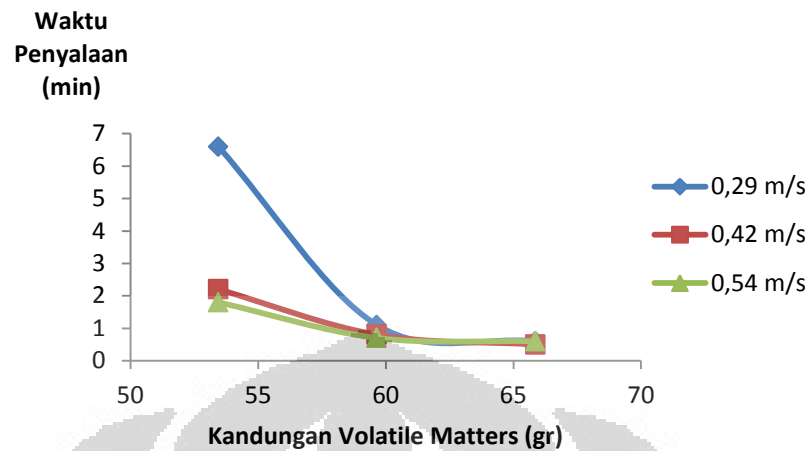
Untuk melihat pengaruh komposisi biobriket terhadap waktu penyalaan dan temperatur pembakaran di dalam kompor akan dilakukan perbandingan pada tiap kecepatan *blower* mengenai waktu ignisi dan temperatur pembakaran pada masing-masing komposisi. Berdasarkan hasil perhitungan dengan mengacu pada temperatur nyala dari masing-masing komposisi di dapat ringkasan waktu penyalaan tiap komposisi beserta suhu tertinggi dari pembakaran biobriket di dalam kompor seperti berikut,

Tabel 4. 3 Ringkasan waktu nyala dan suhu pembakaran pada tiap kecepatan

kecepatan	Komposisi	suhu ignisi (°C)	waktu ignisi (menit)	suhu tertinggi (°C)
0,29 m/s	50% TKKS	280	6,6	342,9
	75% TKKS	187	1,1	347,5
	100% TKKS	154	0,6	574,8
0,42 m/s	50% TKKS	280	2,2	620,8
	75% TKKS	187	0,8	494,2
	100% TKKS	154	0,5	399,4
0,54 m/s	50% TKKS	280	1,8	579,8
	75% TKKS	187	0,7	836,2
	100% TKKS	154	0,6	523,7

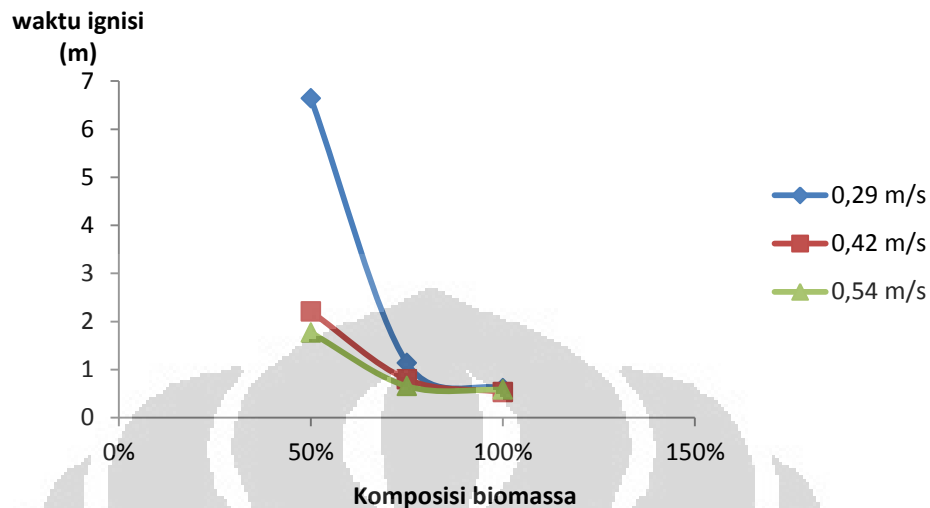
Berdasarkan data pada Tabel 4.3 dapat dibandingkan pengaruh *volatile matters* terhadap waktu penyalaan dari biobriket seperti tergambar pada grafik berikut,

**Gambar 4. 5** Pengaruh Kandungan Volatile Matters terhadap Suhu Ignisi Biobriket



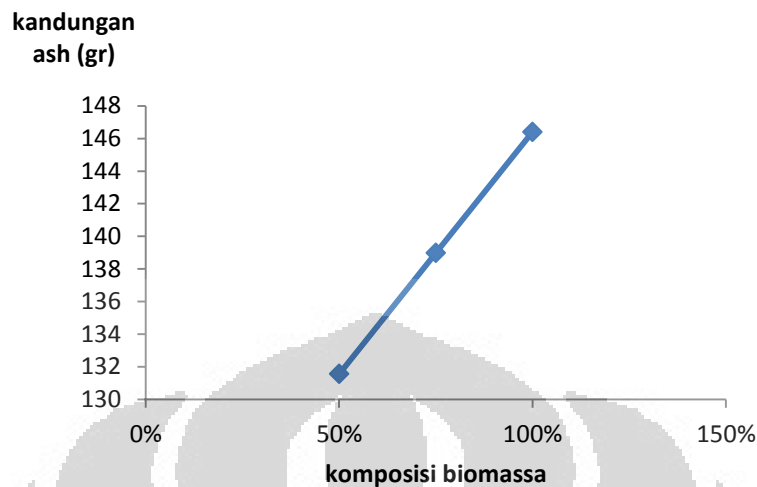
Gambar 4. 6 Pengaruh Kandungan Volatile Matters terhadap Waktu Penyalaan Biobriket

Dari Gambar 4.5 dan 4.6 dapat disimpulkan bahwa kandungan *volatile matters* dapat menurunkan temperatur ignisi dari biobriket. Penurunan temperatur penyalaan biobriket diikuti dengan waktu penyalaan yang semakin singkat (Grotkjaer and Johansen, 2003). Dari Gambar 4.5 dan 4.6 juga dapat dikatakan bahwa bertambahnya komposisi biomassa TKKS akan mempersingkat waktu penyalaan. Semakin singkatnya waktu penyalaan biobriket di dalam kompor ini dipengaruhi oleh kandungan *volatile matters* yang dimiliki oleh biobriket. Kandungan *volatile matter* dapat membantu terjadinya ignisi ketika terbakar di sekitar permukaan bahan dengan memberikan panas ke permukaan briket. Energi panas ini dapat memicu terjadinya penyalaan dengan mentransferkan energi panas secara radiasi (Chigier, 1982). Untuk melihat kecenderungan yang terjadi terhadap pengaruh komposisi terhadap waktu penyalaan dijabarkan pada Gambar 4.7 berikut,



Gambar 4. 7 Pengaruh Komposisi terhadap Waktu Ignisi

Berdasarkan Gambar 4.7 di atas, diketahui bahwa pada kecepatan yang sama tiap penambahan komposisi biomassa akan mempersingkat waktu ignisi. Kecenderungan yang terjadi adalah waktu penyalaan pada komposisi 75% dengan komposisi 100% biomassa tidak mengalami perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan perbedaan kecepatan pada komposisi 50% dan 100% biomassa. Hal ini disebabkan oleh kandungan *ash* yang dimiliki oleh biomassa. Biomassa memiliki kandungan *ash* yang lebih besar jika dibandingkan dengan batubara. Berdasarkan Tabel 4.1 mengenai Analisa Proksimat dapat dilihat bahwa kandungan *ash* dari biomassa tandan kosong kelapa sawit (4,88%) lebih besar dari kandungan *ash* dari batubara (3,89%). Hal ini tentu berpengaruh pada kandungan *ash* pada briket pada komposisi 100% dengan komposisi 75%. Briket dengan komposisi 100% memiliki kandungan *ash* lebih banyak dari briket dengan komposisi 75% dan 50%.



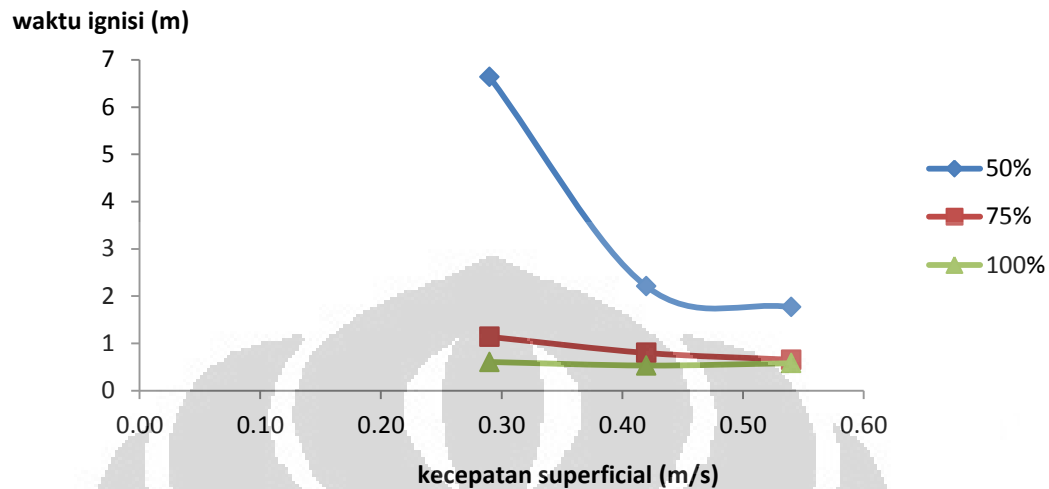
Gambar 4. 8 Kandungan *Ash* Tiap Komposisi Biobriket

Keberadaan *ash* dalam biobriket memberi pengaruh terhadap penurunan temperatur permukaan briket. Hal ini disebabkan *ash* memiliki nilai konduktivitas panas yang lebih tinggi dibanding char ($k_{\text{abu}} = 8 \text{ W/mK}$ (Slifka, 1998) dan $k_{\text{karbon}} = 1.7 \text{ W/mK}$). Pada saat penyalaan briket, panas yang diberikan oleh promotor digunakan untuk menguapkan komponen air dan *volatile matters* yang terkandung di dalam briket setelah itu, panas hasil pembakaran *volatile matters* digunakan untuk pembakaran material karbon di dalam briket. Fenomena ini melibatkan penyerapan panas secara konduksi ke dalam badan briket. Dengan kadar abu yang lebih tinggi dari pada kadar karbon dalam briket dapat mengakibatkan panas yang ada dipermukaan briket akan lebih banyak terserap oleh *ash* dibanding oleh karbon pada briket. Namun, dengan merujuk pada Tabel 4.1 mengenai analisa proksimat biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan batubara, diketahui bahwa nilai *ash* dari biomassa TKKS tidak jauh berbeda dengan nilai *ash* dari batubara, meskipun perbandingan nilai konduktivitas keduanya hampir 4 kali, sehingga pengaruh yang diberikan oleh keberadaan *ash* ini tidak signifikan serta membutuhkan tinjauan lain seperti pengaruh kecepatan superfisial untuk dapat mengaitkannya terhadap waktu penyalaan biobriket. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 4.7 bahwa pada komposisi 100%, kecenderungan waktu ignisi tidak jauh berbeda dengan waktu ignisi pada komposisi 75%.

Selain itu, parameter lain yang dapat mempengaruhi kecenderungan penurunan suhu pada biobriket 100% biomassa tidak jauh berbeda dengan biobriket 75% biomassa adalah faktor kekasaran biobriket. Biobriket dengan campuran 100% biomassa menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih besar dibanding dengan biobriket dengan komposisi 75% maupun 50%, disebabkan oleh penambahan biomassa. Kekasaran permukaan suatu material memiliki hubungan dengan porositas dari material tersebut, di mana semakin besar porositas material maka kekasaran permukaan rata-rata yang dihasilkan akan semakin besar (Sakai and Nakamura, 2005). Dengan tingkat kekasaran yang lebih tinggi maka biobriket 100% biomassa memiliki ukuran pori yang lebih besar. Ukuran pori yang besar ini berpengaruh pada paparan kandungan *ash* pada briket. Diduga dengan ukuran pori yang lebih besar maka paparan kandungan *ash* pada biobriket akan lebih besar sehingga panas yang ditransfer secara konveksi melalui aliran udara dari *blower* akan lebih banyak terserap pada *ash* dibanding karbon. Namun, dengan alasan yang telah dijelaskan di atas mengenai kandungan *ash* pada biomassa tandan kosong kelapa sawit yang rendah, maka pengaruh ini tidak sampai membuat waktu ignisi biobriket dengan komposisi 100% lebih lama dibanding biobriket dengan komposisi 75%

4.5.2 Pengaruh Kecepatan Superfisial terhadap Waktu Penyalaan

Untuk menginvestigasi pengaruh kecepatan superfisial terhadap waktu penyalaan dan fenomena pembakaran yang terjadi akan dibandingkan grafik temperatur penyalaan tiap komposisi pada tiap kecepatan *blower* seperti berikut,



Gambar 4. 9 Temperatur Penyalaan pada Masing-masing Kecepatan Superfisial untuk Tiap Komposisi Biobriket.

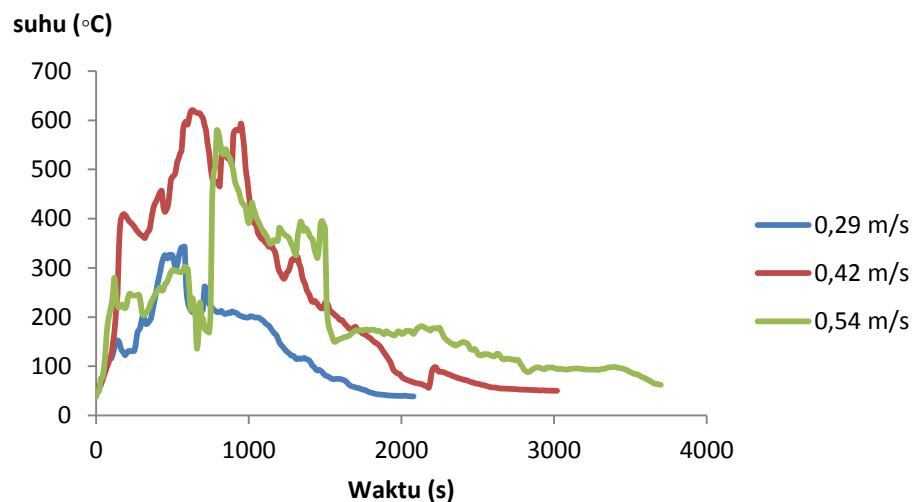
Pada Gambar 4.9 di atas, dapat diperhatikan bahwa dengan meningkatnya kecepatan superfisial akan menurunkan waktu penyalaan biobriket. Hal ini berkaitan dengan turbulensi yang dihasilkan dari peningkatan kecepatan superfisial. Ketika kecepatan udara yang disuplai *blower* semakin meningkat, yang berarti kecepatan superfisial di dalam kompor meningkat, maka turbulensi yang terjadi juga semakin besar. Turbulensi yang semakin besar memberi dampak perpindahan panas secara konveksi dari pellet promotor ke briket pemasakan menjadi semakin besar. Turbulensi yang terjadi akibat peningkatan kecepatan *blower* mengakibatkan awan *volatile matters* yang terbentuk pada pellet promotor akibat proses devolatilisasi menjadi terpecah sehingga oksigen eksternal yang disuplai dari udara luar dapat menyentuh briket. Akibat dari fenomena ini adalah oksigen dapat membantu ignisi briket pemasakan yang berakibat singkatnya waktu penyalaan.

Selain pengaruh kecepatan superfisial, singkatnya waktu ignisi dari pembakaran biobriket ini juga dipengaruhi oleh bentuk biobriket yang diberi *dimples*. *Dimples* adalah cekukan yang dibuat pada biobriket pemasakan dengan tujuan memberi pengaruh turbulensi pada udara yang dilewatkannya. Adanya *dimples* pada biobriket yang dikombinasikan dengan kekasaran yang ditimbulkan dari penambahan

biomassa pada biobriket memberikan pengaruh penurunan turbulensi sehingga dapat memecah awan *volatile matters* yang mengakibatkan oksigen dapat kontak dengan karbon pada briket dan membantu penyalaaan briket.

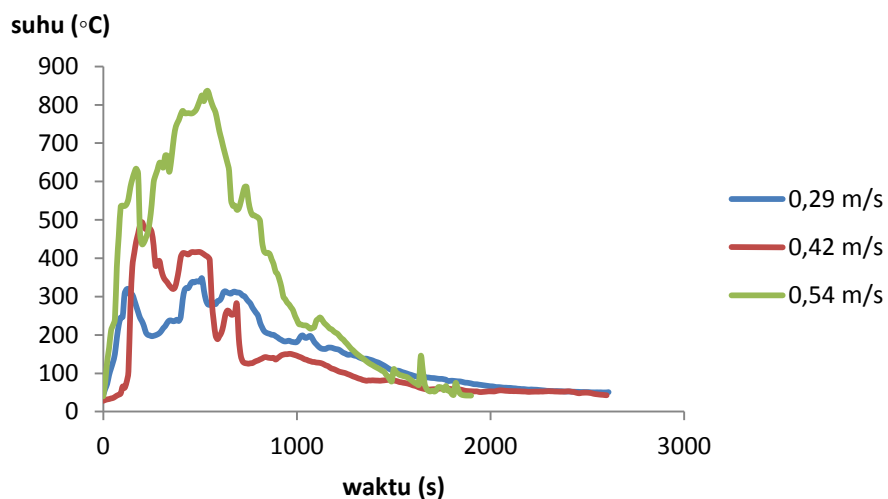
Jika dibandingkan berdasarkan kecepatan superfisial seperti pada grafik pada Gambar 4.9 diketahui bahwa pada komposisi 100% biomassa waktu ignisi pada kecepatan 0,54 m/s sedikit lebih lambat dibanding waktu ignisi pada kecepatan 0,42 m/s. Hal ini erat kaitannya dengan kandungan abu yang terkandung di dalam biomassa. Seperti penjelasan untuk Gambar 4.8 mengenai kandungan *ash* dalam biobriket, maka dengan pori-pori yang lebih besar dan komposisi *ash* yang lebih banyak didukung oleh kecepatan superfisial yang lebih besar (0,54 m/s) mengakibatkan penyerapan panas oleh *ash* menjadi lebih besar sehingga berpengaruh pada kecepatan penyalaaan dari biobriket. Jika sebelumnya dibandingkan berdasarkan komposisi, kandungan *ash* tidak sampai memberikan pengaruh meningkatnya waktu penyalaaan, untuk kecepatan 0,54 m/s konduksi panas oleh *ash* di dalam biobriket memberi pengaruh yang cukup untuk meningkatkan waktu penyalaaan biobriket dengan komposisi 100% biomassa.

Selain mempengaruhi waktu ignisi kecepatan superfisial juga dapat mempengaruhi temperatur pembakaran biobriket.



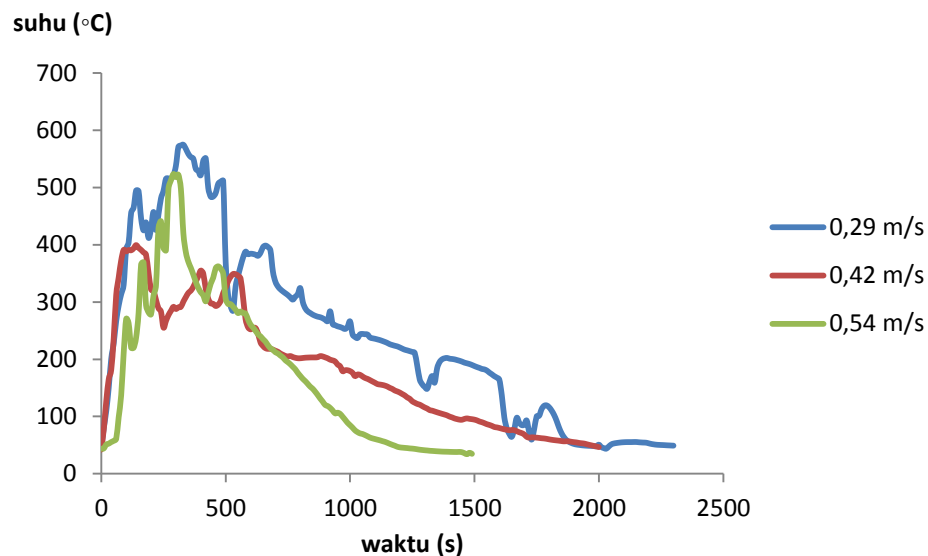
Gambar 4. 10 Temperatur Unggun pada Komposisi 50% Biomassa

Dengan melihat grafik pada Gambar 4.10 diketahui bahwa temperatur pembakaran tertinggi terjadi pada kecepatan udara pada *blower* sebesar 0,42 m/s. Besar dugaan pada kecepatan 0,42 m/s aliran udara terjadi cukup stabil dimana pada kondisi ini, suplai oksigen tercukupi dan efek *quenching* yang terjadi akibat tingginya kecepatan *forced draft* tidak terlalu besar karena pada kecepatan ini turbulensi yang dihasilkan sifatnya menengah. Pada kecepatan 0,54 m/s efek *quenching* terjadi lebih besar dibanding efek turbulensi yang dihasilkan dari tingginya kecepatan aliran udara pada *blower*. Fenomena ini dapat terjadi karena komposisi biobriket yang memiliki kandungan batubara lebih banyak dimana diketahui bahwa batubara memberi efek kekasaran yang kurang jika dibanding dengan biomassa. Permukaan biobriket yang tidak lebih kasar ini mengakibatkan aliran udara dengan kecepatan tinggi yang melewatinya memiliki turbulensi yang lebih rendah sehingga yang lebih dominan adalah pengaruh *quenching* yang mengakibatkan penurunan temperatur pembakaran. Pada Gambar 4.10 diketahui bahwa untuk kecepatan superfisial 0,29 m/s temperatur pembakaran terpantau paling rendah diantara ketiga kecepatan lainnya. Hal ini disebabkan suplai oksigen yang tidak tercukupi dan rendahnya efek turbulensi yang diberikan akibat kecepatan superfisial yang rendah. Dengan rendahnya oksigen yang tersuplai ke dalam kompor mengakibatkan reaksi pembakaran bahan bakar tidak berlangsung sempurna dan menghasilkan temperatur tinggi.



Gambar 4. 11 Temperatur Unggun pada Komposisi Biobriket 75% Biomassa pada Tiap Kecepatan *Blower*

Dari grafik pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa temperatur pembakaran tertinggi dicapai pada kecepatan 0,54 m/s. Besar dugaan disebabkan oleh kekasaran permukaan briket yang berakibat pada peningkatan turbulensi aliran udara. Dengan peningkatan turbulensi udara maka panas yang ditransfer sebagai panas konveksi akan semakin besar, dimana perpindahan panas secara konveksi akan semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan reynolds dari suatu aliran (Borman and Ragland, 1981), sehingga temperatur pembakaran yang terakumulasi menjadi lebih tinggi. Temperatur terendah dicapai pada kecepatan 0,29 m/s yang diakibatkan rendah turbulensi akibat kecepatan aliran udara pada *blower* yang rendah pula. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan alasan seperti di atas.



Gambar 4. 12 Temperatur Unggun pada Komposisi Biobriket 100% Biomassa pada Tiap Kecepatan *Blower*

Fenomena temperatur pembakaran tertinggi yang dicapai pada kecepatan 0,29 m/s diakibatkan pada komposisi biobriket 100% biomassa, kandungan *ash* yang dimiliki oleh biobriket semakin besar sehingga lebih sensitif terhadap kenaikan kecepatan udara pada *blower*. Pada kecepatan 0,42 m/s turbulensi yang dihasilkan tidak cukup mengimbangi pengaruh besarnya konduktivitas abu akibat pembakaran sehingga panas pembakaran akan lebih banyak terserap oleh abu. Kemudian suhu pembakaran meningkat kembali pada kecepatan 0,54 m/s diakibatkan efek turbulensi yang dihasilkan mampu mengimbangi pengaruh produksi abu yang lebih cepat

terbentuk akibat kenaikan kecepatan aliran udara karena pembakaran *volatile matters* menjadi lebih cepat dengan kenaikan kecepatan udara.

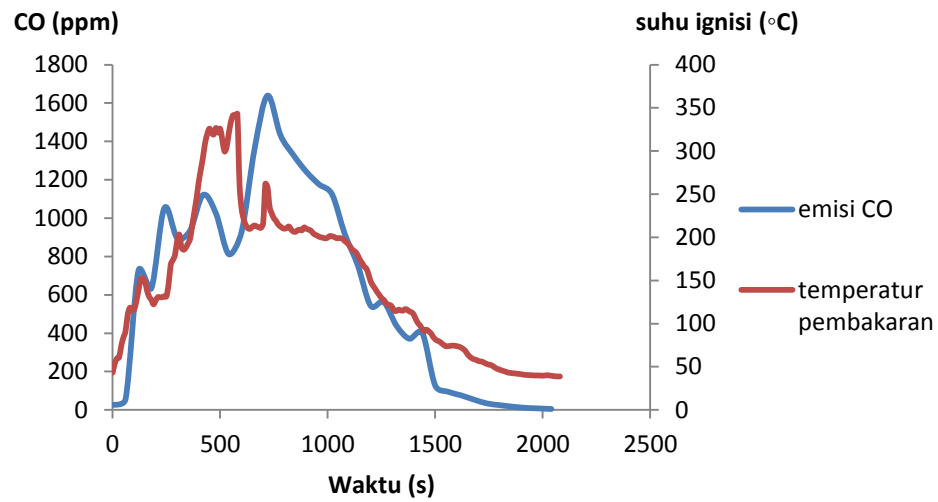
Melihat grafik pada Gambar 4.10; 4.11; dan 4.12 mengenai profil temperatur unggun terhadap waktu pembakaran, diketahui bahwa unggun biobriket sangat aktif. Dikatakan aktif karena briket dalam unggun dapat dengan mudah mengalami reposisi unggun yang disebabkan selesainya pembakaran pada salah satu briket. Suplai udara pada kompor yang tidak merata mengakibatkan pembakaran biobriket di dalam kompor tidak seragam. Ketika salah satu sisi telah selesai mengalami pembakaran, susunan biobriket di dalam kompor akan dapat dengan mudah berubah yang mengakibatkan suhu yang terekam oleh data logger menjadi fluktuatif. Seperti dilihat pada Gambar 4.10; 4.11; dan 4.12, temperatur unggun mengalami fluktuasi yang disebabkan reposisi bahan bakar akibat tipe unggun yang aktif.

4.6 Pengukuran Emisi Pembakaran

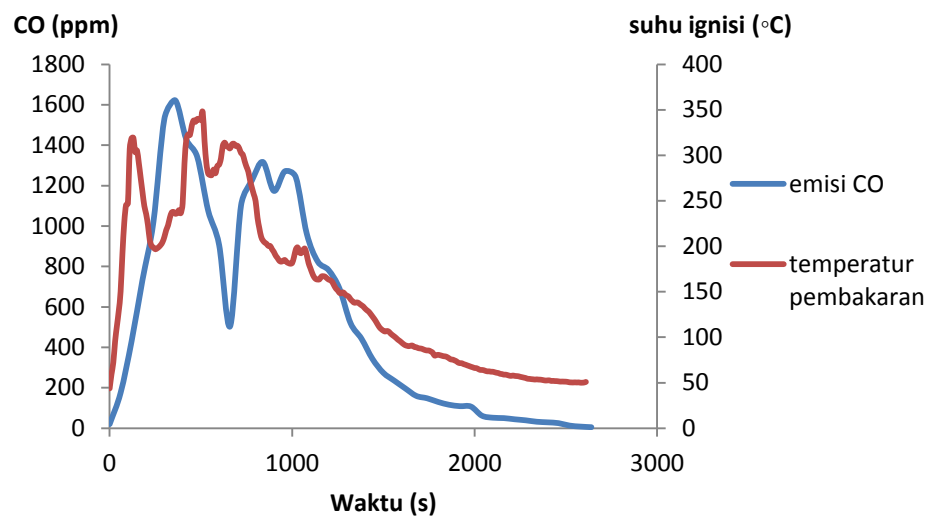
Pada bagian ini akan dibahas pengaruh komposisi biomassa dan kecepatan superfisial terhadap emisi pembakaran yang dihasilkan dari pembakaran biobriket. Dalam hal ini emisi pembakaran yang akan dibahas adalah emisi gas CO yang merupakan zat yang tidak diinginkan dari pembakaran selain karena karakteristik zat CO yang berbahaya bagi kesehatan, gas CO mengindikasikan bahwa pembakaran tidak terjadi secara sempurna (*rich fuel*). Variasi yang akan dibandingkan pada penelitian ini adalah 100% biomassa; 75% biomassa : 25% batubara; 50% biomassa : 50% batubara. Kecepatan superfisial yang dibandingkan pada penelitian ini adalah 0,29 m/s; 0,42 m/s; dan 0,54 m/s.

4.6.1 Fenomena Pembentukan Emisi CO pada Proses Pembakaran terhadap Temperatur Pembakaran.

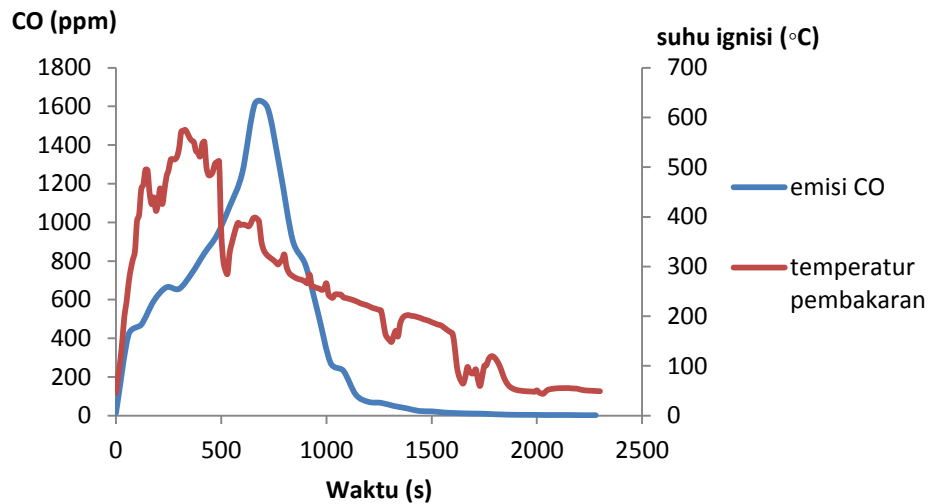
Untuk mengetahui fenomena pembentukan CO pada tiap pembakaran, dilakukan evaluasi pembentukan CO pada tiap komposisi dibandingkan dengan temperatur pembakaran.



(a)



(b)



(c)

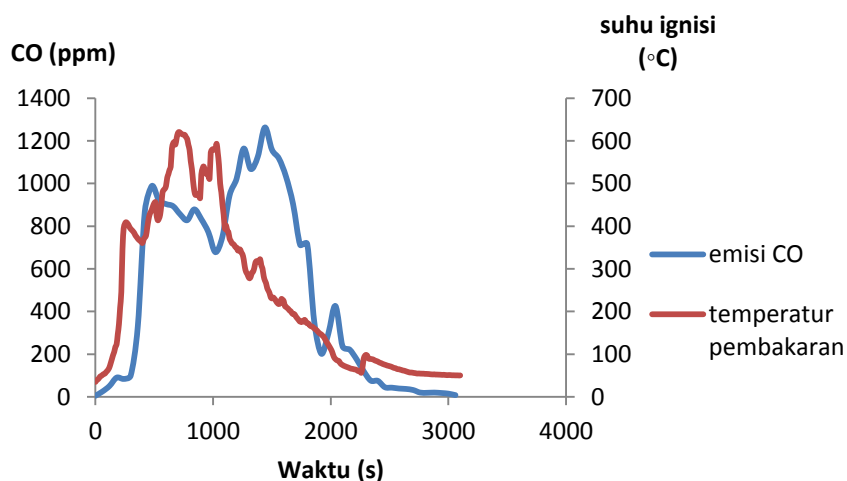
Gambar 4. 13 Emisi Pembakaran pada Kecepatan 0,29 m/s: (a) 50% Biomassa, (b) 75% Biomassa, (c) 100% Biomassa

Secara umum berdasarkan Gambar 4.13 diketahui profil emisi CO terhadap komposisi pada satu kecepatan superficial yang tetap, yaitu 0,29 m/s. Dari ketiga grafik perbandingan antara emisi CO yang dihasilkan, ketiganya memiliki kecenderungan yang fluktuatif sepanjang pembakaran. Namun, dari ketiganya, dapat ditarik kesimpulan bahwa emisi CO mencapai puncak tertinggi setelah mencapai temperatur ignisinya. Berdasarkan fenomena pembakaran yang terjadi, di mana di awal pembakaran temperatur naik karena promotor, sebagai sumber panas, diberi aliran udara yang selain berfungsi sebagai suplai oksigen juga berfungsi untuk membantu transfer panas yang dimiliki oleh promotor. Temperatur terus naik disebabkan aliran udara yang dialirkan kemudian memberi suplai oksigen eksternal yang dapat membantu pembakaran sehingga menghasilkan panas yang digunakan untuk menguapkan kadar air dan *volatile matters* yang dimiliki oleh briket pemasakan. Fenomena ini terjadi di awal pembakaran ketika suhu pembakaran masih rendah hingga mencapai suhu ignisi. Ketika grafik telah menunjukkan suhu tertinggi yang menandakan bahwa kandungan air dari biobriket telah habis teruapkan dan panas hasil pembakaran *volatile matters* mulai mengarah pada pembakaran *char*. Pada saat inilah pada umumnya temperatur beranjak naik dan produksi CO rendah.

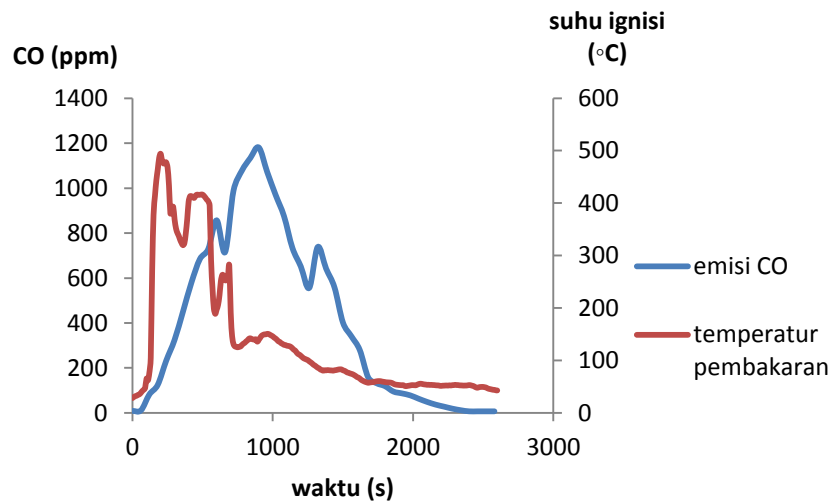
Hal ini disebabkan pembakaran telah memasuki fasa pembakaran sempurna. Sesaat setelah briket mencapai temperatur tertinggi, *volatile matters* mulai berkurang dan reaksi pembakaran terjadi pada permukaan char, di mana emisi pembakaran CO meningkat secara drastis karena pada fasa ini, pembakaran solid cenderung terjadi pada temperatur permukaan yang rendah akibat adanya panas yang terserap oleh volum briket yang besar serta panas yang terserap secara konduksi oleh ash yang mulai terpapar pada fasa ini. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa abu berpengaruh pada menurunnya temperatur pembakaran karena abu memiliki konduktivitas termal yang tinggi sehingga temperatur permukaan briket, temperatur pembakaran briket di dalam kompor rendah. Penurunan temperatur ini akan memberi pengaruh bagi kinetika reaksi pembentukan CO₂ dari CO.

Pada Gambar 4.13 (a), di awal pembakaran temperatur mengalami fluktuasi yang disebabkan oleh distribusi udara yang tidak merata dari *blower* serta pada fasa ini terjadi tahap penguapan kandungan air pada biobriket sehingga panas yang disuplai oleh promotor untuk pembakaran *volatile matters* terserap sebagian dan menjadikan tidak terjadi pembakaran secara sempurna dan produksi CO meningkat. Distribusi udara yang tidak merata diduga mempengaruhi fluktuasi emisi CO yang terjadi selama pembakaran. Penurunan emisi CO di awal pembakaran diduga mengakibatkan adanya pencampuran emisi CO yang dihasilkan dengan udara yang dilewatkan pada briket pemasakan sehingga terjadi penurunan emisi CO secara tiba-tiba dalam waktu singkat. Namun, sesaat setelah pembakaran mencapai temperatur ignisi, maka produksi CO mulai menurun. Hal ini disebabkan kandungan air pada briket telah habis teruapkan didukung dengan reposisi briket yang telah mencapai keadaan stabil sehingga distribusi udara lebih merata dibanding sebelumnya. Pada kondisi ini, aliran udara telah mampu memecah awan *volatile matters* yang terbentuk di permukaan briket sehingga pembakaran telah mencapai fasa pembakaran sempurna. Setelah oksigen eksternal mampu menyentuh permukaan briket terjadi reaksi antara *volatile matters* yang telah terbakar dengan oksigen eksternal sehingga temperatur unggun menjadi lebih tinggi dan kadar CO yang dilepaskan menjadi lebih rendah. CO kembali meningkat ketika zat *volatile* mulai habis terbakar. Hal ini

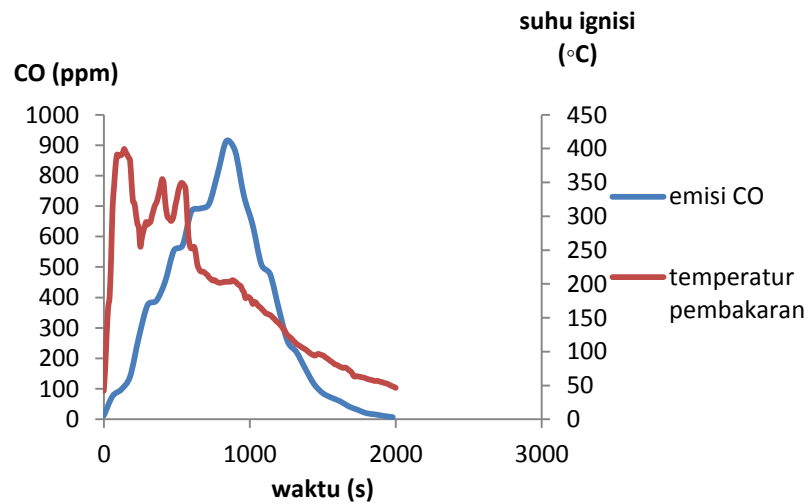
disebabkan pembakaran pada fasa solid berada pada temperatur rendah. Ketika komponen *volatile matters* mulai habis pembakaran terjadi pada char. Pembakaran char diikuti dengan transfer panas secara konduksi oleh volum briket. Transfer panas ini mengakibatkan temperatur permukaan briket turun dan kadar CO kembali meningkat karena reaksi konversi CO menjadi CO₂ tidak cukup mendapat energi yang disebabkan turunnya temperatur permukaan briket. Penurunan temperatur ini juga disebabkan mulai terpaparnya abu. Seperti telah dijelaskan di atas, abu memberi pengaruh pada penurunan temperatur pembakaran. Setelah mengalami kenaikan, emisi CO kemudian terlihat turun secara gradual disebabkan oleh kandungan *fixed carbon* yang mulai berkurang. Hal ini disebabkan oleh fenomena di akhir pembakaran, di mana pada saat ini terjadi pengurangan massa *char*. Luas permukaan char sebagai tempat berlangsung dan sumber produksi CO akan semakin berkurang sedangkan, pasokan udara tetap laju alirnya sehingga konsentrasi CO di akhir akan menjadi berkurang seiring berjalannya waktu. Gambar 4.13 (b) emisi CO sempat mengalami penurunan drastis disebabkan pembakaran *char* kembali terjadi. Hal ini disebabkan pembakaran briket terjadi tidak *uniform* karena distribusi aliran udara yang tidak merata. Gambar 4.13 (c) menunjukkan bahwa puncak emisi CO terjadi di akhir pembakaran. Dimana pada fenomena ini faktor keberadaan abu sebagai bentuk akhir pembakaran biobriket memberi pengaruh besar bagi penurunan temperatur pembakaran yang membawa dampak lambatnya konversi CO menjadi CO₂.



(a)



(b)



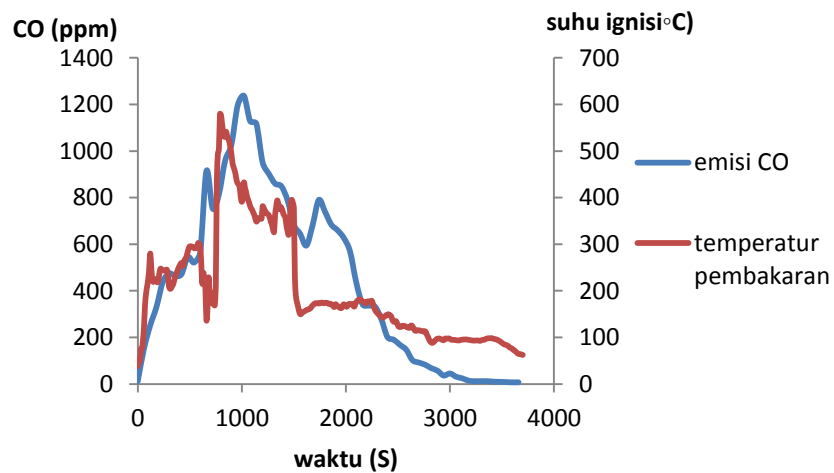
(c)

Gambar 4. 14 Emisi Pembakaran di Kecepatan 0,42 m/s: (a) 50% Biomassa, (b) 75% Biomassa, (c) 100% Biomassa

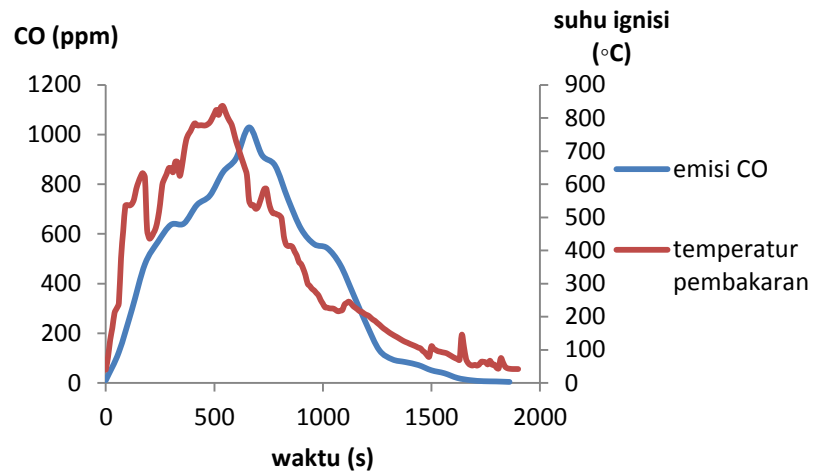
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.14 diketahui bahwa pembakaran biobriket pada komposisi 50%, 75%, dan 100% pada kecepatan superfisial 0,42 m/s memiliki kecenderungan yang hampir sama, yaitu puncak konsentrasi CO terjadi setelah pembakaran dimana fenomena yang terjadi telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya pada kecepatan 0,29 m/s. Fenomena yang sedikit berbeda terjadi pada Gambar 4.14 (a), di mana terdapat fluktuasi temperatur pembakaran terhadap emisi CO yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan adanya reposisi briket di dalam kompor.

Setelah briket berada pada posisi yang stabil, pembakaran briket kembali terjadi dan ditunjukkan pada kenaikan temperatur. Puncak konsentrasi CO terjadi setelah pembakaran mencapai suhu tertingginya dimana pada saat itu, diduga abu mulai terpapar oleh perpindahan pada pembakaran char yang mengakibatkan penurunan suhu permukaan briket dan memperlambat kinetika reaksi konversi CO menjadi CO₂.

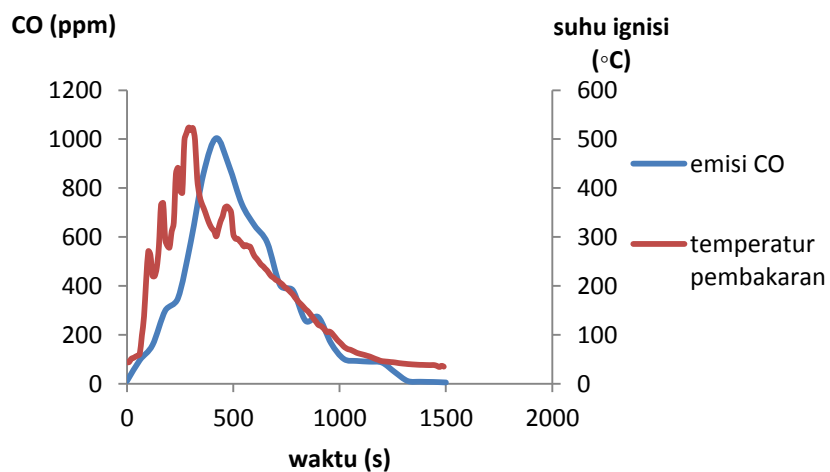
Pada Gambar 4.14 (a) terlihat fluktuasi nilai CO terhadap temperatur pembakaran. Fluktuasi nilai CO terhadap temperatur pembakaran ini memang tidak dapat mewakili secara detail terhadap apa yang terjadi pada kompor karena pengukuran temperatur dilakukan secara lokal pada suatu area pembakaran sedangkan emisi CO yang terbentuk merupakan gabungan dari seluruh proses pembakaran di dalam kompor sehingga untuk dapat meninjau lebih lanjut mengenai emisi CO dan parameter yang divariasikan, digunakan emisi CO rata-rata yang terbentuk selama pembakaran.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 15 Emisi Pembakaran di Kecepatan 0,54 m/s: (a) 50% Biomassa, (b) 75% Biomassa, (c) 100% Biomassa

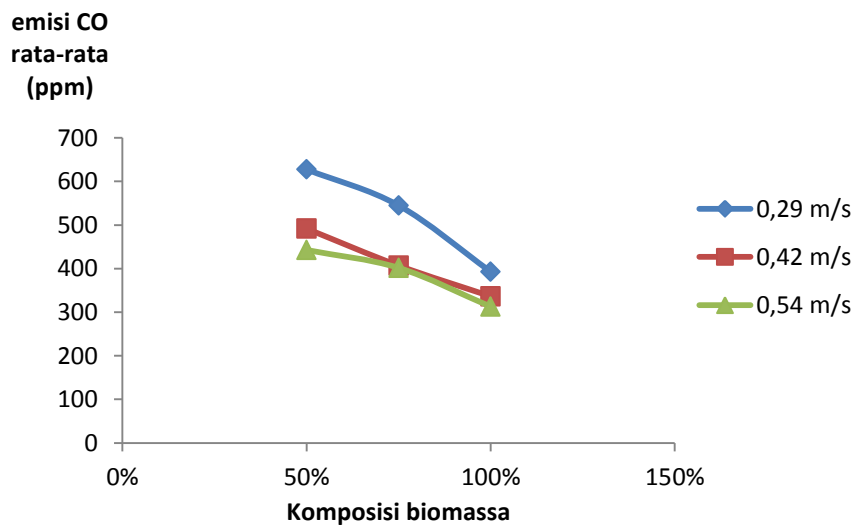
Berdasarkan Gambar 4.15 diketahui bahwa puncak emisi CO terjadi setelah pembakaran mencapai temperatur tertinggi dari unggun. Dimana pada saat itu, dianggap briket telah melewati masa pembakaran sempurna dan abu mulai terbentuk sebagai hasil akhir pembakaran. Seperti pada penjelasan sebelumnya, abu berpengaruh terhadap penurunan suhu permukaan briket selain dari penyerapan panas oleh volum briket itu sendiri.

4.6.2 Pengaruh Komposisi biomassa pada Biobriket terhadap Emisi CO

Untuk mengetahui pengaruh komposisi biomassa terhadap emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran biobriket dapat dianalisa dari emisi CO rata-rata yang dihasilkan serta puncak emisi CO dari tiap pembakaran. Ringkasan mengenai emisi CO rata-rata dan puncak emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran dijabarkan pada Tabel 4.4 berikut,

Tabel 4. 4 Rerata dan Puncak Emisi CO pada Tiap Komposisi dan Kecepatan Flow Udara

kecepatan <i>forced updraft</i>	50% biomassa		75% biomassa		100% biomassa	
	CO tertinggi (ppm)	CO rata-rata (ppm)	CO tertinggi (ppm)	CO rata-rata (ppm)	CO tertinggi (ppm)	CO rata-rata (ppm)
0,29 m/s	1639	627,57	1622	544,93	1614	393,03
0,42 m/s	1263	491,67	1134	406,95	914	336,38
0,54 m/s	1237	442,73	1029	401,72	1004	312,81



Gambar 4. 16 Pengaruh Komposisi Biomassa terhadap Emisi CO

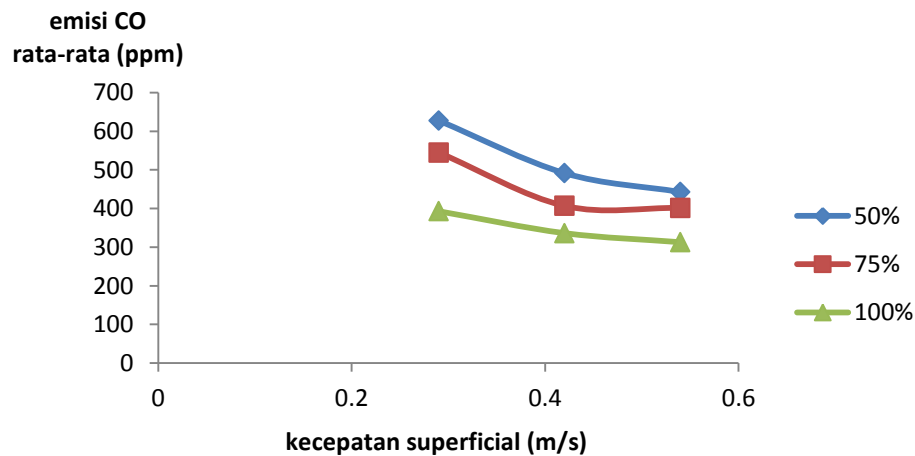
Berdasarkan Tabel 4.4 dan Gambar 4.16 dapat diketahui bahwa pada setiap kecepatan superfisial, semakin bertambahnya komposisi biomassa akan mengakibatkan rendahnya rata-rata emisi CO yang dihasilkan. Terdapat beberapa

faktor yang mempengaruhi rendahnya emisi CO pada komposisi biobriket 100% biomassa. Pertama, hal ini disebabkan kandungan *fixed carbon* yang dimiliki biomassa cukup rendah, di mana *fixed carbon* merupakan komponen utama pembentukan CO, sehingga dengan penambahan biomassa yang semakin besar pada biobriket akan semakin memperkecil emisi karbon yang dihasilkan. Kedua, fenomena penurunan emisi CO oleh penambahan komposisi biomassa pada biobriket dapat diakibatkan oleh kandungan *volatile matters* dari biobriket yang tinggi. Kandungan *volatile matters* yang tinggi dapat mengakibatkan panas awal untuk mencapai pembakaran sempurna lebih mudah tercapai. Selain dapat mempersingkat waktu ignisi, kandungan *volatile matters* yang tinggi berpengaruh terhadap pengkondisian reaksi konversi CO menjadi CO₂, yaitu dengan menaikkan temperatur pembakaran. Ketiga, pengaruh karakteristik biomassa, di mana biomassa memberikan efek kekasaran pada briket, sehingga udara yang dilewatkan pada susunan biobriket akan mengalami turbulensi dan meningkatkan perpindahan panas secara konveksi. Kekasaran pada biobriket dapat meningkatkan turbulensi aliran udara yang melewatinya, di mana turbulensi akan berpengaruh pada peningkatan nilai koefisien konveksi sehingga perpindahan panas secara konveksi akan lebih besar terjadi.

Berdasarkan Gambar 4.16 diketahui bahwa nilai emisi CO rata-rata pada tiap komposisi berada pada range 300-650 ppm dan berdasarkan Tabel 4.4 nilai tertinggi CO berada pada *range* 1004-1669 ppm. Nilai tertinggi tetap ditampilkan untuk mengetahui puncak tertinggi dari emisi CO karena nilai yang dirata-rata pada umumnya tidak dapat menggambarkan kondisi kenyataan nilai ppm CO tertinggi yang dapat dihasilkan oleh pembakaran biobriket. Dari grafik pada Gambar 4.16, diketahui bahwa komposisi biobriket 50% biomassa pada tiap kecepatan menghasilkan emisi CO tertinggi disebabkan oleh nilai *fixed carbon* yang besar, *volatile matters* yang lebih rendah, serta permukaan yang kekasarannya lebih rendah jika dibandingkan dengan dua komposisi lainnya. Nilai emisi CO tertinggi adalah 1669 ppm, nilai ini dihasilkan oleh pembakaran biobriket dengan komposisi 50% biomassa pada kecepatan superfisial 0,29 m/s dengan rata-rata nilai emisi CO 627,57 ppm.

4.6.2 Pengaruh Kecepatan Superfisial pada Emisi Pembakaran

Selain berdasarkan faktor komposisi biomassa pada biobriket, emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran juga dipengaruhi oleh kecepatan superfisial udara di dalam kompor. Kecepatan superfisial berpengaruh terhadap suplai oksigen eksternal untuk pembakaran biobriket serta turbulensi udara yang disuplai ke dalam kompor. Turbulensi berpengaruh terhadap perpindahan panas secara konveksi dari panas yang dihasilkan dari pembakaran promotor atau briket terhadap briket lainnya. Untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan superfisial terhadap emisi CO yang dihasilkan dipaparkan pada grafik berikut,



Gambar 4. 17 Pengaruh Kecepatan Superfisial terhadap Emisi CO

Dari grafik pada Gambar 4.17 diketahui bahwa peningkatan kecepatan superfisial berpengaruh terhadap penurunan rata-rata emisi CO yang dihasilkan dari pembakaran pada tiap komposisi biobriket. Fenomena ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, kenaikan kecepatan superfisial terkait dengan suplai oksigen ke dalam kompor yang semakin besar. dengan suplai oksigen yang semakin besar, reaksi pembakaran yang terjadi akan semakin mengarah pada kondisi stoikiometris. Suplai oksigen yang cukup dan mendekati kondisi stoikiometris dapat mengarahkan reaksi pembakaran ke arah reaksi pembakaran sempurna. Pada reaksi pembakaran sempurna, CO yang terbentuk menjadi rendah karena oksigen yang dibutuhkan untuk mengkonversi CO menjadi CO₂ tercukupi. Selain itu, pada

pembakaran sempurna, panas yang dihasilkan akan lebih besar sehingga kondisi reaksi untuk mengkonversi CO menjadi CO₂ terpenuhi. Untuk itu, pada kecepatan yang semakin tinggi, konsentrasi CO rata-rata yang dihasilkan menjadi semakin rendah. Kedua, kecepatan superfisial yang semakin tinggi berpengaruh pada turbulensi yang dihasilkan dari aliran udara tersebut. Turbulensi banyak dipengaruhi oleh bilangan Reynolds dari sebuah aliran fluida. Bilangan Reynolds ditentukan oleh kecepatan aliran fluida dalam hal ini adalah udara. Bilangan Reynold yang besar akan berpengaruh pada kenaikan koefisien konveksi. Dengan besarnya nilai koefisien konveksi berarti panas yang dipindahkan secara konveksi akan semakin besar. Ketika semakin besar panas konveksi yang ditransferkan pada permukaan briket maka temperatur permukaan briket akan semakin besar, kondisi ini mendukung terjadinya reaksi konversi CO menjadi CO₂ pada kompor briket.

Dari grafik pada Gambar 4.17 diketahui bahwa kecepatan superfisial 0,29 m/s memberikan pengaruh terhadap pembentukan CO terbesar pada pembakaran dilihat dari rata-rata CO yang terbentuk. Hal ini diakibatkan udara dengan kecepatan superfisial ini tidak mampu memberikan suplai oksigen yang cukup untuk proses pembakaran serta udara yang dialirkan pada kecepatan superfisial ini tidak mampu memberi pengaruh turbulensi yang cukup untuk dapat menghantarkan panas secara konveksi dari hasil pembakaran biobriket.

Dengan menggunakan penjelasan di atas, dapat ditarik kesimpulan mengenai paduan komposisi biomassa dalam biobriket dan kecepatan superfisial dalam kompor yang menghasilkan emisi CO terendah. Berdasarkan data pada Tabel 4.4 dapat direkomendasikan paduan biomassa 100% pada biobriket yang dibakar pada kompor dengan kecepatan superfisial 0,42 m/s akan memberikan nilai rata-rata CO yang rendah, yaitu 336, 86 ppm dengan nilai CO maksimum 914 ppm.

4.7 Pengukuran Efisiensi Termal Pembakaran

Efisiensi Termal adalah perbandingan suhu yang diterima dengan suhu pada ruang bakar dan suhu input (Ahmad, Pudjiono et al., 2011). Pada efisiensi termal, suhu dalam pembakaran sangat berkaitan dengan energi yang dikeluarkan sehingga

dapat dikatakan bahwa efisiensi termal pembakaran merupakan perbandingan energi yang diterima dengan energi yang dimiliki pada setiap kali pembakaran. Pengukuran efisiensi termal pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *water boiling pot*. *Water boiling pot* dianggap sebagai metode paling sederhana dalam penentuan efisiensi termal pembakaran. Metode ini juga dianggap telah mampu mewakili semua panas yang diterima oleh *water pot* terhadap panas pembakaran yang dimiliki. Untuk menentukan efisiensi termal dengan menggunakan metode *water boiling pot* dapat digunakan persamaan seperti persamaan 3.1 di atas,

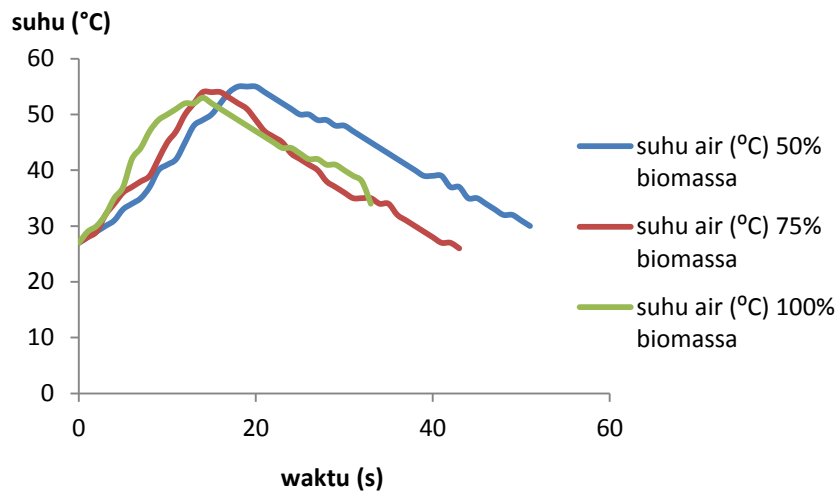
$$\eta = \frac{M \times c_{p(\text{air})} \times (T_b - T_a) + M_1 \times c_{p(\text{bejana})} \times (T_b - T_a) + M_2 \times H_L}{H_c \times W} \quad (3.1)$$

Pada metode ini, terdapat empat jenis panas yang diperhitungkan yaitu panas sensibel yang diterima air untuk menguap, panas sensibel yang diterima bejana, panas laten yang dibutuhkan air untuk menguap, dan panas yang dimiliki bahan bakar (digunakan sebagai pembanding). Dalam kasus metode ini, terdapat sejumlah air yang teruapkan akibat proses pemasakan sehingga panas laten akan memberikan kontribusi besar dalam penentuan efisiensi termal pembakaran briket. Perhitungan data penyerapan panas terlampir pada LAMPIRAN 5.

Penelitian ini, fenomena yang terjadi adalah air yang dimasak di atas kompor pembakaran biobriket tidak sampai mendidih. Pengukuran efisiensi termal dengan menggunakan metode *water boiling pot* dilakukan pada kondisi adanya kontak langsung antara nyala api dengan *water pot* sehingga panas yang diberikan merupakan panas radiasi dari nyala api ke *water pot*. Dimana radiasi dari nyala api akan memberikan panas lebih besar dibanding panas konveksi yang ditransfer oleh *flue gas*. Pada penelitian ini diamati bahwa nyala api berada jauh dibawah *water pot* sehingga panas yang ditransfer ke *water pot* merupakan panas yang dibawa *flue gas* ke bagian atas kompor karena adanya aliran udara secara paksa dari bawah kompor dengan menggunakan *blower*. Transfer panas ini dilakukan secara konveksi antara *flue gas* dengan *water pot* dan badan air.

Data yang didapat dari penelitian ini adalah data kenaikan temperatur air terhadap waktu dengan mempertimbangkan massa air yang digunakan untuk

pemanasan. Data efisiensi termal diambil pada salah satu kecepatan dengan mengasumsikan efisiensi termal pembakaran tidak banyak dipengaruhi oleh faktor kecepatan aliran udara pada *blower*. Dalam hal ini kecepatan yang dipilih adalah kecepatan 0,42 m/s. Dimana pada kecepatan ini dinilai sebagai kecepatan yang stabil dimana efek *quenching* dan turbulensi bersifat saling meniadakan. Berikut adalah profil suhu tiap komposisi pada kecepatan superfisial 0,42 m/s.



Gambar 4. 18 Profil Kenaikan Temperatur Air pada Pengukuran Efisiensi Termal.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.18 diketahui bahwa pada pembakaran tiap komposisi biobriket, temperatur air akan mengalami kenaikan hingga suatu titik tertentu, dalam penelitian ini kisaran titik puncak temperatur air adalah 50-54°C. Setelah mencapai titik puncak, temperatur kemudian akan turun secara gradual hingga pembakaran biobriket selesai. Profil suhu air pada *water pot* ini dipengaruhi oleh dua transfer panas, yaitu konveksi paksa dari bahan bakar menuju badan air dan konveksi alami dari badan air ke ambient. Hal ini dipengaruhi oleh metode pengambilan data temperatur air dengan membiarkan adanya kontak langsung air dengan udara *ambient* sehingga sangat memungkinkan terjadi perpindahan panas secara konveksi dari badan air ke udara. Adanya konveksi panas alami dari badan air ke udara mengakibatkan pengurangan panas yang diterima air yang berpengaruh terhadap kenaikan temperatur air. Ketika di awal pembakaran temperatur air mengalami kenaikan yang terjadi adalah panas yang diberikan dari bahan bakar ke

badan air secara konveksi paksa lebih besar dibanding panas yang dilepaskan oleh air ke udara *ambient*. Hal ini disebabkan oleh *driving temperature* di dalam kompor jauh lebih besar dari pada di *ambient*. Fenomena yang sebaliknya terjadi ketika pada Gambar 4.18 terlihat penurunan suhu air setelah mencapai suhu tertingginya. Hal ini disebabkan *driving temperature ambient* menjadi lebih besar dibanding *driving temperature* di dalam kompor yang diakibatkan pembakaran mulai memasuki fasa pembakaran *char* dimana permukaan char terdiri dari *fixed carbon* dan *ash*. Di akhir fase pembakaran, selain terjadi pengurangan bahan bakar sehingga panas yang dihasilkan berkurang, juga terjadi pembentukan abu. Dalam hal ini, abu bersifat menyerap panas lebih besar dibanding karbon karena nilai konduktivitas termalnya yang lebih tinggi dibanding konduktivitas termal karbon sehingga sebagian besar panas diserap oleh abu.

Selain itu, di awal pembakaran, temperatur naik secara perlahan disebabkan panas yang transfer dari pellet promoter ke briket terlebih dahulu digunakan untuk menguapkan air yang terkandung pada biobriket. Untuk itu, perhitungan efisiensi termal untuk penelitian ini dilakukan dengan menggunakan persamaan,

$$\eta = \frac{Q_{diterima}}{Q_{dihasilkan}} \quad (4.1)$$

Dengan Q yang diterima merupakan akumulasi dari panas sensibel yang diterima air berdasarkan kenaikan temperatur per satuan waktu, panas yang diterima oleh pot air, dan panas yang dilepaskan ke udara melalui konveksi bebas. Sedangkan Q yang dihasilkan merupakan Q bersih setelah dikurang, panas yang digunakan untuk menguapkan air pada briket dan panas yang diserap oleh abu. Dengan data perhitungan konveksi bebas mengacu pada perhitungan konveksi bebas untuk pelat horizontal (Holman, 1986). Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan di atas, didapat nilai efisiensi termal pembakaran biobriket seperti tertera pada table 4.7 berikut,

Tabel 4. 5 Data Perhitungann Efisiensi Panas Pembakaran Biobriket pada Kecepatan 0,42 m/s

Komposisi	Efisiensi Panas Pembakaran (%)
50% TKKS	1,27
75% TKKS	1,17
100% TKKS	1,12

Berdasarkan data pada Tabel 4.5 diketahui bahwa nilai efisiensi panas pembakaran biobriket sangat kecil. Nilai efisiensi panas pembakaran hanya berkisar 1,1-1,2 %. Hal ini jauh sekali dibanding efisiensi termal tungku briket batubara yang berkisar pada angka 31,41% (Supriyatno, 2010). Beberapa faktor yang diinvestigasi dapat mempengaruhi kecilnya nilai efisiensi panas pembakaran ini, yaitu tipe sumber panas yang dihasilkan dari pembakaran, jarak antara bahan bakar dengan *water pot*, luas bidang pot, tipe bahan bakar, dan insulasi kompor.

Tipe sumber panas yang digunakan dapat mempengaruhi nilai panas yang ditransfer. *Flue gas* yang ditransfer secara konveksi pada dinding pot memiliki suhu jauh lebih rendah dibanding panas yang ditransfer oleh nyala api. Hal ini disebabkan, suhu *flue gas* jauh lebih rendah dibanding suhu nyala api. Rendahnya suhu *flue gas* disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari pembakaran sebagian terserap oleh briket secara konduksi untuk pembakaran material di dalam briket. Hal ini mengakibatkan temperatur *flue gas* turun. Turunnya temperatur *flue gas* dipengaruhi pada turunnya temperatur unggun. Hal ini tentu mempengaruhi besar panas yang dipindahkan oleh bahan bakar karena panas yang dipindahkan telah mengalami kehilangan (*loss*) yang disebabkan faktor-faktor lain di luar kinetika pembakaran itu sendiri yang mengakibatkan turunnya suhu *flue gas*. Selain itu, jarak antara bahan bakar dengan *water pot* memberikan pengaruh tambahan dimana dengan jarak yang semakin jauh maka kesempatan panas untuk hilang diperjalanan akan semakin besar. Luas bidang pot sedikit banyak mempengaruhi efisiensi termal pembakaran. Semakin luas bidang pot akan semakin banyak panas yang diterima oleh *water pot*. Dengan kata lain semakin besar efisiensi termal pembakarannya. Tipe bahan bakar juga mempengaruhi

kecilnya efisiensi termal dari pembakaran. hal ini berkaitan dengan volum briket/massa briket yang lebih kecil dibanding volum/massa pellet sehingga panas yang terserap ke dalam massa briket akan lebih besar jika dibandingkan dengan pellet. Penyerapan panas yang besar dapat berpengaruh pada panas yang ditransfer pada *water pot*. Jika penyerapan panas oleh volum briket lebih besar maka akan menurunkan temperatur permukaan briket yang berakibat turunnya temperatur unggun dan *flue gas* yang ditransfer. Terakhir adalah bahan penyusun dinding kompor. Kompor pemasakan yang ada saat ini dipasaran didesain untuk mengkonversi bahan bakar menjadi energi panas sebesar 30-40%. Pada penelitian ini, kompor yang digunakan merupakan kompor batubara dengan insulasi yang terbuat dari campuran material alumina, di mana alumina memiliki nilai emisivitas yang bergantung pada temperatur pembakaran. Berdasarkan persamaan Stefan Boltzman mengenai radiasi panas,

$$H = e\sigma AT^4 \quad (4.2)$$

Dimana H = aliran kalor radiasi, e = emisivitas ($0 \leq e \leq 1$)

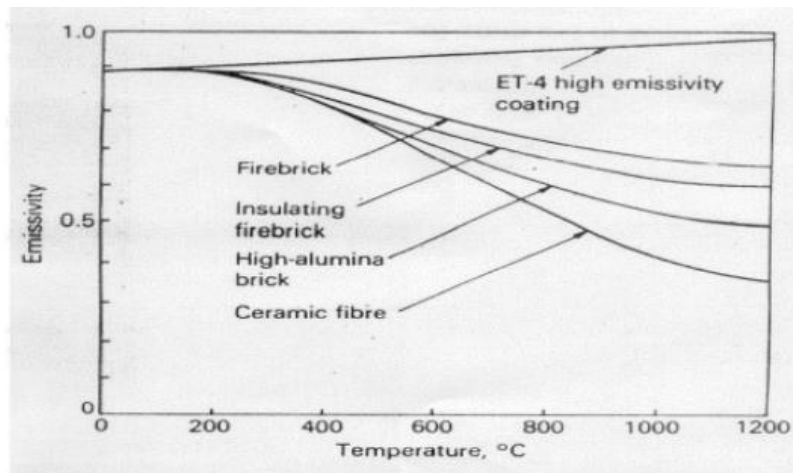
A = luas penampang (m^2)

Σ = konstanta Stefan Boltzman ($\sigma = 5.6699 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$) dan

T = temperatur (K)

Diketahui bahwa radiasi panas adalah pancaran energi dari suatu sumber kalor yang besarnya dipengaruhi oleh luas penampang benda yang beradiasi, temperatur benda yang mengeluarkan radiasi dan emisivitas (Holman, 1986). Emisivitas adalah karakteristik permukaan yang menggambarkan efektifitas permukaan beradiasi dibandingkan dengan “*black body*” atau permukaan ideal yang menerima emisi radiasi termal maksimum pada temperatur yang diberikan (Holman, 1986). Dalam kasus ini, panas yang dipancarkan secara radiasi akan sama dengan panas yang diserap secara radiasi oleh dinding kompor. Dengan mengacu pada persamaan (4.2) semakin besar emisivitas dari suatu bahan maka akan semakin besar panas yang terserap secara radiasi. Besarnya kehilangan panas yang diakibatkan oleh penyerapan radiasi oleh dinding kompor dapat dilihat dari nilai emisivitas bahan penyusun

dinding kompor. Pada penelitian ini, kompor yang digunakan tersusun atas dinding refraktori berbahan baku alumina (Al_2O_3). Berdasarkan Gambar 4.19 diketahui nilai emisivitas alumina bergantung pada suhu.

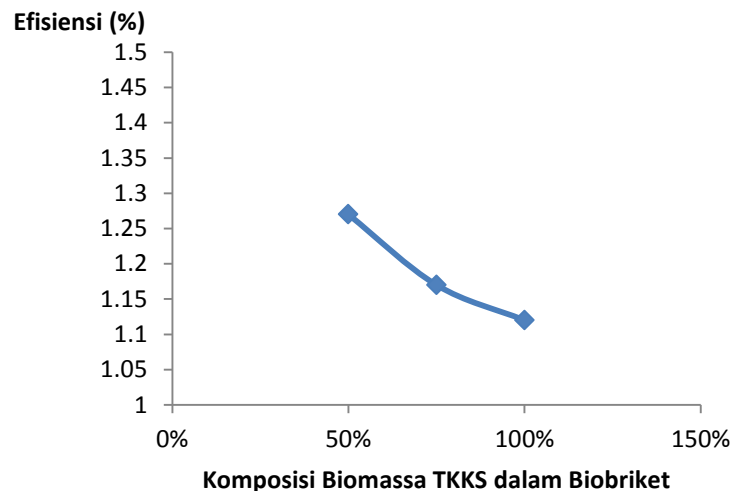


Gambar 4. 19 Emisivitas Bahan Refraktori pada Berbagai Suhu

(UNEP, 2006)

Dengan mengacu pada grafik pada Gambar 4.19 mengenai nilai emisivitas bahan refraktori dan dihubungkan dengan kondisi penelitian ini, di mana pembakaran terjadi pada *range* suhu 400-600 °C, diketahui bahwa refraktori yang terbuat dari campuran alumina memiliki nilai emisivitas dengan *range* 0,75-0,85. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran biomassa dengan batubara dengan komposisi biomassa > 50%. Untuk itu, panas pembakaran yang dihasilkan tidak terlalu tinggi mengingat kandungan *fixed carbon* dari biomassa yang rendah. Dari grafik pada Gambar 4.19 juga terlihat bahwa semakin rendah suhu maka nilai emisivitas akan lebih tinggi. Hal ini memperkuat dugaan bahwa adanya kehilangan panas yang disebabkan oleh penyerapan panas secara radiasi oleh dinding kompor pada pembakaran biomassa yang berlangsung pada suhu rendah. Penjelasan ini mampu menjawab fenomena yang diamati pada eksperimen, di mana suhu *flue gas* yang sampai ke dinding *water pot* jauh lebih rendah dibanding suhu nyala api yang terekam pada *data logger*.

Jika menarik kesimpulan dari data di atas, bahwa efisiensi termal banyak dipengaruhi oleh komposisi biomassa di dalam biobriket. Hal ini karena biomassa memiliki nilai kalor yang rendah sehingga akan berpengaruh pada panas yang dihasilkan dari pembakaran. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.20 berikut,



Gambar 4. 20 Grafik Perbandingan Komposisi Biobriket terhadap Efisiensi Termal

Diketahui bahwa dengan semakin bertambahnya komposisi biomassa dalam biobriket akan semakin menurunkan efisiensi termal pembakaran biobriket. Hal ini disebabkan biomassa memiliki nilai kalor yang rendah erat kaitannya dengan nilai *fixed carbon* yang rendah dan kadar *ash* yang tinggi. Hal ini yang menyebabkan biobriket dapat cepat menyala namun sangat sensitif terhadap perubahan kecepatan *blower* sehingga unggun akan cepat habis dan pembakaran tidak berlangsung dalam waktu yang lama. Meskipun dengan nilai kalor yang lebih kecil akan menghasilkan panas yang lebih kecil juga sehingga panas yang ditransfer akan semakin rendah namun penurunan nilai panas yang diterima oleh air tidak jauh signifikan jika dibandingkan penurunan nilai kalor yang dialami oleh biobriket ketika komposisi biomassa TKKS bertambah.

Selain dapat ditinjau dari penambahan biomassa secara proporsional terhadap nilai kalor material, perhitungan energi yang dihasilkan dari pembakaran dapat dilakukan dengan memperhitungkan dengan memanfaatkan data temperatur

pembakaran yang direkam pada penelitian ini. Dengan memodifikasi persamaan (4.3) menggunakan luas di bawah kurva suhu (T) terhadap waktu (t) serta massa *flue gas* dianalogikan dengan massa udara yang diinputkan maka akan didapat data nilai entalpi yang dihasilkan dari tiap pembakaran sebagai berikut,

$$Q = m \times c_{p(air)} \times \Delta T \quad (4.3)$$

Persamaan ini menggunakan massa udara yang diinput sebagai pendekatan terhadap massa flue gas yang dihasilkan dari pembakaran. Pendekatan ini dilakukan karena diketahui bahwa udara mengandung 79% nitrogen dan 21% oksigen, di mana dalam pembakaran, kedua unsure ini bereaksi dengan unsure karbon yang terkandung di dalam briket. Untuk itu, dapat dikatakan bahwa flue gas hasil pembakaran sebagian besar terdiri dari unsure nitrogen dan oksigen yang berasal dari udara yang dimasukkan ke dalam kompor. Temperature yang digunakan merupakan temperature relative, yaitu terhadap temperature ambient. Dengan demikian, nilai kapasitas panas yang digunakan merupakan nilai kapasitas panas pada temperature ambient, temperature yang digunakan sebagai basis. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan persamaan (4.3) dan asumsi serta pendekatan yang telah dilakukan, didapat nilai data entalpi seperti pada Tabel 4.6. Detail perhitungan entalpi dapat dilihat pada LAMPIRAN 7.

Tabel 4. 6 Data Entalpi Pembakaran

komposisi	Q (kkal) tiap kecepatan		
	0,29 m/s	0,42 m/s	0,54 m/s
50% TKKS	5052,194169	18860,30521	24431,77348
75% TKKS	5281,767869	10258,92089	44356,49132
100% TKKS	8780,403109	14092,88307	21580,29343

Berdasarkan Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 0,54 m/s memiliki entalpi pembakaran yang paling tinggi di antara dua kecepatan lainnya. Pada kecepatan 0,29 m/s pada setiap komposisi biomassa menghasilkan entalpi pembakaran terendah jika dibanding pada kecepatan 0,42 m/s dan 0,54 m/s. Hal ini dapat dipengaruhi oleh jumlah udara yang disuplai ke dalam kompor. Pada kecepatan tinggi dengan luasan dalam kompor yang tetap akan dihasilkan jumlah udara yang

disuplai lebih besar. Suplai udara yang besar akan sebanding dengan entalpi yang dihasilkan. Selain dipengaruhi oleh suplai udara ke dalam kompor, nilai entalpi yang besar juga dipengaruhi oleh temperatur pembakaran yang terekam pada saat pembakaran. Temperatur tinggi pada saat kecepatan tinggi dipengaruhi oleh transfer panas yang dilakukan antar briket. Perpindahan panas antar briket terjadi secara konveksi oleh bantuan aliran udara *blower*, dengan kecepatan udara yang semakin tinggi, perpindahan panas yang dilakukan akan semakin besar seperti dijelaskan pada LAMPIRAN 6 bahwa kecepatan 0,54 m/s memiliki bilangan reynold lebih besar dibanding dua kecepatan lainnya. Bilangan reynold yang besar akan berpengaruh pada koefisien perpindahan panas secara konveksi (h) seperti pada persamaan (4.4) dan (4.5) (Holman, 1986)

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.4)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (4.5)$$

Lebih jauh, nilai entalpi yang rendah pada kecepatan 0,29 m/s menunjukkan adanya panas yang hilang. Kehilangan panas ini menunjukkan adanya ketidakefisienan pembakaran. Pada laju alir udara yang rendah, udara yang disuplai untuk pembakaran tidak mampu mencukupi kebutuhan udara untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Dengan demikian, pembakaran akan lebih tidak sempurna dibandingkan dengan pembakaran yang terjadi pada kecepatan 0,42 m/s dan 0,54 m/s serta nyala api dari pembakaran menghasilkan panas radiasi. Seperti telah dibahas sebelumnya bahwa bahan penyusun dinding kompor briket ini tersusun dari material alumina yang memiliki nilai emisivitas tinggi pada suhu rendah, maka dengan temperature pembakaran yang lebih rendah serta panas radiasi yang dihasilkan dari pembakaran, panas yang hilang karena disebabkan terserap oleh dinding kompor akan lebih besar dibanding ketika pembakaran dilakukan pada laju alir udara yang lebih tinggi. Panas yang hilang ini mengakibatkan entalpi pembakaran yang dihitung menjadi lebih kecil.

Selain menunjukkan adanya panas yang hilang ketika pembakaran berlangsung, nilai entalpi pada Tabel 4.6 juga menunjukkan rendahnya emisi CO pada pembakaran dengan kecepatan superficial tinggi. Merujuk pada Tabel 4.4 mengenai pengukuran emisi CO, diketahui bahwa emisi CO terendah pada tiap komposisi terbentuk pada pembakaran dengan kecepatan tinggi (0,54 m/s). Pada kecepatan tinggi, maka laju alir udara yang disuplai ke dalam kompor akan semakin besar sehingga pembakaran terjadi lebih sempurna dibanding pada kecepatan rendah. Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan panas pembakaran yang lebih tinggi diketahui dari entalpi pembakaran yang lebih besar pada Tabel 4.6. Selain itu, pembakaran yang lebih sempurna akan menghasilkan emisi gas CO yang lebih rendah dibanding pembakaran yang lebih tidak sempurna pada kecepatan yang lebih rendah. Hal ini disebabkan nyala api yang dihasilkan pada pembakaran dengan kecepatan udara yang lebih tinggi akan menghasilkan panas konveksi, di mana panas konveksi akan mengakibatkan temperature unggun lebih tinggi dan kinetika pembentukan CO₂ dari CO lebih cepat sehingga emisi CO lebih rendah. Seperti tertera pada Tabel 4.4 bahwa emisi CO terendah terjadi pada kecepatan 0,54 m/s, di mana pada kecepatan ini berdasarkan Tabel 4.6 memiliki entalpi pembakaran yang lebih tinggi dan pembakaran yang lebih sempurna serta efisiensi panas yang lebih tinggi karena panas yang terserap oleh dinding kompor lebih sedikit.

Secara tidak langsung, perhitungan entalpi pembakaran dari temperature pembakaran ini tidak hanya memberikan informasi mengenai fluktuasi temperature di dalam kompor yang disebabkan oleh karakteristik unggun yang aktif namun juga mampu memberikan informasi lebih lanjut mengenai proses pembakaran yang terjadi di dalam kompor serta kaitannya dengan profil emisi CO yang terukur pada saat proses pembakaran. Lebih lanjut, nilai entalpi pembakaran ini juga mampu memberikan gambaran mengenai efisiensi pembakaran yang terjadi di dalam kompor terkait dengan jenis panas pembakaran yang diberikan dan karakteristik bahan penyusun dinding kompor.

4.8 Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat direkomendasikan komposisi dan kecepatan udara *blower* dari penggunaan biobriket yang terbuat dari TKKS dan batubara sub-bituminus dengan mengacu pada data waktu nyala, suhu tertinggi, dan emisi CO yang terdapat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 maka biobriket dengan komposisi 100% biomassa TKKS yang dibakar pada kecepatan superfisial 0,42 m/s merupakan komposisi dengan waktu penyalaan tersingkat dan proses pembakaran yang menghasilkan emisi CO rendah (kedua terendah dari seluruh data percobaan).

Tabel 4. 7 Rangkuman Rekomendasi Penggunaan Komposisi Biobriket dan Kecepatan *Blower*

Waktu Nyala dan Emisi CO					
Kecepatan	Komposisi	Waktu nyala (menit)	Suhu Tertinggi (°C)	CO avg. (ppm)	CO max. (ppm)
0,42 m/s	100% TKKS	0,5	399.489	336,36	914
0,54 m/s	100% TKKS	0,6	523.74	312,81	1004
Efisiensi Termal (1,27%)					
0,42	50% TKKS	2,2	620.8	1263	442,73

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian mengenai pengaruh komposisi biomassa dan kecepatan terhadap kinerja pembakaran biobriket di dalam kompor adalah:

1. Penambahan biomassa sebagai campuran briket pemasakan dapat mempersingkat waktu penyalaan. Pada penelitian ini, waktu penyalaan tersingkat dialami oleh biobriket dengan komposisi biomassa 100% dengan kecepatan 0,42 m/s, yaitu 0,5 menit.
2. Penambahan biomassa sebagai campuran briket dapat menurunkan rata-rata emisi CO yang terbentuk, adapun rata-rata emisi CO terendah dihasilkan pada pembakaran biobriket dengan komposisi 100% biomassa dengan kecepatan 0,54 m/s, yaitu 312,81 ppm.
3. Komposisi biomassa yang memiliki efisiensi termal tertinggi adalah 50% biomassa : 50% batubara, yaitu 1,2 %.
4. Dengan mempertimbangkan efisiensi pembakaran yang kecil dan faktor yang mempengaruhi, faktor jenis bahan bakar merupakan faktor yang dapat dijadikan tolak ukur analisa pembakaran tidak efisien. Penelitian ini menggunakan briket sebagai modifikasi penggunaan biomassa sebagai bahan bakar tidak berhasil memberikan panas pembakaran yang efisien karena tidak mampu menghasilkan nyala api yang tinggi disebabkan karakteristik fisik dari briket yang tidak mendukung proses pembakaran.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan analisa FTIR untuk mengetahui panjang rantai komponen *volatile matters* yang terkandung di dalam suatu bahan bakar untuk mengetahui lebih lanjut pengaruh kandungan senyawa tersebut pada pembakaran.

2. Perlu dilakukan analisa SEM untuk mengetahui profil permukaan yang dimiliki oleh bahan bakar terkait dengan pengaruh kekasaran permukaan terhadap transfer panas yang terjadi antar briket.
3. Untuk penelitian selanjutnya, setelah mengetahui bahwa jenis bahan bakar briket tidak mampu menghasilkan nyala api yang cukup tinggi sehingga menyentuh dasar pot pemasakan maka dapat dipertimbangkan untuk memodifikasi penggunaan biomassa sebagai bahan bakar menjadi dalam bentuk pellet. Bentuk pellet memiliki banyak keuntungan dari volum permukaan per massa pellet yang lebih besar sehingga dapat membantu penyalaan dan pada saat pembakaran.
4. Perlu dilakukan investigasi lebih lanjut pengaruh bahan penyusun dinding kompor terhadap penyerapan panas secara radiasi untuk mengetahui panas yang hilang akibat terserap oleh dinding kompor secara radiasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A. M., E. Pudjiono, et al. (2011). "Rancang Bangun dan Uji Performansi Tungku Keramik Berpipa Spiral dengan Bahan Bakar Padat." Teknologi Pertanian **12**: 181-186.
- Arslan, D. and M. M. Özcan (2010). "Study the Effect of Sun, Oven and Microwave Drying on Quality of Onion Slices." Food Science and Technology **43**: 1121-1127.
- Battacharya, S. C., D. O. Albina, et al. (2002). "Effect of Selected Parameters on Performance and Emission of Biomass-fired Cookstove." Biomass and Bioenergy **23**: 387-395.
- Biagini, E. and F. Lippi (2002). "Devolatilization Rate of biomasses and coal-biomass blends : an experimental investigation." Fuel Vol. 81: 1041-1050.
- Borman, G. L. and K. W. Ragland (1981). Combustion Engineering, WCB McGraw-Hill.
- Chaney, J. (2006). "An Experimental Study of The Combustion Characteristic of Low Density Biomass Briquettes."
- Chigier, N. (1982). Energy, Combustion, and Environment, Mc-Graw Hill Inc.
- Demirbas, A. (2008). "Hazardous emission from combustion of biomass." Energy Source Part A **30**: 170-178.
- DESM (2005). Rencana Pengembangan Produksi dan Pemanfaatan Briket Batubara 2006-2010. D. E. d. S. M. RI. Jakarta.
- Diah, M. D., H. A. Rasyid, et al. (2009). "Wood Fuel Use in The Traditional Cooking Stoves in The Rural Floodplain Areas of Bangladesh: Asocio-Environmental Perspective." Biomass and Bioenergy **30**: 70-78.
- Edwards, R. D., K. R. Smith, et al. (2004). "Implication of Changes in household stoves and fuel use in China." Elsevier **32**(Energy Policy): 395-411.
- Eka (2010). Potensi Biomassa Dari Limbah Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan Di Indonesia. <http://industri15eka.blog.mercubuana.ac.id>. jakarta, universitas mercubuana. **2010**.
- EPA (2009). Minimising greenhouse gas emissions from biomass energy generation. E. Agency.
- Finney, K. (2009). "Fuel Pelletization with a Binder : Part I - Identification of a Suitable Binder for Spent Mushroom Compost-Coal Tailing Pellets." Energy and Fuels **23**: 3195-3202.
- Fisafarani, H. (2010). Identifikasi Karakteristik Sumber Daya Biomasa dan Pengembangan Pelet Biomasa di Indonesia. Departemen Teknik Kimia Depok, Universitas Indonesia. **S1 Reguler**.
- Galle, C. (2001). "Effect of Drying on Cement-Based Materials Pore Structure As Identified by Mercury Intrusion Porosimetry A Comparative Study Between Oven-, Vacuum-, and Freeze-drying." Cement and Concetrate Research **31**: 1467-1477.
- Grotkjaer, T. and K. D. Johansen (2003). "An Experimental Study of Biomass Ignition." Fuel **82**(825-833).

- Grover, P. D. and S. K. Mishra (1996). *Biomass Briquetting : Technology and Practice*. Regional Wood Energy Development in Asia. Bangkok, FAO.
- Holman, J. P. (1986). Heat Transfer. Singapore, Mc Graw-Hill
- Indarti (2001). Economic and Social Commission for Asia and The Pacific. Regional Seminar on Commercialization of Biomass Technology. Guangzhou, Country Paper Indonesia: 5-6.
- Instrument, T. (1997) "Thermal Analysis Application Brief Proximate Analysis of Coal and Coke."
- ITB, H. (2011) "Potensi Limbah Biomassa Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan." 2010-2011.
- Jean, P. (2006). "Biocoal Out of Firebreak and Agricultural Residue : Between Forest Protection Management and Local Household Fuel Supply."
- Kaliyan, J. (2010). "Natural binders and solid bridge type binding mechanism in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass." Bioresource Technology 2010: 1082-1090.
- Kavalov, B. and S. D. Petevs (2005). Status and perspectives of biomass-to-liquid fuels in the European Union. E. C. D. JRC, EUR 21745EN.
- KBRI (2009). Indonesian palm oil industry takes step towards sustainability-Emassy of Indonesia-Italy, 28 Desember 2009. K. B. I. u. Italy.
- Kim, H. (2002). "Binding and Desulfurization Characteristic of Pulp Black Liquor in Biocoal briquettes." Environ Sci.Technol. **36**: 1607-1612.
- Koestoer (1997). Studi Tentang Batubara Indonesia: Potensi, Teknologi, dan Prospek Pemanfaatannya. Depok, Laboratorium Perpindahan Kalor FTUI.
- Lau, C. W. and S. Niksa (1992). "The combustion of individual particles of various coal types." Combustion and Flame **90**: 45-70.
- Lestari, D. (2009). Perancangan Bahan Bakar Biomassa dengan Heating Value Tinggi dan Emisi Rendah untuk Masyarakat Urban. Departemen Teknik Kimia. Depok, University of Indonesia. **S1 Reguler**.
- Lu, G. (2000). "Experimental Study on Combustion and Pollutant Control of Biobriquette." Energy & Fuels **2000 14**: 1133-1138.
- Myung Won Seo, e. a. (2010). "Gasification Characteristics of Coal/Biomass Blend in a Dual Circulating Fluidized Bed Reactor."
- Obernberger, I. and G. Thek (2004). "Physical Characterisation and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels With Regard to Their Combustion Behaviour." Biomass and Bioenergy **27**: 653–669.
- Parikh, J., S. A. Chaniwala, et al. (2004). "A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels."
- Purwanto, W. W., D. Supramono, et al. (2010). "The Identification of Biomass Resources Characteristics and Bio-pellet Potential in Indonesia." ISFAChe 2010.
- Purwanto, W. W., D. Supramono, et al. (2006). "Indonesia Energi Outlook and Statistic." Pengkajian Energi UI.
- Quaak, P. (1999). "Energy From Biomass: a Review of Combustion and Gasification."

- RIPEBAT (1997). Master plan of new and renewable energy Report. . M. o. E. a. M. R. o. Indonesia. Jakarta, Directorate of Electricity and Energy Utilization.
- Rumalasari, S. (2008). Pengaruh Tinggi Chimney dan Kecepatan Forced Draft terhadap Ignition Time Briket dengan Dimples. Departemen Teknik Kimia. Depok, Universitas Indonesia. **S1 Reguler**.
- Sakai, T. and A. M. Nakamura (2005). "Quantification of Porosity and Surface Roughness in Laboratory Measurement of The Bidirectional Reflectance of Asteroid Surface Analogues." Earth Planet Space **57**: 71-76.
- Samuelson, R. (2006). "Comparison of Different Methods for Determination of Moisture Content in Biomass." Biomass dan Bionergy **30**: 929-934.
- Sari, D. P. (2011). Pengaruh Komposisi Biomassa terhadap Waktu Ignisi dan Emisi CO Biobriket. Departemen Teknik kimia. Depok, Universitas Indonesia. **S1 Reguler**.
- Singh, R. (2009). "Biobriquettes-an Alternative Fuel for Sustainable Development." Journal of Science and Technology **10**: 121-127.
- Slifka, A. (1998). "Thermal Conductivity of Magnesium Oxide from Absolute Steady State Measurements." National Institute of Standart Technology **103**: 357-363.
- Smoot, L. (1991). Fossil Fuel Combustion: A Source Book, Wiley-Interscience.
- Sulistiyanto, A. (2006). "Karakteristik Pembakaran Biobriket Campuran Batubara dan Sabut Kelapa." Media Mesin **7**: 77-84.
- Sumarni, I. (2009). Perbandingan Efek Blind Hood dan Open Hood Terhadap Pembentukan Emisi CO Pada Kompor Briket Batubara. Departemen Teknik Kimia. Depok, Universitas Indonesia. **S1 Reguler**.
- Supramono, D. (2007). Pengurangan Emisi Polutan Gas CO pada Kompor Briket Batubara dengan Mengintroduksi Downjet. Proposal RUUI Program Unggulan 2007 Depok, University of Indonesia
- Supramono, D. (2009). "Penyingkatan Waktu Penyalaan Kompor Briket Batubara." Paper Jurnal Energi.
- Supriyatno (2010). "Uji Coba Karakterisasi Contoh Produk Inovasi Briket Batubara Biomasa di Pusat Penelitian Fisika – LIPI Bandung." Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”.
- Tanto, M. E. H. Y. (2011). Pengaruh Penggunaan Briket Bio-Batubara, Briket Biomassa, dan Pellet Biomassa Sebagai Promotor Terhadap Waktu Nyala pada Kompor Briket Batubara. Departemen Teknik Kimia. Depok, Universitas Indonesia. **S1 Reguler**.
- UNEP (2006) "Energy Equipment Modul for Industry."
- Yusoff, S. (2006). "Renewable Energy from Palm Oil - Innovation on Effective Utilization of Waste." Journal of Cleaner Production **14**(1): 87-93.
- ZREU (2000). Biomass in Indonesia-Business.

LAMPIRAN
LAMPIRAN 1
HASIL UJI PROKSIMAT BATUBARA DAN BIOMASSA



Energy Technology Center
(Badan Besar Teknologi Energi)

No.: 4A/LapJatek/B2TE/BPPT/IV/12

LAPORAN ANALISA
REPORT OF ANALYSIS

PARAMETER ANALYSIS	SAMPLE CODE			STANDARD METHOD
	Batubara UI	TKKS Ayu UI	Baggase Tebu UI	
Total Moisture (% wt, ar)	14.68	13.64	14.21	ASTM D-3302
PROXIMATE ANALYSIS				
Moisture (% wt, adb)	12.71	13.64	14.21	ASTM D-5142
Volatile Matter (% wt, adb)	41.03	65.86	67.83	
Ash (% wt, adb)	3.89	4.88	4.17	
Fixed Carbon (% wt, adb)	42.38	15.56	13.80	
Calorific Value (kcal/kg)	5416	3826	3636	ASTM D 5865

ENERGY TECHNOLOGI CENTER
Head of Fuel Characterization Laboratory,



I. Trisaksono BP, MEng
NIP. 196309201988121001

2/2

LAMPIRAN 2
DATA TEMPERATUR PEMBAKARAN BIOBRIKET

waktu (s)	temperatur Pembakaran (°C)								
	0,29 m/s			0,42 m/s			0,54 m/s		
	50%	75%	100%	50%	75%	100%	50%	75%	100%
0	43.283	43.698	45.693	34.884	28.372	42.127	38.071	39.98	43.729
10	53.937	59.342	79.289	38.549	30.372	77.136	48.118	77.43	44.133
20	59.632	72.234	109.543	40.788	31.898	126.856	50.146	129.98	51.024
30	60.913	95.605	150.348	43.639	32.857	165.204	75.157	166.116	52.591
40	74.33	112.811	200.456	47.701	34.413	181.201	75.337	210.957	55.322
50	83.904	129.088	228.052	49.138	35.638	237.026	94.041	225.155	57.498
60	91.381	150.311	266.833	51.318	38.473	312.055	123.013	241.353	60.879
70	110.374	191.662	293.813	53.491	41.793	342.814	170.188	377.097	98.691
80	118.435	226.122	313.656	54.315	44.224	372.712	194.253	458.707	137.243
90	116.07	245.55	330.033	57.747	47.462	390.997	209.777	535.034	210.448
100	116.251	246.986	391.586	60.727	65.386	388.536	224.565	537.156	270.139
110	125.736	307.158	404.167	64.401	61.952	390.856	247.41	536.033	262.986
120	138.354	318.707	455.723	69.987	76.252	390.348	280.081	540.669	220.431
130	151.478	319.131	464.81	78.986	104.657	393.755	249.024	554.998	219.938
140	152.686	303.508	494.75	88.332	270.845	399.489	222.447	585.484	237.593
150	149.365	305.233	493.659	97.879	377.427	394.716	218.904	606.009	280.966
160	138.191	291.196	446.512	105.626	413.611	391.085	224.411	622.642	365.332
170	131.101	275.306	425.12	117.258	443.391	386.709	225.197	633.545	369.05
180	127.588	259.455	439.067	123.037	464.215	382.686	221.063	620.784	294.481
190	122.38	244.354	411.96	146.781	486.182	350.783	217.949	463.309	281.919
200	126.864	235.468	427.915	170.299	494.241	321.97	224.597	436.672	278.615
210	130.751	223.083	457.442	209.436	482.352	319.284	240.978	440.947	311.102
220	130.637	206.668	425.667	245.769	475.609	303.732	247.682	453.244	329.135
230	130.577	200.3	453.11	346.211	477.151	289.036	244.945	467.927	429.062
240	131.755	198.725	480.917	394.785	477.647	283.314	243.905	496.753	441.141
250	131.45	196.735	494.163	405.246	467.919	255.284	244.005	539.968	394.383
260	145.444	197.682	515.347	409.401	433.536	266.967	243.549	597.747	390.46
270	168.27	199.31	516.019	407.171	380.247	277.096	244.265	616.527	497.618
280	173.658	201.512	515.667	403.391	383.12	284.518	245.21	630.931	512.486
290	179.743	204.704	521.173	397.723	393.041	291.628	233.284	648.539	523.74
300	196.196	210.403	538.002	393.694	368.757	287.759	209.25	647.605	518.313
310	203.216	217.827	571.134	390.843	351.733	290.793	204.275	636.545	522.34
320	188.386	223.084	573.49	387.708	343.199	291.64	205.48	667.525	497.72

330	185.563	231.43	574.815	383.876	337.324	300.759	209.9	666.999	420.207
340	187.982	237.179	567.667	378.406	329.619	308.643	213.892	625.495	387.05
350	192.761	237.741	558.782	374.8	323.888	315.985	221.67	651.466	370.288
360	198.174	235.745	553.303	370.917	319.676	319.892	230.44	695.444	359.682
370	213.747	236.535	550.411	367.818	323.558	326.644	236.581	732.635	347.861
380	229.531	239.756	532.56	365.584	342.61	335.971	241.992	750.128	335.254
390	244.922	236.476	529.059	362.887	369.526	345.181	248.453	760.229	324.699
400	263.726	246.899	521.677	360.69	402.626	354.987	252.86	774.586	316.927
410	278.497	291.043	547.026	368.861	412.887	349.704	257.131	784.252	311.765
420	292.722	317.119	550.883	373.459	413.274	322.884	259.662	778.194	301.18
430	309.537	322.879	499.223	377.743	411.25	305.719	253.782	777.847	316.509
440	319.853	322.363	484.066	396.038	409.83	297.784	255.432	778.376	332.135
450	326.007	332.496	484.3	413.886	414.355	296.83	266.341	777.52	342.438
460	321.248	338.309	490.499	426.849	416.167	293.044	269.204	777.87	359.238
470	319.26	336.746	506.523	433.175	415.762	295.334	274.907	781.522	362.395
480	326.778	340.023	510.328	439.499	415.883	302.042	283.938	787.488	358.221
490	321.348	339.282	511.926	447.405	416.389	315.881	291.612	799.424	349.707
500	325.903	339.493	369.761	453.942	416.158	324.824	295.539	812.798	305.591
510	312.789	347.504	311.368	456.338	413.567	336.479	294.519	824.552	296.544
520	299.563	315.649	292.267	425.376	410.23	344.068	295.098	809.457	296.357
530	304.575	291.195	285.425	414.044	406.522	348.98	292.577	832.931	291.602
540	320.527	279.941	327.221	417.943	403.396	348.622	293.164	836.234	286.543
550	333.997	278.312	345.933	427.055	395.27	345.823	291.282	820.275	280.593
560	341.47	278.45	362.674	449.368	291.679	341.008	291.515	804.238	283.431
570	340.478	284.42	377.87	478.842	238.179	307.424	294.176	791.321	280.632
580	342.949	280.221	388.025	484.871	198.824	270.132	302.679	779.727	279.738
590	260.982	288.205	383.603	487.868	188.82	255.916	299.125	755.86	269.283
600	232.68	289.77	384.43	494.353	197.117	252.287	297.468	730.502	260.529
610	220.479	296.615	383.971	513.464	206.021	254.25	260.398	710.819	255.462
620	213.828	310.479	382.741	521.85	224.391	254.605	214.757	689.612	249.703
630	210.315	313.988	380.714	532.132	251.385	244.947	238.62	670.037	243.765
640	210.039	310.827	385.957	539.392	262.962	229.435	224.686	650.546	240.091
650	212.494	308.923	395.835	581.9	261.354	223.231	204.591	627.49	235.205
660	213.763	307.682	398.643	593.891	253.197	219.322	136.683	551.088	230.799
670	212.541	312.026	396.14	597.31	253.236	218.19	161.156	536.492	224.467
680	211.688	312.82	390.339	591.31	258.754	218.173	228.965	537.146	219.261
690	211.103	310.317	352.98	606.235	280.498	216.817	197.715	526.15	216.451
700	216.527	310.609	335.363	617.66	191.202	214.872	197.057	529.949	212.224
710	261.801	307.724	327.178	620.88	146.346	213.088	177.589	546.721	210.117
720	258.278	302.568	322.239	619.202	131.132	210.067	172.509	566.828	206.465

730	234.964	300.676	318.575	616.77	126.827	207.885	171.344	585.619	203.136
740	227.482	293.439	315.352	615.223	125.976	205.87	168.773	585.992	198.29
750	222.011	287.349	312.129	614.506	124.986	204.817	211.259	548.372	194.954
760	218.992	281.894	308.109	613.971	126.255	205.694	435.879	524.385	191.233
770	214.756	271.93	304.136	608.605	126.511	203.869	493.193	512.941	186.815
780	212.673	264.241	309.355	604.183	129.494	202.576	505.01	511.737	182.376
790	210.683	256.922	313.842	590.494	131.91	201.778	579.811	508.56	176.149
800	210.066	249.554	324.368	578.793	133.659	201.769	577.404	505.622	170.938
810	210.979	231.591	300.187	552.481	136.279	202.22	559.089	496.415	165.83
820	212.559	220.223	289.066	533.987	138.444	202.751	541.832	444.053	161.723
830	209.044	210.583	283.718	505.64	141.41	202.962	530.607	418.836	156.939
840	206.767	206.375	280.771	483.484	142.254	203.166	534.421	413.336	152.09
850	206.344	204.136	277.993	473.274	140.897	203.193	541.402	414.186	148.428
860	208.227	202.69	275.965	475.834	140.099	203.228	530.887	410.472	143.22
870	208.964	200.329	274.393	474.234	139.643	203.581	526.14	396.486	137.546
880	208.107	200.274	273.427	471.495	140.317	205.555	519.936	384.403	131.442
890	211.506	196.669	271.642	466.102	135.768	204.91	507.753	364.981	126.052
900	210.118	193.695	268.988	521.25	139.382	203.317	494.273	358.764	120.103
910	209.012	189.694	266.8	534.572	143.185	201.661	474.757	343.799	118.303
920	208.115	187.038	283.917	540.199	146.913	199.311	465.978	324.947	114.989
930	205.408	184.049	261.625	531.226	148.649	197.982	458.926	299.747	110.455
940	203.235	183.072	259.484	523.203	149.747	196.185	449.734	292.875	105.342
950	202.215	183.955	257.54	521.372	149.761	190.775	436.97	284.367	106.651
960	200.738	184.981	256.346	517.803	150.701	187.754	430.743	279.208	104.566
970	199.981	182.605	254.642	511.325	150.406	179.136	427.999	271.552	99.637
980	199.359	181.519	252.856	572.584	148.948	180.856	420.744	264.285	94.398
990	198.851	180.833	256.699	578.929	147.494	180.785	400.678	250.1	88.989
1000	199.695	181.567	266.215	580.883	145.851	179.286	390.869	239.51	84.788
1010	201.635	187.971	243.419	579.435	143.582	176.263	401.432	228.459	80.491
1020	201.176	196.375	238.888	580.341	141.754	170.464	432.419	227.437	75.785
1030	200.493	198.818	237.065	593.391	139.284	173.392	421.037	225.4	72.684
1040	199.152	193.395	243.496	571.635	136.515	172.791	413.105	224.9	70.484
1050	199.078	192.468	244.265	543.874	135.275	170.018	402.022	224.205	69.435
1060	199.022	195.837	243.665	500.014	132.907	167.362	395.439	219.885	67.546
1070	198.121	197.389	243.328	479.793	131.528	165.772	389.135	216.264	65.443
1080	195.614	190.488	238.123	450.192	129.758	163.548	381.798	218.02	63.199
1090	193.648	181.556	236.724	426.786	129.441	161.215	376.871	220.457	61.819
1100	190.837	176.034	235.848	394.414	128.157	159.017	373.358	236.799	60.62
1110	187.184	170.496	234.658	401.882	127.741	156.624	367.697	241.67	59.489
1120	184.692	166.247	233.49	389.671	127.036	155.829	362.767	245.633	58.346

1130	182.868	164.003	231.942	386.392	125.571	155.101	354.657	239.723	56.977
1140	178.993	163.448	230.33	371.361	123.156	153.942	348.599	231.808	55.736
1150	173.97	163.675	228.48	365.66	120.479	152.318	350.833	226.956	54.059
1160	170.131	166.749	226.212	360.287	118.76	149.95	355.958	221.925	52.205
1170	166.088	167.097	224.841	358.397	115.221	148.112	355.299	216.541	50.481
1180	163.651	166.67	223.554	355.451	112.4	145.381	355.441	214.491	48.929
1190	156.941	164.948	222.447	351.056	110.979	143.754	354.919	209.51	47.115
1200	148.886	163.419	220.579	349.933	108.813	141.745	381.28	205.927	46.093
1210	144.212	162.542	218.558	343.056	106.363	139.178	378.067	203.117	45.589
1220	140.7	160.703	216.657	344.025	104.18	136.727	372.746	197.191	45.168
1230	136.557	156.908	215.533	345.499	102.93	133.296	369.401	191.465	44.799
1240	133.227	153.542	214.138	338.205	101.758	130.853	366.008	187.611	44.246
1250	129.667	151.478	212.8	333.955	100.565	126.572	364.375	181.553	43.911
1260	127.67	148.732	211.056	322.266	98.348	124.161	361.84	176.366	43.4
1270	124.371	148.326	188.731	304.016	96.485	121.99	355.944	170.146	42.694
1280	121.542	149.352	164.687	293.132	94.356	120.644	347.713	164.4	42.01
1290	121.567	147.246	156.336	288.344	91.933	118.211	341.876	159.982	41.505
1300	119.084	145.8	151.685	281.599	90.277	115.784	331.274	154.986	41.001
1310	114.916	144.663	148.45	277.785	88.259	113.864	326.132	150.445	40.632
1320	114.832	141.759	161.346	281.733	86.21	111.164	363.547	146.448	40.135
1330	116.244	139.741	170.717	290.751	84.935	110.196	379.35	142.52	39.846
1340	115.304	137.973	159.145	293.601	82.684	108.772	393.883	139.04	39.514
1350	115.143	138.16	184.397	301.986	81.608	107.324	387.344	135.085	39.203
1360	116.82	138.145	195.216	314.85	80.455	105.983	375.125	131.104	38.942
1370	116.057	136.668	199.898	318.296	81.436	104.637	380.672	127.257	38.666
1380	114.111	135.21	201.711	317.688	81.157	103.365	377.909	124.024	38.485
1390	113.183	133.729	202.313	315.927	81.642	101.962	372.877	121.346	38.402
1400	110.524	131.477	201.039	322.618	81.374	99.848	364.678	118.165	38.247
1410	105.051	129.674	200.501	307.965	81.103	98.405	360.606	115.43	38.101
1420	100.485	128.058	199.799	300.514	80.948	96.61	355.619	112.784	38
1430	97.858	125.59	198.594	282.738	80.6	95.437	338.239	109.889	37.955
1440	93.454	122.868	197.377	272.889	81.221	94.458	328.265	106.494	38.121
1450	91.4	120.155	195.876	266.472	81.65	94.338	320.395	104.404	37.551
1460	92.99	117.058	194.091	254.853	82.233	95.815	342.331	96.905	35.857
1470	91.054	113.646	192.911	249.114	82.868	96.645	388.386	92.005	34.07
1480	88.866	110.637	191.653	242.95	83.046	95.869	395.429	83.974	36.665
1490	84.703	108.667	190.036	233.435	82.862	95.287	388.652	79.252	34.745
1500	81.91	107.191	188.115	230.689	81.313	94.503	379.046	110.405	
1510	80.281	106.23	186.39	233.149	80.413	93.187	228.526	103.535	
1520	79.215	106.915	184.878	230.35	79.005	91.302	188.158	99.515	

1530	77.196	106.09	183.107	226.86	77.217	90.014	175.544	95.92	
1540	75.25	104.012	182.282	222.161	76.474	88.383	166.174	94.47	
1550	73.81	102.334	180.184	218.978	75.34	86.548	156.498	92.71	
1560	73.932	100.844	176.722	217.279	74.551	85.254	150.121	91.386	
1570	74.213	99.183	173.71	220.582	73.599	83.631	150.023	89.688	
1580	74.524	97.291	170.467	229.265	72.136	81.654	153.345	86.019	
1590	74.442	95.893	167.934	227.799	70.437	80.941	154.421	82.215	
1600	73.883	94.148	164.35	224.64	68.502	79.946	155.606	78.206	
1610	73.346	92.53	136.801	212.817	67.298	78.714	156.966	74.778	
1620	72.3	91.231	98.615	210.742	65.574	77.608	158.28	72.007	
1630	70.641	90.582	79.388	208.361	63.191	76.81	159.536	69.791	
1640	68.413	90.171	69.772	205.835	61.6	75.944	159.843	145.197	
1650	64.624	90.699	64.542	202.382	60.236	76.367	161.213	109.333	
1660	61.865	90.833	77.692	200.635	59.064	76.034	162.572	72.176	
1670	59.934	89.235	97.77	196.372	58.209	74.389	165.834	59.502	
1680	58.757	89.025	89.169	193.906	57.467	72.431	168.495	54.259	
1690	58.074	88.121	84.939	194.09	57.925	70.982	170.63	52.604	
1700	56.832	87.715	85.585	189.932	58.337	68.649	172.49	54.614	
1710	56.247	87.4	92.98	185.843	58.643	64.469	173.389	52.316	
1720	55.758	86.556	72.428	182.602	58.801	63.099	172.809	55.56	
1730	54.332	85.829	59.568	179.045	59.662	63.678	173.448	63.875	
1740	53.319	85.447	77.969	176.018	60.23	63.398	173.263	63.818	
1750	52.416	85.405	100.148	176.769	60.586	63.073	172.618	62.122	
1760	52.012	84.349	101.064	175.651	60.633	62.537	174.292	56.056	
1770	50.384	83.138	112.933	178.836	60.376	62.004	174.659	67.123	
1780	48.761	79.914	118.669	180.36	59.686	61.606	174.013	55.061	
1790	47.462	80.262	119.428	175.166	59.299	60.942	173.243	55.623	
1800	46.658	80.678	116.222	172.185	58.796	60.074	174.206	46.223	
1810	45.642	80.243	110.451	171.965	58.347	59.338	174.087	43.932	
1820	44.883	79.722	102.84	168.264	58.225	58.712	174.09	74.807	
1830	44.028	79.149	92.74	165.774	57.986	58.228	172.673	61.751	
1840	43.245	78.926	80.585	164.881	57.782	57.714	171.553	49.076	
1850	42.889	78.133	70.725	162.957	57.016	57.057	172.395	44.414	
1860	42.515	76.833	63.713	160.456	55.619	56.582	170.952	42.943	
1870	42.322	75.6	58.723	158.243	54.387	56.768	169.161	42.196	
1880	42.036	75.397	55.698	156.103	53.85	56.551	166.376	42.025	
1890	41.739	74.554	53.609	153.022	53.515	55.771	165.321	42.011	
1900	41.425	73.605	51.998	150.099	53.241	55.174	171.147	41.844	
1910	40.888	72.127	51	147.936	52.971	54.691	169.344		
1920	40.619	71.526	50.387	146.191	52.795	53.838	167.313		

1930	40.432	71.399	49.769	143.371	52.85	53.259	165.49		
1940	40.308	70.452	49.304	140.451	51.49	52.778	164.014		
1950	40.224	69.835	48.999	135.791	51.056	51.68	162.695		
1960	39.951	69.048	48.715	130.555	51.481	50.581	163.462		
1970	39.964	68.341	48.579	126.359	51.914	49.598	168.443		
1980	39.909	67.573	48.279	121.81	52.402	48.566	171.11		
1990	39.795	66.934	48.031	117.151	52.915	47.619	169.399		
2000	39.731	66.208	50.823	112.279	52.895	46.492	166.248		
2010	39.879	66.022	46.675	106.678	52.804		165.951		
2020	40.258	65.081	44.74	98.558	52.686		168.44		
2030	39.938	64.15	43.729	91.889	53.863		171.952		
2040	39.623	64.041	47.66	88.659	54.972		171.476		
2050	39.213	63.72	51.235	86.232	55.59		171.481		
2060	38.954	62.991	52.808	84.896	55.458		171.849		
2070	38.841	62.513	53.599	83.801	54.849		168.102		
2080	38.769	62.486	54.226	79.25	54.334		165.84		
2090		62.122	54.715	76.321	54.047		170.481		
2100		62.053	55.058	74.734	53.594		175.658		
2110		61.543	55.234	73.025	53.667		178.102		
2120		60.979	55.29	71.902	53.356		180.666		
2130		60.643	55.298	70.648	53.463		181.333		
2140		59.804	55.402	69.684	53.186		180.926		
2150		59.514	55.437	68.572	53.08		179.141		
2160		58.921	55.01	67.414	52.708		177.473		
2170		58.886	54.662	66.223	52.527		175.683		
2180		58.421	54.433	65.72	52.412		174.863		
2190		57.817	54.227	65.197	51.826		172.498		
2200		57.533	53.204	64.429	51.557		176.6		
2210		57.89	52.096	64.011	51.883		176.886		
2220		57.508	51.363	62.86	52.022		177.555		
2230		57.315	50.744	60.829	52.198		176.785		
2240		57.105	50.44	60.029	52.239		177.258		
2250		56.523	50.204	59.368	52.178		178.49		
2260		56.092	50.034	56.585	52.578		172.298		
2270		55.619	49.74	69.569	52.336		165.238		
2280		55.142	49.513	89.34	52.884		159.015		
2290		54.419	49.272	96.111	53.039		155.689		
2300		54.241	49.034	98.419	53.46		152.419		
2310		53.936		96.447	53.123		150.471		
2320		53.778		90.144	53.047		147.865		

2330		53.496		88.899	52.624		145.721		
2340		53.664		88.843	52.463		145.426		
2350		53.48		88.282	52.332		142.073		
2360		53.376		87.642	52.089		142.794		
2370		53.082		86.043	52.22		144.395		
2380		52.682		84.697	52.226		145.622		
2390		52.412		83.764	52.613		148.03		
2400		52.565		82.626	53.045		148.857		
2410		52.589		81.002	52.694		149.577		
2420		51.958		79.752	51.95		147.301		
2430		52.034		78.798	51.255		146.847		
2440		51.816		77.325	49.82		142.793		
2450		51.762		76.315	48.498		136.154		
2460		51.499		75.358	48.018		133.748		
2470		51.251		74.457	48.977		133.458		
2480		51.298		73.325	49.404		135.103		
2490		51.208		72.706	49.566		131.765		
2500		51.153		71.832	49.513		125.695		
2510		50.903		71.085	49.018		122.6		
2520		50.445		70.017	48.374		122.474		
2530		50.329		68.646	46.985		122.351		
2540		50.273		67.63	45.97		124.901		
2550		50.406		67.178	45.355		124.09		
2560		50.261		65.731	44.755		124.747		
2570		50.368		64.822	44.132		123.916		
2580		50.033		64.703	43.88		123.048		
2590		50.047		63.697	43.159		121.372		
2600		50.24		63.035	42.779		120.858		
2610		50.87		61.955			120.273		
2620				61.465			123.648		
2630				60.77			125.696		
2640				59.768			123.816		
2650				58.868			119.429		
2660				57.983			115.594		
2670				57.181			113.786		
2680				57.029			114.76		
2690				56.841			115.515		
2700				56.341			114.762		
2710				55.838			114.887		
2720				55.484			113.975		

2730				54.808			113.475		
2740				54.677			113.313		
2750				54.809			111.976		
2760				54.478			113.238		
2770				54.401			110.76		
2780				54.264			105.047		
2790				54.263			100.905		
2800				53.835			95.038		
2810				53.87			91.532		
2820				53.648			88.9		
2830				53.509			88.148		
2840				53.223			89.234		
2850				52.826			91.257		
2860				52.678			93.909		
2870				52.487			95.816		
2880				52.776			97.319		
2890				52.25			97.416		
2900				52.308			97.58		
2910				52.133			96.554		
2920				52.012			95.356		
2930				51.901			94.439		
2940				51.652			93.736		
2950				51.486			96.944		
2960				51.688			97.654		
2970				51.365			97.446		
2980				51.117			97.495		
2990				50.833			97.716		
3000				51.044			96.799		
3010				51.103			95.477		
3020				50.901			94.685		
3030				50.554			94.519		
3040				50.591			94.59		
3050				50.478			94.425		
3060				50.367			93.845		
3070				50.369			93.673		
3080				50.32			93.392		
3090				50.118			93.398		
3100				50.2			94.419		
3110							94.724		
3120							95.19		

3130							95.314		
3140							95.569		
3150							95.498		
3160							95.516		
3170							95.137		
3180							94.665		
3190							94.307		
3200							93.976		
3210							93.592		
3220							93.264		
3230							93.101		
3240							93.159		
3250							93.233		
3260							93.411		
3270							93.239		
3280							92.903		
3290							92.45		
3300							93.373		
3310							94.294		
3320							94.754		
3330							94.816		
3340							96.083		
3350							97.07		
3360							97.689		
3370							98.086		
3380							98.028		
3390							98.257		
3400							98.426		
3410							97.677		
3420							96.878		
3430							96.479		
3440							95.969		
3450							95.116		
3460							94.268		
3470							93.187		
3480							91.598		
3490							90.046		
3500							88.284		
3510							86.814		
3520							85.114		

3530							84.424		
3540							83.785		
3550							82.707		
3560							81.365		
3570							79.191		
3580							77.743		
3590							76.775		
3600							75.403		
3610							72.823		
3620							72.15		
3630							69.853		
3640							68.09		
3650							65.757		
3660							64.614		
3670							64.018		
3680							64.016		
3690							62.707		
3700							62.421		

LAMPIRAN 3
DATA EMISI CO PEMBAKARAN BIOBRIKET

waktu (min)	emisi CO (ppm)								
	0,29 m/s			0,42 m/s			0,54 m/s		
	50%	75%	100%	50%	75%	100%	50%	75%	100%
0	26	20	14	5	9	12	12	11	11
1	56	175	420	25	11	76	152	124	96
2	726	429	470	51	82	98	252	295	158
3	634	734	594	90	125	140	331	478	299
4	1052	1021	664	84	232	269	437	568	350
5	897	1531	656	100	325	375	475	637	580
6	935	1622	736	329	451	389	463	642	860
7	1121	1429	840	870	580	452	471	717	1004
8	1026	1342	934	989	684	554	545	755	890
9	812	1076	1082	921	729	571	521	849	735
10	931	906	1256	904	857	683	564	904	647
11	1362	504	1614	894	715	692	914	1029	576
12	1639	1102	1594	856	989	706	753	917	403
13	1434	1226	1270	828	1078	806	814	875	382
14	1330	1317	906	879	1134	914	959	739	257
15	1243	1174	781	833	1181	881	1027	620	272
16	1176	1271	530	772	1072	734	1196	559	165
17	1125	1242	272	678	970	638	1237	543	101
18	916	963	233	752	875	508	1128	476	93
19	754	825	108	944	734	476	1117	358	90
20	543	782	71	1023	651	361	951	238	86
21	564	690	66	1164	556	255	902	132	47
22	439	520	50	1068	738	221	860	95	11
23	371	443	38	1126	642	167	849	84	8
24	401	343	24	1263	558	116	788	72	7
25	127	274	22	1159	402	86	683	51	5
26	95	235	16	1117	341	71	645	39	
27	76	197	13	1032	280	59	594	20	
28	54	160	11	903	158	42	681	11	
29	34	148	10	712	132	31	790	7	
30	25	130	7	717	119	20	739	6	
31	17	116	5	351	95	16	684	4	
32	11	109	4	202	87	11	660		

33	8	107	4	298	78	7	627		
34	5	62	3	426	63		569		
35		52	3	237	49		435		
36		50	3	222	37		342		
37		44	2	176	28		336		
38		39	2	120	19		332		
39		32		76	12		279		
40		29		75	7		201		
41		25		45	7		190		
42		13		43	7		168		
43		8		39	7		147		
44		5		37			102		
				32			92		
				20			83		
				19			68		
				20			57		
				18			36		
				15			45		
				8			31		
							24		
							14		
							12		
							12		
							12		
							10		
							9		
							8		
							7		
							7		

LAMPIRAN 4 PERHITUNGAN EFISIENSI TERMAL

Komposisi 50% Biomassa

Spesifikasi	Besar	Satuan
V air	1000	ml
ρ air	1	kg/L
m air	1	kg
m briket	0,69	kg
m <i>Water Boiling Pot</i>	0,18	kg
ΔT	20	$^{\circ}C$
Cp air	1	kcal/kg $^{\circ}C$
Cp <i>Water Boiling Pot</i>	0,214	kcal/kg $^{\circ}C$
Cp abu	0,205	kcal/kg $^{\circ}C$
HL air	538	kcal/kg
Calorific Value Briket 50% Biomassa	4081	kcal/kg
<i>Moisture Content</i> Briket 50% Biomassa	13,84	%
Ash Briket 50% Biomassa	4,1	%

Q yang diterima				Q Nett Briket			
Q	Persamaan	Besar	Satuan	Q	Persamaan	Besar	Satuan
Q Sensible Air	$m \text{ air} \times C_p \text{ air} \times \Delta T$	28	kcal	Q Bruto Briket	$m \text{ briket} \times \text{Calorific Value Briket}$	2597.982	kcal
Q Sensible Water Boiling Pot	$m \text{ WBP} \times C_p \text{ WBP} \times \Delta T$	2.0988	kcal	Q Sensibel Moisture	$m \text{ briket} \times \text{Moisture Content Briket} \times C_p \text{ air} \times \Delta T$	(-) 55.81079	kcal
Q Latent Air	Tidak ada air yang menguap	0	kcal	Q Latent Moisture	$m \text{ briket} \times \text{Moisture Content Briket} \times \text{HL air}$	(-) 50.63441	kcal
Q free Convection	Terlampir	(-) 1.6914	kcal	Q Sensibel Abu	$m \text{ briket} \times \text{Ash Briket} \times C_p \text{ abu} \times \Delta T$	(-) 3.973532	kcal
Total		31.79	kcal	Total		2487.563	kcal
Efisiensi Termal (%) = (Q yang diserap/Q Nett Briket) x 100%				1.278			

Universitas Indonesia

waktu (menit)	t (s)	suhu (°C)	ΔT	Tf	beta	v	k	Pr	Gr.Pr	Nu	h	q	integral
0	0	27	2	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	6775074	26.52967	2.109511	0.154377	0
1	60	28	3	299.5	0.003339	1.57E-05	0.02624	0.708	10145646	29.34765	2.333582	0.256163	12.31621
2	120	29	4	300	0.003333	1.57E-05	0.02624	0.708	13504982	31.52295	2.506552	0.366867	18.6909
3	180	30	5	300.5	0.003328	1.57E-05	0.02624	0.708	16853139	33.31759	2.649253	0.484692	25.54676
4	240	31	6	301	0.003322	1.57E-05	0.02624	0.708	20190172	34.85687	2.771649	0.608501	32.79579
5	300	33	8	302	0.003311	1.57E-05	0.02624	0.708	26831090	37.4251	2.975862	0.871114	44.38845
6	360	34	9	302.5	0.003306	1.57E-05	0.02624	0.708	30135083	38.52755	3.063524	1.008872	56.39956
7	420	35	10	303	0.0033	1.57E-05	0.02624	0.708	33428173	39.53953	3.143992	1.150412	64.77851
8	480	37	12	304	0.003289	1.57E-05	0.02624	0.708	39981854	41.34939	3.287903	1.443684	77.8229
9	540	40	15	305.5	0.003273	1.57E-05	0.02624	0.708	49731930	43.66789	3.472259	1.905791	100.4843
10	600	41	16	306	0.003268	1.57E-05	0.02624	0.708	52960713	44.36003	3.527294	2.065065	119.1257
11	660	42	17	306.5	0.003263	1.57E-05	0.02624	0.708	56178962	45.0191	3.5797	2.22673	128.7539
12	720	45	20	308	0.003247	1.57E-05	0.02624	0.708	65771015	46.82869	3.72359	2.724984	148.5514
13	780	48	23	309.5	0.003231	1.57E-05	0.02624	0.708	75270092	48.43496	3.851313	3.241222	178.9862
14	840	49	24	310	0.003226	1.57E-05	0.02624	0.708	78416023	48.9333	3.890939	3.416943	199.7449
15	900	50	25	310.5	0.003221	1.57E-05	0.02624	0.708	81551822	49.41534	3.929268	3.594378	210.3396
16	960	52	27	311.5	0.00321	1.57E-05	0.02624	0.708	87793220	50.33483	4.002381	3.954161	226.4561
17	1020	54	29	312.5	0.0032	1.57E-05	0.02624	0.708	93994673	51.20108	4.071262	4.320153	248.2294
18	1080	55	30	313	0.003195	1.57E-05	0.02624	0.708	97080540	51.61624	4.104273	4.505361	264.7654
19	1140	55	30	313	0.003195	1.57E-05	0.02624	0.708	97080540	51.61624	4.104273	4.505361	270.3217
20	1200	55	30	313	0.003195	1.57E-05	0.02624	0.708	97080540	51.61624	4.104273	4.505361	270.3217
21	1260	54	29	312.5	0.0032	1.57E-05	0.02624	0.708	93994673	51.20108	4.071262	4.320153	264.7654
22	1320	53	28	312	0.003205	1.57E-05	0.02624	0.708	90898916	50.77419	4.037318	4.136404	253.6967
23	1380	52	27	311.5	0.00321	1.57E-05	0.02624	0.708	87793220	50.33483	4.002381	3.954161	242.7169
24	1440	51	26	311	0.003215	1.57E-05	0.02624	0.708	84677538	49.88218	3.966389	3.773468	231.8289

25	1500	50	25	310.5	0.003221	1.57E-05	0.02624	0.708	81551822	49.41534	3.929268	3.594378	221.0354
26	1560	50	25	310.5	0.003221	1.57E-05	0.02624	0.708	81551822	49.41534	3.929268	3.594378	215.6627
27	1620	49	24	310	0.003226	1.57E-05	0.02624	0.708	78416023	48.9333	3.890939	3.416943	210.3396
28	1680	49	24	310	0.003226	1.57E-05	0.02624	0.708	78416023	48.9333	3.890939	3.416943	205.0166
29	1740	48	23	309.5	0.003231	1.57E-05	0.02624	0.708	75270092	48.43496	3.851313	3.241222	199.7449
30	1800	48	23	309.5	0.003231	1.57E-05	0.02624	0.708	75270092	48.43496	3.851313	3.241222	194.4733
31	1860	47	22	309	0.003236	1.57E-05	0.02624	0.708	72113980	47.91905	3.810291	3.067276	189.2549
32	1920	46	21	308.5	0.003241	1.57E-05	0.02624	0.708	68947638	47.38416	3.767759	2.895172	178.8734
33	1980	45	20	308	0.003247	1.57E-05	0.02624	0.708	65771015	46.82869	3.72359	2.724984	168.6047
34	2040	44	19	307.5	0.003252	1.57E-05	0.02624	0.708	62584062	46.2508	3.67764	2.556789	158.4532
35	2100	43	18	307	0.003257	1.57E-05	0.02624	0.708	59386728	45.64841	3.629741	2.390673	148.4238
36	2160	42	17	306.5	0.003263	1.57E-05	0.02624	0.708	56178962	45.0191	3.5797	2.22673	138.5221
37	2220	41	16	306	0.003268	1.57E-05	0.02624	0.708	52960713	44.36003	3.527294	2.065065	128.7539
38	2280	40	15	305.5	0.003273	1.57E-05	0.02624	0.708	49731930	43.66789	3.472259	1.905791	119.1257
39	2340	39	14	305	0.003279	1.57E-05	0.02624	0.708	46492560	42.93873	3.41428	1.749038	109.6449
40	2400	39	14	305	0.003279	1.57E-05	0.02624	0.708	46492560	42.93873	3.41428	1.749038	104.9423
41	2460	39	14	305	0.003279	1.57E-05	0.02624	0.708	46492560	42.93873	3.41428	1.749038	104.9423
42	2520	37	12	304	0.003289	1.57E-05	0.02624	0.708	39981854	41.34939	3.287903	1.443684	95.78167
43	2580	37	12	304	0.003289	1.57E-05	0.02624	0.708	39981854	41.34939	3.287903	1.443684	86.62106
44	2640	35	10	303	0.0033	1.57E-05	0.02624	0.708	33428173	39.53953	3.143992	1.150412	77.8229
45	2700	35	10	303	0.0033	1.57E-05	0.02624	0.708	33428173	39.53953	3.143992	1.150412	69.02473
46	2760	34	9	302.5	0.003306	1.57E-05	0.02624	0.708	30135083	38.52755	3.063524	1.008872	64.77851
47	2820	33	8	302	0.003311	1.57E-05	0.02624	0.708	26831090	37.4251	2.975862	0.871114	56.39956
48	2880	32	7	301.5	0.003317	1.57E-05	0.02624	0.708	23516137	36.21136	2.879352	0.737505	48.25855
49	2940	32	7	301.5	0.003317	1.57E-05	0.02624	0.708	23516137	36.21136	2.879352	0.737505	44.25029
50	3000	31	6	301	0.003322	1.57E-05	0.02624	0.708	20190172	34.85687	2.771649	0.608501	40.38018

51	3060	30	5	300.5	0.003328	1.57E-05	0.02624	0.708	16853139	33.31759	2.649253	0.484692	32.79579	
													7103.754	joule
													1691.37	kal
													1.69137	kkal

Komposisi 75% Biomassa

Spesifikasi	Besar	Satuan
V air	1000	ml
ρ air	1	kg/L
m air	1	kg
m briket	0,69	kg
<i>m Water Boiling Pot</i>	0,18	kg
ΔT	20	$^{\circ}C$
C_p air	1	kkal/kg $^{\circ}C$
<i>Cp Water Boiling Pot</i>	0,214	kkal/kg $^{\circ}C$
C_p abu	0,205	kkal/kg $^{\circ}C$
HL air	538	kkal/kg
Calorific Value Briket 50% Biomassa	4081	kkal/kg
<i>Moisture Content</i> Briket 50% Biomassa	13,84	%
Ash Briket 50% Biomassa	4,1	%

Q yang diterima				Q Nett Briket			
Q	Persamaan	Besar	Satuan	Q	Persamaan	Besar	Satuan
Q Sensible Air	m air x Cp air x ΔT	22.95	kcal	Q Bruto Briket	m briket x <i>Calorific Value</i> Briket	2374.502	kcal
Q Sensible Water Boiling Pot	m WBP x Cp WBP x ΔT	2.0988	kcal	Q Sensibel Moisture	m briket x Moisture Content Briket x Cp air x ΔT	(-) 43.95217	kcal
Q Latent Air	Tidak ada air yang menguap	0	kcal	Q Latent Moisture	m briket x <i>Moisture Content</i> Briket x HL air	(-) 50.63441	kcal
Q free Convection	Terlampir	(-) 1.549568	kcal	Q Sensibel Abu	m briket x Ash Briket x Cp abu x ΔT	(-) 3.12924	kcal
Total		26.59837	kcal	Total		2276.787	kcal
Efisiensi Termal (%) = (Q yang diserap/Q Nett Briket) x 100%				1.168242			

waktu (min)	t (s)	suhu (°C)	ΔT	Tf	beta	v	k	Pr	Gr.Pr	Nu	h	Q	integral Q
0	0	27	2	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	20530529	35.00285	2.783257	0.203683	0
1	60	28	3	299.5	0.003339	1.57E-05	0.02624	0.708	30744381	38.72084	3.078894	0.337978	16.24983
2	120	29	4	300	0.003333	1.57E-05	0.02624	0.708	40924187	41.5909	3.307107	0.484039	24.6605
3	180	32	7	301.5	0.003317	1.57E-05	0.02624	0.708	71261022	47.77672	3.798973	0.973053	43.71275
4	240	34	9	302.5	0.003306	1.57E-05	0.02624	0.708	91318434	50.83267	4.041968	1.33109	69.12428
5	300	36	11	303.5	0.003295	1.57E-05	0.02624	0.708	1.11E+08	53.4038	4.246411	1.709176	91.20798
6	360	37	12	304	0.003289	1.57E-05	0.02624	0.708	1.21E+08	54.55576	4.338009	1.904775	108.4185
7	420	38	13	304.5	0.003284	1.57E-05	0.02624	0.708	1.31E+08	55.63559	4.423872	2.10435	120.2738
8	480	39	14	305	0.003279	1.57E-05	0.02624	0.708	1.41E+08	56.65271	4.504749	2.307654	132.3601
9	540	42	17	306.5	0.003263	1.57E-05	0.02624	0.708	1.7E+08	59.39752	4.723003	2.937914	157.3671
10	600	45	20	308	0.003247	1.57E-05	0.02624	0.708	1.99E+08	61.78506	4.912849	3.595302	195.9965
11	660	47	22	309	0.003236	1.57E-05	0.02624	0.708	2.19E+08	63.22367	5.02724	4.046917	229.2666
12	720	50	25	310.5	0.003221	1.57E-05	0.02624	0.708	2.47E+08	65.19785	5.184217	4.742368	263.6786
13	780	52	27	311.5	0.00321	1.57E-05	0.02624	0.708	2.66E+08	66.41101	5.280682	5.21706	298.7828

14	840	54	29	312.5	0.0032	1.57E-05	0.02624	0.708	2.85E+08	67.55394	5.371562	5.699944	327.5101
15	900	54	29	312.5	0.0032	1.57E-05	0.02624	0.708	2.85E+08	67.55394	5.371562	5.699944	341.9967
16	960	54	29	312.5	0.0032	1.57E-05	0.02624	0.708	2.85E+08	67.55394	5.371562	5.699944	341.9967
17	1020	53	28	312	0.003205	1.57E-05	0.02624	0.708	2.75E+08	66.9907	5.326776	5.45751	334.7236
18	1080	52	27	311.5	0.00321	1.57E-05	0.02624	0.708	2.66E+08	66.41101	5.280682	5.21706	320.2371
19	1140	51	26	311	0.003215	1.57E-05	0.02624	0.708	2.57E+08	65.81379	5.233194	4.978657	305.8715
20	1200	49	24	310	0.003226	1.57E-05	0.02624	0.708	2.38E+08	64.56186	5.133646	4.508263	284.6076
21	1260	47	22	309	0.003236	1.57E-05	0.02624	0.708	2.19E+08	63.22367	5.02724	4.046917	256.6554
22	1320	46	21	308.5	0.003241	1.57E-05	0.02624	0.708	2.09E+08	62.51795	4.971124	3.819847	236.0029
23	1380	45	20	308	0.003247	1.57E-05	0.02624	0.708	1.99E+08	61.78506	4.912849	3.595302	222.4545
24	1440	43	18	307	0.003257	1.57E-05	0.02624	0.708	1.8E+08	60.22783	4.789025	3.154218	202.4856
25	1500	42	17	306.5	0.003263	1.57E-05	0.02624	0.708	1.7E+08	59.39752	4.723003	2.937914	182.764
26	1560	41	16	306	0.003268	1.57E-05	0.02624	0.708	1.6E+08	58.52795	4.653859	2.724616	169.8759
27	1620	40	15	305.5	0.003273	1.57E-05	0.02624	0.708	1.51E+08	57.61475	4.581246	2.514472	157.1726
28	1680	38	13	304.5	0.003284	1.57E-05	0.02624	0.708	1.31E+08	55.63559	4.423872	2.10435	138.5647
29	1740	37	12	304	0.003289	1.57E-05	0.02624	0.708	1.21E+08	54.55576	4.338009	1.904775	120.2738
30	1800	36	11	303.5	0.003295	1.57E-05	0.02624	0.708	1.11E+08	53.4038	4.246411	1.709176	108.4185
31	1860	35	10	303	0.0033	1.57E-05	0.02624	0.708	1.01E+08	52.16786	4.148135	1.517836	96.81037
32	1920	35	10	303	0.0033	1.57E-05	0.02624	0.708	1.01E+08	52.16786	4.148135	1.517836	91.07018
33	1980	35	10	303	0.0033	1.57E-05	0.02624	0.708	1.01E+08	52.16786	4.148135	1.517836	91.07018
34	2040	34	9	302.5	0.003306	1.57E-05	0.02624	0.708	91318434	50.83267	4.041968	1.33109	85.46779
35	2100	34	9	302.5	0.003306	1.57E-05	0.02624	0.708	91318434	50.83267	4.041968	1.33109	79.8654
36	2160	32	7	301.5	0.003317	1.57E-05	0.02624	0.708	71261022	47.77672	3.798973	0.973053	69.12428
37	2220	31	6	301	0.003322	1.57E-05	0.02624	0.708	61182340	45.98962	3.656872	0.802847	53.277
38	2280	30	5	300.5	0.003328	1.57E-05	0.02624	0.708	51070117	43.95872	3.495384	0.639495	43.27027
39	2340	29	4	300	0.003333	1.57E-05	0.02624	0.708	40924187	41.5909	3.307107	0.484039	33.70601

40	2400	28	3	299.5	0.003339	1.57E-05	0.02624	0.708	30744381	38.72084	3.078894	0.337978	24.6605	
41	2460	27	2	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	20530529	35.00285	2.783257	0.203683	16.24983	
42	2520	27	2	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	20530529	35.00285	2.783257	0.203683	12.221	
43	2580	26	1	298.5	0.00335	1.57E-05	0.02624	0.708	10282459	29.44609	2.34141	0.085674	8.68072	
													6508.184	joule
													1549.568	kal
													1.549568	kkal

100% Biomassa

Spesifikasi	Besar	Satuan
V air	1000	ml
ρ air	1	kg/L
m air	1	kg
m briket	0,72	kg
m <i>Water Boiling Pot</i>	0,18	kg
ΔT	20	$^{\circ}C$
Cp air	1	kkal/kg $^{\circ}C$
Cp <i>Water Boiling Pot</i>	0,214	kkal/kg $^{\circ}C$
Cp abu	0,205	kkal/kg $^{\circ}C$
HL air	538	kkal/kg
Calorific Value Briket 50% Biomassa	4081	kkal/kg
<i>Moisture Content</i> Briket 50% Biomassa	13,84	%
Ash Briket 50% Biomassa	4,1	%

Q yang diterima				Q Nett Briket			
Q	Persamaan	Besar	Satuan	Q	Persamaan	Besar	Satuan
Q Sensible Air	$m \text{ air} \times C_p \text{ air} \times \Delta T$	20.8	kcal	Q Bruto Briket	$m \text{ briket} \times \text{Calorific Value Briket}$	2265.803	kcal
Q Sensible Water Boiling Pot	$m \text{ WBP} \times C_p \text{ WBP} \times \Delta T$	2.0988	kcal	Q Sensibel Moisture	$m \text{ briket} \times \text{Moisture Content Briket} \times C_p \text{ air} \times \Delta T$	(-) 34.54057	kcal
Q Latent Air	Tidak ada air yang menguap	0	kcal	Q Latent Moisture	$m \text{ briket} \times \text{Moisture Content Briket} \times \text{HL air}$	(-) 50.63441	kcal
Q free Convection	Terlampir	(-) 1.589241	kcal	Q Sensibel Abu	$m \text{ briket} \times \text{Ash Briket} \times C_p \text{ abu} \times \Delta T$	(-) 2.459167	kcal
Total		24.48804	kcal	Total		2178.169	kcal
Efisiensi Termal (%) = (Q yang diserap/Q Nett Briket) x 100%				1.168242			

waktu (min)	t (s)	suhu (°C)	ΔT	Tf	beta	v	k	Pr	Gr.Pr	Nu	h	Q	integral Q
0	0	27	2	286.5	0.00349	1.57E-05	0.02624	0.708	21426276	35.37855	2.813131	0.205869	0
1	60	29	4	287.5	0.003478	1.57E-05	0.02624	0.708	42703500	42.03579	3.342482	0.489217	20.85258
2	120	30	5	288	0.003472	1.57E-05	0.02624	0.708	53286702	44.42813	3.53271	0.646324	34.0662
3	180	32	7	289	0.00346	1.57E-05	0.02624	0.708	74343247	48.28517	3.839402	0.983408	48.89195
4	240	35	10	290.5	0.003442	1.57E-05	0.02624	0.708	1.06E+08	52.72021	4.192056	1.533907	75.51945
5	300	37	12	291.5	0.003431	1.57E-05	0.02624	0.708	1.26E+08	55.13144	4.383785	1.924875	103.7635
6	360	42	17	294	0.003401	1.57E-05	0.02624	0.708	1.77E+08	60.01904	4.772423	2.968656	146.8059
7	420	44	19	295	0.00339	1.57E-05	0.02624	0.708	1.98E+08	61.65901	4.902826	3.408569	191.3168
8	480	47	22	296.5	0.003373	1.57E-05	0.02624	0.708	2.28E+08	63.87974	5.079408	4.088912	224.9244
9	540	49	24	297.5	0.003361	1.57E-05	0.02624	0.708	2.48E+08	65.2296	5.186742	4.55489	259.3141
10	600	50	25	298	0.003356	1.57E-05	0.02624	0.708	2.57E+08	65.87105	5.237747	4.791335	280.3868
11	660	51	26	298.5	0.00335	1.57E-05	0.02624	0.708	2.67E+08	66.49223	5.28714	5.02998	294.6394
12	720	52	27	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	2.77E+08	67.09448	5.335028	5.270751	309.0219
13	780	52	27	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	2.77E+08	67.09448	5.335028	5.270751	316.2451

14	840	53	28	299.5	0.003339	1.57E-05	0.02624	0.708	2.87E+08	67.67901	5.381506	5.513583	323.53
15	900	52	27	299	0.003344	1.57E-05	0.02624	0.708	2.77E+08	67.09448	5.335028	5.270751	323.53
16	960	51	26	298.5	0.00335	1.57E-05	0.02624	0.708	2.67E+08	66.49223	5.28714	5.02998	309.0219
17	1020	50	25	298	0.003356	1.57E-05	0.02624	0.708	2.57E+08	65.87105	5.237747	4.791335	294.6394
18	1080	49	24	297.5	0.003361	1.57E-05	0.02624	0.708	2.48E+08	65.2296	5.186742	4.55489	280.3868
19	1140	48	23	297	0.003367	1.57E-05	0.02624	0.708	2.38E+08	64.56639	5.134006	4.320722	266.2684
20	1200	47	22	296.5	0.003373	1.57E-05	0.02624	0.708	2.28E+08	63.87974	5.079408	4.088912	252.289
21	1260	46	21	296	0.003378	1.57E-05	0.02624	0.708	2.18E+08	63.16777	5.022795	3.859551	238.4539
22	1320	45	20	295.5	0.003384	1.57E-05	0.02624	0.708	2.08E+08	62.42834	4.963999	3.632735	224.7686
23	1380	44	19	295	0.00339	1.57E-05	0.02624	0.708	1.98E+08	61.65901	4.902826	3.408569	211.2391
24	1440	44	19	295	0.00339	1.57E-05	0.02624	0.708	1.98E+08	61.65901	4.902826	3.408569	204.5142
25	1500	43	18	294.5	0.003396	1.57E-05	0.02624	0.708	1.88E+08	60.85699	4.839053	3.187168	197.8721
26	1560	42	17	294	0.003401	1.57E-05	0.02624	0.708	1.77E+08	60.01904	4.772423	2.968656	184.6747
27	1620	42	17	294	0.003401	1.57E-05	0.02624	0.708	1.77E+08	60.01904	4.772423	2.968656	178.1194
28	1680	41	16	293.5	0.003407	1.57E-05	0.02624	0.708	1.67E+08	59.14141	4.702638	2.753173	171.6549
29	1740	41	16	293.5	0.003407	1.57E-05	0.02624	0.708	1.67E+08	59.14141	4.702638	2.753173	165.1904
30	1800	40	15	293	0.003413	1.57E-05	0.02624	0.708	1.57E+08	58.21965	4.629344	2.540872	158.8214
31	1860	39	14	292.5	0.003419	1.57E-05	0.02624	0.708	1.47E+08	57.24851	4.552124	2.331923	146.1838
32	1920	38	13	292	0.003425	1.57E-05	0.02624	0.708	1.37E+08	56.22168	4.470475	2.126518	133.7532
33	1980	34	9	290	0.003448	1.57E-05	0.02624	0.708	95254574	51.3718	4.084837	1.345207	104.1518

6674.811	joule
1589.241	kal
1.589241	kkal

Untuk perhitungan transfer panas konveksi bebas, data-data pendukung yang dibutuhkan:

Parameter	Nilai
g	9.8
D	0.165
L	0.33
C	0.52
n	0.25
A top	0.010686
A side	0.025905
A total	0.036591

Nilai di atas, dianalisa berdasarkan nilai temperature rata-rata (T_f) dari data di atas, yang pada umumnya mendekati nilai 300.

LAMPIRAN 5

DATA PENYERAPAN PANAS OLEH AIR DALAM WATER POT

Berdasarkan persamaan 3.1

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

Untuk kasus penguapan 1 kg air dengan suhu awal 27°C pada panci berbahan aluminium, panas yang terlibat antara lain,

Panas sensible untuk menaikkan suhu air,

$$Q_{\text{air}} = m_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot \Delta T$$

$$Q_{\text{air}} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kkal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (100 - 27)$$

$$Q_{\text{air}} = 73 \text{ kkal}$$

Panas yang terserap oleh panci,

$$Q_{\text{panci}} = m_{\text{panci}} \cdot C_{p\text{aluminium}} \cdot \Delta T$$

$$Q_{\text{panci}} = 0,18 \text{ kg} \cdot 0,22 \text{ kkal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (100 - 27)$$

$$Q_{\text{panci}} = 2.89 \text{ kkal}$$

Panas yang dibutuhkan untuk menguapkan 1 kg air (Kalor Laten)

$$Q_{\text{laten air}} = m \cdot H_L$$

$$Q_{\text{laten air}} = 1 \text{ kg} \cdot 538 \text{ kkal/kg}$$

$$Q_{\text{laten air}} = 538 \text{ kkal/kg}$$

LAMPIRAN 6
PERHITUNGAN BILANGAN REYNOLDS

$$Re = \frac{D \times v \times \rho}{\mu}$$

Diketahui

Diameter kompor : 0,175 m
 v (kecepatan superficial : 0,29 m/s; 0,42m/s; 0,54 m/s.
 Densitas Udara : 1,2 kg.m³
 Viskositas udara : (bervariasi terhadap suhu rata-rata pembakaran)
 0.00002484 dan 0.00002671

Berdasarkan hukum kontinuitas perkalian v dan ρ akan menghasilkan hasil yang sama pada tiap variasi densitas udara terhadap suhu. Maka yang dapat diperhitungkan berdasarkan variasi suhu adalah viskositas.

D (m)	v (m/s)	P (kg/m ³)	viskositas (kg/m.s)	Re
0.175	0.29	1.18	0.00002484	2410.829
	0.42		0.00002484	3491.546
	0.54		0.00002671	4489.13

LAMPIRAN 7
PERHITUNGAN ENTHALPI PEMBAKARAN

Kecepatan: 0,29 m/s

t	50% TKKS : 50% Batubara			75% TKKS : 25% Batubara			100% TKKS		
	T	T-25	integral	T	T-25	integral	T	T-25	integral
0	43.283	18.283	0	43.698	18.698	0	45.693	20.693	0
10	53.937	28.937	236.1	59.342	34.342	265.2	79.289	54.289	374.91
20	59.632	34.632	317.845	72.234	47.234	407.88	109.543	84.543	694.16
30	60.913	35.913	352.725	95.605	70.605	589.195	150.348	125.348	1049.455
40	74.33	49.33	426.215	112.811	87.811	792.08	200.456	175.456	1504.02
50	83.904	58.904	541.17	129.088	104.088	959.495	228.052	203.052	1892.54
60	91.381	66.381	626.425	150.311	125.311	1146.995	266.833	241.833	2224.425
70	110.374	85.374	758.775	191.662	166.662	1459.865	293.813	268.813	2553.23
80	118.435	93.435	894.045	226.122	201.122	1838.92	313.656	288.656	2787.345
90	116.07	91.07	922.525	245.55	220.55	2108.36	330.033	305.033	2968.445
100	116.251	91.251	911.605	246.986	221.986	2212.68	391.586	366.586	3358.095
110	125.736	100.736	959.935	307.158	282.158	2520.72	404.167	379.167	3728.765
120	138.354	113.354	1070.45	318.707	293.707	2879.325	455.723	430.723	4049.45
130	151.478	126.478	1199.16	319.131	294.131	2939.19	464.81	439.81	4352.665
140	152.686	127.686	1270.82	303.508	278.508	2863.195	494.75	469.75	4547.8
150	149.365	124.365	1260.255	305.233	280.233	2793.705	493.659	468.659	4692.045
160	138.191	113.191	1187.78	291.196	266.196	2732.145	446.512	421.512	4450.855
170	131.101	106.101	1096.46	275.306	250.306	2582.51	425.12	400.12	4108.16
180	127.588	102.588	1043.445	259.455	234.455	2423.805	439.067	414.067	4070.935
190	122.38	97.38	999.84	244.354	219.354	2269.045	411.96	386.96	4005.135
200	126.864	101.864	996.22	235.468	210.468	2149.11	427.915	402.915	3949.375
210	130.751	105.751	1038.075	223.083	198.083	2042.755	457.442	432.442	4176.785
220	130.637	105.637	1056.94	206.668	181.668	1898.755	425.667	400.667	4165.545
230	130.577	105.577	1056.07	200.3	175.3	1784.84	453.11	428.11	4143.885
240	131.755	106.755	1061.66	198.725	173.725	1745.125	480.917	455.917	4420.135
250	131.45	106.45	1066.025	196.735	171.735	1727.3	494.163	469.163	4625.4
260	145.444	120.444	1134.47	197.682	172.682	1722.085	515.347	490.347	4797.55
270	168.27	143.27	1318.57	199.31	174.31	1734.96	516.019	491.019	4906.83
280	173.658	148.658	1459.64	201.512	176.512	1754.11	515.667	490.667	4908.43
290	179.743	154.743	1517.005	204.704	179.704	1781.08	521.173	496.173	4934.2
300	196.196	171.196	1629.695	210.403	185.403	1825.535	538.002	513.002	5045.875

310	203.216	178.216	1747.06	217.827	192.827	1891.15	571.134	546.134	5295.68
320	188.386	163.386	1708.01	223.084	198.084	1954.555	573.49	548.49	5473.12
330	185.563	160.563	1619.745	231.43	206.43	2022.57	574.815	549.815	5491.525
340	187.982	162.982	1617.725	237.179	212.179	2093.045	567.667	542.667	5462.41
350	192.761	167.761	1653.715	237.741	212.741	2124.6	558.782	533.782	5382.245
360	198.174	173.174	1704.675	235.745	210.745	2117.43	553.303	528.303	5310.425
370	213.747	188.747	1809.605	236.535	211.535	2111.4	550.411	525.411	5268.57
380	229.531	204.531	1966.39	239.756	214.756	2131.455	532.56	507.56	5164.855
390	244.922	219.922	2122.265	236.476	211.476	2131.16	529.059	504.059	5058.095
400	263.726	238.726	2293.24	246.899	221.899	2166.875	521.677	496.677	5003.68
410	278.497	253.497	2461.115	291.043	266.043	2439.71	547.026	522.026	5093.515
420	292.722	267.722	2606.095	317.119	292.119	2790.81	550.883	525.883	5239.545
430	309.537	284.537	2761.295	322.879	297.879	2949.99	499.223	474.223	5000.53
440	319.853	294.853	2896.95	322.363	297.363	2976.21	484.066	459.066	4666.445
450	326.007	301.007	2979.3	332.496	307.496	3024.295	484.3	459.3	4591.83
460	321.248	296.248	2986.275	338.309	313.309	3104.025	490.499	465.499	4623.995
470	319.26	294.26	2952.54	336.746	311.746	3125.275	506.523	481.523	4735.11
480	326.778	301.778	2980.19	340.023	315.023	3133.845	510.328	485.328	4834.255
490	321.348	296.348	2990.63	339.282	314.282	3146.525	511.926	486.926	4861.27
500	325.903	300.903	2986.255	339.493	314.493	3143.875	369.761	344.761	4158.435
510	312.789	287.789	2943.46	347.504	322.504	3184.985	311.368	286.368	3155.645
520	299.563	274.563	2811.76	315.649	290.649	3065.765	292.267	267.267	2768.175
530	304.575	279.575	2770.69	291.195	266.195	2784.22	285.425	260.425	2638.46
540	320.527	295.527	2875.51	279.941	254.941	2605.68	327.221	302.221	2813.23
550	333.997	308.997	3022.62	278.312	253.312	2541.265	345.933	320.933	3115.77
560	341.47	316.47	3127.335	278.45	253.45	2533.81	362.674	337.674	3293.035
570	340.478	315.478	3159.74	284.42	259.42	2564.35	377.87	352.87	3452.72
580	342.949	317.949	3167.135	280.221	255.221	2573.205	388.025	363.025	3579.475
590	260.982	235.982	2769.655	288.205	263.205	2592.13	383.603	358.603	3608.14
600	232.68	207.68	2218.31	289.77	264.77	2639.875	384.43	359.43	3590.165
610	220.479	195.479	2015.795	296.615	271.615	2681.925	383.971	358.971	3592.005
620	213.828	188.828	1921.535	310.479	285.479	2785.47	382.741	357.741	3583.56
630	210.315	185.315	1870.715	313.988	288.988	2872.335	380.714	355.714	3567.275
640	210.039	185.039	1851.77	310.827	285.827	2874.075	385.957	360.957	3583.355
650	212.494	187.494	1862.665	308.923	283.923	2848.75	395.835	370.835	3658.96
660	213.763	188.763	1881.285	307.682	282.682	2833.025	398.643	373.643	3722.39
670	212.541	187.541	1881.52	312.026	287.026	2848.54	396.14	371.14	3723.915
680	211.688	186.688	1871.145	312.82	287.82	2874.23	390.339	365.339	3682.395

690	211.103	186.103	1863.955	310.317	285.317	2865.685	352.98	327.98	3466.595
700	216.527	191.527	1888.15	310.609	285.609	2854.63	335.363	310.363	3191.715
710	261.801	236.801	2141.64	307.724	282.724	2841.665	327.178	302.178	3062.705
720	258.278	233.278	2350.395	302.568	277.568	2801.46	322.239	297.239	2997.085
730	234.964	209.964	2216.21	300.676	275.676	2766.22	318.575	293.575	2954.07
740	227.482	202.482	2062.23	293.439	268.439	2720.575	315.352	290.352	2919.635
750	222.011	197.011	1997.465	287.349	262.349	2653.94	312.129	287.129	2887.405
760	218.992	193.992	1955.015	281.894	256.894	2596.215	308.109	283.109	2851.19
770	214.756	189.756	1918.74	271.93	246.93	2519.12	304.136	279.136	2811.225
780	212.673	187.673	1887.145	264.241	239.241	2430.855	309.355	284.355	2817.455
790	210.683	185.683	1866.78	256.922	231.922	2355.815	313.842	288.842	2865.985
800	210.066	185.066	1853.745	249.554	224.554	2282.38	324.368	299.368	2941.05
810	210.979	185.979	1855.225	231.591	206.591	2155.725	300.187	275.187	2872.775
820	212.559	187.559	1867.69	220.223	195.223	2009.07	289.066	264.066	2696.265
830	209.044	184.044	1858.015	210.583	185.583	1904.03	283.718	258.718	2613.92
840	206.767	181.767	1829.055	206.375	181.375	1834.79	280.771	255.771	2572.445
850	206.344	181.344	1815.555	204.136	179.136	1802.555	277.993	252.993	2543.82
860	208.227	183.227	1822.855	202.69	177.69	1784.13	275.965	250.965	2519.79
870	208.964	183.964	1835.955	200.329	175.329	1765.095	274.393	249.393	2501.79
880	208.107	183.107	1835.355	200.274	175.274	1753.015	273.427	248.427	2489.1
890	211.506	186.506	1848.065	196.669	171.669	1734.715	271.642	246.642	2475.345
900	210.118	185.118	1858.12	193.695	168.695	1701.82	268.988	243.988	2453.15
910	209.012	184.012	1845.65	189.694	164.694	1666.945	266.8	241.8	2428.94
920	208.115	183.115	1835.635	187.038	162.038	1633.66	283.917	258.917	2503.585
930	205.408	180.408	1817.615	184.049	159.049	1605.435	261.625	236.625	2477.71
940	203.235	178.235	1793.215	183.072	158.072	1585.605	259.484	234.484	2355.545
950	202.215	177.215	1777.25	183.955	158.955	1585.135	257.54	232.54	2335.12
960	200.738	175.738	1764.765	184.981	159.981	1594.68	256.346	231.346	2319.43
970	199.981	174.981	1753.595	182.605	157.605	1587.93	254.642	229.642	2304.94
980	199.359	174.359	1746.7	181.519	156.519	1570.62	252.856	227.856	2287.49
990	198.851	173.851	1741.05	180.833	155.833	1561.76	256.699	231.699	2297.775
1000	199.695	174.695	1742.73	181.567	156.567	1562	266.215	241.215	2364.57
1010	201.635	176.635	1756.65	187.971	162.971	1597.69	243.419	218.419	2298.17
1020	201.176	176.176	1764.055	196.375	171.375	1671.73	238.888	213.888	2161.535
1030	200.493	175.493	1758.345	198.818	173.818	1725.965	237.065	212.065	2129.765
1040	199.152	174.152	1748.225	193.395	168.395	1711.065	243.496	218.496	2152.805
1050	199.078	174.078	1741.15	192.468	167.468	1679.315	244.265	219.265	2188.805
1060	199.022	174.022	1740.5	195.837	170.837	1691.525	243.665	218.665	2189.65

1070	198.121	173.121	1735.715	197.389	172.389	1716.13	243.328	218.328	2184.965
1080	195.614	170.614	1718.675	190.488	165.488	1689.385	238.123	213.123	2157.255
1090	193.648	168.648	1696.31	181.556	156.556	1610.22	236.724	211.724	2124.235
1100	190.837	165.837	1672.425	176.034	151.034	1537.95	235.848	210.848	2112.86
1110	187.184	162.184	1640.105	170.496	145.496	1482.65	234.658	209.658	2102.53
1120	184.692	159.692	1609.38	166.247	141.247	1433.715	233.49	208.49	2090.74
1130	182.868	157.868	1587.8	164.003	139.003	1401.25	231.942	206.942	2077.16
1140	178.993	153.993	1559.305	163.448	138.448	1387.255	230.33	205.33	2061.36
1150	173.97	148.97	1514.815	163.675	138.675	1385.615	228.48	203.48	2044.05
1160	170.131	145.131	1470.505	166.749	141.749	1402.12	226.212	201.212	2023.46
1170	166.088	141.088	1431.095	167.097	142.097	1419.23	224.841	199.841	2005.265
1180	163.651	138.651	1398.695	166.67	141.67	1418.835	223.554	198.554	1991.975
1190	156.941	131.941	1352.96	164.948	139.948	1408.09	222.447	197.447	1980.005
1200	148.886	123.886	1279.135	163.419	138.419	1391.835	220.579	195.579	1965.13
1210	144.212	119.212	1215.49	162.542	137.542	1379.805	218.558	193.558	1945.685
1220	140.7	115.7	1174.56	160.703	135.703	1366.225	216.657	191.657	1926.075
1230	136.557	111.557	1136.285	156.908	131.908	1338.055	215.533	190.533	1910.95
1240	133.227	108.227	1098.92	153.542	128.542	1302.25	214.138	189.138	1898.355
1250	129.667	104.667	1064.47	151.478	126.478	1275.1	212.8	187.8	1884.69
1260	127.67	102.67	1036.685	148.732	123.732	1251.05	211.056	186.056	1869.28
1270	124.371	99.371	1010.205	148.326	123.326	1235.29	188.731	163.731	1748.935
1280	121.542	96.542	979.565	149.352	124.352	1238.39	164.687	139.687	1517.09
1290	121.567	96.567	965.545	147.246	122.246	1232.99	156.336	131.336	1355.115
1300	119.084	94.084	953.255	145.8	120.8	1215.23	151.685	126.685	1290.105
1310	114.916	89.916	920	144.663	119.663	1202.315	148.45	123.45	1250.675
1320	114.832	89.832	898.74	141.759	116.759	1182.11	161.346	136.346	1298.98
1330	116.244	91.244	905.38	139.741	114.741	1157.5	170.717	145.717	1410.315
1340	115.304	90.304	907.74	137.973	112.973	1138.57	159.145	134.145	1399.31
1350	115.143	90.143	902.235	138.16	113.16	1130.665	184.397	159.397	1467.71
1360	116.82	91.82	909.815	138.145	113.145	1131.525	195.216	170.216	1648.065
1370	116.057	91.057	914.385	136.668	111.668	1124.065	199.898	174.898	1725.57
1380	114.111	89.111	900.84	135.21	110.21	1109.39	201.711	176.711	1758.045
1390	113.183	88.183	886.47	133.729	108.729	1094.695	202.313	177.313	1770.12
1400	110.524	85.524	868.535	131.477	106.477	1076.03	201.039	176.039	1766.76
1410	105.051	80.051	827.875	129.674	104.674	1055.755	200.501	175.501	1757.7
1420	100.485	75.485	777.68	128.058	103.058	1038.66	199.799	174.799	1751.5
1430	97.858	72.858	741.715	125.59	100.59	1018.24	198.594	173.594	1741.965
1440	93.454	68.454	706.56	122.868	97.868	992.29	197.377	172.377	1729.855

1450	91.4	66.4	674.27	120.155	95.155	965.115	195.876	170.876	1716.265
1460	92.99	67.99	671.95	117.058	92.058	936.065	194.091	169.091	1699.835
1470	91.054	66.054	670.22	113.646	88.646	903.52	192.911	167.911	1685.01
1480	88.866	63.866	649.6	110.637	85.637	871.415	191.653	166.653	1672.82
1490	84.703	59.703	617.845	108.667	83.667	846.52	190.036	165.036	1658.445
1500	81.91	56.91	583.065	107.191	82.191	829.29	188.115	163.115	1640.755
1510	80.281	55.281	560.955	106.23	81.23	817.105	186.39	161.39	1622.525
1520	79.215	54.215	547.48	106.915	81.915	815.725	184.878	159.878	1606.34
1530	77.196	52.196	532.055	106.09	81.09	815.025	183.107	158.107	1589.925
1540	75.25	50.25	512.23	104.012	79.012	800.51	182.282	157.282	1576.945
1550	73.81	48.81	495.3	102.334	77.334	781.73	180.184	155.184	1562.33
1560	73.932	48.932	488.71	100.844	75.844	765.89	176.722	151.722	1534.53
1570	74.213	49.213	490.725	99.183	74.183	750.135	173.71	148.71	1502.16
1580	74.524	49.524	493.685	97.291	72.291	732.37	170.467	145.467	1470.885
1590	74.442	49.442	494.83	95.893	70.893	715.92	167.934	142.934	1442.005
1600	73.883	48.883	491.625	94.148	69.148	700.205	164.35	139.35	1411.42
1610	73.346	48.346	486.145	92.53	67.53	683.39	136.801	111.801	1255.755
1620	72.3	47.3	478.23	91.231	66.231	668.805	98.615	73.615	927.08
1630	70.641	45.641	464.705	90.582	65.582	659.065	79.388	54.388	640.015
1640	68.413	43.413	445.27	90.171	65.171	653.765	69.772	44.772	495.8
1650	64.624	39.624	415.185	90.699	65.699	654.35	64.542	39.542	421.57
1660	61.865	36.865	382.445	90.833	65.833	657.66	77.692	52.692	461.17
1670	59.934	34.934	358.995	89.235	64.235	650.34	97.77	72.77	627.31
1680	58.757	33.757	343.455	89.025	64.025	641.3	89.169	64.169	684.695
1690	58.074	33.074	334.155	88.121	63.121	635.73	84.939	59.939	620.54
1700	56.832	31.832	324.53	87.715	62.715	629.18	85.585	60.585	602.62
1710	56.247	31.247	315.395	87.4	62.4	625.575	92.98	67.98	642.825
1720	55.758	30.758	310.025	86.556	61.556	619.78	72.428	47.428	577.04
1730	54.332	29.332	300.45	85.829	60.829	611.925	59.568	34.568	409.98
1740	53.319	28.319	288.255	85.447	60.447	606.38	77.969	52.969	437.685
1750	52.416	27.416	278.675	85.405	60.405	604.26	100.148	75.148	640.585
1760	52.012	27.012	272.14	84.349	59.349	598.77	101.064	76.064	756.06
1770	50.384	25.384	261.98	83.138	58.138	587.435	112.933	87.933	819.985
1780	48.761	23.761	245.725	79.914	54.914	565.26	118.669	93.669	908.01
1790	47.462	22.462	231.115	80.262	55.262	550.88	119.428	94.428	940.485
1800	46.658	21.658	220.6	80.678	55.678	554.7	116.222	91.222	928.25
1810	45.642	20.642	211.5	80.243	55.243	554.605	110.451	85.451	883.365
1820	44.883	19.883	202.625	79.722	54.722	549.825	102.84	77.84	816.455

1830	44.028	19.028	194.555	79.149	54.149	544.355	92.74	67.74	727.9
1840	43.245	18.245	186.365	78.926	53.926	540.375	80.585	55.585	616.625
1850	42.889	17.889	180.67	78.133	53.133	535.295	70.725	45.725	506.55
1860	42.515	17.515	177.02	76.833	51.833	524.83	63.713	38.713	422.19
1870	42.322	17.322	174.185	75.6	50.6	512.165	58.723	33.723	362.18
1880	42.036	17.036	171.79	75.397	50.397	504.985	55.698	30.698	322.105
1890	41.739	16.739	168.875	74.554	49.554	499.755	53.609	28.609	296.535
1900	41.425	16.425	165.82	73.605	48.605	490.795	51.998	26.998	278.035
1910	40.888	15.888	161.565	72.127	47.127	478.66	51	26	264.99
1920	40.619	15.619	157.535	71.526	46.526	468.265	50.387	25.387	256.935
1930	40.432	15.432	155.255	71.399	46.399	464.625	49.769	24.769	250.78
1940	40.308	15.308	153.7	70.452	45.452	459.255	49.304	24.304	245.365
1950	40.224	15.224	152.66	69.835	44.835	451.435	48.999	23.999	241.515
1960	39.951	14.951	150.875	69.048	44.048	444.415	48.715	23.715	238.57
1970	39.964	14.964	149.575	68.341	43.341	436.945	48.579	23.579	236.47
1980	39.909	14.909	149.365	67.573	42.573	429.57	48.279	23.279	234.29
1990	39.795	14.795	148.52	66.934	41.934	422.535	48.031	23.031	231.55
2000	39.731	14.731	147.63	66.208	41.208	415.71	50.823	25.823	244.27
2010	39.879	14.879	148.05	66.022	41.022	411.15	46.675	21.675	237.49
2020	40.258	15.258	150.685	65.081	40.081	405.515	44.74	19.74	207.075
2030	39.938	14.938	150.98	64.15	39.15	396.155	43.729	18.729	192.345
2040	39.623	14.623	147.805	64.041	39.041	390.955	47.66	22.66	206.945
2050	39.213	14.213	144.18	63.72	38.72	388.805	51.235	26.235	244.475
2060	38.954	13.954	140.835	62.991	37.991	383.555	52.808	27.808	270.215
2070	38.841	13.841	138.975	62.513	37.513	377.52	53.599	28.599	282.035
2080	38.769	13.769	138.05	62.486	37.486	374.995	54.226	29.226	289.125
2090		Σ(T.dt)	255651.7	62.122	37.122	373.04	54.715	29.715	294.705
2100		T.dt/dt	122.91	62.053	37.053	370.875	55.058	30.058	298.865
2110				61.543	36.543	367.98	55.234	30.234	301.46
2120				60.979	35.979	362.61	55.29	30.29	302.62
2130				60.643	35.643	358.11	55.298	30.298	302.94
2140				59.804	34.804	352.235	55.402	30.402	303.5
2150				59.514	34.514	346.59	55.437	30.437	304.195
2160				58.921	33.921	342.175	55.01	30.01	302.235
2170				58.886	33.886	339.035	54.662	29.662	298.36
2180				58.421	33.421	336.535	54.433	29.433	295.475
2190				57.817	32.817	331.19	54.227	29.227	293.3
2200				57.533	32.533	326.75	53.204	28.204	287.155

2210				57.89	32.89	327.115	52.096	27.096	276.5
2220				57.508	32.508	326.99	51.363	26.363	267.295
2230				57.315	32.315	324.115	50.744	25.744	260.535
2240				57.105	32.105	322.1	50.44	25.44	255.92
2250				56.523	31.523	318.14	50.204	25.204	253.22
2260				56.092	31.092	313.075	50.034	25.034	251.19
2270				55.619	30.619	308.555	49.74	24.74	248.87
2280				55.142	30.142	303.805	49.513	24.513	246.265
2290				54.419	29.419	297.805	49.272	24.272	243.925
2300				54.241	29.241	293.3	49.034	24.034	241.53
2310				53.936	28.936	290.885		Σ(T.dt)	491300.9
2320				53.778	28.778	288.57		T.dt/dt	213.6091
2330				53.496	28.496	286.37			
2340				53.664	28.664	285.8			
2350				53.48	28.48	285.72			
2360				53.376	28.376	284.28			
2370				53.082	28.082	282.29			
2380				52.682	27.682	278.82			
2390				52.412	27.412	275.47			
2400				52.565	27.565	274.885			
2410				52.589	27.589	275.77			
2420				51.958	26.958	272.735			
2430				52.034	27.034	269.96			
2440				51.816	26.816	269.25			
2450				51.762	26.762	267.89			
2460				51.499	26.499	266.305			
2470				51.251	26.251	263.75			
2480				51.298	26.298	262.745			
2490				51.208	26.208	262.53			
2500				51.153	26.153	261.805			
2510				50.903	25.903	260.28			
2520				50.445	25.445	256.74			
2530				50.329	25.329	253.87			
2540				50.273	25.273	253.01			
2550				50.406	25.406	253.395			
2560				50.261	25.261	253.335			
2570				50.368	25.368	253.145			
2580				50.033	25.033	252.005			

2590				50.047	25.047	250.4
2600				50.24	25.24	251.435
2610				50.87	25.87	255.55
				$\Sigma(T.dt)$		335370.7
				$T.dt/dt$		128.4945

Kecepatan: 0,42 m/s

t	50% TKKS : 50% Batubara			75% TKKS : 25% Batubara			100% TKKS		
	T	T-25	integral	T	T-25	integral	T	T-25	integral
0	34.884	9.884	0	28.372	3.372	0	42.127	17.127	0
10	38.549	13.549	117.165	30.372	5.372	43.72	77.136	52.136	346.315
20	40.788	15.788	146.685	31.898	6.898	61.35	126.856	101.856	769.96
30	43.639	18.639	172.135	32.857	7.857	73.775	165.204	140.204	1210.3
40	47.701	22.701	206.7	34.413	9.413	86.35	181.201	156.201	1482.025
50	49.138	24.138	234.195	35.638	10.638	100.255	237.026	212.026	1841.135
60	51.318	26.318	252.28	38.473	13.473	120.555	312.055	287.055	2495.405
70	53.491	28.491	274.045	41.793	16.793	151.33	342.814	317.814	3024.345
80	54.315	29.315	289.03	44.224	19.224	180.085	372.712	347.712	3327.63
90	57.747	32.747	310.31	47.462	22.462	208.43	390.997	365.997	3568.545
100	60.727	35.727	342.37	65.386	40.386	314.24	388.536	363.536	3647.665
110	64.401	39.401	375.64	61.952	36.952	386.69	390.856	365.856	3646.96
120	69.987	44.987	421.94	76.252	51.252	441.02	390.348	365.348	3656.02
130	78.986	53.986	494.865	104.657	79.657	654.545	393.755	368.755	3670.515
140	88.332	63.332	586.59	270.845	245.845	1627.51	399.489	374.489	3716.22
150	97.879	72.879	681.055	377.427	352.427	2991.36	394.716	369.716	3721.025
160	105.626	80.626	767.525	413.611	388.611	3705.19	391.085	366.085	3679.005
170	117.258	92.258	864.42	443.391	418.391	4035.01	386.709	361.709	3638.97
180	123.037	98.037	951.475	464.215	439.215	4288.03	382.686	357.686	3596.975
190	146.781	121.781	1099.09	486.182	461.182	4501.985	350.783	325.783	3417.345
200	170.299	145.299	1335.4	494.241	469.241	4652.115	321.97	296.97	3113.765
210	209.436	184.436	1648.675	482.352	457.352	4632.965	319.284	294.284	2956.27
220	245.769	220.769	2026.025	475.609	450.609	4539.805	303.732	278.732	2865.08
230	346.211	321.211	2709.9	477.151	452.151	4513.8	289.036	264.036	2713.84
240	394.785	369.785	3454.98	477.647	452.647	4523.99	283.314	258.314	2611.75
250	405.246	380.246	3750.155	467.919	442.919	4477.83	255.284	230.284	2442.99
260	409.401	384.401	3823.235	433.536	408.536	4257.275	266.967	241.967	2361.255
270	407.171	382.171	3832.86	380.247	355.247	3818.915	277.096	252.096	2470.315
280	403.391	378.391	3802.81	383.12	358.12	3566.835	284.518	259.518	2558.07

290	397.723	372.723	3755.57	393.041	368.041	3630.805	291.628	266.628	2630.73
300	393.694	368.694	3707.085	368.757	343.757	3558.99	287.759	262.759	2646.935
310	390.843	365.843	3672.685	351.733	326.733	3352.45	290.793	265.793	2642.76
320	387.708	362.708	3642.755	343.199	318.199	3224.66	291.64	266.64	2662.165
330	383.876	358.876	3607.92	337.324	312.324	3152.615	300.759	275.759	2711.995
340	378.406	353.406	3561.41	329.619	304.619	3084.715	308.643	283.643	2797.01
350	374.8	349.8	3516.03	323.888	298.888	3017.535	315.985	290.985	2873.14
360	370.917	345.917	3478.585	319.676	294.676	2967.82	319.892	294.892	2929.385
370	367.818	342.818	3443.675	323.558	298.558	2966.17	326.644	301.644	2982.68
380	365.584	340.584	3417.01	342.61	317.61	3080.84	335.971	310.971	3063.075
390	362.887	337.887	3392.355	369.526	344.526	3310.68	345.181	320.181	3155.76
400	360.69	335.69	3367.885	402.626	377.626	3610.76	354.987	329.987	3250.84
410	368.861	343.861	3397.755	412.887	387.887	3827.565	349.704	324.704	3273.455
420	373.459	348.459	3461.6	413.274	388.274	3880.805	322.884	297.884	3112.94
430	377.743	352.743	3506.01	411.25	386.25	3872.62	305.719	280.719	2893.015
440	396.038	371.038	3618.905	409.83	384.83	3855.4	297.784	272.784	2767.515
450	413.886	388.886	3799.62	414.355	389.355	3870.925	296.83	271.83	2723.07
460	426.849	401.849	3953.675	416.167	391.167	3902.61	293.044	268.044	2699.37
470	433.175	408.175	4050.12	415.762	390.762	3909.645	295.334	270.334	2691.89
480	439.499	414.499	4113.37	415.883	390.883	3908.225	302.042	277.042	2736.88
490	447.405	422.405	4184.52	416.389	391.389	3911.36	315.881	290.881	2839.615
500	453.942	428.942	4256.735	416.158	391.158	3912.735	324.824	299.824	2953.525
510	456.338	431.338	4301.4	413.567	388.567	3898.625	336.479	311.479	3056.515
520	425.376	400.376	4158.57	410.23	385.23	3868.985	344.068	319.068	3152.735
530	414.044	389.044	3947.1	406.522	381.522	3833.76	348.98	323.98	3215.24
540	417.943	392.943	3909.935	403.396	378.396	3799.59	348.622	323.622	3238.01
550	427.055	402.055	3974.99	395.27	370.27	3743.33	345.823	320.823	3222.225
560	449.368	424.368	4132.115	291.679	266.679	3184.745	341.008	316.008	3184.155
570	478.842	453.842	4391.05	238.179	213.179	2399.29	307.424	282.424	2992.16
580	484.871	459.871	4568.565	198.824	173.824	1935.015	270.132	245.132	2637.78
590	487.868	462.868	4613.695	188.82	163.82	1688.22	255.916	230.916	2380.24
600	494.353	469.353	4661.105	197.117	172.117	1679.685	252.287	227.287	2291.015
610	513.464	488.464	4789.085	206.021	181.021	1765.69	254.25	229.25	2282.685
620	521.85	496.85	4926.57	224.391	199.391	1902.06	254.605	229.605	2294.275
630	532.132	507.132	5019.91	251.385	226.385	2128.88	244.947	219.947	2247.76
640	539.392	514.392	5107.62	262.962	237.962	2321.735	229.435	204.435	2121.91
650	581.9	556.9	5356.46	261.354	236.354	2371.58	223.231	198.231	2013.33
660	593.891	568.891	5628.955	253.197	228.197	2322.755	219.322	194.322	1962.765

670	597.31	572.31	5706.005	253.236	228.236	2282.165	218.19	193.19	1937.56
680	591.31	566.31	5693.1	258.754	233.754	2309.95	218.173	193.173	1931.815
690	606.235	581.235	5737.725	280.498	255.498	2446.26	216.817	191.817	1924.95
700	617.66	592.66	5869.475	191.202	166.202	2108.5	214.872	189.872	1908.445
710	620.88	595.88	5942.7	146.346	121.346	1437.74	213.088	188.088	1889.8
720	619.202	594.202	5950.41	131.132	106.132	1137.39	210.067	185.067	1865.775
730	616.77	591.77	5929.86	126.827	101.827	1039.795	207.885	182.885	1839.76
740	615.223	590.223	5909.965	125.976	100.976	1014.015	205.87	180.87	1818.775
750	614.506	589.506	5898.645	124.986	99.986	1004.81	204.817	179.817	1803.435
760	613.971	588.971	5892.385	126.255	101.255	1006.205	205.694	180.694	1802.555
770	608.605	583.605	5862.88	126.511	101.511	1013.83	203.869	178.869	1797.815
780	604.183	579.183	5813.94	129.494	104.494	1030.025	202.576	177.576	1782.225
790	590.494	565.494	5723.385	131.91	106.91	1057.02	201.778	176.778	1771.77
800	578.793	553.793	5596.435	133.659	108.659	1077.845	201.769	176.769	1767.735
810	552.481	527.481	5406.37	136.279	111.279	1099.69	202.22	177.22	1769.945
820	533.987	508.987	5182.34	138.444	113.444	1123.615	202.751	177.751	1774.855
830	505.64	480.64	4948.135	141.41	116.41	1149.27	202.962	177.962	1778.565
840	483.484	458.484	4695.62	142.254	117.254	1168.32	203.166	178.166	1780.64
850	473.274	448.274	4533.79	140.897	115.897	1165.755	203.193	178.193	1781.795
860	475.834	450.834	4495.54	140.099	115.099	1154.98	203.228	178.228	1782.105
870	474.234	449.234	4500.34	139.643	114.643	1148.71	203.581	178.581	1784.045
880	471.495	446.495	4478.645	140.317	115.317	1149.8	205.555	180.555	1795.68
890	466.102	441.102	4437.985	135.768	110.768	1130.425	204.91	179.91	1802.325
900	521.25	496.25	4686.76	139.382	114.382	1125.75	203.317	178.317	1791.135
910	534.572	509.572	5029.11	143.185	118.185	1162.835	201.661	176.661	1774.89
920	540.199	515.199	5123.855	146.913	121.913	1200.49	199.311	174.311	1754.86
930	531.226	506.226	5107.125	148.649	123.649	1227.81	197.982	172.982	1736.465
940	523.203	498.203	5022.145	149.747	124.747	1241.98	196.185	171.185	1720.835
950	521.372	496.372	4972.875	149.761	124.761	1247.54	190.775	165.775	1684.8
960	517.803	492.803	4945.875	150.701	125.701	1252.31	187.754	162.754	1642.645
970	511.325	486.325	4895.64	150.406	125.406	1255.535	179.136	154.136	1584.45
980	572.584	547.584	5169.545	148.948	123.948	1246.77	180.856	155.856	1549.96
990	578.929	553.929	5507.565	147.494	122.494	1232.21	180.785	155.785	1558.205
1000	580.883	555.883	5549.06	145.851	120.851	1216.725	179.286	154.286	1550.355
1010	579.435	554.435	5551.59	143.582	118.582	1197.165	176.263	151.263	1527.745
1020	580.341	555.341	5548.88	141.754	116.754	1176.68	170.464	145.464	1483.635
1030	593.391	568.391	5618.66	139.284	114.284	1155.19	173.392	148.392	1469.28
1040	571.635	546.635	5575.13	136.515	111.515	1128.995	172.791	147.791	1480.915

1050	543.874	518.874	5327.545	135.275	110.275	1108.95	170.018	145.018	1464.045
1060	500.014	475.014	4969.44	132.907	107.907	1090.91	167.362	142.362	1436.9
1070	479.793	454.793	4649.035	131.528	106.528	1072.175	165.772	140.772	1415.67
1080	450.192	425.192	4399.925	129.758	104.758	1056.43	163.548	138.548	1396.6
1090	426.786	401.786	4134.89	129.441	104.441	1045.995	161.215	136.215	1373.815
1100	394.414	369.414	3856	128.157	103.157	1037.99	159.017	134.017	1351.16
1110	401.882	376.882	3731.48	127.741	102.741	1029.49	156.624	131.624	1328.205
1120	389.671	364.671	3707.765	127.036	102.036	1023.885	155.829	130.829	1312.265
1130	386.392	361.392	3630.315	125.571	100.571	1013.035	155.101	130.101	1304.65
1140	371.361	346.361	3538.765	123.156	98.156	993.635	153.942	128.942	1295.215
1150	365.66	340.66	3435.105	120.479	95.479	968.175	152.318	127.318	1281.3
1160	360.287	335.287	3379.735	118.76	93.76	946.195	149.95	124.95	1261.34
1170	358.397	333.397	3343.42	115.221	90.221	919.905	148.112	123.112	1240.31
1180	355.451	330.451	3319.24	112.4	87.4	888.105	145.381	120.381	1217.465
1190	351.056	326.056	3282.535	110.979	85.979	866.895	143.754	118.754	1195.675
1200	349.933	324.933	3254.945	108.813	83.813	848.96	141.745	116.745	1177.495
1210	343.056	318.056	3214.945	106.363	81.363	825.88	139.178	114.178	1154.615
1220	344.025	319.025	3185.405	104.18	79.18	802.715	136.727	111.727	1129.525
1230	345.499	320.499	3197.62	102.93	77.93	785.55	133.296	108.296	1100.115
1240	338.205	313.205	3168.52	101.758	76.758	773.44	130.853	105.853	1070.745
1250	333.955	308.955	3110.8	100.565	75.565	761.615	126.572	101.572	1037.125
1260	322.266	297.266	3031.105	98.348	73.348	744.565	124.161	99.161	1003.665
1270	304.016	279.016	2881.41	96.485	71.485	724.165	121.99	96.99	980.755
1280	293.132	268.132	2735.74	94.356	69.356	704.205	120.644	95.644	963.17
1290	288.344	263.344	2657.38	91.933	66.933	681.445	118.211	93.211	944.275
1300	281.599	256.599	2599.715	90.277	65.277	661.05	115.784	90.784	919.975
1310	277.785	252.785	2546.92	88.259	63.259	642.68	113.864	88.864	898.24
1320	281.733	256.733	2547.59	86.21	61.21	622.345	111.164	86.164	875.14
1330	290.751	265.751	2612.42	84.935	59.935	605.725	110.196	85.196	856.8
1340	293.601	268.601	2671.76	82.684	57.684	588.095	108.772	83.772	844.84
1350	301.986	276.986	2727.935	81.608	56.608	571.46	107.324	82.324	830.48
1360	314.85	289.85	2834.18	80.455	55.455	560.315	105.983	80.983	816.535
1370	318.296	293.296	2915.73	81.436	56.436	559.455	104.637	79.637	803.1
1380	317.688	292.688	2929.92	81.157	56.157	562.965	103.365	78.365	790.01
1390	315.927	290.927	2918.075	81.642	56.642	563.995	101.962	76.962	776.635
1400	322.618	297.618	2942.725	81.374	56.374	565.08	99.848	74.848	759.05
1410	307.965	282.965	2902.915	81.103	56.103	562.385	98.405	73.405	741.265
1420	300.514	275.514	2792.395	80.948	55.948	560.255	96.61	71.61	725.075

1430	282.738	257.738	2666.26	80.6	55.6	557.74	95.437	70.437	710.235
1440	272.889	247.889	2528.135	81.221	56.221	559.105	94.458	69.458	699.475
1450	266.472	241.472	2446.805	81.65	56.65	564.355	94.338	69.338	693.98
1460	254.853	229.853	2356.625	82.233	57.233	569.415	95.815	70.815	700.765
1470	249.114	224.114	2269.835	82.868	57.868	575.505	96.645	71.645	712.3
1480	242.95	217.95	2210.32	83.046	58.046	579.57	95.869	70.869	712.57
1490	233.435	208.435	2131.925	82.862	57.862	579.54	95.287	70.287	705.78
1500	230.689	205.689	2070.62	81.313	56.313	570.875	94.503	69.503	698.95
1510	233.149	208.149	2069.19	80.413	55.413	558.63	93.187	68.187	688.45
1520	230.35	205.35	2067.495	79.005	54.005	547.09	91.302	66.302	672.445
1530	226.86	201.86	2036.05	77.217	52.217	531.11	90.014	65.014	656.58
1540	222.161	197.161	1995.105	76.474	51.474	518.455	88.383	63.383	641.985
1550	218.978	193.978	1955.695	75.34	50.34	509.07	86.548	61.548	624.655
1560	217.279	192.279	1931.285	74.551	49.551	499.455	85.254	60.254	609.01
1570	220.582	195.582	1939.305	73.599	48.599	490.75	83.631	58.631	594.425
1580	229.265	204.265	1999.235	72.136	47.136	478.675	81.654	56.654	576.425
1590	227.799	202.799	2035.32	70.437	45.437	462.865	80.941	55.941	562.975
1600	224.64	199.64	2012.195	68.502	43.502	444.695	79.946	54.946	554.435
1610	212.817	187.817	1937.285	67.298	42.298	429	78.714	53.714	543.3
1620	210.742	185.742	1867.795	65.574	40.574	414.36	77.608	52.608	531.61
1630	208.361	183.361	1845.515	63.191	38.191	393.825	76.81	51.81	522.09
1640	205.835	180.835	1820.98	61.6	36.6	373.955	75.944	50.944	513.77
1650	202.382	177.382	1791.085	60.236	35.236	359.18	76.367	51.367	511.555
1660	200.635	175.635	1765.085	59.064	34.064	346.5	76.034	51.034	512.005
1670	196.372	171.372	1735.035	58.209	33.209	336.365	74.389	49.389	502.115
1680	193.906	168.906	1701.39	57.467	32.467	328.38	72.431	47.431	484.1
1690	194.09	169.09	1689.98	57.925	32.925	326.96	70.982	45.982	467.065
1700	189.932	164.932	1670.11	58.337	33.337	331.31	68.649	43.649	448.155
1710	185.843	160.843	1628.875	58.643	33.643	334.9	64.469	39.469	415.59
1720	182.602	157.602	1592.225	58.801	33.801	337.22	63.099	38.099	387.84
1730	179.045	154.045	1558.235	59.662	34.662	342.315	63.678	38.678	383.885
1740	176.018	151.018	1525.315	60.23	35.23	349.46	63.398	38.398	385.38
1750	176.769	151.769	1513.935	60.586	35.586	354.08	63.073	38.073	382.355
1760	175.651	150.651	1512.1	60.633	35.633	356.095	62.537	37.537	378.05
1770	178.836	153.836	1522.435	60.376	35.376	355.045	62.004	37.004	372.705
1780	180.36	155.36	1545.98	59.686	34.686	350.31	61.606	36.606	368.05
1790	175.166	150.166	1527.63	59.299	34.299	344.925	60.942	35.942	362.74
1800	172.185	147.185	1486.755	58.796	33.796	340.475	60.074	35.074	355.08

1810	171.965	146.965	1470.75	58.347	33.347	335.715	59.338	34.338	347.06
1820	168.264	143.264	1451.145	58.225	33.225	332.86	58.712	33.712	340.25
1830	165.774	140.774	1420.19	57.986	32.986	331.055	58.228	33.228	334.7
1840	164.881	139.881	1403.275	57.782	32.782	328.84	57.714	32.714	329.71
1850	162.957	137.957	1389.19	57.016	32.016	323.99	57.057	32.057	323.855
1860	160.456	135.456	1367.065	55.619	30.619	313.175	56.582	31.582	318.195
1870	158.243	133.243	1343.495	54.387	29.387	300.03	56.768	31.768	316.75
1880	156.103	131.103	1321.73	53.85	28.85	291.185	56.551	31.551	316.595
1890	153.022	128.022	1295.625	53.515	28.515	286.825	55.771	30.771	311.61
1900	150.099	125.099	1265.605	53.241	28.241	283.78	55.174	30.174	304.725
1910	147.936	122.936	1240.175	52.971	27.971	281.06	54.691	29.691	299.325
1920	146.191	121.191	1220.635	52.795	27.795	278.83	53.838	28.838	292.645
1930	143.371	118.371	1197.81	52.85	27.85	278.225	53.259	28.259	285.485
1940	140.451	115.451	1169.11	51.49	26.49	271.7	52.778	27.778	280.185
1950	135.791	110.791	1131.21	51.056	26.056	262.73	51.68	26.68	272.29
1960	130.555	105.555	1081.73	51.481	26.481	262.685	50.581	25.581	261.305
1970	126.359	101.359	1034.57	51.914	26.914	266.975	49.598	24.598	250.895
1980	121.81	96.81	990.845	52.402	27.402	271.58	48.566	23.566	240.82
1990	117.151	92.151	944.805	52.915	27.915	276.585	47.619	22.619	230.925
2000	112.279	87.279	897.15	52.895	27.895	279.05	46.492	21.492	220.555
2010	106.678	81.678	844.785	52.804	27.804	278.495		Σ(T.dt)	317676.8
2020	98.558	73.558	776.18	52.686	27.686	277.45		T.dt/dt	158.8384
2030	91.889	66.889	702.235	53.863	28.863	282.745			
2040	88.659	63.659	652.74	54.972	29.972	294.175			
2050	86.232	61.232	624.455	55.59	30.59	302.81			
2060	84.896	59.896	605.64	55.458	30.458	305.24			
2070	83.801	58.801	593.485	54.849	29.849	301.535			
2080	79.25	54.25	565.255	54.334	29.334	295.915			
2090	76.321	51.321	527.855	54.047	29.047	291.905			
2100	74.734	49.734	505.275	53.594	28.594	288.205			
2110	73.025	48.025	488.795	53.667	28.667	286.305			
2120	71.902	46.902	474.635	53.356	28.356	285.115			
2130	70.648	45.648	462.75	53.463	28.463	284.095			
2140	69.684	44.684	451.66	53.186	28.186	283.245			
2150	68.572	43.572	441.28	53.08	28.08	281.33			
2160	67.414	42.414	429.93	52.708	27.708	278.94			
2170	66.223	41.223	418.185	52.527	27.527	276.175			
2180	65.72	40.72	409.715	52.412	27.412	274.695			

2190	65.197	40.197	404.585	51.826	26.826	271.19
2200	64.429	39.429	398.13	51.557	26.557	266.915
2210	64.011	39.011	392.2	51.883	26.883	267.2
2220	62.86	37.86	384.355	52.022	27.022	269.525
2230	60.829	35.829	368.445	52.198	27.198	271.1
2240	60.029	35.029	354.29	52.239	27.239	272.185
2250	59.368	34.368	346.985	52.178	27.178	272.085
2260	56.585	31.585	329.765	52.578	27.578	273.78
2270	69.569	44.569	380.77	52.336	27.336	274.57
2280	89.34	64.34	544.545	52.884	27.884	276.1
2290	96.111	71.111	677.255	53.039	28.039	279.615
2300	98.419	73.419	722.65	53.46	28.46	282.495
2310	96.447	71.447	724.33	53.123	28.123	282.915
2320	90.144	65.144	682.955	53.047	28.047	280.85
2330	88.899	63.899	645.215	52.624	27.624	278.355
2340	88.843	63.843	638.71	52.463	27.463	275.435
2350	88.282	63.282	635.625	52.332	27.332	273.975
2360	87.642	62.642	629.62	52.089	27.089	272.105
2370	86.043	61.043	618.425	52.22	27.22	271.545
2380	84.697	59.697	603.7	52.226	27.226	272.23
2390	83.764	58.764	592.305	52.613	27.613	274.195
2400	82.626	57.626	581.95	53.045	28.045	278.29
2410	81.002	56.002	568.14	52.694	27.694	278.695
2420	79.752	54.752	553.77	51.95	26.95	273.22
2430	78.798	53.798	542.75	51.255	26.255	266.025
2440	77.325	52.325	530.615	49.82	24.82	255.375
2450	76.315	51.315	518.2	48.498	23.498	241.59
2460	75.358	50.358	508.365	48.018	23.018	232.58
2470	74.457	49.457	499.075	48.977	23.977	234.975
2480	73.325	48.325	488.91	49.404	24.404	241.905
2490	72.706	47.706	480.155	49.566	24.566	244.85
2500	71.832	46.832	472.69	49.513	24.513	245.395
2510	71.085	46.085	464.585	49.018	24.018	242.655
2520	70.017	45.017	455.51	48.374	23.374	236.96
2530	68.646	43.646	443.315	46.985	21.985	226.795
2540	67.63	42.63	431.38	45.97	20.97	214.775
2550	67.178	42.178	424.04	45.355	20.355	206.625
2560	65.731	40.731	414.545	44.755	19.755	200.55

2570	64.822	39.822	402.765	44.132	19.132	194.435
2580	64.703	39.703	397.625	43.88	18.88	190.06
2590	63.697	38.697	392	43.159	18.159	185.195
2600	63.035	38.035	383.66	42.779	17.779	179.69
2610	61.955	36.955	374.95		Σ(T.dt)	300628.9
2620	61.465	36.465	367.1		T.dt/dt	115.6265
2630	60.77	35.77	361.175			
2640	59.768	34.768	352.69			
2650	58.868	33.868	343.18			
2660	57.983	32.983	334.255			
2670	57.181	32.181	325.82			
2680	57.029	32.029	321.05			
2690	56.841	31.841	319.35			
2700	56.341	31.341	315.91			
2710	55.838	30.838	310.895			
2720	55.484	30.484	306.61			
2730	54.808	29.808	301.46			
2740	54.677	29.677	297.425			
2750	54.809	29.809	297.43			
2760	54.478	29.478	296.435			
2770	54.401	29.401	294.395			
2780	54.264	29.264	293.325			
2790	54.263	29.263	292.635			
2800	53.835	28.835	290.49			
2810	53.87	28.87	288.525			
2820	53.648	28.648	287.59			
2830	53.509	28.509	285.785			
2840	53.223	28.223	283.66			
2850	52.826	27.826	280.245			
2860	52.678	27.678	277.52			
2870	52.487	27.487	275.825			
2880	52.776	27.776	276.315			
2890	52.25	27.25	275.13			
2900	52.308	27.308	272.79			
2910	52.133	27.133	272.205			
2920	52.012	27.012	270.725			
2930	51.901	26.901	269.565			
2940	51.652	26.652	267.765			
2950	51.486	26.486	265.69			

2960	51.688	26.688	265.87
2970	51.365	26.365	265.265
2980	51.117	26.117	262.41
2990	50.833	25.833	259.75
3000	51.044	26.044	259.385
3010	51.103	26.103	260.735
3020	50.901	25.901	260.02
3030	50.554	25.554	257.275
3040	50.591	25.591	255.725
3050	50.478	25.478	255.345
3060	50.367	25.367	254.225
3070	50.369	25.369	253.68
3080	50.32	25.32	253.445
3090	50.118	25.118	252.19
3100	50.2	25.2	251.59
		Σ(T.dt)	658970.6
		T.dt/dt	212.5712

Kecepatan: 0,54 m/s

t	50% TKKS : 50% Batubara			75% TKKS : 25% Batubara			100% TKKS		
	T	T-25	integral	T	T-25	integral	T	T-25	integral
0	38.071	13.071	0	39.98	14.98	0	43.729	18.729	0
10	48.118	23.118	180.945	77.43	52.43	337.05	44.133	19.133	189.31
20	50.146	25.146	241.32	129.98	104.98	787.05	51.024	26.024	225.785
30	75.157	50.157	376.515	166.116	141.116	1230.48	52.591	27.591	268.075
40	75.337	50.337	502.47	210.957	185.957	1635.365	55.322	30.322	289.565
50	94.041	69.041	596.89	225.155	200.155	1930.56	57.498	32.498	314.1
60	123.013	98.013	835.27	241.353	216.353	2082.54	60.879	35.879	341.885
70	170.188	145.188	1216.005	377.097	352.097	2842.25	98.691	73.691	547.85
80	194.253	169.253	1572.205	458.707	433.707	3929.02	137.243	112.243	929.67
90	209.777	184.777	1770.15	535.034	510.034	4718.705	210.448	185.448	1488.455
100	224.565	199.565	1921.71	537.156	512.156	5110.95	270.139	245.139	2152.935
110	247.41	222.41	2109.875	536.033	511.033	5115.945	262.986	237.986	2415.625
120	280.081	255.081	2387.455	540.669	515.669	5133.51	220.431	195.431	2167.085
130	249.024	224.024	2395.525	554.998	529.998	5228.335	219.938	194.938	1951.845
140	222.447	197.447	2107.355	585.484	560.484	5452.41	237.593	212.593	2037.655
150	218.904	193.904	1956.755	606.009	581.009	5707.465	280.966	255.966	2342.795
160	224.411	199.411	1966.575	622.642	597.642	5893.255	365.332	340.332	2981.49

170	225.197	200.197	1998.04	633.545	608.545	6030.935	369.05	344.05	3421.91
180	221.063	196.063	1981.3	620.784	595.784	6021.645	294.481	269.481	3067.655
190	217.949	192.949	1945.06	463.309	438.309	5170.465	281.919	256.919	2632
200	224.597	199.597	1962.73	436.672	411.672	4249.905	278.615	253.615	2552.67
210	240.978	215.978	2077.875	440.947	415.947	4138.095	311.102	286.102	2698.585
220	247.682	222.682	2193.3	453.244	428.244	4220.955	329.135	304.135	2951.185
230	244.945	219.945	2213.135	467.927	442.927	4355.855	429.062	404.062	3540.985
240	243.905	218.905	2194.25	496.753	471.753	4573.4	441.141	416.141	4101.015
250	244.005	219.005	2189.55	539.968	514.968	4933.605	394.383	369.383	3927.62
260	243.549	218.549	2187.77	597.747	572.747	5438.575	390.46	365.46	3674.215
270	244.265	219.265	2189.07	616.527	591.527	5821.37	497.618	472.618	4190.39
280	245.21	220.21	2197.375	630.931	605.931	5987.29	512.486	487.486	4800.52
290	233.284	208.284	2142.47	648.539	623.539	6147.35	523.74	498.74	4931.13
300	209.25	184.25	1962.67	647.605	622.605	6230.72	518.313	493.313	4960.265
310	204.275	179.275	1817.625	636.545	611.545	6170.75	522.34	497.34	4953.265
320	205.48	180.48	1798.775	667.525	642.525	6270.35	497.72	472.72	4850.3
330	209.9	184.9	1826.9	666.999	641.999	6422.62	420.207	395.207	4339.635
340	213.892	188.892	1868.96	625.495	600.495	6212.47	387.05	362.05	3786.285
350	221.67	196.67	1927.81	651.466	626.466	6134.805	370.288	345.288	3536.69
360	230.44	205.44	2010.55	695.444	670.444	6484.55	359.682	334.682	3399.85
370	236.581	211.581	2085.105	732.635	707.635	6890.395	347.861	322.861	3287.715
380	241.992	216.992	2142.865	750.128	725.128	7163.815	335.254	310.254	3165.575
390	248.453	223.453	2202.225	760.229	735.229	7301.785	324.699	299.699	3049.765
400	252.86	227.86	2256.565	774.586	749.586	7424.075	316.927	291.927	2958.13
410	257.131	232.131	2299.955	784.252	759.252	7544.19	311.765	286.765	2893.46
420	259.662	234.662	2333.965	778.194	753.194	7562.23	301.18	276.18	2814.725
430	253.782	228.782	2317.22	777.847	752.847	7530.205	316.509	291.509	2838.445
440	255.432	230.432	2296.07	778.376	753.376	7531.115	332.135	307.135	2993.22
450	266.341	241.341	2358.865	777.52	752.52	7529.48	342.438	317.438	3122.865
460	269.204	244.204	2427.725	777.87	752.87	7526.95	359.238	334.238	3258.38
470	274.907	249.907	2470.555	781.522	756.522	7546.96	362.395	337.395	3358.165
480	283.938	258.938	2544.225	787.488	762.488	7595.05	358.221	333.221	3353.08
490	291.612	266.612	2627.75	799.424	774.424	7684.56	349.707	324.707	3289.64
500	295.539	270.539	2685.755	812.798	787.798	7811.11	305.591	280.591	3026.49
510	294.519	269.519	2700.29	824.552	799.552	7936.75	296.544	271.544	2760.675
520	295.098	270.098	2698.085	809.457	784.457	7920.045	296.357	271.357	2714.505
530	292.577	267.577	2688.375	832.931	807.931	7961.94	291.602	266.602	2689.795
540	293.164	268.164	2678.705	836.234	811.234	8095.825	286.543	261.543	2640.725

550	291.282	266.282	2672.23	820.275	795.275	8032.545	280.593	255.593	2585.68
560	291.515	266.515	2663.985	804.238	779.238	7872.565	283.431	258.431	2570.12
570	294.176	269.176	2678.455	791.321	766.321	7727.795	280.632	255.632	2570.315
580	302.679	277.679	2734.275	779.727	754.727	7605.24	279.738	254.738	2551.85
590	299.125	274.125	2759.02	755.86	730.86	7427.935	269.283	244.283	2495.105
600	297.468	272.468	2732.965	730.502	705.502	7181.81	260.529	235.529	2399.06
610	260.398	235.398	2539.33	710.819	685.819	6956.605	255.462	230.462	2329.955
620	214.757	189.757	2125.775	689.612	664.612	6752.155	249.703	224.703	2275.825
630	238.62	213.62	2016.885	670.037	645.037	6548.245	243.765	218.765	2217.34
640	224.686	199.686	2066.53	650.546	625.546	6352.915	240.091	215.091	2169.28
650	204.591	179.591	1896.385	627.49	602.49	6140.18	235.205	210.205	2126.48
660	136.683	111.683	1456.37	551.088	526.088	5642.89	230.799	205.799	2080.02
670	161.156	136.156	1239.195	536.492	511.492	5187.9	224.467	199.467	2026.33
680	228.965	203.965	1700.605	537.146	512.146	5118.19	219.261	194.261	1968.64
690	197.715	172.715	1883.4	526.15	501.15	5066.48	216.451	191.451	1928.56
700	197.057	172.057	1723.86	529.949	504.949	5030.495	212.224	187.224	1893.375
710	177.589	152.589	1623.23	546.721	521.721	5133.35	210.117	185.117	1861.705
720	172.509	147.509	1500.49	566.828	541.828	5317.745	206.465	181.465	1832.91
730	171.344	146.344	1469.265	585.619	560.619	5512.235	203.136	178.136	1798.005
740	168.773	143.773	1450.585	585.992	560.992	5608.055	198.29	173.29	1757.13
750	211.259	186.259	1650.16	548.372	523.372	5421.82	194.954	169.954	1716.22
760	435.879	410.879	2985.69	524.385	499.385	5113.785	191.233	166.233	1680.935
770	493.193	468.193	4395.36	512.941	487.941	4936.63	186.815	161.815	1640.24
780	505.01	480.01	4741.015	511.737	486.737	4873.39	182.376	157.376	1595.955
790	579.811	554.811	5174.105	508.56	483.56	4851.485	176.149	151.149	1542.625
800	577.404	552.404	5536.075	505.622	480.622	4820.91	170.938	145.938	1485.435
810	559.089	534.089	5432.465	496.415	471.415	4760.185	165.83	140.83	1433.84
820	541.832	516.832	5254.605	444.053	419.053	4452.34	161.723	136.723	1387.765
830	530.607	505.607	5112.195	418.836	393.836	4064.445	156.939	131.939	1343.31
840	534.421	509.421	5075.14	413.336	388.336	3910.86	152.09	127.09	1295.145
850	541.402	516.402	5129.115	414.186	389.186	3887.61	148.428	123.428	1252.59
860	530.887	505.887	5111.445	410.472	385.472	3873.29	143.22	118.22	1208.24
870	526.14	501.14	5035.135	396.486	371.486	3784.79	137.546	112.546	1153.83
880	519.936	494.936	4980.38	384.403	359.403	3654.445	131.442	106.442	1094.94
890	507.753	482.753	4888.445	364.981	339.981	3496.92	126.052	101.052	1037.47
900	494.273	469.273	4760.13	358.764	333.764	3368.725	120.103	95.103	980.775
910	474.757	449.757	4595.15	343.799	318.799	3262.815	118.303	93.303	942.03
920	465.978	440.978	4453.675	324.947	299.947	3093.73	114.989	89.989	916.46

930	458.926	433.926	4374.52	299.747	274.747	2873.47	110.455	85.455	877.22
940	449.734	424.734	4293.3	292.875	267.875	2713.11	105.342	80.342	828.985
950	436.97	411.97	4183.52	284.367	259.367	2636.21	106.651	81.651	809.965
960	430.743	405.743	4088.565	279.208	254.208	2567.875	104.566	79.566	806.085
970	427.999	402.999	4043.71	271.552	246.552	2503.8	99.637	74.637	771.015
980	420.744	395.744	3993.715	264.285	239.285	2429.185	94.398	69.398	720.175
990	400.678	375.678	3857.11	250.1	225.1	2321.925	88.989	63.989	666.935
1000	390.869	365.869	3707.735	239.51	214.51	2198.05	84.788	59.788	618.885
1010	401.432	376.432	3711.505	228.459	203.459	2089.845	80.491	55.491	576.395
1020	432.419	407.419	3919.255	227.437	202.437	2029.48	75.785	50.785	531.38
1030	421.037	396.037	4017.28	225.4	200.4	2014.185	72.684	47.684	492.345
1040	413.105	388.105	3920.71	224.9	199.9	2001.5	70.484	45.484	465.84
1050	402.022	377.022	3825.635	224.205	199.205	1995.525	69.435	44.435	449.595
1060	395.439	370.439	3737.305	219.885	194.885	1970.45	67.546	42.546	434.905
1070	389.135	364.135	3672.87	216.264	191.264	1930.745	65.443	40.443	414.945
1080	381.798	356.798	3604.665	218.02	193.02	1921.42	63.199	38.199	393.21
1090	376.871	351.871	3543.345	220.457	195.457	1942.385	61.819	36.819	375.09
1100	373.358	348.358	3501.145	236.799	211.799	2036.28	60.62	35.62	362.195
1110	367.697	342.697	3455.275	241.67	216.67	2142.345	59.489	34.489	350.545
1120	362.767	337.767	3402.32	245.633	220.633	2186.515	58.346	33.346	339.175
1130	354.657	329.657	3337.12	239.723	214.723	2176.78	56.977	31.977	326.615
1140	348.599	323.599	3266.28	231.808	206.808	2107.655	55.736	30.736	313.565
1150	350.833	325.833	3247.16	226.956	201.956	2043.82	54.059	29.059	298.975
1160	355.958	330.958	3283.955	221.925	196.925	1994.405	52.205	27.205	281.32
1170	355.299	330.299	3306.285	216.541	191.541	1942.33	50.481	25.481	263.43
1180	355.441	330.441	3303.7	214.491	189.491	1905.16	48.929	23.929	247.05
1190	354.919	329.919	3301.8	209.51	184.51	1870.005	47.115	22.115	230.22
1200	381.28	356.28	3430.995	205.927	180.927	1827.185	46.093	21.093	216.04
1210	378.067	353.067	3546.735	203.117	178.117	1795.22	45.589	20.589	208.41
1220	372.746	347.746	3504.065	197.191	172.191	1751.54	45.168	20.168	203.785
1230	369.401	344.401	3460.735	191.465	166.465	1693.28	44.799	19.799	199.835
1240	366.008	341.008	3427.045	187.611	162.611	1645.38	44.246	19.246	195.225
1250	364.375	339.375	3401.915	181.553	156.553	1595.82	43.911	18.911	190.785
1260	361.84	336.84	3381.075	176.366	151.366	1539.595	43.4	18.4	186.555
1270	355.944	330.944	3338.92	170.146	145.146	1482.56	42.694	17.694	180.47
1280	347.713	322.713	3268.285	164.4	139.4	1422.73	42.01	17.01	173.52
1290	341.876	316.876	3197.945	159.982	134.982	1371.91	41.505	16.505	167.575
1300	331.274	306.274	3115.75	154.986	129.986	1324.84	41.001	16.001	162.53

1310	326.132	301.132	3037.03	150.445	125.445	1277.155	40.632	15.632	158.165
1320	363.547	338.547	3198.395	146.448	121.448	1234.465	40.135	15.135	153.835
1330	379.35	354.35	3464.485	142.52	117.52	1194.84	39.846	14.846	149.905
1340	393.883	368.883	3616.165	139.04	114.04	1157.8	39.514	14.514	146.8
1350	387.344	362.344	3656.135	135.085	110.085	1120.625	39.203	14.203	143.585
1360	375.125	350.125	3562.345	131.104	106.104	1080.945	38.942	13.942	140.725
1370	380.672	355.672	3528.985	127.257	102.257	1041.805	38.666	13.666	138.04
1380	377.909	352.909	3542.905	124.024	99.024	1006.405	38.485	13.485	135.755
1390	372.877	347.877	3503.93	121.346	96.346	976.85	38.402	13.402	134.435
1400	364.678	339.678	3437.775	118.165	93.165	947.555	38.247	13.247	133.245
1410	360.606	335.606	3376.42	115.43	90.43	917.975	38.101	13.101	131.74
1420	355.619	330.619	3331.125	112.784	87.784	891.07	38	13	130.505
1430	338.239	313.239	3219.29	109.889	84.889	863.365	37.955	12.955	129.775
1440	328.265	303.265	3082.52	106.494	81.494	831.915	38.121	13.121	130.38
1450	320.395	295.395	2993.3	104.404	79.404	804.49	37.551	12.551	128.36
1460	342.331	317.331	3063.63	96.905	71.905	756.545	35.857	10.857	117.04
1470	388.386	363.386	3403.585	92.005	67.005	694.55	34.07	9.07	99.635
1480	395.429	370.429	3669.075	83.974	58.974	629.895	36.665	11.665	103.675
1490	388.652	363.652	3670.405	79.252	54.252	566.13	34.745	9.745	107.05
1500	379.046	354.046	3588.49	110.405	85.405	698.285		Σ(T.dt)	236164.6
1510	228.526	203.526	2787.86	103.535	78.535	819.7		T.dt/dt	158.4997
1520	188.158	163.158	1833.42	99.515	74.515	765.25			
1530	175.544	150.544	1568.51	95.92	70.92	727.175			
1540	166.174	141.174	1458.59	94.47	69.47	701.95			
1550	156.498	131.498	1363.36	92.71	67.71	685.9			
1560	150.121	125.121	1283.095	91.386	66.386	670.48			
1570	150.023	125.023	1250.72	89.688	64.688	655.37			
1580	153.345	128.345	1266.84	86.019	61.019	628.535			
1590	154.421	129.421	1288.83	82.215	57.215	591.17			
1600	155.606	130.606	1300.135	78.206	53.206	552.105			
1610	156.966	131.966	1312.86	74.778	49.778	514.92			
1620	158.28	133.28	1326.23	72.007	47.007	483.925			
1630	159.536	134.536	1339.08	69.791	44.791	458.99			
1640	159.843	134.843	1346.895	145.197	120.197	824.94			
1650	161.213	136.213	1355.28	109.333	84.333	1022.65			
1660	162.572	137.572	1368.925	72.176	47.176	657.545			
1670	165.834	140.834	1392.03	59.502	34.502	408.39			
1680	168.495	143.495	1421.645	54.259	29.259	318.805			

1690	170.63	145.63	1445.625	52.604	27.604	284.315
1700	172.49	147.49	1465.6	54.614	29.614	286.09
1710	173.389	148.389	1479.395	52.316	27.316	284.65
1720	172.809	147.809	1480.99	55.56	30.56	289.38
1730	173.448	148.448	1481.285	63.875	38.875	347.175
1740	173.263	148.263	1483.555	63.818	38.818	388.465
1750	172.618	147.618	1479.405	62.122	37.122	379.7
1760	174.292	149.292	1484.55	56.056	31.056	340.89
1770	174.659	149.659	1494.755	67.123	42.123	365.895
1780	174.013	149.013	1493.36	55.061	30.061	360.92
1790	173.243	148.243	1486.28	55.623	30.623	303.42
1800	174.206	149.206	1487.245	46.223	21.223	259.23
1810	174.087	149.087	1491.465	43.932	18.932	200.775
1820	174.09	149.09	1490.885	74.807	49.807	343.695
1830	172.673	147.673	1483.815	61.751	36.751	432.79
1840	171.553	146.553	1471.13	49.076	24.076	304.135
1850	172.395	147.395	1469.74	44.414	19.414	217.45
1860	170.952	145.952	1466.735	42.943	17.943	186.785
1870	169.161	144.161	1450.565	42.196	17.196	175.695
1880	166.376	141.376	1427.685	42.025	17.025	171.105
1890	165.321	140.321	1408.485	42.011	17.011	170.18
1900	171.147	146.147	1432.34	41.844	16.844	169.275
1910	169.344	144.344	1452.455		Σ (T.dt)	618987.6
1920	167.313	142.313	1433.285		T.dt/dt	325.7829
1930	165.49	140.49	1414.015			
1940	164.014	139.014	1397.52			
1950	162.695	137.695	1383.545			
1960	163.462	138.462	1380.785			
1970	168.443	143.443	1409.525			
1980	171.11	146.11	1447.765			
1990	169.399	144.399	1452.545			
2000	166.248	141.248	1428.235			
2010	165.951	140.951	1410.995			
2020	168.44	143.44	1421.955			
2030	171.952	146.952	1451.96			
2040	171.476	146.476	1467.14			
2050	171.481	146.481	1464.785			
2060	171.849	146.849	1466.65			
2070	168.102	143.102	1449.755			

2080	165.84	140.84	1419.71
2090	170.481	145.481	1431.605
2100	175.658	150.658	1480.695
2110	178.102	153.102	1518.8
2120	180.666	155.666	1543.84
2130	181.333	156.333	1559.995
2140	180.926	155.926	1561.295
2150	179.141	154.141	1550.335
2160	177.473	152.473	1533.07
2170	175.683	150.683	1515.78
2180	174.863	149.863	1502.73
2190	172.498	147.498	1486.805
2200	176.6	151.6	1495.49
2210	176.886	151.886	1517.43
2220	177.555	152.555	1522.205
2230	176.785	151.785	1521.7
2240	177.258	152.258	1520.215
2250	178.49	153.49	1528.74
2260	172.298	147.298	1503.94
2270	165.238	140.238	1437.68
2280	159.015	134.015	1371.265
2290	155.689	130.689	1323.52
2300	152.419	127.419	1290.54
2310	150.471	125.471	1264.45
2320	147.865	122.865	1241.68
2330	145.721	120.721	1217.93
2340	145.426	120.426	1205.735
2350	142.073	117.073	1187.495
2360	142.794	117.794	1174.335
2370	144.395	119.395	1185.945
2380	145.622	120.622	1200.085
2390	148.03	123.03	1218.26
2400	148.857	123.857	1234.435
2410	149.577	124.577	1242.17
2420	147.301	122.301	1234.39
2430	146.847	121.847	1220.74
2440	142.793	117.793	1198.2
2450	136.154	111.154	1144.735
2460	133.748	108.748	1099.51
2470	133.458	108.458	1086.03

2480	135.103	110.103	1092.805
2490	131.765	106.765	1084.34
2500	125.695	100.695	1037.3
2510	122.6	97.6	991.475
2520	122.474	97.474	975.37
2530	122.351	97.351	974.125
2540	124.901	99.901	986.26
2550	124.09	99.09	994.955
2560	124.747	99.747	994.185
2570	123.916	98.916	993.315
2580	123.048	98.048	984.82
2590	121.372	96.372	972.1
2600	120.858	95.858	961.15
2610	120.273	95.273	955.655
2620	123.648	98.648	969.605
2630	125.696	100.696	996.72
2640	123.816	98.816	997.56
2650	119.429	94.429	966.225
2660	115.594	90.594	925.115
2670	113.786	88.786	896.9
2680	114.76	89.76	892.73
2690	115.515	90.515	901.375
2700	114.762	89.762	901.385
2710	114.887	89.887	898.245
2720	113.975	88.975	894.31
2730	113.475	88.475	887.25
2740	113.313	88.313	883.94
2750	111.976	86.976	876.445
2760	113.238	88.238	876.07
2770	110.76	85.76	869.99
2780	105.047	80.047	829.035
2790	100.905	75.905	779.76
2800	95.038	70.038	729.715
2810	91.532	66.532	682.85
2820	88.9	63.9	652.16
2830	88.148	63.148	635.24
2840	89.234	64.234	636.91
2850	91.257	66.257	652.455
2860	93.909	68.909	675.83
2870	95.816	70.816	698.625

2880	97.319	72.319	715.675
2890	97.416	72.416	723.675
2900	97.58	72.58	724.98
2910	96.554	71.554	720.67
2920	95.356	70.356	709.55
2930	94.439	69.439	698.975
2940	93.736	68.736	690.875
2950	96.944	71.944	703.4
2960	97.654	72.654	722.99
2970	97.446	72.446	725.5
2980	97.495	72.495	724.705
2990	97.716	72.716	726.055
3000	96.799	71.799	722.575
3010	95.477	70.477	711.38
3020	94.685	69.685	700.81
3030	94.519	69.519	696.02
3040	94.59	69.59	695.545
3050	94.425	69.425	695.075
3060	93.845	68.845	691.35
3070	93.673	68.673	687.59
3080	93.392	68.392	685.325
3090	93.398	68.398	683.95
3100	94.419	69.419	689.085
3110	94.724	69.724	695.715
3120	95.19	70.19	699.57
3130	95.314	70.314	702.52
3140	95.569	70.569	704.415
3150	95.498	70.498	705.335
3160	95.516	70.516	705.07
3170	95.137	70.137	703.265
3180	94.665	69.665	699.01
3190	94.307	69.307	694.86
3200	93.976	68.976	691.415
3210	93.592	68.592	687.84
3220	93.264	68.264	684.28
3230	93.101	68.101	681.825
3240	93.159	68.159	681.3
3250	93.233	68.233	681.96
3260	93.411	68.411	683.22
3270	93.239	68.239	683.25

3280	92.903	67.903	680.71
3290	92.45	67.45	676.765
3300	93.373	68.373	679.115
3310	94.294	69.294	688.335
3320	94.754	69.754	695.24
3330	94.816	69.816	697.85
3340	96.083	71.083	704.495
3350	97.07	72.07	715.765
3360	97.689	72.689	723.795
3370	98.086	73.086	728.875
3380	98.028	73.028	730.57
3390	98.257	73.257	731.425
3400	98.426	73.426	733.415
3410	97.677	72.677	730.515
3420	96.878	71.878	722.775
3430	96.479	71.479	716.785
3440	95.969	70.969	712.24
3450	95.116	70.116	705.425
3460	94.268	69.268	696.92
3470	93.187	68.187	687.275
3480	91.598	66.598	673.925
3490	90.046	65.046	658.22
3500	88.284	63.284	641.65
3510	86.814	61.814	625.49
3520	85.114	60.114	609.64
3530	84.424	59.424	597.69
3540	83.785	58.785	591.045
3550	82.707	57.707	582.46
3560	81.365	56.365	570.36
3570	79.191	54.191	552.78
3580	77.743	52.743	534.67
3590	76.775	51.775	522.59
3600	75.403	50.403	510.89
3610	72.823	47.823	491.13
3620	72.15	47.15	474.865
3630	69.853	44.853	460.015
3640	68.09	43.09	439.715
3650	65.757	40.757	419.235
3660	64.614	39.614	401.855
3670	64.018	39.018	393.16

3680	64.016	39.016	390.17
3690	62.707	37.707	383.615
3700	62.421	37.421	375.64
		Σ (T.dt)	663938.5
		T.dt/dt	179.4428

Persamaan yang digunakan:

$$Q = M \times c_{p(air)} \times T.dt / dt$$

Perhitungan massa udara

kecepatan superfisial (m/s)	A kompor (m ²)	Laju alir (m ³ /s)	Densitas (kg/m ³)	Massa Udara (kg)		
				50% biomassa	75% biomassa	100% biomassa
0.29	0.24041	0.0697189	1.18	171.1180682	214.7202682	189.2170946
0.42		0.1009722		369.3563076	309.7827096	238.294392
0.54		0.1298214		566.8002324	291.0595788	228.2519855

Perhitungan enthalpy pembakaran

komposisi	Perhitungan Q	Cp (kJ/kg°C)	Q (kkal) tiap kecepatan		
			0,29 m/s	0,42 m/s	0,54 m/s
50% TKKS	m udara x Cp udara x integral suhu	1.0089	5052.194169	18860.30521	24431.77348
75% TKKS			5281.767869	10258.92089	44356.49132
100% TKKS			8780.403109	14092.88307	21580.29343