



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN BAHAN BAKAR PELET BIOMASA
DENGAN NILAI KALOR OPTIMAL DAN EMISI RENDAH
UNTUK MASYARAKAT PERKOTAAN DI INDONESIA**

SKRIPSI

**DWI ENDAH LESTARI
0405060237**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM SARJANA
DEPOK
2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

HALAMAN JUDUL

**PERANCANGAN BAHAN BAKAR PELET BIOMASA
DENGAN NILAI KALOR OPTIMAL DAN EMISI RENDAH
UNTUK MASYARAKAT PERKOTAAN DI INDONESIA**

SKRIPSI

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

**Dwi Endah Lestari
0405060237**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM SARJANA
DEPOK
2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dwi Endah Lestari

NPM : 0405060237

Tanda Tangan : 

Tanggal : 26 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh
Nama : Dwi Endah Lestari
NPM : 0405060237
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi :

Perancangan Bahan Bakar Pelet Biomasa dengan Nilai Kalor Optimal dan Emisi Rendah Untuk Masyarakat Perkotaan di Indonesia

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 : Prof. Dr. Ir. Widodo W. P., DEA
Pembimbing II : Ir. Dijan Supramono, M.Sc
Penguji : Ir. Yulianto, M.Sc., PhD.
Penguji : Ir. Mahmud S., M.Sc., PhD.



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA. selaku dosen pembimbing I dan Ir. Dijan Supramono, M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Pihak Departemen Pertanian yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (3) Orang tua dan keluarga saya (Mamah, Bapak, Mba Astrid, dan Dimas) serta seluruh keluarga besar saya yang telah memberikan dukungan yang sangat berarti baik berupa material dan moral;
- (4) Eris, Devi, Gema, Isna, Tya, Ita dan Febry serta semua teman Teknik Kimia angkatan 2005 yang sama-sama saling memberi semangat dalam perjuangan menyelesaikan skripsi masing-masing.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

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

LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

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

Nama : Dwi Endah Lestari

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

NPM : 0405060237

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

“Perancangan Bahan Bakar Pelet Biomasa dengan Nilai Kalor Optimal dan Emisi Rendah untuk Masyarakat Perkotaan di Indonesia”

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 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 : 26 Juni 2009

Yang menyatakan



(Dwi Endah Lestari)

ABSTRAK

Nama : Dwi Endah Lestari
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Perancangan Bahan Bakar Pelet Biomasa dengan Nilai Kalor Optimal dan Emisi Rendah untuk Masyarakat Perkotaan di Indonesia.

Biomasa mempunyai potensi besar sebagai energi alternatif pengganti bahan bakar minyak dan gas. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang, membuat, dan menguji pelet biomassa sehingga menghasilkan bahan bakar dengan performa pembakaran yang optimal didampingi dengan emisi gas berbahaya yang rendah. Biomassa dibuat menjadi pelet dengan bentuk silindris. Parameter yang divariasikan pada penelitian ini adalah bahan baku biomassa yaitu sekam, jerami, kayu kamper, dan kayu karet, ukuran yaitu diameter pelet dari 10-20 mm, kandungan air pada pelet biomassa yaitu 4%-20%, dan laju alir oksigen ke dalam furnace. Hasil penelitian menunjukkan performa pembakaran yang tinggi terjadi pada pelet dengan kadar air rendah dan diameter kecil serta diberi masukan oksigen. Nilai kalor paling tinggi dimiliki oleh pelet kayu kamper yaitu 4556 kal/g sedangkan temperatur pembakaran paling tinggi dimiliki oleh jerami dengan $d = 1$ cm dan $mc = 4\%$. Densitas bulk pelet terbesar adalah pelet jerami $d = 1$ cm dan $mc = 4\%$. Emisi CO_2 terbesar memperbesar massa CO_2 dan menaikkan temperatur pembakaran hingga $1060^\circ C$.

Kata kunci: pembakaran; biomassa; nilai kalor; temperatur; emisi

ABSTRACT

Name : Dwi Endah Lestari
Study Program : Chemical Engineering
Title : Designing Biomass Pellet Fuels with Optimal Heating Value and Low Emission for Urban Society in Indonesia.

Biomass is a potential alternative energy replacing oil and gas. The experiment goals are designing, making, and testing pellets in order to create fuels with good combustion performance and low emission. Pellets were shaped cylindrical. The variations are pellets raw materials (husk, straw, rubber wood, kamper wood), pellets size (10 – 20 mm in diameter), moisture content (4-20%) and oxygen purging. Result of the experiment is that good combustion performance happen to pellets with low moisture content and small size with oxygen supply. The highest heating value is from straw pellets with $d = 1$ cm and $mc = 4\%$. The same pellets also have highest densitas bulk. Highest CO_2 emission happen to rubber wood pellets with $d = 2$ cm and $mc = 11\%$. Purging of oxygen into furnace increases CO_2 emission and also temperatur combustion until $1060^\circ C$

Key words: combustion; biomass; heating value; temperature; emission.

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH..... | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR NOTASI..... | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xv |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5 Sistematika Penulisan..... | 3 |
| | |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Sejarah Perkembangan Bahan Bakar Biomasa | 5 |
| 2.2 Biomasa..... | 5 |
| 2.2.1 Asal Mula Energi Biomasa | 5 |
| 2.2.2 Sumber Biomasa | 6 |
| 2.2.3 Ketersediaan Biomasa di Indonesia | 7 |
| 2.2.4 Komposisi Biomasa | 9 |
| 2.2.5 Analisa Biomasa. | 11 |
| 2.2.6 Nilai Kalor Biomasa | 13 |
| 2.2.7 Perbandingan Pelet Biomasa Komersil..... | 14 |
| 2.3 Proses Densifikasi (<i>Pelletizing</i>) | 14 |
| 2.3.1 Prinsip Dasar Proses Densifikasi | 14 |
| 2.3.2 Langkah Dasar Proses Densifikasi..... | 15 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.3 Teknologi | 16 |
| 2.3.4 Faktor-Faktor yang Perlu Diperhatikan pada Proses Densifikasi 18 | |
| 2.4 Pembakaran Biomasa | 20 |
| 2.4.1 Tahap-Tahap Pembakaran | 20 |
| 2.4.2 Faktor Pengontrol Pembakaran | 23 |
| 2.4.3 Karakteristik Emisi dari Bahan Bakar Biomasa | 24 |
| 2.5 Aspek Lingkungan dan Kesehatan | 25 |
| 2.5.1 Aspek Lingkungan | 25 |
| 2.5.2 Kontribusi Penggunaan Bahan Bakar Biomasa pada Masalah Pencemaran | 25 |
| 2.5.3 Aspek Kesehatan | 27 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 29 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian | 29 |
| 3.2 Tahap Perancangan Pelet | 29 |
| 3.3 Tahap Preparasi Pelet | 30 |
| 3.3.1 Alat dan Bahan Preparasi Pelet | 30 |
| 3.3.2 Prosedur Preparasi Pelet | 31 |
| 3.4 Tahap Pengujian Pelet | 34 |
| 3.4.1 Alat dan Bahan Pengujian Pelet | 34 |
| 3.4.2. Pengujian Biomassa | 35 |
| 3.4.3 Pengujian Pembakaran | 36 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 37 |
| 4.1 Hasil Karakterisasi Biomasa | 37 |
| 4.1.1 Morfologi Bahan Baku Biomasa | 37 |
| 4.1.2 Komposisi Bahan Baku Biomassa | 38 |
| 4.1.3 Nilai Kalor | 39 |
| 4.1.4 Densitas bulk | 41 |
| 4.2 Pengujian Pembakaran | 43 |
| 4.2.2 Pengujian Emisi Hasil Pembakaran | 54 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 62 |
| DAFTAR REFERENSI | 64 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2. 1 Klasifikasi sumber biomasa (www.eubia.org)..... | 7 |
| Tabel 2. 2 Sumber biomasa potensi energi (ZRUE, 2000 CGI.) | 8 |
| Tabel 2. 3 Komposisi dan nilai kalor biomasa (www.eubia.org)..... | 9 |
| Tabel 2. 4 Sifat dan karakteristik biomasa kering (www.woodgas.com) | 10 |
| Tabel 2. 5 Perbandingan pelet biomasa komersil..... | 14 |
| Tabel 2. 6 Mekanisme efek kesehatan dari polutan | 27 |
| Tabel 2. 7 Emisi hasil pembakaran biomasa yang dapat membahayakan kesehatan..... | 28 |
| Tabel 4. 1 Analisa proksimat biomasa | 38 |
| Tabel 4. 2 Analisa ultimat biomasa | 39 |

DAFTAR GAMBAR

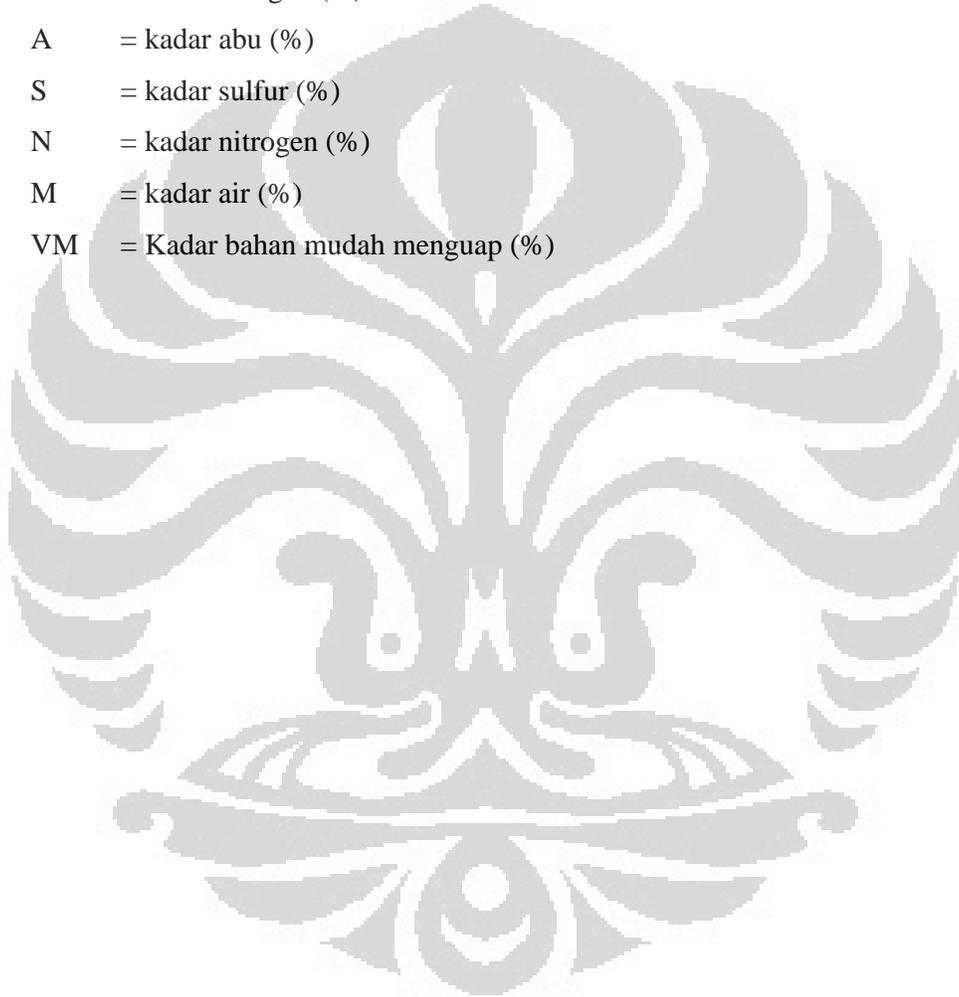
| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 Siklus karbon secara keseluruhan (www.eubia.org) | 6 |
| Gambar 2.2 Contoh biomasa (www.eubia.org)..... | 6 |
| Gambar 2.3 Langkah-langkah proses densifikasi (www.eubia.org) | 15 |
| Gambar 2.4 Flat die dan ring die | 16 |
| Gambar 2.5 Pembakaran kayu | 20 |
| Gambar 2.6 Efek konsentrasi CO di udara terhadap waktu pemaparan dan kondisi kerja | 27 |
| Gambar 3.1 Diagram alir penelitian | 29 |
| Gambar 3.2 Mesin pencacah | 31 |
| Gambar 3.3 Mesin penepung | 30 |
| Gambar 3.4 Cetakan dan besi penekan | 32 |
| Gambar 3.5 Pressure peletizer..... | 31 |
| Gambar 3.6 Oven laboratorium..... | 32 |
| Gambar 3.7 <i>Infrared Moisture Determination Balance FD-240 KETT</i> | 31 |
| Gambar 3.8 Pelet kayu kamper dengan variasi diameter: (a) 2 cm, (b) 1.5 cm dan (c) 1 cm..... | 37 |
| Gambar 3.9 Furnace laboratorium | 34 |
| Gambar 3.10 Data aquisisi ADAM 4018M | 34 |
| Gambar 4.1 Pelet dengan variasi diameter: (a) 2 cm, (b) 1.5 cm dan (c) 1 cm..... | 37 |
| Gambar 4.2 Hasil SEM untuk masing-masing jenis biomasa: (a) jerami (b) kayu karet (c) kayu kamper (d) sekam | 37 |
| Gambar 4.3 Perbandingan antara HHV percobaan dengan HHV perhitungan..... | 40 |
| Gambar 4.4 Hubungan antara nilai kalor dengan kandungan air | 40 |
| Gambar 4.5 Hubungan antara densitas bulk dengan diameter pelet | 41 |
| Gambar 4.6 Hubungan antara densitas bulk dengan kadar air | 42 |
| Gambar 4.7 Hubungan antara temperatur dengan waktu | 43 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.8 Hubungan antara diameter dengan rasio diameter per satuan massa..... | 45 |
| Gambar 4.9 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi diameter pelet kayu karet | 45 |
| Gambar 4.10 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi diameter pelet kayu kamper | 46 |
| Gambar 4.11 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi diameter pelet jerami..... | 46 |
| Gambar 4.12 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap jenis pelet biomasa diameter 1 cm..... | 47 |
| Gambar 4.13 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap jenis pelet biomasa diameter 1.5 cm..... | 47 |
| Gambar 4.14 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap jenis pelet biomasa diameter 2 cm..... | 48 |
| Gambar 4.15 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi kandungan air pada pelet karet..... | 49 |
| Gambar 4.16 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi kandungan air pada pelet kamper..... | 49 |
| Gambar 4.17 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi kandungan air pada pelet jerami | 50 |
| Gambar 4.18 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi pelet biomasa dengan kandungan air 4% | 50 |
| Gambar 4.19 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi pelet biomasa dengan kandungan air 4% | 51 |
| Gambar 4.20 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi pelet biomasa dengan kandungan air 4% | 51 |
| Gambar 4.21 Laju pertambahan konsentrasi oksigen dalam furnace..... | 52 |
| Gambar 4.22 Perbandingan profil temperatur dengan adanya laju alir oksigen | 53 |
| Gambar 4.23 Perbandingan profil temperatur pada variasi laju alir oksigen | 54 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.24 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi diameter pelet karet..... | 55 |
| Gambar 4.25 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi diameter pelet kamper..... | 55 |
| Gambar 4.26 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi diameter pelet jerami..... | 56 |
| Gambar 4.27 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa diameter 1 cm..... | 56 |
| Gambar 4.28 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa diameter 1.5 cm..... | 57 |
| Gambar 4.29 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa diameter 2 cm..... | 57 |
| Gambar 4.30 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi kandungan air pelet karet..... | 58 |
| Gambar 4.31 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi kandungan air pelet kamper..... | 58 |
| Gambar 4.32 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi kandungan air pelet jerami..... | 59 |
| Gambar 4.33 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa dengan kandungan air 4%..... | 59 |
| Gambar 4.34 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa dengan kandungan air 11%..... | 60 |
| Gambar 4.35 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa dengan kandungan air 20%..... | 60 |
| Gambar 4.36 Perbandingan emisi CO ₂ terhadap variasi laju alir O ₂ | 61 |
| Gambar 4.37 Perbandingan emisi CO terhadap variasi laju alir O ₂ | 61 |

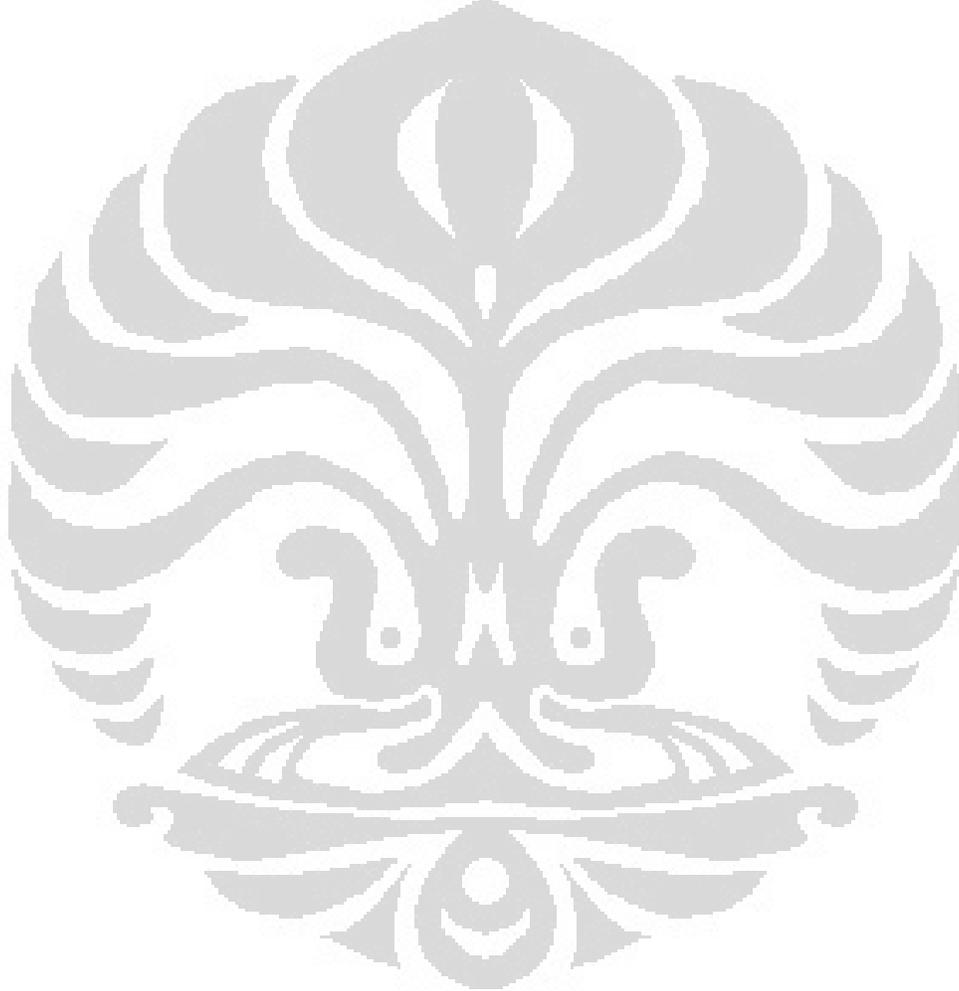
DAFTAR NOTASI

- LHV = *Light Heating Value* (cal/g)
HHV = *High Heating Value* (cal/g)
C = kadar karbon (%)
H = kadar hidrogen (%)
O = kadar oksigen (%)
A = kadar abu (%)
S = kadar sulfur (%)
N = kadar nitrogen (%)
M = kadar air (%)
VM = Kadar bahan mudah menguap (%)



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Hasil pengujian nilai kalor dari TEKMIIRA
- Lampiran 2. Tabel data hasil pengujian densitas bulk
- Lampiran 3. Perhitungan jumlah emisi CO₂ yang dikeluarkan
- Lampiran 4. Tabel hasil perhitungan jumlah emisi CO₂ yang dikeluarkan
- Lampiran 5. Tabel hasil perhitungan jumlah emisi CO yang dikeluarkan



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi merupakan sumber kehidupan seluruh makhluk hidup di muka bumi, khususnya manusia. Secara umum, energi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu energi yang tidak dapat diperbaharui dan energi yang dapat diperbaharui. Energi fosil sangat disukai sebagai sumber energi karena mempunyai nilai kalor yang tinggi dan mudah terbakar. Namun masalah yang tak dapat dielakkan lagi adalah proses terbentuknya sangat lama bahkan membutuhkan waktu hingga berjuta tahun. Pada masa sekarang ini telah terjadi penyusutan cadangan minyak dan gas di seluruh dunia. Untuk menanggulangi masalah tersebut telah banyak dilakukan penelitian dan pengembangan terhadap sumber energi yang dapat diperbaharui.

Salah satu sumber energi yang dapat diperbaharui berasal dari siklus biologis, yang dinamakan biomasa. Contoh biomasa yang berpotensi menghasilkan energi dari pembakarannya adalah kayu, arang, kotoran hewan, dan limbah pertanian. Bahan bakar biomasa dapat diaplikasikan pada berbagai manfaat, antara lain menghasilkan energi listrik, pemanas ruangan, bahan bakar untuk memasak, dan sebagainya. Salah satu aplikasi pemakaian biomasa dalam rumah adalah sebagai bahan bakar kompor masak.

Di Indonesia, biomasa sangat berpotensi dan kompetitif untuk dimanfaatkan menjadi bahan bakar. Hal ini dapat ditinjau dari ketersediaan biomasa di Indonesia yang sangat banyak dan belum banyak diaplikasikan untuk bahan baku pembuatan bahan bakar. Kayu karet mempunyai angka produksi yang paling besar di Pulau Sumatera, Kalimantan dan Jawa [1]

Dalam sejarah pengembangan bahan bakar biomasa, awalnya kayu dibakar secara langsung tanpa dikenai proses terlebih dulu. Hal ini mengakibatkan nilai kalor yang dihasilkan belum maksimal, begitu pula dengan efisiensi termal yang tidak begitu tinggi. Selain masalah nilai kalor dan efisiensi, polusi asap dalam ruangan juga merupakan masalah penting yang mengakibatkan berbagai gangguan

kesehatan, seperti infeksi pernapasan akut (*Acute Respiratory Infection*, ARI), penyakit kronis paru-paru, kanker paru-paru, serta gangguan mata [2].

Masalah ini dapat diselesaikan dengan memproses bahan baku biomasa terlebih dulu dan memperhatikan faktor-faktor yang berpengaruh pada segi pembakaran. Hal ini menyangkut penggunaan bahan biomasa yang tepat dengan memperhatikan komposisi bahan baku biomasa tersebut, kandungan air, serta mengatur ukuran bahan bakar yang digunakan. Bahan baku biomasa juga tidak harus berasal dari batang kayu utama, namun dari ranting-ranting, serta dari pemanfaatan limbah pertanian yang dikeringkan.

Berbagai negara maju belakangan ini telah memproduksi bahan bakar biomasa dengan bentuk pelet ataupun briket. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk melihat berbagai faktor yang dapat meningkatkan nilai kalor, efisiensi ataupun mengurangi emisi bahan bakar tersebut. Namun, efisiensi termalnya masih rendah sampai sedang, yaitu sekitar 9.5 – 25%, dan nilai kalornya masih lebih rendah daripada bahan bakar gas yaitu sekitar 17 MJ/kg [3]. Di samping itu, emisi gas pembakaran cukup banyak, termasuk karbon monoksida (CO), metana (CH₄), *Total Non-Methane Organic Carbon* (TNMOC), dan senyawa nitrogen oksida (NO_x) yang semuanya dapat berbahaya bila dilepas ke udara dalam ruangan sehingga menimbulkan polusi ruangan dan membahayakan kesehatan manusia.

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan bahan bakar biomasa berbentuk pelet, yang dapat diterapkan untuk masyarakat kota, memakai sumber energi terbarukan, menghasilkan nilai kalor yang cukup tinggi bila dibandingkan dengan pelet biomasa lainnya, temperatur pembakaran yang tinggi dan emisi gas yang rendah, serta tidak membahayakan kesehatan masyarakat.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam merancang bahan bakar biomasa berbentuk pelet untuk masyarakat perkotaan, umumnya terdapat tiga masalah utama.

Pertama, bagaimana meningkatkan nilai kalor. Nilai kalor ini dipengaruhi oleh komposisi bahan baku dan kandungan air dalam biomasa.

Kedua, bagaimana meningkatkan temperatur pembakaran pelet biomasa. Temperatur ini dipengaruhi oleh kandungan air, ukuran, dan bentuk pelet biomasa.

Ketiga, bagaimana mengurangi emisi gas dan partikulat akibat pembakaran, sehingga dapat mencegah polusi udara dalam ruangan, serta tidak berbahaya bagi kesehatan dan keselamatan manusia. Pengurangan partikulat ini dapat ditunjang dari komposisi ash yang terkandung pada bahan baku pembuatan bahan bakar biomasa.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang bahan bakar dengan nilai kalor yang optimal, temperatur tinggi, dan rendah emisi sehingga dapat diterima oleh masyarakat perkotaan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan ruang lingkup yang akan dibahas adalah:

- Menggunakan 4 macam bahan baku biomasa berupa sekam, jerami, kayu karet, dan kayu kamper;
- Pelet biomasa dibentuk silindris; dan
- Uji pembakaran dilakukan pada sebuah pelet.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah ini adalah sebagai berikut :

Bab I : Pendahuluan

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

Bab II : Tinjauan Pustaka

Menjelaskan tentang berbagai aspek yang berkaitan dengan biomasa, proses pengolahan biomasa dari bahan mentah hingga menjadi pelet dan karakteristik biomasa yang mempengaruhi proses tersebut, proses pembakaran serta karakteristik biomasa

yang mempengaruhi proses tersebut, teknologi, pengujian emisi, serta aspek lingkungan dan kesehatan.

Bab III : Metode Penelitian

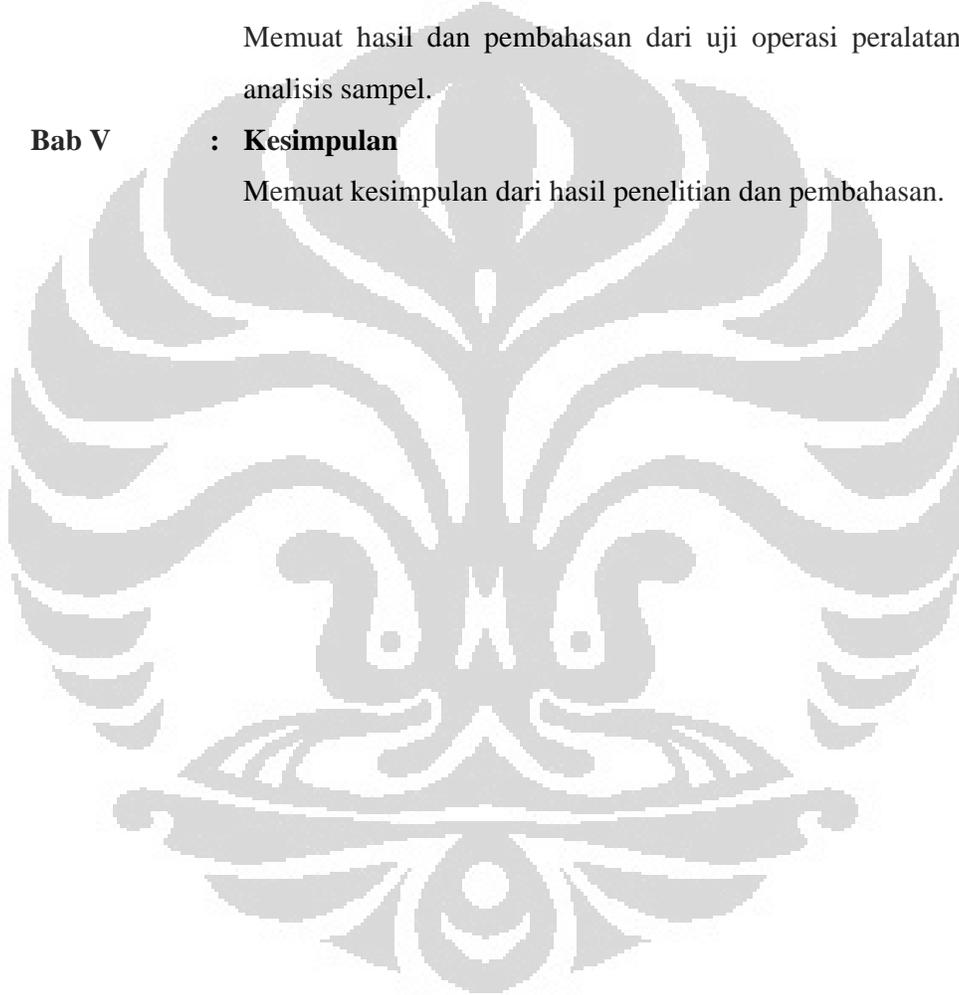
Menjelaskan diagram alir penelitian, prosedur tiap tahap penelitian, alat dan bahan yang diperlukan, serta jadwal pelaksanaan penelitian.

Bab IV : Hasil dan Pembahasan

Memuat hasil dan pembahasan dari uji operasi peralatan dan analisis sampel.

Bab V : Kesimpulan

Memuat kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah Perkembangan Bahan Bakar Biomasa

Pada dasarnya fenomena pembakaran langsung biomasa menjadi panas telah dilakukan oleh nenek moyang kita sejak jutaan tahun yang lampau. Dengan membakar kayu, dedaunan dipergunakan untuk memasak, membakar maupun menghangatkan tubuh. Pembakaran langsung biomasa kedalam ruang bakar kadang di pandang tidak efisien. Hal ini disebabkan ukuran atau volume biomasa. Sebagai langkah untuk meng-efisienkan proses pembakaran langsung maka proses densifikasi atau biasa dikenal briket perlu dilakukan. Manfaat yang diperoleh adalah meningkatkan energi per unit volume disamping menyeragamkan ukuran biomasa yang akan masuk dalam ruang bakar. Ukuran yang lebih padat dengan peningkatan density menjadikan briket lebih efisien sehingga meningkatkan nilai kalor per unit volume. Proses pembriketan sering terjadi pada limbah biomasa seperti jerami, bekas gergajian, atau berbagai cangkang biomasa seperti cangkang kopi, coklat maupun kemiri serta jagung, ketela dan limbah jarak pagar yang sangat menarik untuk dikaji.

Konsumsi biomasa cenderung kian meningkat dari tahun ke tahun. Diperkirakan lebih dari separuh penduduk dunia masih memasak dengan menggunakan bahan bakar biomasa. Dari data **FAO**, terlihat bahwa penggunaan bahan bakar biomasa di Indonesia mencapai 60 % -70 %. Dari data tahun 1981 di pulau Jawa saja, konsumsi biomasa mencapai 0,82 m³/kap/th, dan naik menjadi 0,85 m³/kap/th pada tahun 1986 [4].

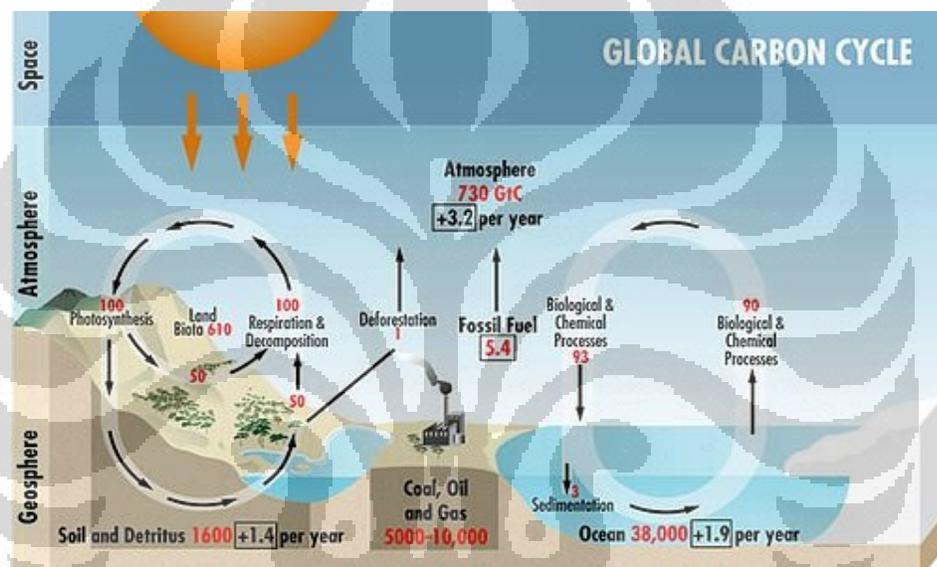
2.2 Biomasa

2.2.1 Asal Mula Energi Biomasa

CO₂ dari atmosfer dan air yang diserap oleh akar tumbuhan bereaksi melalui proses fotosintesis untuk memproduksi karbohidrat (atau gula) yang terkandung pada biomasa. Energi matahari yang membantu proses fotosintesis disimpan dalam ikatan kimia dari komponen biomasa.

Selama proses pembakaran, O_2 dari atmosfer bereaksi dengan karbon di biomasa sehingga memproduksi CO_2 dan air. Proses tersebut berlangsung secara terus-menerus dan berputar (siklik) karena CO_2 yang dihasilkan dapat digunakan kembali untuk menghasilkan biomasa yang baru. Inilah salah satu alasan mengapa energi bio dipertimbangkan sebagai bahan bakar netral karbon.

Gambar 2.1. menunjukkan sumber carbon secara keseluruhan (1GtC = 1012 kg) dan fluks tahunan serta laju akumulasi dalam GtC/tahun, dihitung dalam periode tahun 1990 hingga 1999 [5].



Gambar 2. 1 Siklus karbon secara keseluruhan (www.eubia.org)

2.2.2 Sumber Biomasa

Gambar 2.2 menunjukkan beberapa contoh biomasa yang ada di sekitar kita. Namun tidak semua biomasa mempunyai karakteristik yang sesuai untuk dapat dijadikan bahan bakar



Gambar 2. 2 Contoh biomasa (www.eubia.org)

Sumber biomasa dapat diklasifikasikan menurut sektor *supplier*, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Klasifikasi sumber biomasa (www.eubia.org)

| Sektor <i>supplier</i> | Tipe | Contoh |
|------------------------|--|---|
| Hutan | Hutan khusus penghasil bahan baku biomass fuel | Penanaman pohon yang memiliki waktu rotasi cenderung singkat (contoh: willow, poplar, eucalyptus) |
| | Hasil hutan | Balok kayu dan ranting |
| Agrikultur | Lignocellulosic kering | Tanaman Herbaceous (contoh: miscanthus, reed canarygrass, giant) |
| | Minyak, gula dan starch energy crops | Minyak untuk methylesters (contoh: rape seed, bunga matahari) Gula untuk ethanol (contoh: sugar cane, sweet sorghum) Starch crops untuk ethanol (contoh:) |
| | Sisa agrikultur | Jerami, ranting-daun dari vineyards dan |
| | Zat sisa makhluk hidup | Kotoran hewan, basah dan kering |
| Industri | Sisa industri | Sampah kayu industri, sawdust dari |
| | | Sampah dari industri kertas |
| Sampah | Lignocellulosic kering | Sampah dari taman dan kebun (contoh: rumput, daun, ranting) |
| | Sampah yang telah terkontaminasi | Demolition wood |
| | | Organic fraction of municipal solid |
| | | Biodegradable landfilled waste, Sewage sludge |

2.2.3 Ketersediaan Biomasa di Indonesia

Diperkirakan Indonesia menghasilkan 146.7 juta ton biomasa per tahun, setara dengan 470 GJ/ tahun. Seperti tampak pada Tabel 2.2, sumber utama energi biomasa di Indonesia didapat dari sisa pengolahan beras yang memberikan bagian paling besar 150 GJ/tahun, kayu pohon karet dengan 120 GJ/tahun, sisa pengolahan gula dengan 78 GJ/year, sisa pengolahan minyak kelapa sawit dengan 67 GJ/year, dan sisanya adalah dari kayu triplek, sisa pengolahan kelapa, dll. [1]

Tabel 2. 2 Sumber biomasa potensi energi (ZRUE, 2000 CGI.)

| Biomasa | Wilayah Utama | Produksi [juta ton/ tahun] | Energi [juta GJ/ tahun] | Keterangan |
|---------------------------------------|---|---|-------------------------|---|
| Kayu karet | Sumatera, Kalimantan, Jawa | 41 | 120 | Gelondongan berdiameter kecil <10 cm Gelondongan berdiameter besar dan menengah digunakan sebagai kayu bakar di industri batu bata dan genteng |
| Logging residu | Sumatera, Kalimantan | 4,5 | 19 | |
| Limbah gergajian kayu | Sumatera, Kalimantan | 1,3 | 13 | Residu dari pabrik sering digunakan sebagai kayu bakar oleh masyarakat setempat |
| Produksi kayu lapis dan veneer residu | Kalimantan, Sumatera, Jawa, Irian Jaya, Maluku | 1,5 | 16 | |
| Limbah tebu | Jawa, Sumatera, Kalimantan Selatan | Bagas: 10 cane tops: 4 | 78 | Bagas umumnya digunakan di pabrik-pabrik gula (90%) |
| Limbah padi | Jawa, Sumatera, Sulawesi, Kalimantan, Bali / Nusa Tenggara | Sekam: 12 Bran: 2,5 tangkai: 2 jerami: 49 | 150 | Tangkai dan jerami yang dihasilkan umumnya dibakar, di beberapa daerah digunakan untuk makanan atau bahan baku industri kertas. Sekam hanya dibakar begitu saja |
| Limbah kelapa | Sumatera, Jawa, Sulawesi | Batok: 0,4 sekam: 0,7 | 7 | Limbah yang dihasilkan biasanya dikumpulkan dan ditinggalkan begitu saja Digunakan sebagai kayu bakar |
| Limbah minyak kelapa sawit | Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Maluku, Nusa Tenggara Timur, Irian Jaya | buah kosong: 3,4 Serabut: 3.6 cangkang sawit: 1.2 | 67 | Cangkang sawit dan serabut biasanya dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar |

2.2.4 Komposisi Biomasa

Biomasa adalah istilah yang digunakan untuk jenis biomasa apapun dalam bentuk padat yang digunakan sebagai bahan bakar, terlebih kayu bakar, arang, kotoran hewan, limbah pertanian, dan limbah padat yang dapat terbiodegradasi. Biomasa merupakan produk reaksi fotodintetik dari karbon dioksida dengan air, yang terdiri atas karbon, oksigen, dan hidrogen, yang terdapat dalam bentuk polimerik makroskopik kompleks. Bentuk-bentuknya adalah;

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

Komposisi senyawa-senyawa pokok di atas bervariasi untuk tiap spesies tanaman. Nilai kalor (nilai kalor) tiap komponen juga berbeda, dapat dilihat dari Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Komposisi dan nilai kalor biomasa (www.eubia.org)

| | Selulosa | Hemiselulosa | Lignin |
|-------------|-------------|--------------|------------|
| Hardwood | 43 % | 35 % | 22 % |
| Softwood | 43 % | 28 % | 29 % |
| Nilai kalor | 17.51 MJ/kg | 17.51 MJ/kg | 25.1 MJ/kg |

Dari Tabel 2.3 kita dapat membandingkan nilai kalor dari berbagai jenis biomasa bila data komposisi penyusun biomas tersebut telah diketahui.

Selain komposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin, performa pelet biomasa juga dipengaruhi oleh kandungan unsure-unsur kimia yang terkandung dalam pelet (C, H, O, N, S) dan juga komponen penyusunnya (bahan mudah menguap, karbon tetap, kandungan air). Sifat dan karakteristik berbagai macam biomasa kering dapat dilihat dari Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Sifat dan karakteristik biomasa kering (www.woodgas.com)

| Biomasa | Carbon Tetap | Zat Terbang | Abu | C | H | O | N | S | HHV | HHV |
|--------------------------|--------------|-------------|-------|-------|------|-------|------|------|-----------|-----------|
| | | | | | | | | | Percobaan | Kalkulasi |
| | % | % | % | % | % | % | % | % | kJ/g | kJ/g |
| Kayu | | | | | | | | | | |
| Beech | - | - | 0.65 | 51.64 | 6.26 | 41.45 | 0 | 0 | 20.38 | 21.1 |
| Black Locust | 18.26 | 80.94 | 0.8 | 50.73 | 5.71 | 41.93 | 0.57 | 0.01 | 19.7 | 20.12 |
| Douglas Fir | 17.7 | 81.5 | 0.8 | 52.3 | 6.3 | 40.5 | 0.1 | 0 | 21.05 | 21.48 |
| Hickory | - | - | 0.73 | 47.67 | 6.49 | 43.11 | 0 | 0 | 20.17 | 19.82 |
| Maple | - | - | 1.35 | 50.64 | 6.02 | 41.74 | 0.25 | 0 | 19.96 | 20.42 |
| Ponderosa Pine | 17.17 | 82.54 | 0.29 | 49.25 | 5.99 | 44.36 | 0.06 | 0.03 | 20.02 | 19.66 |
| Poplar | - | - | 0.65 | 51.64 | 6.26 | 41.45 | 0 | 0 | 20.75 | 21.1 |
| Red Alder | 12.5 | 87.1 | 0.4 | 49.58 | 6.06 | 43.78 | 0.13 | 0.07 | 19.3 | 19.91 |
| Redwood | 16.1 | 83.5 | 0.4 | 53.5 | 5.9 | 40.3 | 0.1 | 0 | 21.03 | 21.45 |
| Western Hemlock | 15.2 | 84.8 | 2.2 | 50.4 | 5.8 | 41.1 | 0.1 | 0.1 | 20.05 | 20.14 |
| Yellow Pine | - | - | 1.31 | 52.6 | 7 | 40.1 | 0 | 0 | 22.3 | 22.44 |
| White Fir | 16.58 | 83.17 | 0.25 | 49 | 5.98 | 44.73 | 0.05 | 0.01 | 19.95 | 19.52 |
| White Oak | 17.2 | 81.28 | 1.52 | 49.48 | 5.38 | 43.13 | 0.35 | 0.01 | 19.42 | 19.12 |
| Madrone | 12 | 87.8 | 0.2 | 48.94 | 6.03 | 44.73 | 0.05 | 0.02 | 19.5 | 19.56 |
| Mango Wood | 11.36 | 85.64 | 2.98 | 46.24 | 6.08 | 44.42 | 0.28 | | 19.17 | 18.65 |
| BARK | | | | | | | | | | |
| Douglas Fir bark | 25.8 | 73 | 1.2 | 56.2 | 5.9 | 36.7 | 0 | 0 | 22.1 | 22.75 |
| Loblolly Pine bark | 33.9 | 54.7 | 0.4 | 56.3 | 5.6 | 37.7 | 0 | 0 | 21.78 | 22.35 |
| Eucalyptus Camaldulensis | 17.82 | 81.42 | 0.76 | 49 | 5.87 | 43.97 | 0.3 | 0.01 | 19.42 | 19.46 |
| Casuarina | 19.58 | 78.58 | 1.83 | 48.5 | 6.04 | 43.32 | 0.31 | 0 | 18.77 | 19.53 |
| Poplar | 16.35 | 82.32 | 1.33 | 48.45 | 5.85 | 43.69 | 0.47 | 0.01 | 19.38 | 19.26 |
| Sudan Grass | 18.6 | 72.75 | 8.65 | 44.58 | 5.35 | 39.18 | 1.2 | 0.01 | 17.39 | 17.62 |
| Plywood | 15.77 | 82.14 | 2.09 | 48.13 | 5.87 | 42.46 | 1.45 | 0 | 18.96 | 19.26 |
| Limbah Pertanian | | | | | | | | | | |
| Peach Pits | 19.85 | 79.12 | 1.03 | 53 | 5.9 | 39.14 | 0.32 | 0.05 | 20.82 | 21.39 |
| Walnut Shells | 21.16 | 78.28 | 0.56 | 49.98 | 5.71 | 43.35 | 0.21 | 0.01 | 20.18 | 19.68 |
| Almond Prunings | 21.54 | 76.83 | 1.63 | 51.3 | 5.29 | 40.9 | 0.66 | 0.01 | 20.01 | 19.87 |
| Black Walnut Prunings | 18.56 | 80.69 | 0.78 | 49.8 | 5.82 | 43.25 | 0.22 | 0.01 | 19.83 | 19.75 |
| Corncoobs | 18.54 | 80.1 | 1.36 | 46.58 | 5.87 | 45.46 | 0.47 | 0.01 | 18.77 | 18.44 |
| Wheat Straw | 19.8 | 71.3 | 8.9 | 43.2 | 5 | 39.4 | 0.61 | 0.11 | 17.51 | 16.71 |
| Cotton Stalk | 22.43 | 70.89 | 6.68 | 43.64 | 5.81 | 43.87 | 0 | 0 | 18.26 | 17.4 |
| Corn Stover | 19.25 | 75.17 | 5.58 | 43.65 | 5.56 | 43.31 | 0.61 | 0.01 | 17.65 | 17.19 |
| Sugarcane Bagasse | 14.95 | 73.78 | 11.27 | 44.8 | 5.35 | 39.55 | 0.38 | 0.01 | 17.33 | 17.61 |
| Rice Hulls | 15.8 | 63.6 | 20.6 | 38.3 | 4.36 | 35.45 | 0.83 | 0.06 | 14.89 | 14.4 |
| Pine needles | 26.12 | 72.38 | 1.5 | 48.21 | 6.57 | 43.72 | | | 20.12 | 20.02 |
| Cotton gin trash | 15.1 | 67.3 | 17.6 | 39.59 | 5.26 | 36.38 | 2.09 | 0 | 16.42 | 15.85 |

2.2.5 Analisa Biomasa

Terdapat dua metode untuk menganalisa biomasa: analisa ultimat dan analisa proksimat. Analisa ultimat menganalisa seluruh elemen komponen biomasa, padat atau gas dan analisa proksimat menganalisa hanya *fixed carbon*, bahan yang mudah menguap, kadar air dan persen abu. Analisa *ultimat* harus dilakukan di laboratorium dengan peralatan yang lengkap oleh ahli kimia yang terampil, sedangkan analisa *proksimat* dapat dilakukan dengan peralatan yang sederhana.

A. Analisa Proksimat

Analisa proksimat menunjukkan persen berat dari *fixed carbon*, bahan mudah menguap, abu, dan kadar air dalam batubara. Jumlah *fixed carbon* dan bahan yang mudah menguap secara langsung turut andil terhadap nilai panas biomasa. *Fixed carbon* bertindak sebagai pembangkit utama panas selama pembakaran. Kandungan bahan yang mudah menguap yang tinggi menunjukkan mudahnya penyalaan bahan bakar. Kadar abu merupakan hal penting dalam perancangan *grate* tungku, volum pembakaran, peralatan kendali polusi dan sistem *handling* abu pada tungku. Parameter-parameter tersebut digambarkan dibawah ini [6].

a. Fixed carbon:

Fixed carbon merupakan bahan bakar padat yang tertinggal dalam tungku setelah bahan yang mudah menguap didistilasi. Kandungan utamanya adalah karbon tetapi juga mengandung hidrogen, oksigen, sulfur dan nitrogen yang tidak terbawa gas. *Fixed carbon* memberikan perkiraan kasar terhadap nilai panas biomasa.

b. Bahan yang mudah menguap (*volatile matter*):

Bahan yang mudah menguap dalam biomasa adalah metana, hidrokarbon, hydrogen, karbon monoksida, dan gas-gas yang tidak mudah terbakar, seperti karbon dioksida dan nitrogen. Bahan yang mudah menguap merupakan indeks dari kandungan bahan bakar bentuk gas didalam biomasa. Kandungan bahan yang mudah menguap berkisar antara 20 hingga 35%.

Bahan yang mudah menguap:

- Berbanding lurus dengan peningkatan panjang nyala api, dan membantu dalam memudahkan penyalaan biomasa
- Mempengaruhi kebutuhan udara sekunder dan aspek-aspek distribusi
- Mempengaruhi kebutuhan minyak bakar yang mungkin diperlukan untuk penyalaan awal

c. Kadar abu:

Abu merupakan kotoran atau sisa pembakaran yang tidak akan terbakar. Kandungannya berkisar antara 5% hingga 40%.

Abu:

- Mengurangi kapasitas *handling* dan pembakaran
- Meningkatkan biaya *handling*
- Mempengaruhi efisiensi pembakaran dan efisiensi *boiler*
- Menyebabkan penggumpalan dan penyumbatan

d. Kandungan Air:

Kandungan air dalam biomasa harus diminimalisasi, di-*handling* dan disimpan bersama-sama biomasa. Kadar air akan menurunkan kandungan panas per kg biomasa, dan kandungannya berkisar antara 0,5 hingga 10%.

Kadar air:

- Meningkatkan kehilangan panas, karena penguapan dan pemanasan berlebih dari uap
- Membantu pengikatan partikel halus pada tingkatan tertentu
- Membantu radiasi transfer panas

e. Kadar Sulfur:

Pada umumnya berkisar pada 0,5 hingga 0,8%. Sulfur:

- Mempengaruhi kecenderungan terjadinya penggumpalan dan penyumbatan
- Mengakibatkan korosi pada cerobong dan peralatan lain seperti pemanas udara dan *economizers*.
- Membatasi suhu gas buang yang keluar.

B. Analisa Ultimat

Analisis ultimat menentukan berbagai macam kandungan kimia unsur-unsur seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, dll. Analisa ini berguna dalam penentuan jumlah udara yang diperlukan untuk pemakaran dan volum serta komposisi gas pembakaran. Informasi ini diperlukan untuk perhitungan suhu nyala dan perancangan saluran gas buang dll. Persamaan (2.1) sampai (2.3) menyatakan hubungan antara analisa proksimat dan analisa ultimat dalam batu bara.

$$\%C = 0.97C + 0.7(VM - 0.1A) - M(0.6 - 0.01M) \quad (2.1)$$

$$\%H = 0.036C + 0.086(VM - 0.1A) - 0.0035M^2(1 - 0.02M) \quad (2.2)$$

$$\%N_2 = 2.10 - 0.020VM \quad (2.3)$$

2.2.6 Nilai Kalor Biomasa

Jumlah energi yang dilepaskan pada proses pembakaran dinyatakan sebagai entalpi pembakaran yang merupakan beda entalpi antara produk dan reaktan dari proses pembakaran sempurna. Entalpi pembakaran ini dapat dinyatakan sebagai *Higher Nilai kalor* (HHV) atau *Lower Nilai kalor* (LHV). HHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam wujud cair sedangkan LHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam bentuk uap.[7]

Beberapa penelitian sebelumnya telah menyimpulkan suatu persamaan dalam menentukan harga HHV suatu bahan bakar [8]:

$$HHV \text{ (kJ/g)} = 0.3491C + 1.1783 H - 0.1034 O - 0.0211 A + 0.1005 S - 0.0151 N \quad (2.4)$$

Dalam percobaan biasanya yang kita dapatkan adalah nilai HHV. Dengan adanya persamaan (2.4) kita dapat menghitung nilai HHV bila data ultimat dan proksimat sudah tersedia.

Persamaan (2.5) merupakan persamaan untuk menentukan LHV suatu bahan bakar [9]:

$$LHV_{ar} = HHV_{ar} - 2.442 \cdot \{8.936 H/100 (1-M/100) + M/100\} \quad (2.5)$$

2.2.7 Perbandingan Pelet Biomasa Komersil

Saat ini berbagai produsen dari beberapa negara telah memasarkan produk pelet biomasa. Masing-masing pelet tersebut mempunyai spesifikasi yang hamper menyerupai satu sama lainnya.

Tabel 2. 5 Perbandingan pelet biomasa komersil

| Negara | Bahan baku | Diameter (mm) | Panjang (mm) | Moisture (%) | Densitas (MT/m ³) | nilai kalor (kcal/kg) | ash (%) |
|-----------|------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------------------|---------|
| Rusia | 100% Pine wood | 8 | 10- 30 | <7.5 | 1.1-1.4 | 4600 - 4800 | <1.5 |
| Hongkong | 100% Bamboo sawdust | 6 | 10 - 30 | <7.5 | >1.3 | 4200 - 4500 | 1.1 - 2 |
| China | 100% Hard wood sawdust | 6 | 10 - 30 | <7.5 | >1.3 | 4200 - 4500 | 1.1 - |
| Sri Lanka | 100% Coconut shell | ~ | ~ | <5 | ~ | 4298 | <0.5 |
| Ukraina | 100% Softwood | 6 | ~ | 7 | ~ | 4226 | 0.49 |

2.3 Proses Densifikasi (Peletizing)

2.3.1 Prinsip Dasar Proses Densifikasi

Proses pengolahan bahan baku biomasa menjadi pelet menggunakan prinsip dasar densifikasi. Proses ini mengakibatkan naiknya nilai kalorifik volumetri suatu bahan bakar, mengurangi biaya transportasi, dan dapat membantu meningkatkan penggunaan bahan bakar di daerah terpencil. Sesuai dengan prinsip dasar dari pengompakan, teknologi pembuatan pelet biomasa dapat dibagi menjadi:

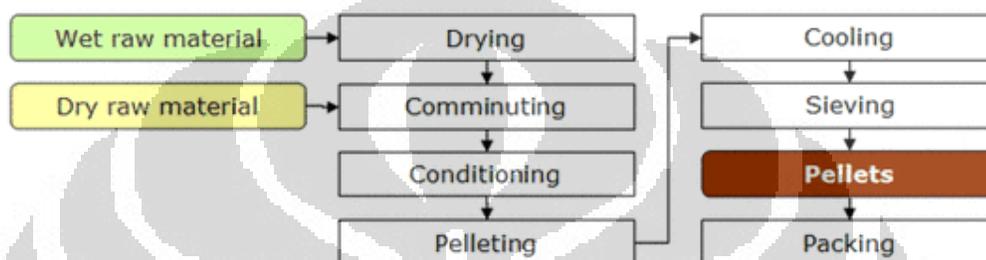
1. Pengompakkan dengan tekanan tinggi
2. Pengompakkan dengan tekanan sedang diiringi dengan pemanasan
3. Pengompakkan dengan tekanan rendah menggunakan perekat/pengikat

Pada semua teknik pengompakkan tersebut digunakan material padat sebagai bahan baku awal. Jika partikel ditekan dengan tekanan tinggi maka tidak dibutuhkan perekat. Kekuatan dari pengompakkan tersebut disebabkan oleh adanya gaya Van der Waals, atau *interlocking*. Komponen alami dari material,

yaitu lignin akan teraktivasi oleh tingginya tekanan sehingga menjadi perekat alami. Namun, beberapa material tetap membutuhkan perekat meskipun dilakukan pengompakkan dengan tekanan tinggi [10].

2.3.2 Langkah Dasar Proses Densifikasi

Gambar 2.3 menunjukkan langkah-langkah yang dilakukan untuk menghasilkan pelet dengan kualitas yang baik.



Gambar 2. 3 Langkah-langkah proses densifikasi (www.eubia.org)

a. *Comminution.*

Bahan baku mentah terlebih dahulu dipisahkan dari material pengotor berat seperti logam dan batu untuk kemudian dihancurkan dengan mesin penghancur. Ukuran partikel maksimum harus disesuaikan dengan ukuran pelet yang akan dihasilkan.

b. *Pengeringan.*

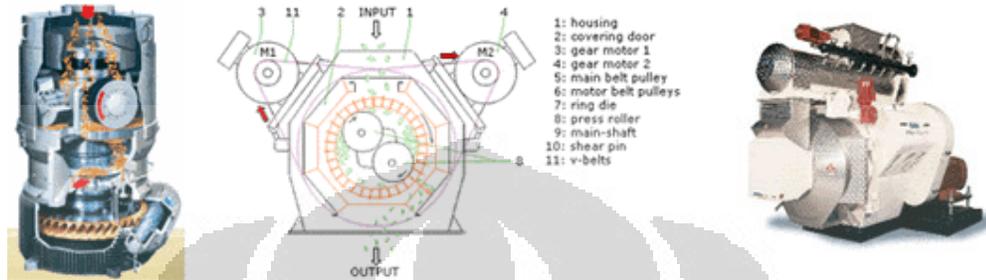
Jika bahan baku mentah bersifat basah (biasanya didapat dari sisa hutan, sekitar 50% kandungan air) biomasa tersebut harus dikeringkan terlebih dulu dengan mesin pengering hingga didapat kandungan air sekitar 8-10%.

c. *Conditioning.*

Bahan baku dapat dikontakkan dengan steam kering dan air untuk mendapatkan temperatur yang sesuai sehingga kandungan air yang ada di dalam biomasa dapat mengaktifkan lignin sebagai perekat alami pelet dan untuk mendapatkan kekuatan yang dimiliki pelet. Senyawa perekat organik dapat ditambahkan tergantung dari standard yang diinginkan.

d. Milling (Peletizing)

Setelah tahap persiapan, partikel dipindahkan menggunakan *conveyor* ke sebuah pelet *mill*, dimana pelet akan dipotong-potong sesuai dengan panjang yang diinginkan. Ada dua macam pelet press, yaitu *flat die* dan *ring die press*.



Sumber: Amandus Kahl, Salmatec; Sprout Matador

Gambar 2. 4 Flat die dan ring die

e. Cooling.

Setelah proses penghancuran, pelet akan sangat panas (90-100oC). Hal ini membuat lignin menjadi perekat alami yang menambah kekuatan pelet, dan berkontribusi untuk tetap menjaga kekuatan dan kualitas pelet selama penyimpanan dan distribusi.

f. Sieving.

Akhirnya, pelet akhirnya dibersihkan dan dipisahkan dari pengotor-pengotor. Pelet yang telah bersih dan siap kemudian dipindahkan ke tempat penyimpanan atau pengemasan.

2.3.3 Teknologi

A. Piston Press

Teknologi ini banyak digunakan di India dan seringkali dikenal sebagai teknologi penekan dan pencetak. Biomasa dimasukkan ke dalam mesin pencetak diiringi menggunakan penekan dengan tekanan sangat tinggi sehingga menekan biomasa menjadi pelet. Mesin ini mempunyai kapasitas 700 kg/jam dan dibutuhkan daya sebesar 25 kW. Alat penekan bergerak sekitar 270 kali per menit pada proses ini.

Berikut merupakan kekurangan dan kelebihan dari teknologi *piston press*:

- Teknologi ini merupakan teknologi dengan efisiensi biaya yang paling tinggi
- Dapat diaplikasikan pada berbagai jenis bahan baku biomasa
- Kandungan air dari bahan baku biomasa harus kurang dari 12% untuk hasil yang maksimal
- Kualitas pelet yang dihasilkan berbanding terbalik dengan banyaknya produk pada besar daya yang sama
- Tidak terjadi karbonisasi pada bagian luar pelet sehingga pelet mempunyai sifat agak sulit untuk pembakaran pertama.

B. Screw Press

Pada teknologi ini, bahan baku biomasa dihancurkan secara kontinu oleh alat penghancur lalu dimasukkan ke dalam alat pencetak dengan dilakukan pemanasan untuk mengurangi terjadinya friksi. Berikut merupakan kekurangan dan kelebihan dari teknologi *screw press*:

- Produk dihasilkan secara kontinu dan pelet mempunyai ukuran yang seragam
- Permukaan luar pelet dilapisi dengan karbon sehingga memudahkan dalam penyalaaan awal api dan pembakaran. Hal ini juga melindungi pelet dari kelembaban udara luar.
- Mesin lebih sederhana dibandingkan dengan *piston press*
- Besar daya yang dibutuhkan lebih besar daripada *piston press*.

C. Hydraulic Piston Press

Perbedaan teknologi ini dengan *mechanical piston press* adalah bahwa energy yang dibutuhkan oleh *piston* ditransmisikan dari mesin elektrikal melalui sistem tekan tinggi hidrolis. Mesin ini cukup sederhana tetapi produk yang dihasilkan lebih sedikit. Pelet yang dihasilkan mempunyai densitas kurang dari 1000 kg/m³ karena tekanan maksimal yang digunakan adalah 40-315 kg/h. Mesin ini dapat mentoleransi kandungan air yang lebih tinggi daripada yang biasa diperbolehkan yaitu 15% untuk *mechanical piston press* [10].

2.3.4 Faktor-Faktor yang Perlu Diperhatikan pada Proses Densifikasi

Untuk proses densifikasi biomasa, perlu diketahui faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses pembuatan pelet biomasa. Untuk teknologi pembuatan pelet yang berbeda, parameter yang harus dipenuhi oleh suatu bahan baku juga berbeda. Berikut ini akan dijelaskan tentang pengaruh ukuran partikel, kandungan air, temperatur bahan baku, temperatur mesin pencetak, dan penambahan zat aditif pada proses pembuatan pelet [10].

A. Pengaruh Ukuran Partikel

Ukuran dan bentuk partikel bahan baku biomasa sangat berpengaruh pada proses densifikasi. Telah disepakati bahwa material biomasa dengan ukuran 6-8 mm memberikan hasil yang paling baik. Meskipun teknologi *screw press* yang menggunakan tekanan tinggi (1000-1500 bar) dapat diaplikasikan pada material biomasa berukuran besar, proses pembuatan pelet tidak akan berjalan lancar dan penyumbatan dapat terjadi di bagian awal proses. Partikel biomasa yang lebih besar tidak akan terhancurkan dengan baik dan akan bertambah dan terakumulasi di bagian masuk dan steam yang dihasilkan akibat temperatur yang tinggi (sesuai dengan perputaran penghancur, panas yang dihasilkan dari alat pencetak, dan juga jika material dipanaskan terlebih dahulu) seputar mesin mulai berkondensasi dan terbentuk gumpalan sehingga menyebabkan terjadinya penyumbatan.

Untuk menghindari hal tersebut, seringkali partikel yang lebih besar dihancurkan terlebih dulu sehingga didapatkan ukuran partikel yang bervariasi. Adanya variasi pada ukuran partikel meningkatkan dinamik susunan partikel saat pengompakkan dan berkontribusi kepada kekuatan statis yang tinggi.

B. Pengaruh Kadar Air

Persentase kadar air pada bahan baku biomasa yang masuk ke mesin pengepres merupakan faktor yang sangat penting. Secara umum, disimpulkan bahwa saat kadar air biomasa 8-10%, pelet akan mempunyai kadar air 6-8%. Pada kadar air demikian, pelet bersifat kuat dan bebas pecah/retak serta proses pembuatan pelet akan berjalan lancar. Akan tetapi, bila kadar air kurang dari 8%, pelet akan bersifat lemah dan rapuh.

Pada proses pembuatan pelet, air juga bertindak sebagai perekat dengan menguatkan ikatan pada pelet. Pada bahan baku biomasa, air membantu terjadinya ikatan Van der Waals dengan meningkatkan area kontak partikel. Kenyataannya, berhasil tidaknya proses pengompakkan bergantung pada kadar air yang dimiliki oleh bahan baku biomasa. Jumlah kadar air yang tepat mengakibatkan terjadinya ikatan alami dari komponen lignocelulosic.

Kadar air yang terkandung dalam biomasa juga mempengaruhi densitas bulk dari pelet yang dihasilkan. Pelet yang dibuat tanpa pre-treatment awal akan mempunyai densitas bulk lebih besar bila kandungan air didalamnya lebih kecil [11]

C. Pengaruh Temperatur Biomasa

Dengan memvariasikan temperatur biomasa, maka densitas, kekuatan, kadar air pada pelet juga akan bervariasi. Di alat penghancur, temperatur tidak tetap konstan tapi bertambah. Friksi internal dan eksternal mengakibatkan pemanasan lokal dan material akan mengalami perekatan alami. Juga dapat diasumsikan bahwa kadar air yang terkandung pada material membentuk steam pada tekanan tinggi yang kemudian dapat menghidrolisis hemiselulosa dan lignin dalam biomasa menjadi karbohidrat dengan molekular rendah, produk lignin, polimer gula dan turunan lainnya. Produk-produk ini bila dikaitkan dengan panas dan tekanan pada alat pencetak, bertindak sebagai perekat adesive. Temperatur tidak boleh lebih tinggi daripada temperatur dekomposisi biomas yaitu sekitar 30°C.

D. Pengaruh Temperatur Alat Pencetak

Adanya baling-baling penghancur pada teknologi *screw press* mengakibatkan terjadi panas pada alat pencetak. Hal ini memberikan 2 keuntungan. Mesin dapat beroperasi dengan konsumsi daya yang lebih rendah dan umur manfaat dari alat pencetak akan lebih panjang. Temperatur alat pencetak harus dijaga pada rentang 280-290 °C. Jika temperatur alat pencetak lebih tinggi, friksi antara bahan baku dengan dinding alat pencetak akan menurun menyerupai pengompakkan yang terjadi pada tekanan yang lebih rendah yang menghasilkan

hasil densifikasi yang lemah. Sebaliknya, temperatur rendah akan membutuhkan tekanan dan daya yang lebih tinggi sedangkan laju produksi menurun.

E. Pengaruh Penambahan Zat Aditif

Proses pembuatan pelet tidak dapat menambah nilai kalor dari bahan baku biomasa yang digunakan. Untuk menaikkan nilai kalor dan kemampuan pembakaran dari suatu pelet biasanya digunakan zat aditif tambahan seperti batubara dan arang. Telah disebutkan sebelumnya bahwa hanya teknologi *screw press* yang dapat mengakibatkan terjadinya karbonisasi. Tergantung oleh kualitas bubuk arang atau batubara, bermacam formulasi dapat dilakukan untuk hasil yang berbeda.

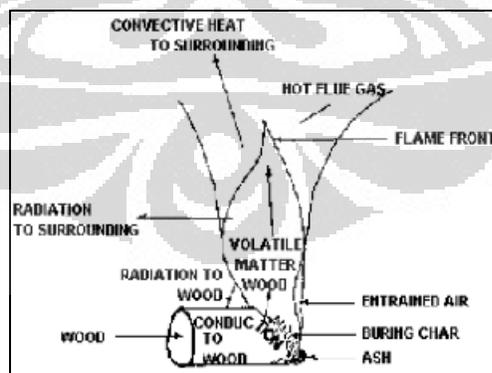
2.4 Pembakaran Biomasa

2.4.1 Tahap-Tahap Pembakaran

Pembakaran biomasa dapat terbagi ke dalam tiga tahap, yaitu [12]:

- Pengeringan kandungan air dalam biomasa
- Pelepasan zat-zat volatile yang terkandung dalam biomasa (devolatilisasi)
- Pembakaran gas volatile yang keluar dari biomasa
- Pembakaran arang

Skema prosesnya dapat dilihat dari gambar berikut.



Gambar 2. 5 Pembakaran kayu

A. Pengerinan

Pada tahap ini dilakukan pengerinan pada biomasa sehingga air yang terkandung dalam biomasa akan keluar dan membentuk uap air. Lamanya tahap ini tergantung pada tingkat kandungan air dalam biomasa.

B. Devolatilisasi

Biomasa pada umumnya mempunyai kadar volatil yang tinggi sehingga pembakarannya dimulai pada temperatur yang rendah. Proses devolatilisasi pada biomasa umumnya terjadi pada temperatur rendah dan hal ini mengindikasikan bahwa biomasa mudah dinyalakan dan dibakar, meskipun pembakaran yang diharapkan terjadi sangat cepat dan bahkan sulit dikontrol. Bentuk umum dari persamaan devolatilisasi adalah sebagai berikut:



Karena kadar volatil yang tinggi pada biomasa, maka pengetahuan detail pada proses devolatilisasi menjadi sangat penting. Selama proses devolatilisasi, kandungan volatil akan keluar dalam bentuk gas. Umumnya gas-gas yang keluar selama proses devolatilisasi dapat dikelompokkan ke dalam gas yang dapat diembunkan dan gas permanen. Masuk dalam kelompok gas permanen utama selama proses devolatilisasi adalah CO, CO₂, CH₄ dan H₂. Komposisi gas selama devolatilisasi tergantung pada jenis bahan yang digunakan.

C. Pembakaran Zat Volatile

Biomasa mengandung komponen penyusun yang sangat kompleks dimana zat-zat volatile yang ada di dalamnya berbed untuk tiap jenis biomasa. Berikut ini merupakan reaksi pembakaran sederhana dari zat volatile yang seringkali terjadi pada proses pembakaran biomasa.



Panas yang dihasilkan oleh reaksi eksotermis sangat penting dalam pelepasan zat volatile dan penyalaan api pada arang (karbon)

D. Pembakaran Arang

Setelah devolatilisasi akan terjadi oksidasi bahan bakar padat (arang). Laju pembakaran arang tergantung pada konsentrasi oksigen, temperatur gas, bilangan Reynolds, ukuran dan porositas arang. Kenaikan konsentrasi oksigen dalam gas menimbulkan laju pembakaran bahan bakar padat yang lebih tinggi. Temperatur pembakaran bahan bakar padat yang lebih tinggi menaikkan laju reaksi dan menyebabkan waktu pembakaran bahan bakar padat yang lebih singkat. Kecepatan gas yang tinggi pada permukaan akan menaikkan laju pembakaran bahan bakar padat, terutama disebabkan karena laju perpindahan massa dari oksigen ke permukaan partikel yang lebih tinggi.

Densitas pelet juga mempengaruhi waktu pembakaran arang. Semakin besar densitas pelet maka waktu pembakaran arang akan semakin lama [13]



Arang karbon bereaksi dengan oksigen pada permukaan partikel membentuk karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂), tetapi secara umum CO merupakan produk utama, selain itu juga permukaan arang karbon juga bereaksi dengan gas karbon dioksida dan uap air. Proses tersebut dinyatakan dalam reaksi-reaksi berikut:

Reaksi (2.11) merupakan reaksi oksidasi, reaksi (2.12) merupakan reaksi ketika tidak terdapat uap air dalam campuran, sedangkan reaksi (2.13) dan (2.14) merupakan reaksi reduksi yang pada umumnya berlangsung lebih lambat dari pada reaksi oksidasi dan untuk proses pembakaran yang menjadi perhatian penting adalah reaksi oksidasi. Akan tetapi ketika konsentrasi oksigen habis, barulah reaksi reduksi ini merupakan faktor penting. Pembakaran karbon sangat bergantung pada temperatur bahan bakar. Pada temperatur yang lebih rendah,

oksigen akan menyelimuti permukaan karbon, diserap dan bereaksi disana. Produk utama dari reaksi permukaan ini adalah CO_2 pada temperatur di bawah sekitar 800K dan CO pada temperatur lebih tinggi. Sehingga, pada reaksi (2.11) dapat terjadi secara baik jika temperatur permukaan dari karbon sekitar 800K sampai 4000K [14].

2.4.2 Faktor Pengontrol Pembakaran

Faktor-faktor penting yang mempengaruhi pembakaran adalah;

A. Sifat fisika dan kimia

Fraksi komposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin mempengaruhi pembakaran. (Dibahas dalam subbab 2.2.4). Lignin mempunyai nilai kalor yang paling besar. Bila sebuah biomasa mempunyai kandungan lignin yang tinggi maka diperkirakan nilai kalor biomasa tersebut juga tinggi.

B. Kadar Air

Semakin tinggi kadar air dalam biomasa menyebabkan temperatur pembakaran menurun dan kadar H_2O meningkat. Dengan semakin tingginya kadar air juga mengakibatkan biomasa lebih sulit dibakar sehingga terjadi pembakaran tidak sempurna dan terbentuk CO yang tinggi di awal proses pembakaran.

C. 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 volume dan massa yang sama [15].

Ukuran pelet biomas yang dibakar mempengaruhi besar temperatur yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran pelet maka temperatur pembakaran akan semakin besar dan waktu pembakaran semakin cepat. Hal ini berkaitan dengan laju perpindahan panas dari udara sekitar ke dalam biomasa yang semakin besar [16].

D. Penyediaan udara primer dan sekunder

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.

E. Rasio bahan bakar / udara

Rasio bahan bakar / udara memainkan peranan penting dalam reaksi pembakaran. Pembakaran yang sempurna terjadi pada kondisi stoikiometri. Adapun pengaruh dari kondisi pembakaran dengan campuran kaya biomas dapat dilihat dari peningkatan kadar CO khususnya di bagian depan ruang bakar. Semakin besar laju alir biomas ke ruang bakar menyebabkan kadar H₂O meningkat tetapi tidak menyebabkan kenaikan kadar CO₂ dengan semakin tingginya laju alir biomas menyebabkan temperatur pembakaran tidak terlalu tinggi [14]

2.4.3 Karakteristik Emisi dari Bahan Bakar Biomasa

Emisi yang dapat dihasilkan dari pembakaran biomasa dalam kompor, yang dapat menyebabkan polusi udara antara lain adalah: karbon monoksida, partikulat, sulfur oksida, nitrogen oksida, dan hidrokarbon.

A. Emisi dari Pembakaran Tidak Sempurna

Bila pembakaran tidak berjalan dengan efisien, sejumlah hidrokarbon dan karbon monoksida tidak terbakar dan terdapat pada gas hasil pembakaran. Pada temperatur yang rendah, konsentrasi CO semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi oksidasi CO menurun dengan penurunan temperatur. Penelitian lain menunjukkan bahwa konsentrasi CO semakin besar seiring dengan besarnya kandungan abu dalam biomasa walaupun temperatur pembakaran tetap konstan. Hal ini menunjukkan bahwa CO tidak hanya bergantung pada temperatur pembakaran tetapi juga pada kandungan biomasa.

B. Emisi dari Komponen Inorganik

Konsentrasi partikulat matter yang dihasilkan saat pembakaran berkaitan erat dengan besarnya kandungan abu dalam biomasa. Semakin besar kandungan

abu maka partikulat matter (PM1.0) yang dihasilkan juga makin besar. Selain itu komponen K, Na, S, dan Cl juga memberikan kontribusi pada banyaknya PM1.0 yang dihasilkan. [17]

2.5 Aspek Lingkungan dan Kesehatan

2.5.1 Aspek Lingkungan

Persoalan pokok mengenai konservasi biomasa (khususnya pohon/hutan biomasa) meliputi: generasi, pemeliharaan, dan penerusan (*sustain*). Walaupun generasi pohon terus dilakukan, namun penggunaan produk-produk pohon dianggap bermasalah untuk konservasi. Maka tiap negara harus menjamin sustainability dari hutan-hutan, agar produk-produk kayu dapat terus dipakai. Bila hal ini sudah tercapai, maka akan menguntungkan juga secara ekonomi.

Sedangkan masalah emisi CO₂ yang dapat menyebabkan pemanasan global, untuk penggunaan kompor biomasa, emisi CO₂ masih tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan pembakaran-pembakaran lain, khususnya emisi yang dikeluarkan industri besar dan kendaraan bermotor. Berarti, masalah yang perlu diatasi adalah bagaimana menjamin ketersediaan bahan bakar kayu secara terus menerus tanpa merugikan lingkungan.

2.5.2 Kontribusi Penggunaan Bahan Bakar Biomasa pada Masalah Pencemaran

Lingkungan tempat tinggal kita merupakan sumber kehidupan yang harus kita jaga dan lestarikan. Pencemaran lingkungan yang terjadi dapat membahayakan makhluk hidup yang bernaung didalamnya. Salah satu penyebabnya adalah penggunaan energi fosil yang makin meningkat. Penggunaan biomassa sebagai energi dapat mengurangi efek pencemaran yang saat ini terjadi.

A. Mengurangi gas rumah kaca

a. Karbondioksida (CO₂)

Tanaman atau biomasa akan mengurangi konsentrasi karbondioksida dari atmosfer melalui proses fotosintesis. Karbon dioksida (CO₂) yang diserap untuk tumbuh dan berkembang. Ketika biomasa dibakar, karbon (C) akan diubah kedalam bentuk karbon dioksida dan kembali ke atmosfer. Proses ini berlangsung

secara terus menerus sehingga jumlah konsentrasi karbon dioksida di atmosfer akan selalu seimbang bila sejumlah biomasa menyerap sejumlah karbon dioksida yang seimbang. Tetapi bila konsumsi energi fosil menjadi meningkat maka konsentrasi karbon dioksida akan meningkat. Sehingga penambahan biomasa dibutuhkan untuk menyeimbangkan kembali jumlah karbon dioksida yang diserap dan dilepaskan.

Kenyataan, peningkatan sejumlah energi fosil seperti gas, minyak yang terjadi belakangan ini tidak diimbangi dengan peningkatan jumlah biomasa, yang terjadi adalah apa yang dinamakan deforestation atau penggundulan hutan, pembalakan dan sebagainya. Hal tersebut makin meningkatkan konsentrasi karbon dioksida. Penggunaan biomasa sebagai pengganti bahan bakar dapat mengurangi konsentrasi karbon dioksida.

b. Metana (CH₄)

Seperti halnya karbondioksida metana merupakan gas yang dapat menimbulkan efek pemanasan global. Potensi metana untuk meningkatkan temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan karbon dioksida. Metana dapat dihasilkan dari sampah padat pertanian, kotoran ternak maupun manusia merupakan penyebab timbulnya emisi metana.

Penggunaan biomasa (bahan organik) sebagai bahan bakar akan mengkonversi metana menjadi bahan bakar yang lebih bermanfaat sehingga potensi metana yang dilepaskan ke atmosfer menjadi berkurang.

B. Mengurangi limbah organik

Sampah organik seperti sampah pertanian (jerami, tongkol), limbah pengolahan biodiesel (cangkang biji jarak pagar, cangkang sawit), sampah kota ataupun limbah kayu, ranting dan pengolahan kayu (sawdust) merupakan limbah yang keberadaanya kurang bermanfaat. Limbah tersebut bila dibiarkan atau dibuang tanpa dibakar terlebih dahulu, dapat melepaskan gas metana yang berbahaya. Hasil pembakaran limbah merupakan abu yang memiliki volume 1 % bila dibandingkan dengan limbah padat. Untuk meningkatkan nilai kalor, dan mengurangi emisi limbah organik biasanya dilakukan proses karbonisasi. Selain itu pembentukan menjadi pelet bermanfaat sebagai bahan bakar padat.

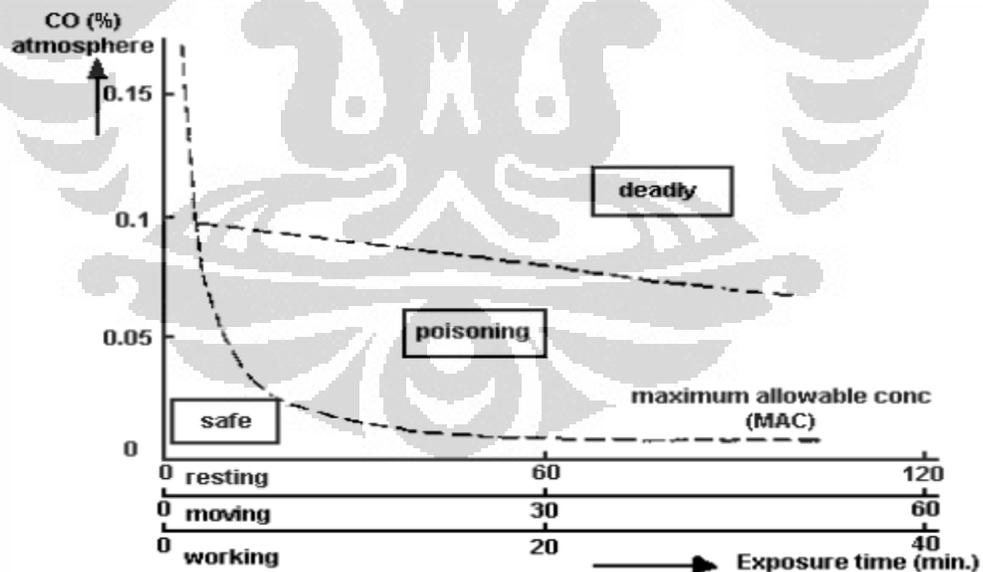
2.5.3 Aspek Kesehatan

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

Tabel 2. 6 Mekanisme efek kesehatan dari polutan

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

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



Gambar 2. 6 Efek konsentrasi CO di udara terhadap waktu pemaparan dan kondisi kerja

Dampak negatif dari emisi yang dikeluarkan oleh pembakaran biomasa terhadap kesehatan manusia, antara lain dapat menimbulkan:

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

Tabel 2. 7 Emisi hasil pembakaran biomasa yang dapat membahayakan kesehatan

| System/Fuel | Estimated thermal efficiency | Fuel used to deliver 1 GJ of useful energy | Particulates grams per kg fuel burned | Sulphur oxides grams per kg fuel burned | Nitrogen oxides grams per kg fuel burned | Hydro carbons grams per kg fuel burned | Carbon monoxide grams per kg fuel burned |
|-----------------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|---|--|--|--|
| Industrial (>20kW) | | | | | | | |
| Wood | 73 | 89 kg | 6 | 0.5 | 4 | 4 | 5 |
| Bituminous coal | 83 | 43 kg | 65 | 18 | 8 | 0.5 | 1 |
| Residual oil | 83 | 33 lit. | 3 | 42 | 8 | 0.1 | 0.6 |
| Distillate oil | 90 | 31 lit. | 0.3 | 41 | 3 | 0.1 | 0.7 |
| Natural gas | 93 | 28 m ³ | --- | --- | --- | --- | --- |
| Residential (>5kW) | | | | | | | |
| Heating stoves | | | | | | | |
| Wood | 53 | 130 kg | 21 | 0.2 | 14 | 50 | 130 |
| Anthracite coal | 65 | 49 kg | 1 | 4 | 50 | 1.3 | 20 |
| Bituminous coal | 65 | 53 kg | 10 | 30 | 30 | 10 | 100 |
| Distillate oil | 85 | 33 lit. | 0.4 | 41 | 2.5 | 0.1 | 0.7 |
| Natural gas | 95 | 30 m ³ | --- | --- | --- | --- | --- |
| Cooking stoves^a | | | | | | | |
| Wood (tropical) | 15 | 420 kg | 0 | 0.5 | 0.7 | 7.5 | 80 |
| Cow dung (Hawaiian) | 15 | 530 kg | 20 | 6 | 7.0 | 7 | 83 |
| Coal (indian) | 23 | 220 kg | 1.2 | 10 | 2.0 | 10 | 120 |
| Coconut husk | 15 | 480 kg | 35 | 7 | 7.0 | 7 | 110 |
| Natural gas | 80 | 32 m ³ | --- | --- | --- | --- | --- |

Source: Smith (1987)

Wood, 15% moisture (dry basis), 16 MJ/kg
 Bituminous coal, 10% ash, 1% Sulphur, 29.2 MJ/kg
 Anthracite coal, 0.2% Sulphur, 31.5 MJ/kg
 Indian coal, 0.5% Sulphur, 23 MJ/kg

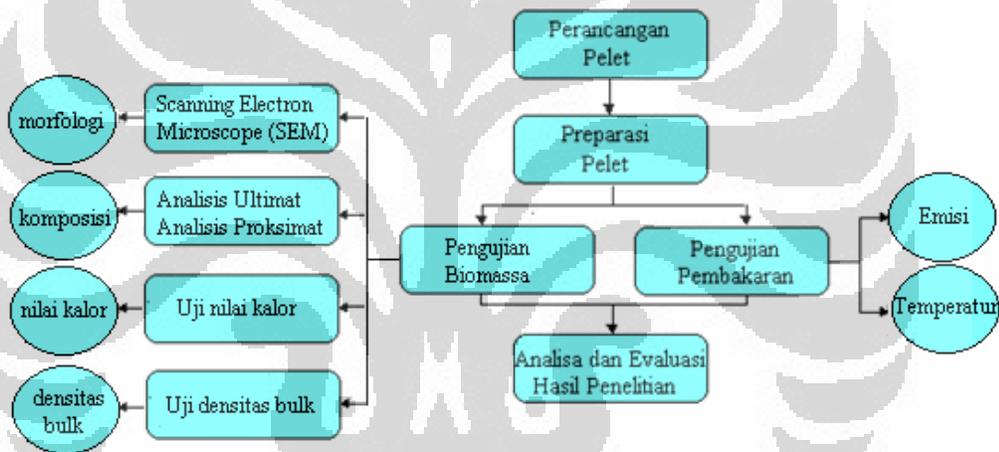
Hawaiian cow dung, 0.3% Sulphur, 15% moisture, 12.5 MJ/kg
 Coconut husk, 15% moisture (dry basis), 14 MJ/kg
 Residual oil, 0.941 specific gravity, 45.9 MJ/kg

^a Excluding natural gas, cooking efficiency and emissions of biomass fuels and coal are based on traditional stoves without any grate.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimana tahap pra-penelitian adalah melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan bahan bakar biomasa. Lalu, penelitian utamanya menyangkut tiga hal, yaitu perancangan, preparasi, dan pengujian. Adapun hal-hal yang diuji meliputi emisi, efisiensi termal, dan penerimaan masyarakat perkotaan. Setelah itu, dilakukan analisa dan evaluasi hasil penelitian, dan terakhir, dibuat kesimpulan.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Tahap Perancangan Pelet

Setelah melakukan studi literatur, maka tahap berikutnya adalah penelitian, dimana pertama-tama akan dirancang bahan bakar. Perancangan ini meliputi penentuan bahan baku biomasa yang digunakan dan ukuran pelet biomasa yang akan dihasilkan. Prosedur umum perancangan bahan bakar adalah sebagai berikut:

1. Menentukan variasi bahan baku biomasa yang akan digunakan dalam pembuatan pelet, dengan mempertimbangkan analisa ultimat dan

proksimat yang dimiliki oleh biomasa tersebut untuk memenuhi standar emisi dan nilai kalor yang baik.

1. Menentukan variasi ukuran dimensional pelet dengan memperhatikan proses pembakaran maupun konsumsi masyarakat perkotaan yang mengutamakan kepraktisan.
2. Menentukan variasi kandungan air dalam tiap pelet biomasa.

3.3 Tahap Preparasi Pelet

Di waktu yang bersamaan dengan penyediaan alat dan bahan, akan dipreparasi bahan bakar yang akan dipakai.

3.3.1 Alat dan Bahan Preparasi Pelet

Peralatan:

- Mesin pencacah
- Mesin penepung
- Cetakan pelet
- Besi penekan
- Alat pengepres
- Gergaji kayu
- Oven laboratorium
- *Infrared Moisture Determination Balance FD-240 KETT.*



Gambar 3. 2 Mesin pencacah



Gambar 3. 3 Mesin penepung



Gambar 3. 4 Cetakan dan besi penekan



Gambar 3. 5 Pressure peletizer



Gambar 3. 6 Oven laboratorium

Gambar 3. 7 *Infrared Moisture Determination Balance FD-240 KETT***Bahan:**

- Kayu karet
- Kayu kamper
- Sekam
- Jerami
- Air

3.3.2 Prosedur Preparasi Pelet

Prosedur umum dalam preparasi tiap jenis bahan bakar adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan bahan baku pembuatan pelet biomasa (yaitu jerami, sekam, kayu karet, dan kayu kamper).
2. Khusus untuk kayu karet dan kayu kamper, memotong ranting-ranting tersebut sehingga panjangnya seragam, yaitu 10cm.

3. Memasukkan potongan ranting kayu karet ke dalam mesin crusher agar terbentuk serpihan kayu karet. Lakukan hal yang sama pada potongan kayu kamper dan jerami.
4. Memasukkan serpihan kayu karet ke dalam mesin penepung untuk menghasilkan serbuk kayu karet. Lakukan hal yang sama pada potongan kayu kamper, jerami, dan sekam.
5. Simpan serbuk kayu karet dalam karung. Lakukan hal yang sama pada serbuk kayu kamper, serbuk sekam, dan serbuk jerami.

Pembuatan pelet berkaian erat dengan pengujian yang akan dilakukan. Oleh karena ini berikut akan dipaparkan proses pembuatan pelet biomasa sesuai dengan pengujian yang akan dilakukan.

A. Preparasi Pelet untuk Pengujian Nilai Kalor

1. Menyemprotkan air ke 300 gram serbuk kayu karet hingga mencapai tingkat kandungan air sebesar (20 ± 1) %.
2. Memasukkan serbuk kayu karet ke dalam pencetak dengan diameter cetakan 1 cm untuk kemudian di tekan dengan alat pengepres dengan tekanan 2 Ton/kg. Membuat pelet dengan panjang 3cm.
3. Membagi pelet yang dihasilkan menjadi 3 bagian:
 - 100 gram disimpan alam plastik dengan *sealer*
 - 100 gram dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 150°C selama 120 menit hingga pelet mempunyai kadar air sebesar (11 ± 1) %. Simpan dalam plastik dengan *saler*.
 - 100 gram dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 150°C selama 240 menit hingga pelet mempunyai kadar air sebesar (5 ± 1) %. Simpan dalam plastik dengan *saler*.
4. Lakukan tahap 1, 2, dan 3 pada serbuk sekam, serbuk jerami, dan serbuk kayu kamper. Perlu diperhatikan bahwa karakteristik tiap bahan berbeda sehingga lama waktu yang diperlukan untuk mengeringkan hingga mencapai kandungan air tertentu pada tiap bahan juga berbeda.

B. Preparasi Pelet untuk Pengujian Temperatur Pembakaran dan Densitas Bulk

1. Menyemprotkan air ke 300 gram serbuk kayu karet hingga mencapai tingkat kandungan air sebesar $(11 \pm 1) \%$
2. Memasukkan serbuk kayu karet ke dalam pencetak dengan diameter cetakan 1 cm untuk kemudian ditekan dengan alat pengepres dengan tekanan 2 Ton/kg. Membuat pelet dengan panjang 3cm.
3. Melakukan pengerjaan di poin 1 dengan menggunakan diameter cetakan 1.5 cm dan 2 cm.
4. Membuat pelet biomasa dengan diameter 1 cm, 1.5 cm, dan 2 cm untuk tiap bahan baku masing-masing 300 gram.
5. Menyimpan pelet biomasa di dalam plastik yang terpisah.
6. Menyemprotkan air ke 300 gram serbuk kayu karet hingga mencapai tingkat kandungan air sebesar $(20 \pm 1) \%$.
7. Memasukkan serbuk kayu karet ke dalam pencetak dengan diameter cetakan 1 cm untuk kemudian di tekan dengan alat pengepres dengan tekanan 2 Ton/kg. Membuat pelet dengan panjang 3cm.
8. Membagi pelet yang dihasilkan menjadi 3 bagian:
 - 100 gram disimpan dalam plastik dengan *sealer*
 - 100 gram dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 150°C selama 120 menit hingga pelet mempunyai kadar air sebesar $(11 \pm 1) \%$. Simpan dalam plastik dengan *sealer*.
 - 100 gram dimasukkan ke dalam oven dengan temperatur 150°C selama 240 menit hingga pelet mempunyai kadar air sebesar $(5 \pm 1) \%$. Simpan dalam plastik dengan *sealer*.
9. Lakukan tahap 1, 2, dan 3 pada serbuk sekam, serbuk jerami, dan serbuk kayu kamper. Perlu diperhatikan bahwa karakteristik tiap bahan berbeda sehingga lama waktu yang diperlukan untuk mengeringkan hingga mencapai kandungan air tertentu pada tiap bahan juga berbeda.

3.4 Tahap Pengujian Pelet

Tahap selanjutnya adalah pengujian efisiensi bahan bakar biomasa. Pada tahap ini, akan dilakukan dua macam pengujian yaitu pengujian karakteristik biomasa dan pengujian pembakaran.

3.4.1 Alat dan Bahan Pengujian Pelet

Peralatan:

- *Furnace* laboratorium
- 2 buah termokopel
- Data aquisisi ADAM 4018M
- Timbangan elektrik
- Wadah plastik 350 ml
- *Syringe*
- *Gas Chromatography*



Gambar 3. 8 Furnace laboratorium



Gambar 3. 9 Data aquisisi ADAM 4018M

Bahan:

- Pelet kayu karet
- Pelet kayu kamper
- Pelet sekam
- Pelet jerami

3.4.2. Pengujian Biomassa

A. Pengujian Morfologi Pelet

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan tenaga dari luar yaitu Laboratorium CMFD di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, dengan alat *Scanning Electron Microscop* (SEM).

B. Analisa Proksimat dan Ultimat

Analisa proksimat terdiri dari analisa kadar air, kadar abu, dan bahan mudah menguap. Analisa kadar air menggunakan metode ASTM D 3173, ISO 331. Analisa kadar abu menggunakan metode ASTM D 3174, ISO 1171. Sedangkan analisa kadar bahan mudah menguap menggunakan metode ISO 562.

Analisa ultimat terdiri dari komposisi unsur-unsur kimia dalam bahan baku biomasa. Analisa kadar karbon dan hidrogen menggunakan metode ASTM D 3178, ISO 625. Analisa kadar nitrogen menggunakan metode ASTM D 3179, ISO 332. Analisa kadar sulfur menggunakan metode ASTM D 4239, ISO 351.

C. Pengujian Nilai kalor

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Adiabatic Bomb Calorimeter*.

D. Pengujian Densitas Bulk

Pengujian ini dilakukan di Departemen Pertanian Serpong.

1. Menyiapkan wadah dengan volume 350 ml
2. Menimbang massa kosong wadah tersebut
3. Menyiapkan pelet berbahan baku serbuk kayu karet dengan kandungan air $(5 \pm 1) \%$ dan diameter 1 cm
4. Memasukkan pelet tersebut ke dalam wadah hingga penuh
5. Menimbang massa wadah yang telah berisi pelet
6. Menghitung *densitas bulk* pelet dengan membagi massa pelet (massa wadah yang telah berisi pelet dikurang dengan massa wadah) dengan volume wadah
7. Mencatat hasil yang didapat

8. Mengulangi tahap 3-7 dengan pelet berdiameter 1.5 dan 2 cm
9. Mengulangi tahap 3-8 dengan pelet dengan kandungan air $(11 \pm 1) \%$ dan $(20 \pm 1) \%$

3.4.3 Pengujian Pembakaran

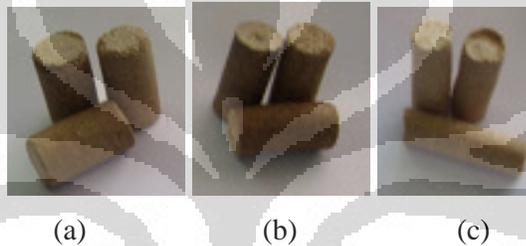
Prosedur dalam pengujian pembakaran adalah sebagai berikut dimana performa pelet yang akan ditinjau adalah temperatur pembakaran dan emisi yang dihasilkan.

1. Melubangi pelet biomasa pada bagian tengah dengan bor berdiameter 1.5 mm
2. Memasukkan dua buah termokopel ke dalam furnace
3. Memasukkan sebuah termokopel kedalam lubang pada pelet biomasa
4. Meletakkan pelet biomasa yang telah terhubung dengan termokopel di atas cawan dan memasukkannya ke dalam furnace.
5. Menghubungkan kedua termokopel pada data akuisisi yang telah terhubung ke komputer
6. Mengeset temperatur furnace pada 250°C
7. Mencatat temperatur ruangan maupun temperatur pelet biomasa yang terbakar
8. Pada selang waktu 10 menit mengambil gas pembakaran sebanyak 1 ml dengan cara mendekatkan *syringe* ke lubang pada bagian atas *furnace*.
9. Menyuntikkan gas dalam *syringe* ke dalam kolom GC dan mengolah data yang keluar.
10. Pengujian dilakukan pada tiap variasi pelet biomasa yang telah dipreparasi sebelumnya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Karakterisasi Biomasa

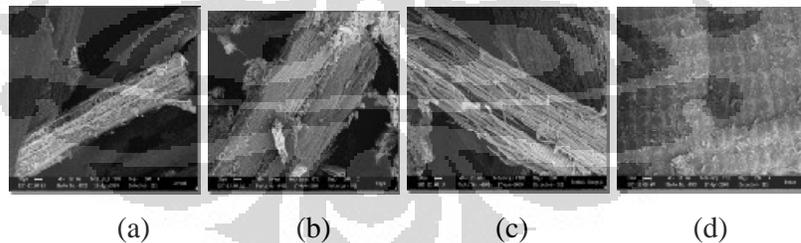
Gambar 4.1 merupakan pelet biomasa yang dihasilkan yaitu pelet kayu karet, pelet kayu kamper, dan pelet jerami. Dari penelitian yang telah dilakukan didapat bahwa sekam tidak bisa dibuat menjadi pelet bila peletisasi dilakukan dengan tanpa bahan perekat tambahan. Hal ini disebabkan karena sekam mengandung zat silica yang sangat tinggi dan hemiselulosa yang rendah sehingga sulit merekat.



Gambar 4. 1 Pelet dengan variasi diameter: (a) 2 cm, (b) 1.5 cm dan (c) 1 cm

4.1.1 Morfologi Bahan Baku Biomasa

Gambar 4. 2 merupakan bentuk morfologi bahan baku biomasa dengan menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM).



Gambar 4. 2 Hasil SEM untuk masing-masing jenis biomasa: (a) jerami (b) kayu karet (c) kayu kamper (d) sekam

Hasil SEM memperlihatkan struktur dari tiap bahan baku. Jerami dan kayu kamper memiliki struktur agak berpori sedangkan kayu karet dan sekam mempunyai struktur yang padat. Hal ini akan memberi pengaruh pada performa pelet yang terbuat dari masing-masing bahan baku dalam hal densitas bulk.

4.1.2 Komposisi Bahan Baku Biomassa

Tabel 4.1. merupakan kandungan komposisi biomassa yang diukur dengan menggunakan analisa proksimat

Tabel 4. 1 Analisa proksimat biomassa

| Jenis Biomasa | Kandungan air %, adb | Abu %, adb | Bahan mudah menguap %, adb | Karbon Padat %, adb | Nilai Kalor (HHV) Cal/g, adb |
|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Sekam | 7.78 | 21.84 | 57.05 | 13.33 | 3211 |
| Jerami | 11.98 | 17.42 | 56.48 | 14.12 | 3151 |
| Kayu Karet | 10.85 | 4.29 | 69.76 | 15.1 | 4012 |
| Kayu Kamper | 15.52 | 1.21 | 68.22 | 15.05 | 4017 |

Kandungan air paling rendah ada pada sekam, dan yang paling tinggi ada pada kayu kamper. Sekam tersusun dari palea dan lemma (bagian yang lebih lebar) yang terikat dengan struktur pengikat yang menyerupai kait. Sel-sel sekam yang telah masak mengandung lignin dan silica dalam konsentrasi tinggi. Kandungan silica diperkirakan berada dalam lapisan luar [18] sehingga permukaannya keras dan sulit menyerap air, mempertahankan kelembaban, serta memerlukan waktu yang lama untuk mendekomposisinya [19].

Kandungan air merupakan salah satu faktor penentu besar nilai kalor dimana semakin besar kandungan air maka semakin rendah nilai kalornya. Berlawanan dengan pernyataan sebelumnya, bila dilihat di Tabel 4.1 walaupun kandungan air kayu kamper paling tinggi namun nilai kalornya justru paling tinggi. Hal ini dikarenakan adanya zat lain dalam biomassa tersebut yang juga mempengaruhi nilai kalor sehingga menjadi lebih tinggi, yaitu kadar karbon, hidrogen, dan oksigen yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Sekam mempunyai kadar abu yang paling tinggi dimana kadar abu yang paling rendah dimiliki oleh kayu kamper. Artinya bila dibakar pelet yang terbuat dari sekam akan menghasilkan emisi abu (*ash*) dan partikulat matter yang paling banyak.

Bahan mudah menguap (*volatile matter*) dan karbon padat (*fixed carbon*) juga mempengaruhi nilai kalor. Semakin banyak kandungan bahan mudah menguap artinya kemampuan biomasa untuk terbakar juga semakin tinggi. Semakin banyak kandungan karbon padat artinya semakin banyak zat yang dapat bereaksi dalam reaksi pembakaran sehingga memungkinkan reaksi pembakaran berjalan dengan lebih baik. Kayu karet dan kayu kamper mempunyai kemampuan terbakar yang lebih tinggi daripada sekam dan jerami.

Dari Tabel 4.1 diperhatikan bahwa nilai kalor yang tercantum di atas adalah untuk pelet dengan kadar air yang tersebut. Jadi nilai kalor ini tidak dapat kita gunakan untuk membandingkan keempat bahan bakar tersebut karena untuk membandingkan diperlukan kondisi kandungan air yang sama.

Tabel 4.2 menyajikan data unsur-unsur kimia penyusun biomasa. Data ini sangat penting karena digunakan dalam perhitungan nilai kalor.

Tabel 4. 2 Analisa ultimat biomasa

| Jenis Biomasa | Carbon (%, adb) | Hidrogen (%, adb) | Nitrogen (%, adb) | Belerang (%, adb) | Oksigen (%, adb) |
|---------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Sekam | 35.18 | 4.46 | 0.15 | 0.01 | 38.36 |
| Jerami | 36.48 | 4.7 | 0.61 | 0.09 | 40.7 |
| Kayu Karet | 45.62 | 5.57 | 0.72 | 0.04 | 43.76 |
| Kayu Kamper | 45.67 | 5.74 | 0.12 | Trace | 47.26 |

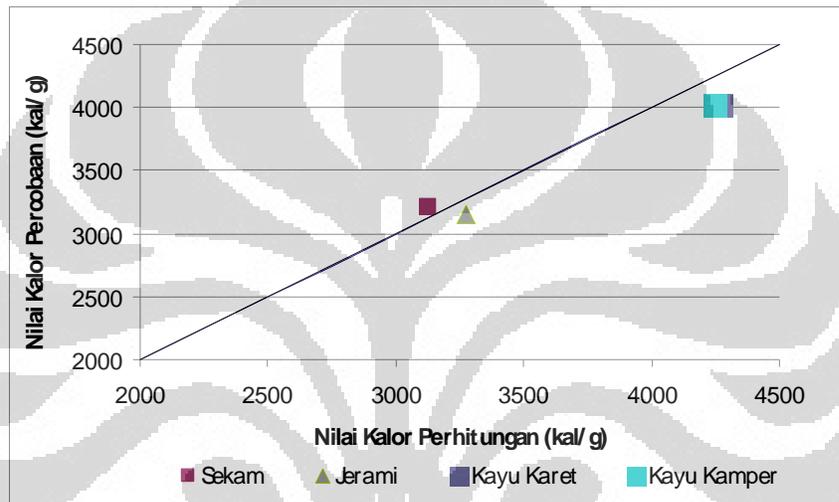
4.1.3 Nilai Kalor

Dengan diketahui komposisi penyusun biomasa pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 ini kita dapat membuat prediksi dari nilai kalor bahan baku tersebut dengan menggunakan persamaan (2.4). Dari persamaan tersebut kita lihat bahwa nilai kalor dipengaruhi oleh banyaknya unsur C, H, O, S, N, dan kadar ash dalam biomasa. Dengan demikian secara teoritis dapat dilihat bahwa semakin banyak unsur C, H, dan S maka semakin besar nilai kalornya. Namun semakin besar unsur O, N, dan kadar ash maka akan mengurangi nilai kalor.

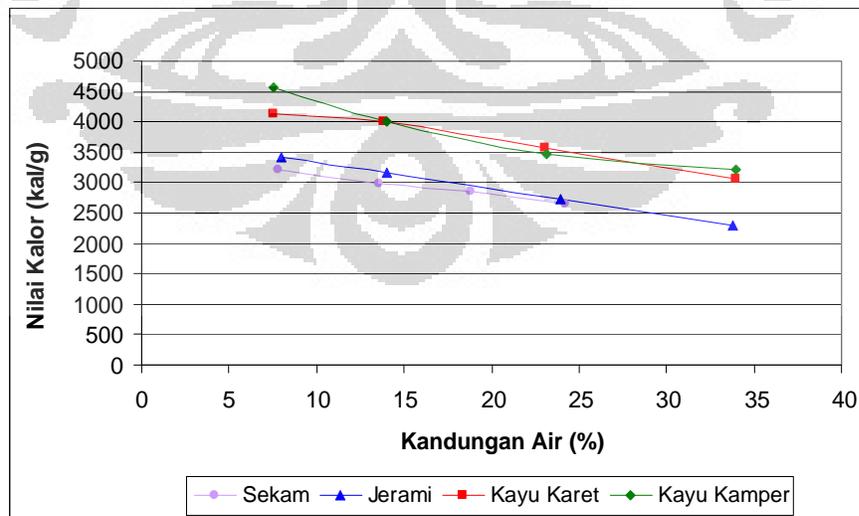
Dari percobaan pengujian nilai kalor yang dilakukan dengan menggunakan alat bomb calorimeter, didapat bahwa nilai kalor kayu kamper adalah yang paling

tinggi (sesuai dengan kadar unsur C dan H yang paling tinggi). Nilai kalor yang paling rendah adalah sekam (sesuai dengan kadar unsur C dan H yang paling rendah). Sekali lagi perlu ditekankan perbandingan ini dilakukan dengan tidak melihat pengaruh dari kadar air. Sehingga bila dilakukan pengujian dengan kadar air yang sama artinya komposisi biomasa juga akan berubah dan begitu pula dengan nilai kalornya.

Perbedaan antara HHV percobaan dengan HHV perhitungan hanyalah sebesar $4\pm 2\%$ sehingga masih dapat ditoleransi.



Gambar 4. 3 Perbandingan antara HHV percobaan dengan HHV perhitungan
Dari percobaan ini kita akan melihat pengaruh kadar air terhadap nilai kalor.



Gambar 4. 4 Hubungan antara nilai kalor dengan kandungan air

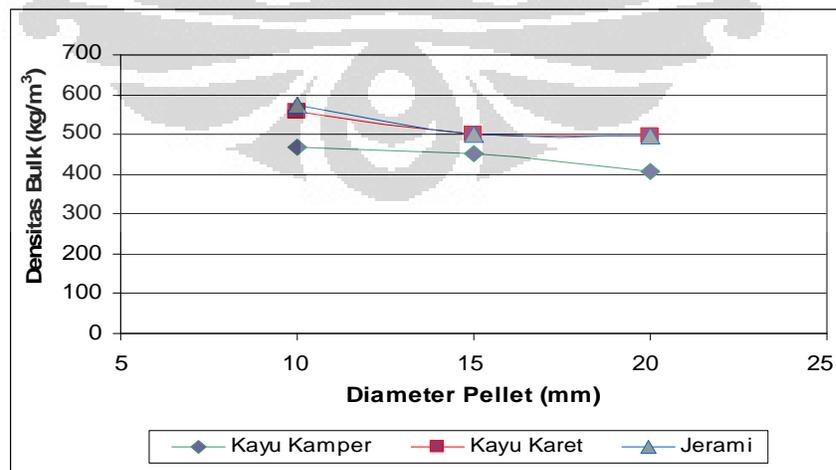
Secara garis besar nilai kalor akan turun bila kandungan air naik. Air yang terkandung dalam biomasa akan menguap menjadi uap air saat biomasa dipanaskan. Hal ini membuat panas yang dihasilkan oleh reaksi kimia (reaksi pembakaran) terabsorb oleh proses penguapan tersebut.

Variasi pelet yang diujikan adalah pelet dengan kandungan air $\pm 8\%$, $\pm 14\%$, $\pm 23\%$, dan $\pm 35\%$. Namun khusus untuk pelet sekam, variasi kandungan air yang diujikan maksimal adalah $\pm 25\%$. Hal ini karena sekam memiliki karakteristik jaringan yang tidak berpori sehingga tidak mampu menyerap air. Dari kurva dapat kita lihat bahwa pelet dengan kandungan air di bawah 10% mempunyai nilai kalor yang paling tinggi yaitu berkisar antara 3200 – 4500 Cal/g, tergantung dari jenis bahan baku biomasa yang digunakan.

Dari Gambar 4. 4 dapat disimpulkan bila dilihat dari segi nilai kalornya maka bahan bakar pelet biomasa yang paling bagus dibandingkan dengan bahan lain yang dianalisa adalah pelet yang terbuat dari kayu kamper dengan kandungan air berkisar 7-8%.

4.1.4 Densitas bulk

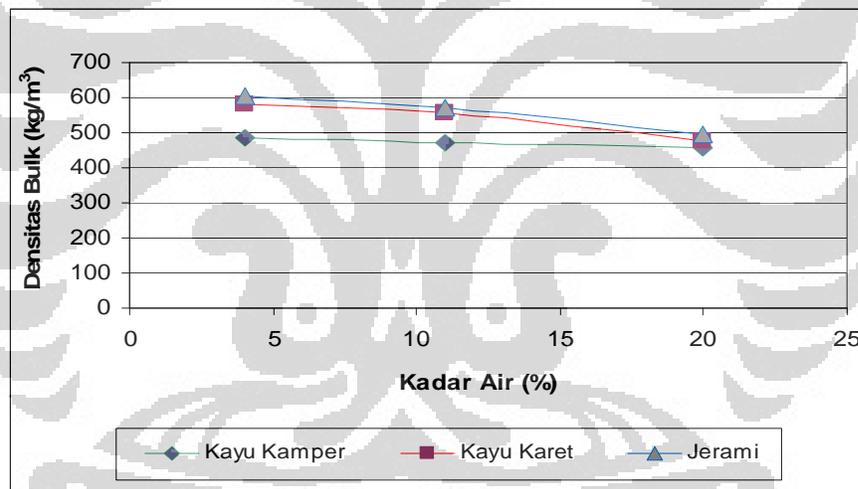
Densitas bulk menunjukkan perbandingan massa pelet terhadap volume. Dari hasil percobaan diketahui bahwa densitas bulk semakin menurun sering dengan bertambahnya diameter pelet. Hal ini jelas karena pelet dengan ukuran yang lebih kecil dapat lebih banyak tertampung dalam wadah dengan volume yang sama daripada pelet dengan ukuran yang lebih besar.



Gambar 4. 5 Hubungan antara densitas bulk dengan diameter pelet

Begitu pula dengan kadar air, semakin tinggi kadar air pelet maka densitas bulk akan turun. Tingginya kadar air dalam pelet dipengaruhi oleh kadar air pada bahan baku biomasa. Kadar air yang tepat dalam biomasa menghasilkan pelet yang bersifat *compact* (padat) sedangkan kadar air pada biomasa yang terlalu berlebih menyebabkan lignin tidak dapat berfungsi menjadi perekat bila pembuatan pelet dilakukan dengan tekanan dan temperatur yang sama sehingga pelet bersifat mengembang (tidak padat). Hal ini menghasilkan pelet dengan densitas bulk yang lebih kecil pada pelet dengan panjang yang sama

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang telah terlebih dulu dilakukan oleh M.D. Shaw yang berjudul *Physicochemical characteristic of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds*. Journal tersebut menyatakan bahwa pelet tanpa treatment awal memiliki sifat semakin rendah densitas bulk bila kandungan airnya semakin tinggi.



Gambar 4. 6 Hubungan antara densitas bulk dengan kadar air

Dari Gambar 4. 5 dan Gambar 4. 6 dapat dilihat bahwa jerami mempunyai densitas bulk yang paling besar. Artinya dalam ukuran pelet yang sama massa jerami yang dipakai untuk membuat pelet tersebut lebih banyak daripada bahan lain. Hal ini dapat dibuktikan dengan massa persatuan unit pelet yang terbuat dari jerami mempunyai massa lebih besar daripada pelet yang terbuat dari bahan lain. Sekam tidak ditampilkan dalam gambar karena setelah dilakukan percobaan karena dengan perlakuan yang sama sekam tidak dapat dibuat menjadi pelet

dengan kualitas layak. Hal ini dikarenakan kandungan lignin dalam sekam yang tidak memadai sebagai perekat alami.

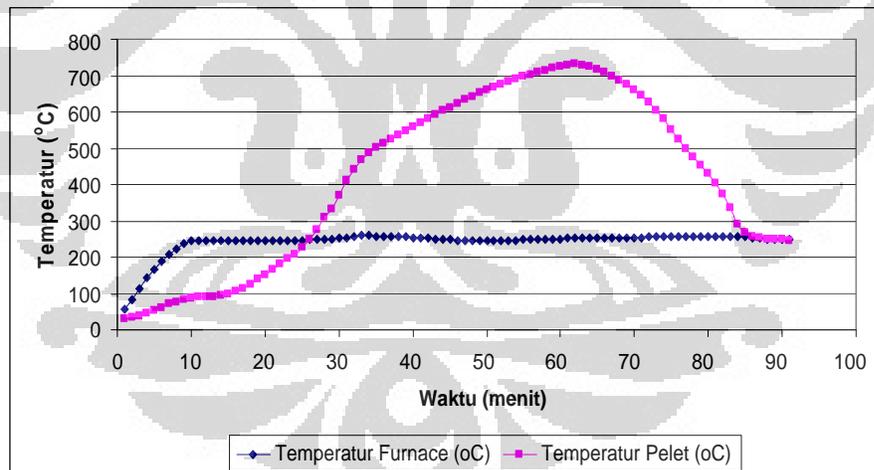
Densitas bulk merupakan salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan dalam menentukan volume penyimpanan pada segi transportasi. Dengan meningkatkan densitas bulk, jumlah pelet biomasa yang didistribusikan dan disimpan akan lebih banyak pada volume yang sama. Hal ini mereduksi biaya transportasi. Tempat penyimpanan pun dapat direduksi.

Jadi dapat disimpulkan bahwa pelet jerami dengan kandungan air 4% merupakan pilihan terbaik bila dilihat dari segi penyimpanan (*storage*).

4.2 Pengujian Pembakaran

4.2.1 Pengujian Temperatur Pembakaran

Pengujian temperatur pembakaran dilakukan terhadap pelet biomasa dengan variasi diameter dan variasi kandungan air. Temperatur furnace diset stabil pada 250 °C. Gambar 4. 7 merupakan profil temperatur furnace dan temperatur pelet vs waktu pada pelet jerami dengan diameter 1 cm.



Gambar 4. 7 Hubungan antara temperatur dengan waktu

Dari Gambar 4. 7 dapat dilihat bahwa temperatur furnace cenderung stabil dan tidak terpengaruh oleh temperatur pelet. Hal ini disebabkan karena volume pelet yang terbakar jauh lebih kecil dibandingkan dengan volume furnace. Selain itu, panas yang dihasilkan oleh proses pembakaran pelet tidak terlalu tinggi sehingga tidak mempengaruhi temperatur furnace.

Karakteristik pembakaran dari berbagai tipe biomasa bervariasi tergantung pada komposisi kimia, sifat fisis, dan karakteristik abu dari bahan bakar tersebut. Perhatikan Gambar 4. 7. Pembakaran pelet biomasa terbagi dalam empat tahap. Tahap pertama adalah saat permukaan pelet melepaskan uap air dan gas-gas (CO, CO₂, CH₄ dan H₂), beberapa diantaranya gas yang mudah terbakar. Tahap pembakaran ini terjadi hingga temperatur 100 °C. Pada tahap kedua, yaitu pada rentang temperatur 100 °C hingga 400 °C, bahan mudah menguap pada pelet (*volatile matter*) mulai terbakar dan terjadi reaksi yang menghasilkan panas. Pada tahap ini belum terjadi api hingga temperatur naik. Pada tahap ketiga saat temperatur naik dari 400°C hingga 500 °C, gas-gas yang telah terlepas bereaksi kembali, terignitasi sehingga membentuk api. Zat yang tersisa setelah semua gas habis bereaksi adalah karbon atau arang. Carbon atau arang inilah yang kemudian terbakar pada temperatur diatas 500 °C yaitu pada tahap keempat.

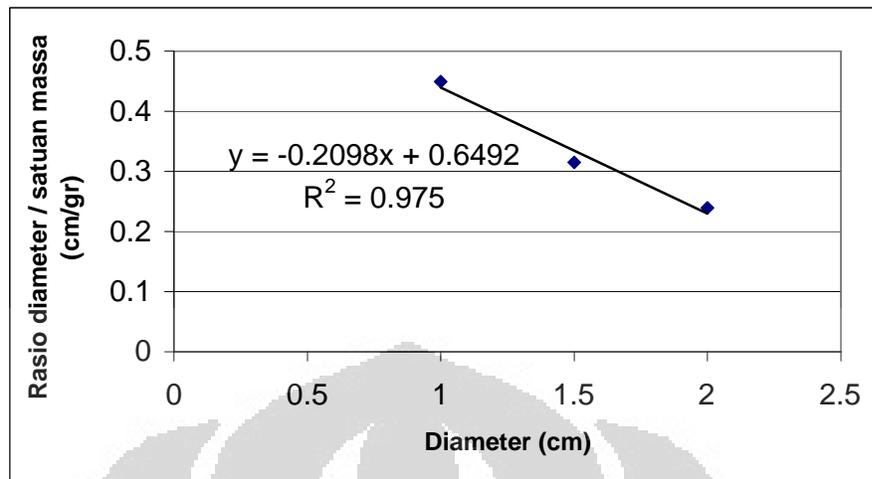
Menurut penelitian terdahulu, temperatur furnace dapat mempengaruhi temperatur pembakaran pelet yang dihasilkan. Jadi untuk dapat membandingkan temperatur pembakaran yang dihasilkan, pastikan bahwa temperatur furnace tepat sama pada masing-masing pengujian.

Pada pembahasan berikutnya akan kita lihat pengaruh diameter pelet dan kandungan air pada pelet terhadap temperatur pembakaran, sehingga pada kurva selanjutnya hanya akan disajikan kurva temperatur pelet terhadap waktu.

A. Pengaruh Diameter Pelet terhadap Temperatur Pembakaran

Diameter pelet yang bervariasi berkaitan erat dengan volume dan massa pelet yang diuji. Semakin besar diameter pelet dengan panjang tetap menghasilkan semakin besar volume dan dimana pada kondisi pengujian yang sama rasio udara terhadap bahan bakar semakin kecil.

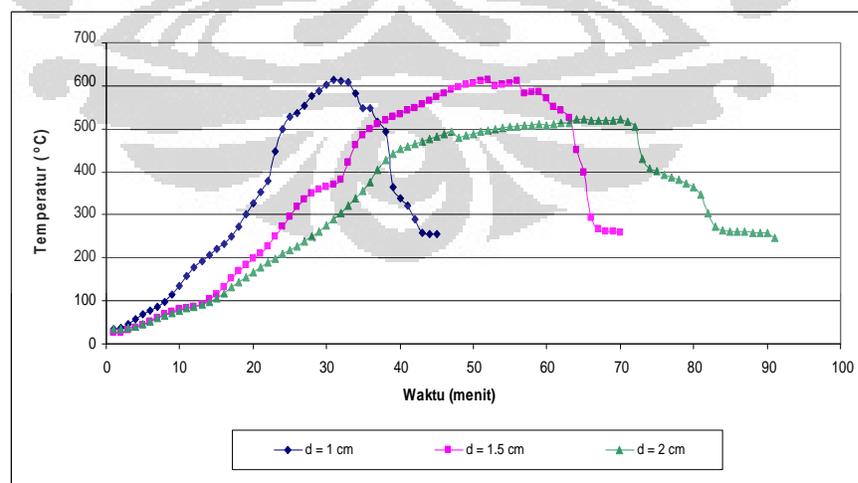
Gambar 4. 8 menyatakan bahwa semakin besar diameter pelet menghasilkan pelet dengan massa yang lebih besar sehingga membuat rasio diameter per satuan massa pelet lebih kecil. Artinya, semakin kecil volume pelet dengan kata lain semakin besar massa pelet yang diujikan maka reaksi pembakaran akan terjadi pada kondisi kaya akan oksigen.



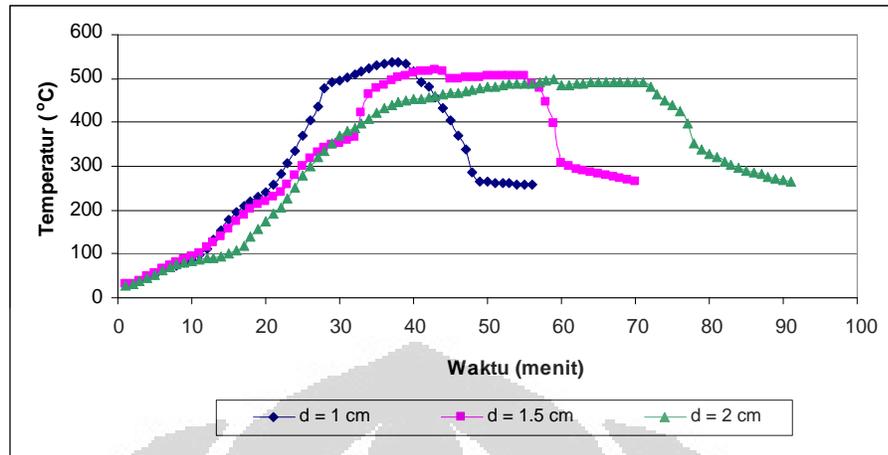
Gambar 4. 8 Hubungan antara diameter dengan rasio diameter per satuan massa

Secara teoritis, pembakaran sempurna terjadi pada saat stoikiometri dan menghasilkan temperatur puncak pembakaran yang paling tinggi. Namun pada percobaan ini temperatur puncak pembakaran yang paling tinggi cenderung terjadi pada pelet dengan diameter 1 cm. Proses pembakaran pelet diameter 1 cm terjadi pada kondisi yang paling kaya oksigen sehingga dengan tingkat kandungan oksigen yang sama dalam furnace membuat pelet terbakar dengan sempurna.

Gambar 4. 9– Gambar 4. 11 menyatakan hubungan antara diameter pelet dengan temperatur puncak pembakaran yang dihasilkan pada masing-masing jenis pelet biomasa.

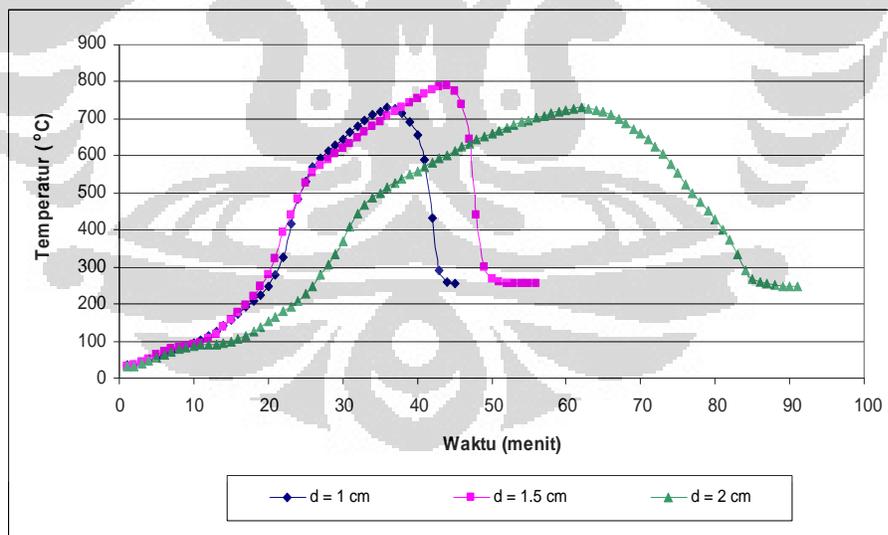


Gambar 4. 9 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi diameter pelet kayu karet



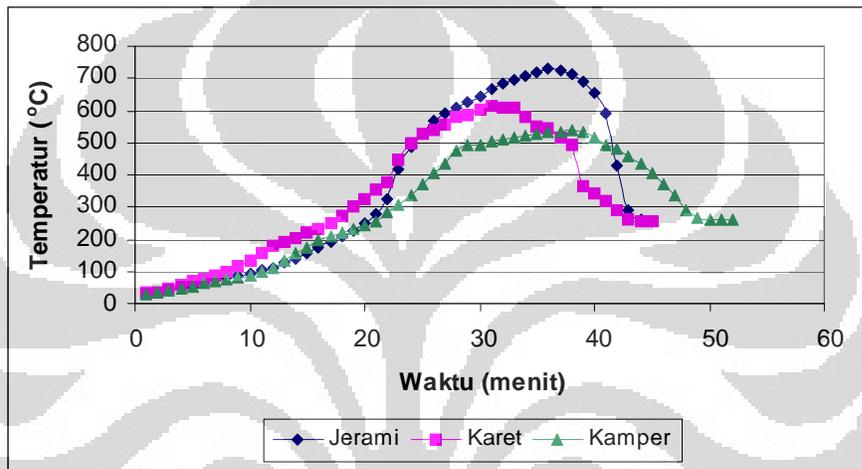
Gambar 4. 10 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi diameter pelet kayu kamper

Perhatikan Gambar 4. 11. Pelet jerami dengan diameter 1.5 cm ternyata menghasilkan temperatur puncak pembakaran yang lebih tinggi daripada pelet jerami dengan diameter 1 cm. Ada beberapa faktor kemungkinan penyebab, yaitu letak termokopel dalam pelet yang berbeda dengan pengujian sebelumnya dan temperatur furnace yang lebih tinggi.

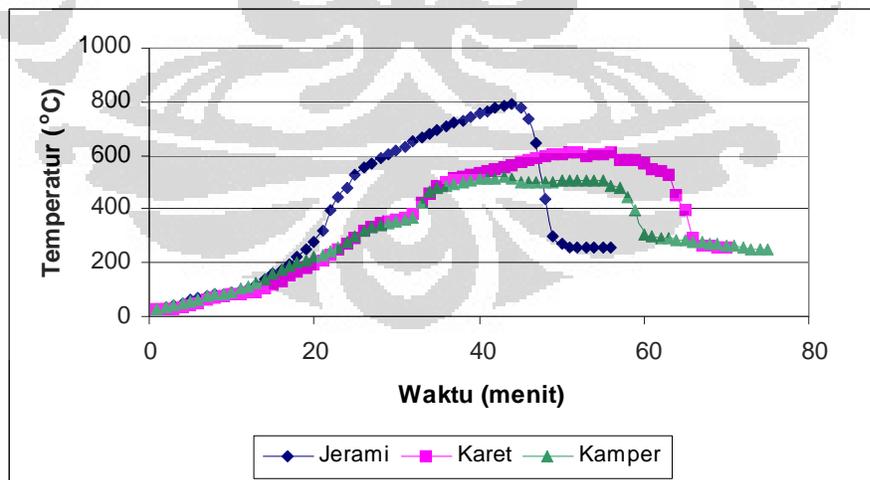


Gambar 4. 11 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi diameter pelet jerami

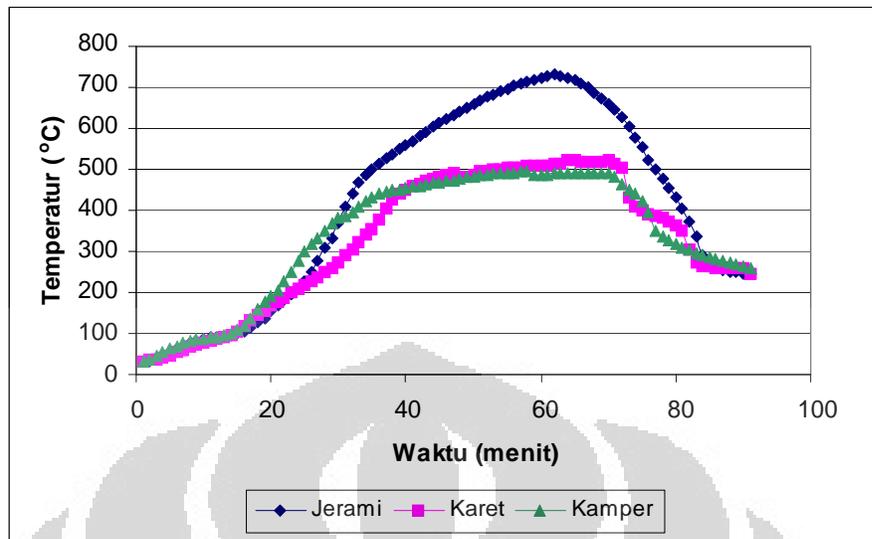
Gambar 4. 12 – Gambar 4. 14 menyatakan hubungan antara jenis pelet biomasa dengan temperatur puncak pembakaran pada masing-masing diameter pelet. Temperatur puncak pembakaran tertinggi diantara ketiga bahan baku adalah jerami, diikuti oleh kayu karet lalu yang paling rendah adalah kayu kamper. Hal ini berkaitan dengan densitas bulk masing-masing pelet. Dari sub bab 4.1.4 diketahui bahwa jerami memiliki densitas bulk yang paling tinggi. Densitas bulk mempengaruhi efisiensi pembakaran yang terjadi. Semakin besar densitas bulk maka semakin tinggi temperatur puncak pembakaran yang dihasilkan.



Gambar 4. 12 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap jenis pelet biomasa diameter 1 cm



Gambar 4. 13 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap jenis pelet biomasa diameter 1.5 cm



Gambar 4. 14 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap jenis pelet biomasa diameter 2 cm

Pada diameter yang berbeda ternyata susunan temperatur puncak pembakaran yang dihasilkan tetap sama. Pelet jerami menghasilkan temperatur yang paling tinggi sedangkan pelet kamper menghasilkan temperatur puncak pembakaran yang paling rendah.

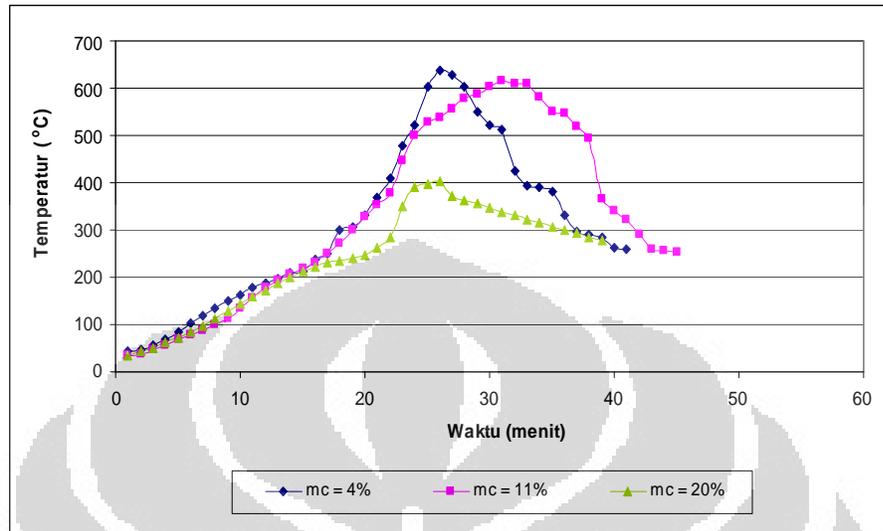
B. Pengaruh Kandungan Air pada Pelet terhadap Temperatur Pembakaran

Gambar 4. 15 – Gambar 4. 17 menyatakan hubungan antara kandungan air pada pelet dengan temperaur puncak pembakaran yang dihasilkan pada masing-masing jenis pelet biomasa. Kandungan air yang berlebih menurunkan temperatur pembakaran.

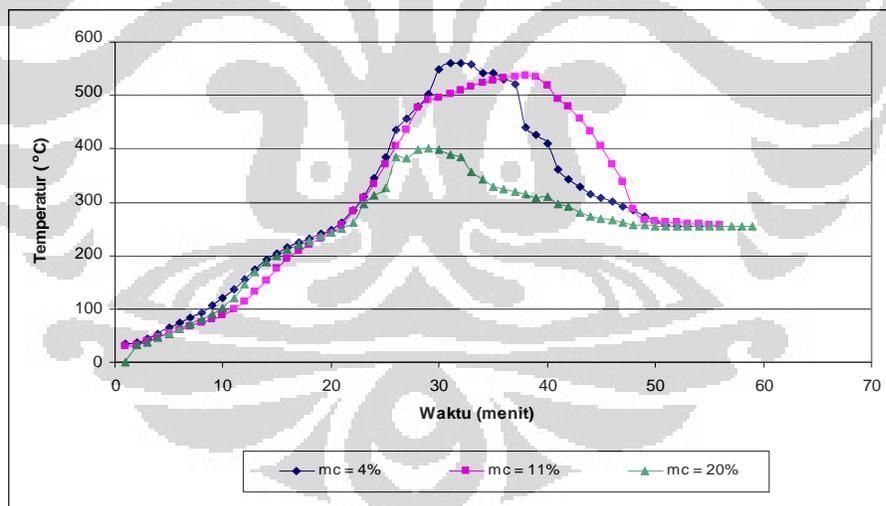
Kandungan air yang tinggi pada pelet menurunkan efisiensi pembakaran mengingat energi yang dihasilkan digunakan untuk mengeringkan pelet daripada membakar pelet tersebut. Kandungan air yang berlebihan juga menambah waktu yang dibutuhkan bagi pelet untuk terbakar.

Pelet dengan kandungan air paling kecil membutuhkan waktu yang paling cepat untuk terbakar karena waktu pengeringan kadar air dalam pelet pun lebih cepat. Selain itu temperatur pembakaran yang dihasilkan adalah paling tinggi karena reaksi pembakaran terjadi dengan lebih sempurna. Sedangkan pelet dengan

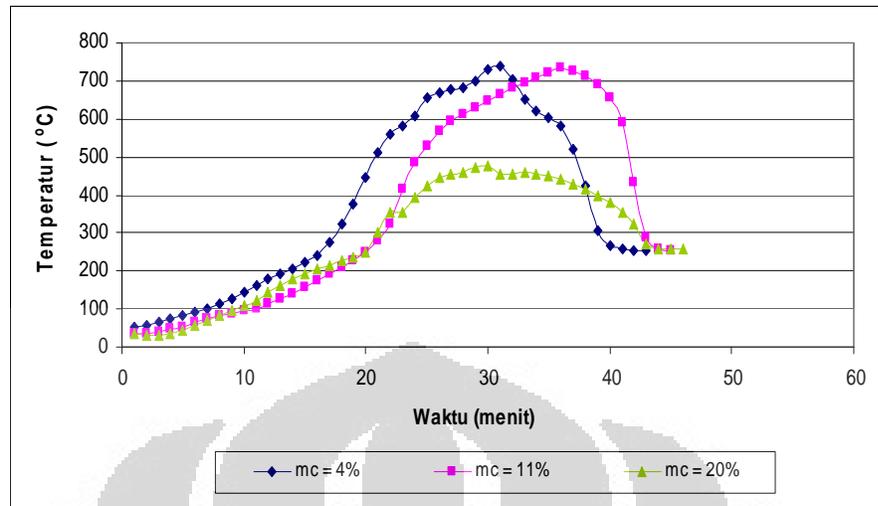
kandungan air paling tinggi membutuhkan waktu yang paling lama untuk terbakar karena harus terlebih dulu melepas kandungan air yang terdapat didalamnya.



Gambar 4. 15 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi kandungan air pada pelet karet

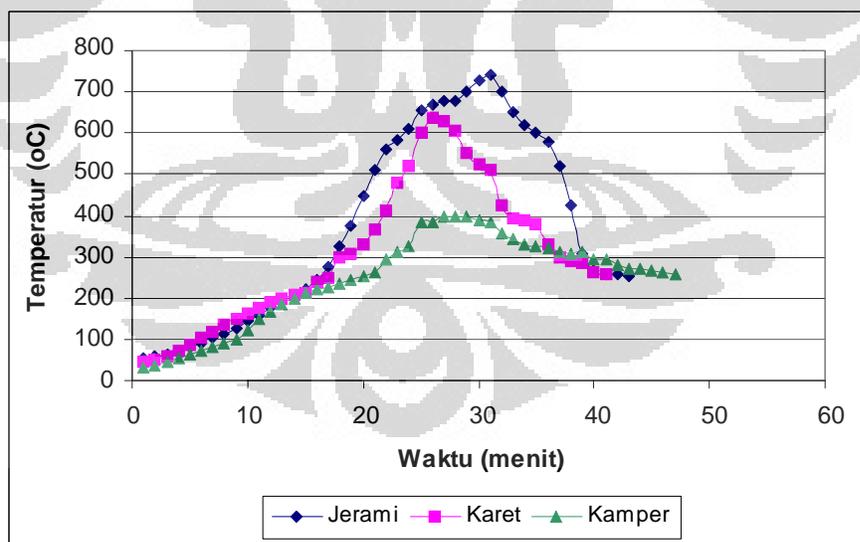


Gambar 4. 16 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi kandungan air pada pelet kamper

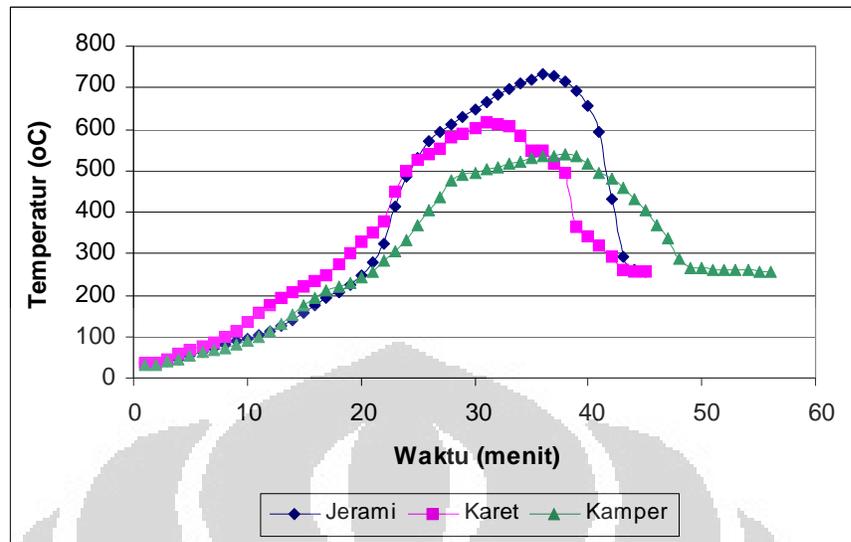


Gambar 4. 17 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi kandungan air pada pelet jerami

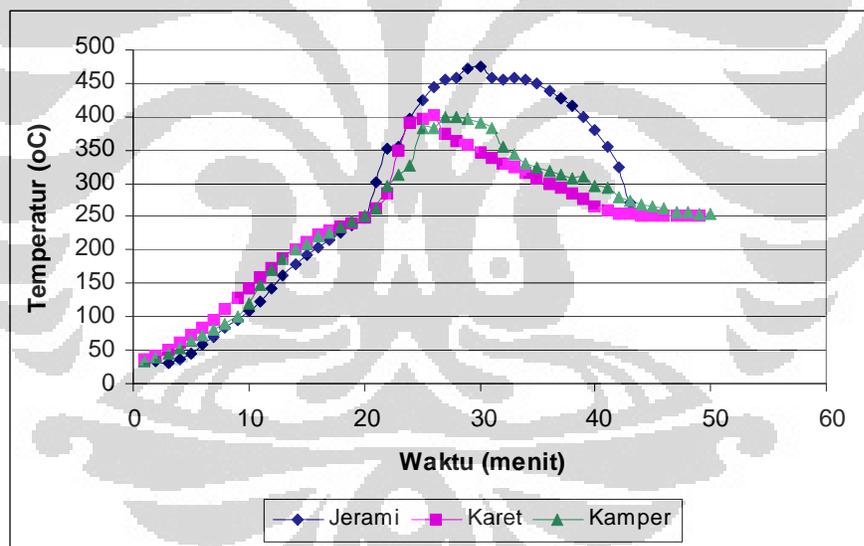
Gambar 4. 18 – Gambar 4. 20 menyatakan hubungan antara jenis pelet biomasa dengan temperatur puncak pembakaran. Temperatur puncak pembakaran tertinggi diantara ketiga bahan baku adalah jerami, diikuti oleh kayu karet lalu yang paling rendah adalah kayu kamper.



Gambar 4. 18 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi pelet biomasa dengan kandungan air 4%



Gambar 4. 19 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi pelet biomasa dengan kandungan air 4%

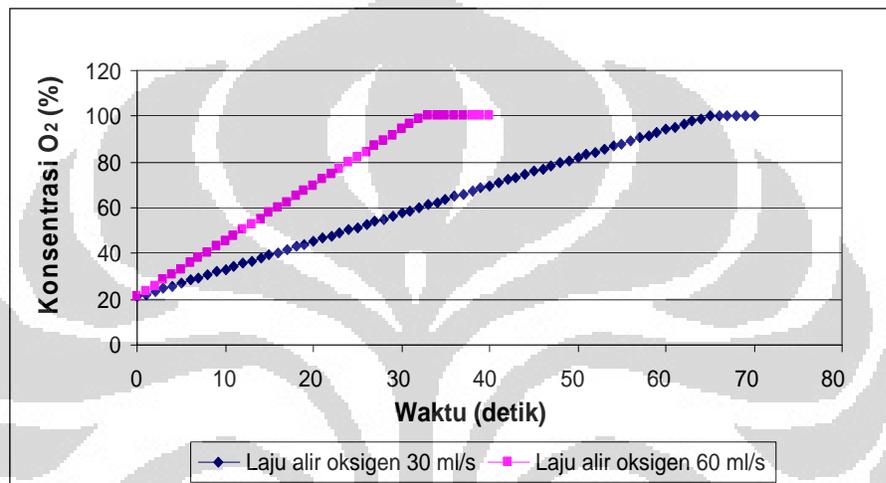


Gambar 4. 20 Perbandingan temperatur pembakaran terhadap variasi pelet biomasa dengan kandungan air 4%

Sama halnya dengan pada diameter yang berbeda, pada kandungan air yang berbeda susunan temperatur puncak pembakaran yang dihasilkan tetap sama. Pelet jerami menghasilkan temperatur yang paling tinggi sedangkan pelet kamper menghasilkan temperatur puncak pembakaran yang paling rendah.

C. Pengaruh Laju Alir Oksigen terhadap Temperatur Pembakaran

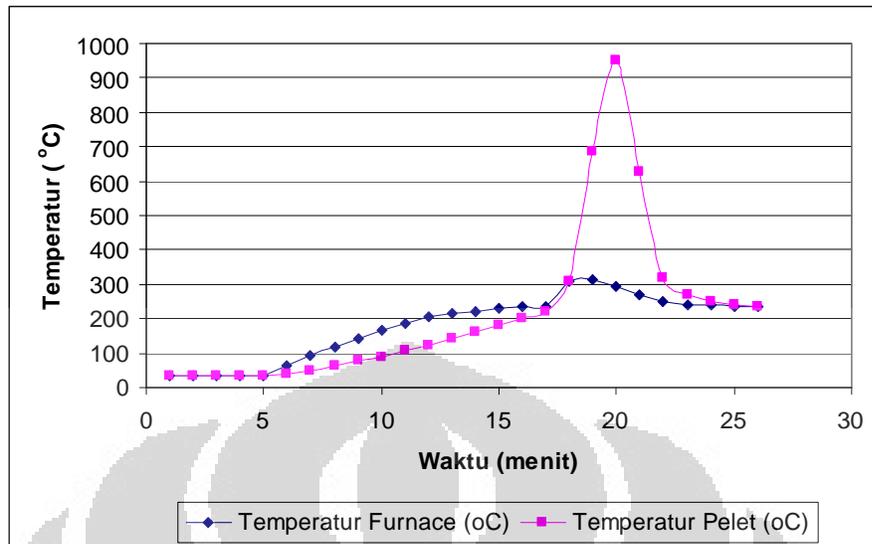
Pengujian ini dilakukan dengan laju alir oksigen 30 ml/s dan 60 ml/s. Gambar 4. 21 menyatakan laju pertambahan konsentrasi oksigen pada furnace dengan masing-masing laju alir oksigen. Pada laju alir oksigen 30 m/s furnace akan penuh oksigen 64 detik setelah regulator gas dibuka. Sedangkan pada laju alir 60 m/s furnace akan penuh oksigen 32 detik setelah regulator gas dibuka.



Gambar 4. 21 Laju pertambahan konsentrasi oksigen dalam furnace

Pada pengujian tanpa ada aliran masuk oksigen ke dalam furnace, temperatur puncak pembakaran adalah 716 °C. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pada temperatur puncak pembakaran yang demikian, temperatur furnace tidak terlalu terpengaruh dan cenderung tetap stabil pada temperatur 250 °C.

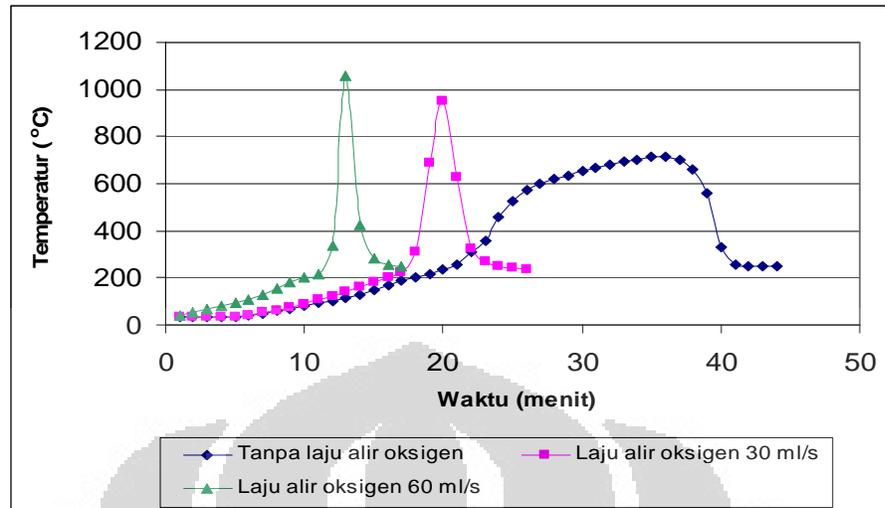
Gambar 4. 22 menunjukkan profil temperatur furnace dan temperatur pelet bila dilakukan pengaliran masuk oksigen ke dalam furnace.



Gambar 4. 22 Perbandingan profil temperatur dengan adanya laju alir oksigen

Perhatikan bahwa proses pembakaran sudah terjadi saat temperatur furnace belum mencapai kondisi stabil yaitu 250 °C. Artinya dengan adanya supply oksigen ke dalam furnace, nyala api pada pelet terjadi pada temperatur yang lebih rendah yaitu sekitar 210 °C karena proses laju pembakaran pelet menjadi lebih tinggi. Tingginya temperatur puncak pembakaran mempengaruhi temperatur furnace menjadi naik sesaat.

Gambar 4. 23 menunjukkan grafik perbandingan profil temperatur pelet pada kondisi tanpa ada aliran masuk oksigen dengan kondisi ada aliran masuk oksigen ke dalam furnace. Semakin besar laju alir oksigen tampak semakin tinggi pula temperatur puncak pembakaran. Hal ini menandakan meningkatnya laju reaksi pembakaran yang terjadi sehingga proses pembakarannya pun terjadi pada rentang waktu yang lebih cepat.



Gambar 4. 23 .Perbandingan profil temperatur pada variasi laju alir oksigen

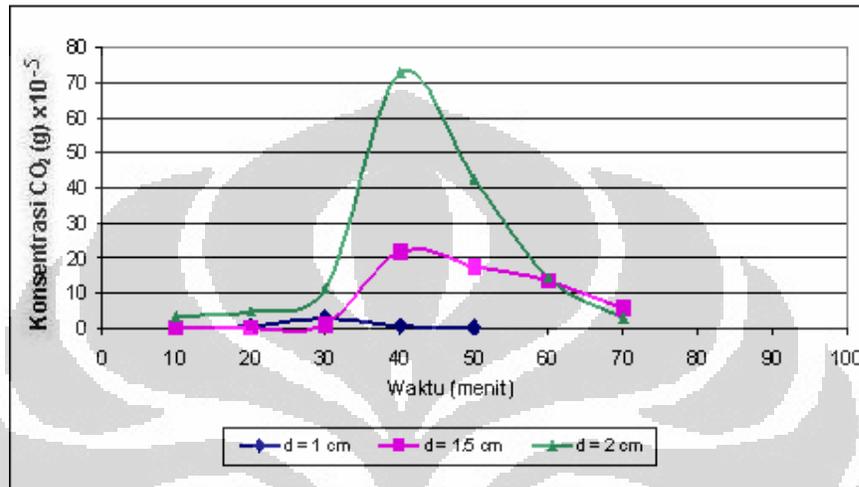
Pada saat proses pembakaran terjadi konsentrasi oksigen di dalam furnace sudah 100%. Akan tetapi, waktu pencapaian kondisi 100% oksigen masing-masing berbeda. Kondisi dengan memasukkan oksigen dengan laju alir yang lebih besar mempercepat waktu pencapaian 100% oksigen dalam furnace sehingga waktu yang tersedia untuk proses difusi oksigen ke dalam pellet lebih banyak. Hal ini membuat proses pembakaran pelet tersebut lebih sempurna sehingga lebih tinggi daripada temperatur pembakaran yang dihasilkan dengan laju alir oksigen 30 ml/s.

4.2.2 Pengujian Emisi Hasil Pembakaran

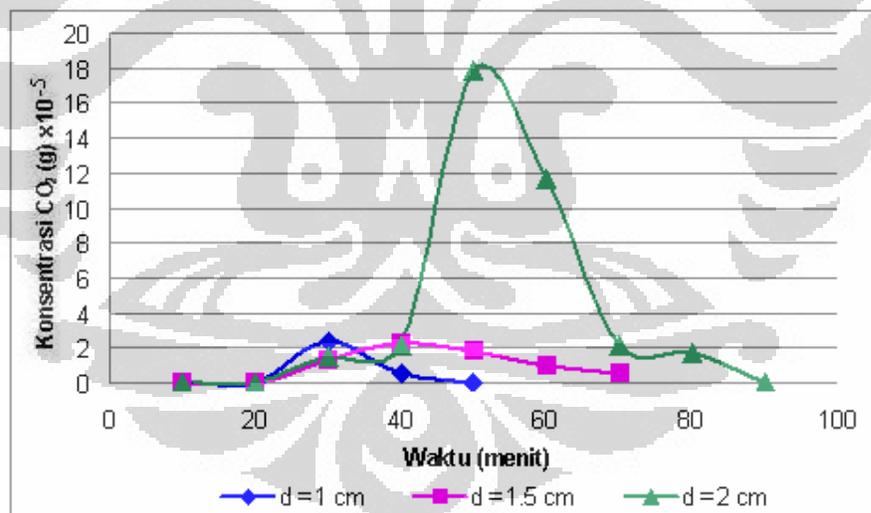
A. Pengaruh Diameter Pelet terhadap Emisi CO₂

Pada percobaan dengan memvariasikan diameter pelet, didapat hasil bahwa semakin besar diameter pelet akan menghasilkan semakin banyak CO₂. Bila dilihat dari segi temperatur pembakaran, reaksi pembakaran pelet pada diameter 2 cm kurang sempurna bila dibandingkan dengan reaksi pembakaran pelet pada diameter 1 cm yang ditandai dengan temperatur puncak pembakaran yang lebih tinggi. Bila merujuk pada teori tersebut artinya kadar CO₂ yang terbentuk harusnya semakin kecil, mengingat bahwa CO₂ merupakan gas hasil pembakaran bila reaksi berjalan sempurna.

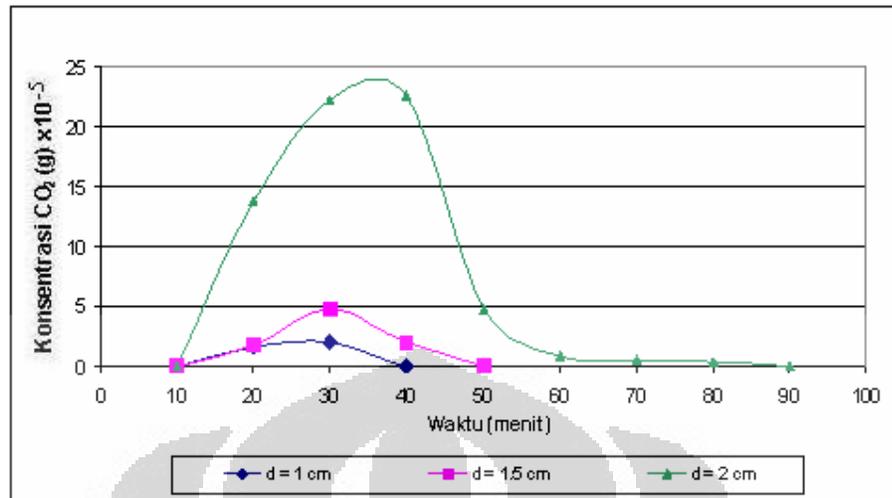
Perhatikan Gambar 4. 24 hingga Gambar 4. 26. Pada gambar tersebut pelet berdiameter besar justru menghasilkan CO₂ yang terbanyak. Hal ini dikarenakan pada pelet berdiameter besar, bahan bakar yang tersedia juga lebih banyak, sehingga proses pembakaran berlangsung lebih lama dan CO₂ yang dihasilkan akan lebih besar.



Gambar 4. 24 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi diameter pelet karet

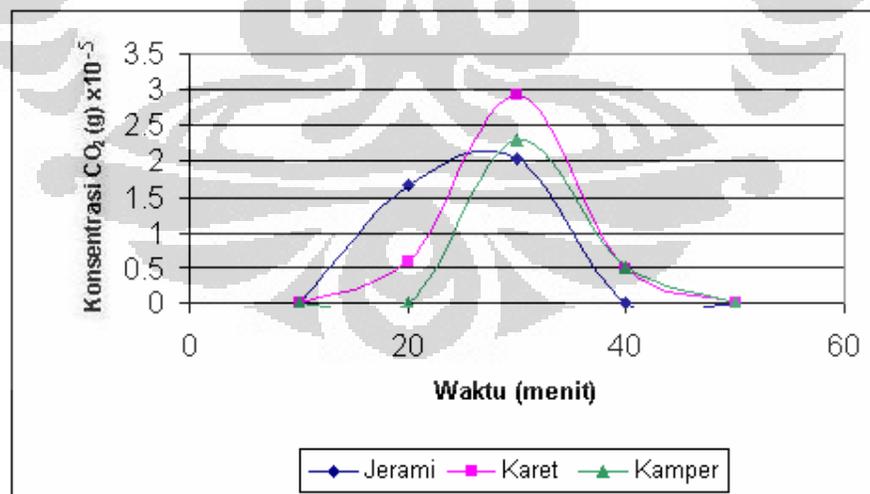


Gambar 4. 25 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi diameter pelet kamper

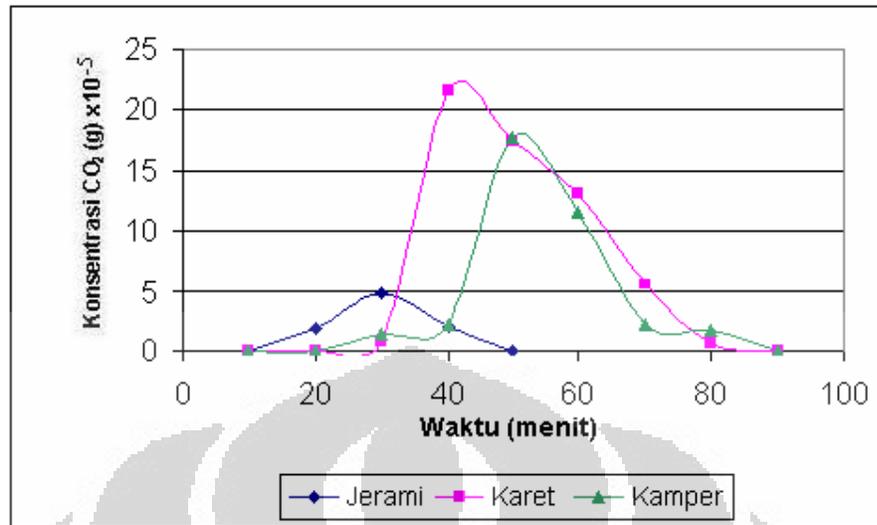


Gambar 4. 26 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi diameter pelet jerami

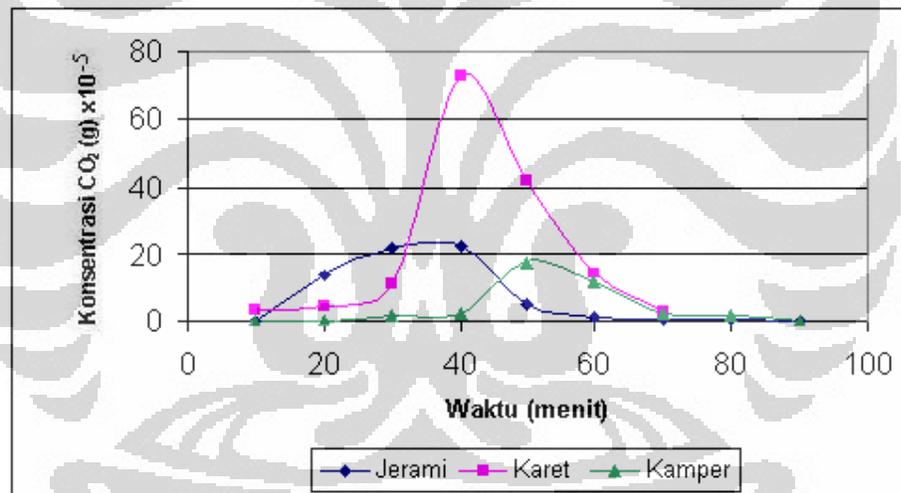
Gambar 4. 27 hingga Gambar 4. 29 menyatakan hubungan antara emisi CO₂ yang dihasilkan dengan jenis pelet biomasa pada berbagai variasi diameter. Susunan emisi CO₂ yang dihasilkan dimulai dari tertinggi hingga terendah berbeda pada masing-masing diameter. Hal ini disebabkan karena emisi CO₂ berkaitan dengan reaksi pembakaran yang terjadi. Biomasa mempunyai zat volatile matter yang tinggi sehingga reaksi pembakaran yang terjadi sulit untuk dipastikan.



Gambar 4. 27 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa diameter 1 cm



Gambar 4. 28 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa diameter 1.5 cm



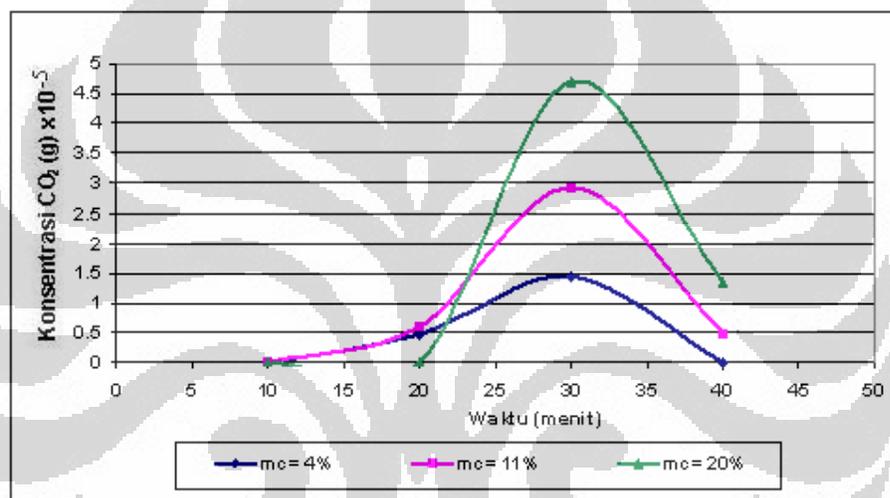
Gambar 4. 29 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa diameter 2 cm

B. Pengaruh Kandungan Air pada Pelet terhadap Emisi CO₂

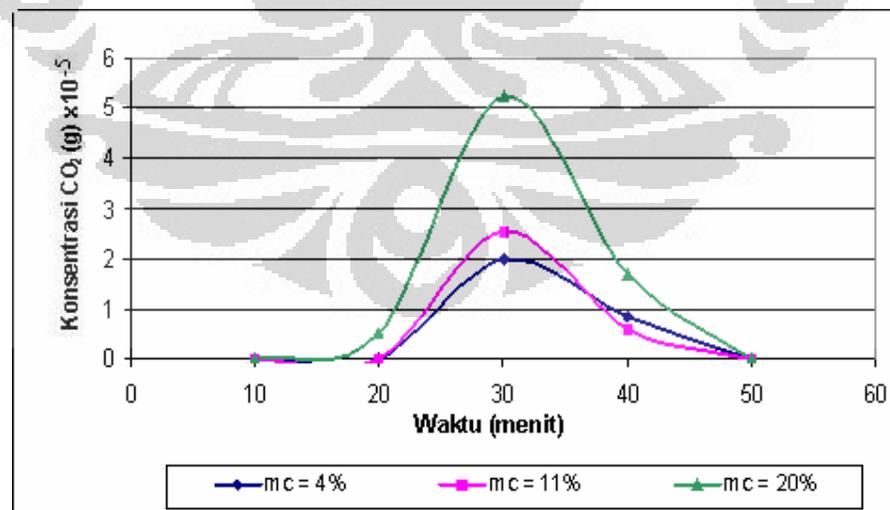
Gambar 4. 30 hingga Gambar 4. 32 menunjukkan bahwa semakin besar kadar air maka emisi CO₂ yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena ketika pelet mempunyai kadar air yang tinggi, lignin tidak akan bekerja dengan optimal sebagai binder oleh karena itu akan dihasilkan pelet dengan tinggi lebih bersifat berpori. Adanya pori yang lebih besar ini mengakibatkan oksigen saat

terjadinya reaksi pembakaran dengan lebih mudah masuk ke dalam pelet sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna.

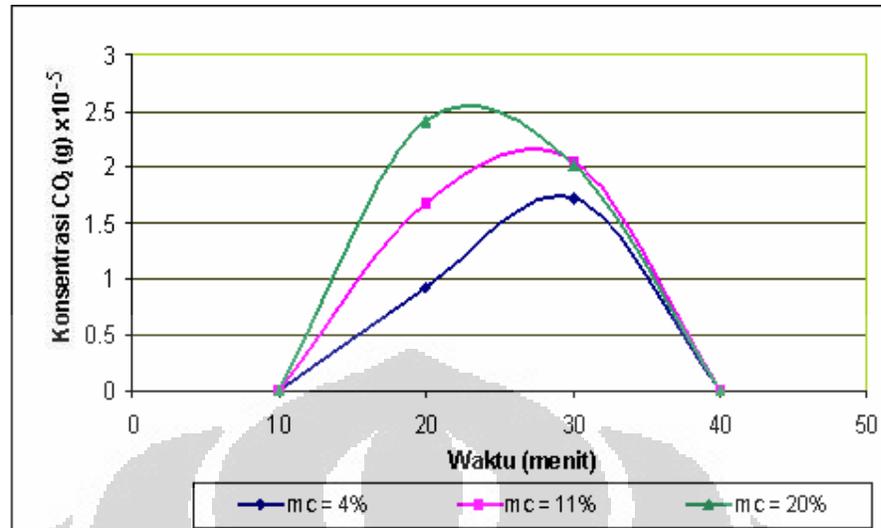
Analisa lain adalah bahwa biomasa mengandung komponen hidrokarbon yang sangat kompleks. Dalam fasa pembakaran zat volatil, kemungkinan terjadi reaksi pembakaran antara hidrokarbon dengan oksigen yang menghasilkan karbondioksida dimana reaksi tersebut berlangsung secara eksotermis dan terjadi dalam reaksi kesetimbangan. Dengan adanya reaksi tersebut dengan temperatur pembakaran yang lebih rendah maka reaksi akan bergeser ke arah produk sehingga dihasilkan gas CO_2 yang semakin besar.



Gambar 4. 30 Perbandingan emisi CO_2 terhadap variasi kandungan air pelet karet

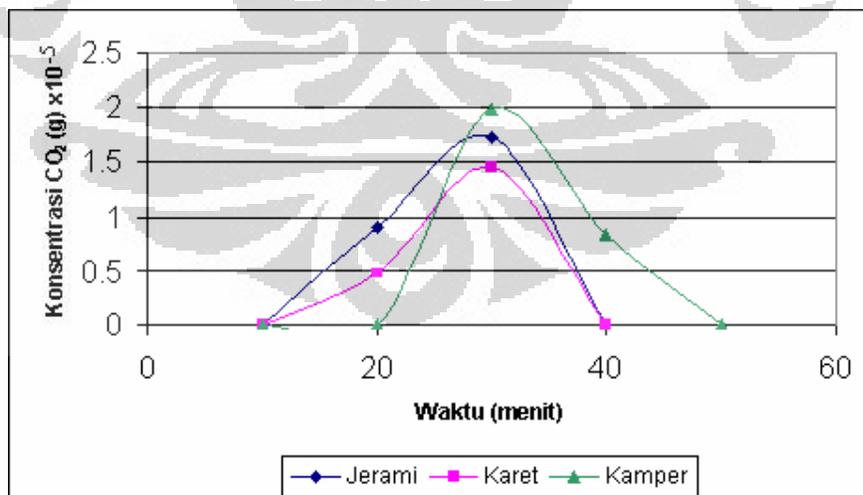


Gambar 4. 31 Perbandingan emisi CO_2 terhadap variasi kandungan air pelet kamper

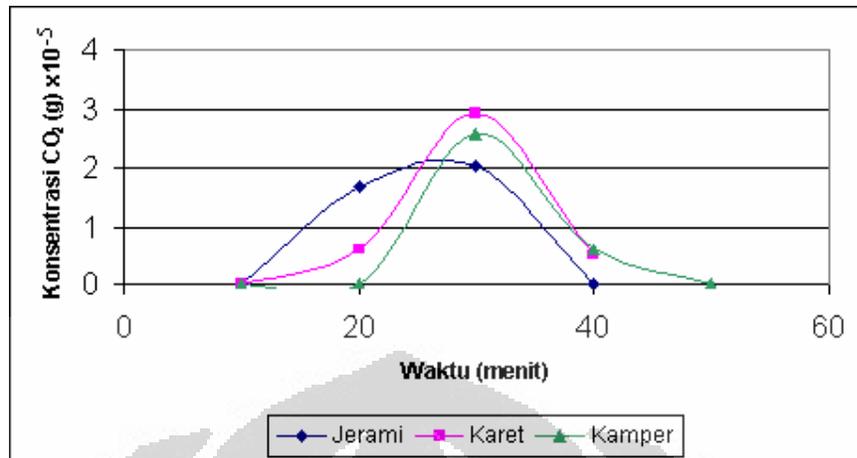


Gambar 4. 32 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi kandungan air pelet jerami

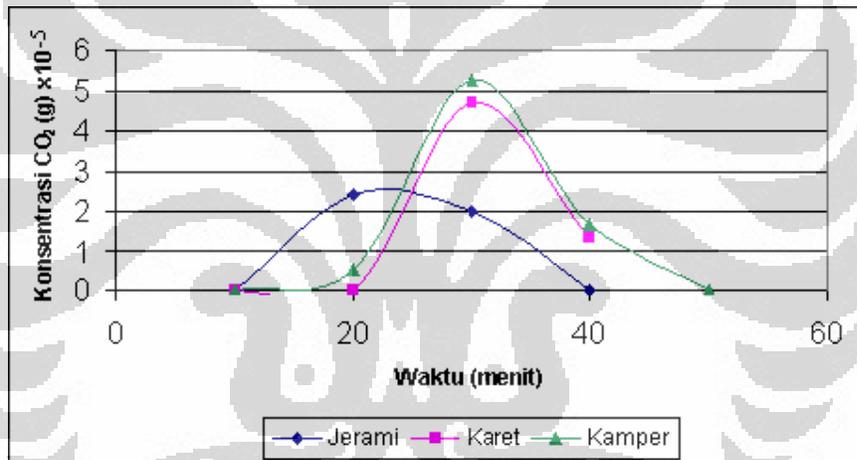
Gambar 4. 33 hingga Gambar 4. 35 menyatakan hubungan antara emisi CO₂ yang dihasilkan dengan jenis pelet biomasa pada berbagai variasi kandungan air. Susunan emisi CO₂ yang dihasilkan dimulai dari tertinggi hingga terendah berbeda pada masing-masing diameter. Hal ini disebabkan karena emisi CO₂ berkaitan dengan reaksi pembakaran yang terjadi. Biomasa mempunyai zat volatile matter yang tinggi sehingga reaksi pembakaran yang terjadi sulit untuk dipastikan



Gambar 4. 33 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa dengan kandungan air 4%



Gambar 4. 34 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa dengan kandungan air 11%

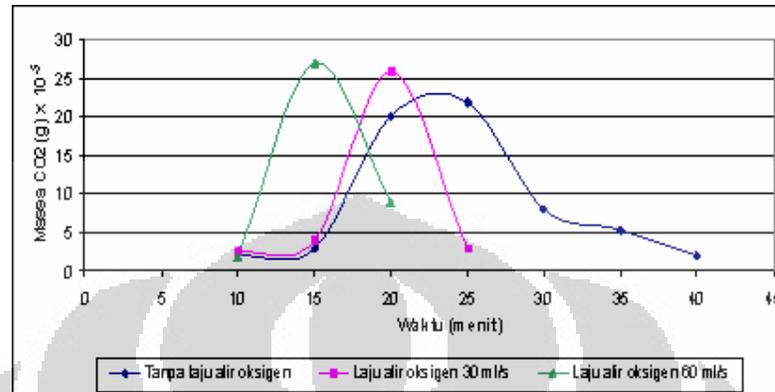


Gambar 4. 35 Perbandingan emisi CO₂ terhadap variasi jenis pelet biomasa dengan kandungan air 20%

C. Pengaruh Laju Alir Oksigen terhadap Emisi CO dan CO₂

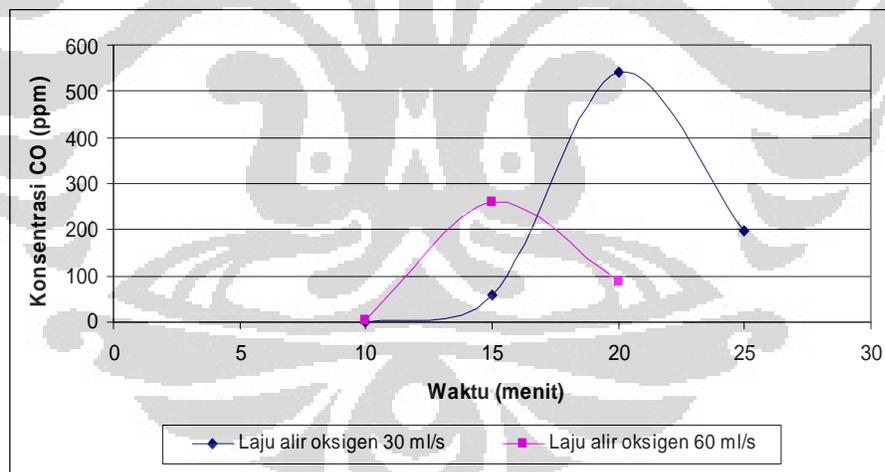
Pengujian ini dilakukan untuk melihat profil kadar CO pada proses pembakaran. Pada percobaan sebelumnya tidak ada supply oksigen sehingga udara yang tersedia hanyalah udara premixed yaitu udara saat awal proses pembakaran. Seiring berjalannya proses pembakaran, oksigen akan habis bereaksi sehingga reaksi tidak akan berjalan sempurna dan menghasilkan gas CO yang sangat tinggi.

Gambar 4. 36 menunjukkan bahwa dengan adanya supply oksigen ke dalam furnace maka massa CO_2 yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dipengaruhi oleh reaksi pembakaran yang semakin sempurna.



Gambar 4. 36 Perbandingan emisi CO_2 terhadap variasi laju alir O_2

Gambar 4. 37 menyatakan bahwa semakin besar laju alir oksigen akan memperkecil CO yang dihasilkan karena reaksi pembakaran berlangsung dengan lebih sempurna.



Gambar 4. 37 Perbandingan emisi CO terhadap variasi laju alir O_2

BAB V

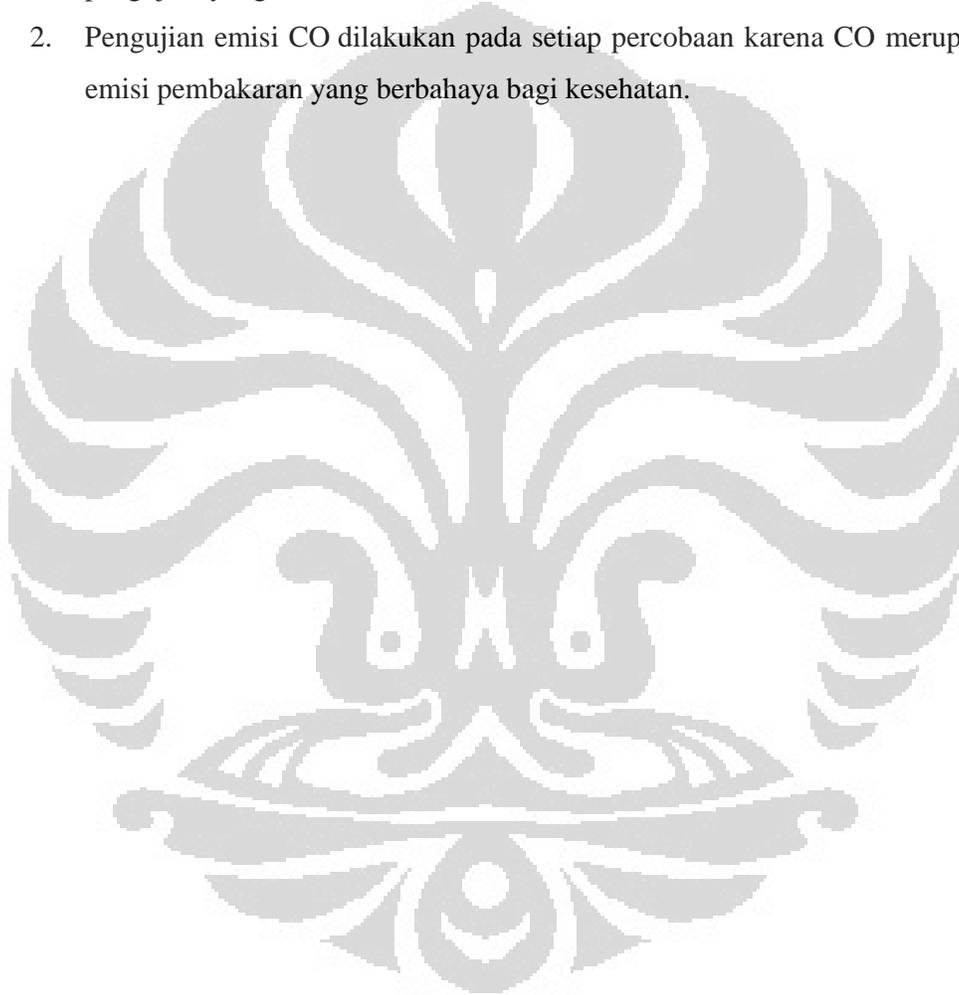
KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Nilai kalor pelet biomasa dipengaruhi oleh komposisi bahan baku pelet yang didapat dengan analisa proksimat dan analisa ultimat. Nilai kalor pelet turun seiring dengan naiknya kadar air. Nilai kalor tertinggi dimiliki oleh pelet kayu kamper dengan kadar air 7.52% yaitu 4556 kal/g.
2. Densitas bulk yang semakin besar dipengaruhi oleh diameter pelet dan kandungan air yang semakin kecil. Densitas bulk terbesar dimiliki oleh Jerami dengan diameter 1 cm dan kandungan air 4% yaitu sebesar 606 kg/m³
3. Temperatur puncak pembakaran yang semakin besar dipengaruhi oleh diameter pelet dan kandungan air yang semakin kecil pada kondisi rasio udara dan bahan bakar yang sama. Temperatur puncak pembakaran tertinggi dimiliki oleh pelet jerami dengan diameter 1.5 cm dan kadar air 11%
4. Temperatur puncak pembakaran semakin besar bila ada masukkan oksigen ke dalam furnace. Temperatur puncak pembakaran mencapai 1020°C saat ada masukkan oksigen sebesar 60 ml/s.
5. Massa CO₂ yang dihasilkan semakin besar seiring dengan diameter pelet yang semakin besar. Massa CO₂ terbesar dihasilkan oleh pelet kayu karet dengan diameter 2 cm yaitu sebesar 72 x 10⁻⁵ gram..
6. Pada diameter pelet 1 cm massa CO₂ terbesar yang dihasilkan dimiliki oleh kayu kamper dengan kandungan air 20 % yaitu sebesar 5 x 10⁻⁵ gram
7. Pasokan oksigen ke dalam furnace membuat reaksi pembakaran terjadi dengan lebih sempurna sehingga mereduksi terbentuknya CO hingga maksimal 542 ppm.

Untuk penelitian selanjutnya ada beberapa saran yang diajukan oleh peneliti, yaitu:

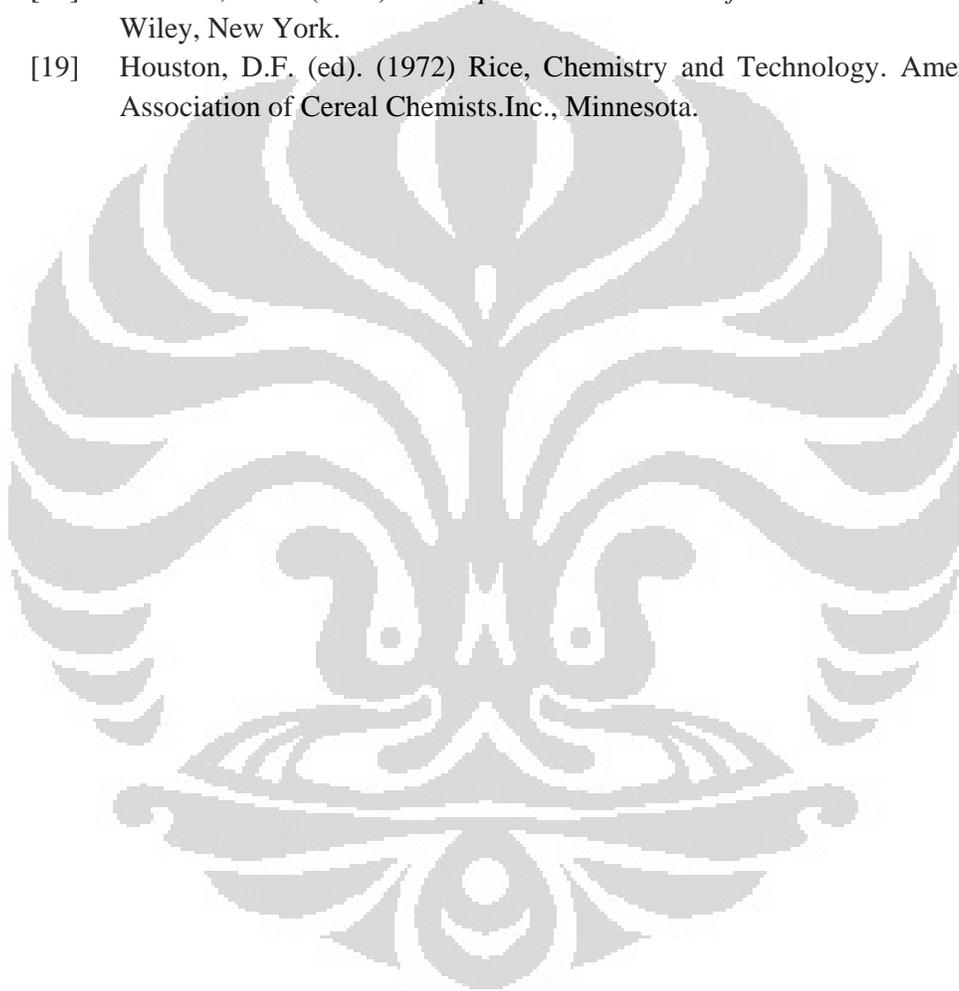
1. Pengujian performa pembakaran dilakukan dengan menggunakan furnace laboratorium yang sudah mempunyai pengatur suhu otomatis. Temperatur furnace sangat berpengaruh pada temperatur puncak pembakaran pelet sehingga diperlukan kondisi temperatur furnace yang tepat sama pada setiap pengujian yang dilakukan.
2. Pengujian emisi CO dilakukan pada setiap percobaan karena CO merupakan emisi pembakaran yang berbahaya bagi kesehatan.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Abdullah, Kamaruddin. *Biomass Energy Potentials And Utilization In Indonesia*. Laboratory of Energy and Agricultural Electrification, Department of Agricultural Engineering, IPB.
- [2] Sukar, Agustina Lubis dkk. (1996). *Pengaruh Kualitas Lingkungan dalam Ruang (Indoor) terhadap Penyakit ISPA-Pneumonia di Indramayu Jawa Barat*. Badan Litbang Kesehatan. Jakarta
- [3] Suyitno, dkk. (2008). *Pengolahan Sekam Padi Menjadi Bahan Bakar Alternatif Melalui Proses Pirolisis Lambat*. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS. Surakarta.
- [4] Jaringan Kerja Tungku Indonesia. *Isu di Seputar Tungku dan Dapur*. <http://www.tungku.or.id/ina/jkti/isu/>.
- [5] European Biomass Industry Association . (2007). <http://www.eubia.org/115.0.html>.
- [6] Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia. *Bahan Bakar dan Pembakaran*. 7-8.
- [7] web.ipb.ac.id
- [8] Channiwala S. A., 1992, A Correlation for Calculating Elemental Composition From Proximate Analysis of Biomass Materials
- [9] Phyllis, The Composition of Biomass and Waste. <http://www.ecn.nl/phyllis/defs.asp>.
- [10] P.D. Grover & S.K. Mishra. (2006). *Biomass Briquetting: Technology and Practices*. Food and Agricultural Organization of The United Nation. Bangkok. 7, 10-14
- [11] M.D. Shaw, et al. (2009). *Physicochemical Characteristic of Densified Untreated and Steam Exploded Poplar Wood and Wheat Straw Grinds*. Department of Agricultural & Bioresource Engineering, University of Saskatchewan. Canada.
- [12] Yiqun Wang and Lifeng Yan. (2008). *CFD Studies on Biomass Thermochemical Conversion*. Department of Chemical Physics and Hefei National Laboratory for Physical Science at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, P. R. China
- [13] Dan Bergstorm, et al. (2008). *Effects of Raw Material Particle Size Distribution on the Characteristics of Scots Pine Sawdust Fuel Pelets*. Department of Forest Resource Management. Sweden.
- [14] Suyitno dan Tri Istanto. Simulasi CFD Pembakaran Non-Premixed Serbuk Biomass Kayu Jati. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNS. Surakarta.

- [15] Hong Lu, et al. *Effects of Particle Shape and Size on Black Liquor and Biomass Reactivity*. Chemical Engineering Department, Brigham Young University.
- [16] Yao B. Yang, et al. (2007). *Combustion of a Single Particle of Biomass*. Department of Chemical and Process Engineering, University of Sheffield. UK.
- [17] Olli Sippula, et al. *Effect of Wood Fuel on The Emissions from a Top-Feed Pelet Stove*. *Energy & Fuels* 2007, 21, 1151-1160
- [18] DeDatta, S. K. (1981). *Principles and Practices of Rice Production*. John Wiley, New York.
- [19] Houston, D.F. (ed). (1972) *Rice, Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists.Inc., Minnesota.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil pengujian nilai kalor dari TEKMIIRA

| Bahan Baku | Moisture Content (%) | HHV (kal/g) |
|-------------------|-----------------------------|--------------------|
| Sekam | 7.78 | 3211 |
| | 13.59 | 2980 |
| | 18.81 | 2857 |
| | 24.19 | 2663 |
| Jerami | 7.97 | 3421 |
| | 13.98 | 3151 |
| | 23.97 | 2734 |
| | 33.75 | 2306 |
| Kayu Karet | 7.5 | 4139 |
| | 13.82 | 4012 |
| | 23.08 | 3582 |
| | 33.95 | 3050 |
| Kayu Kamper | 7.52 | 4556 |
| | 13.99 | 4017 |
| | 23.15 | 3457 |
| | 33.93 | 3227 |

Lampiran 2. Tabel data hasil pengujian densitas bulk

2.1. Pengujian pengaruh diameter pelet terhadap densitas bulk

2.1.1. Kayu kamper

| Diameter (mm) | Massa pelet (kg) | Massa pelet (kg) | Densitas bulk (kg/m ³) |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 10 | 0.1961 | 0.1767 | 469.073533 |
| 15 | 0.1901 | 0.1707 | 453.145739 |
| 20 | 0.1725 | 0.1531 | 406.42421 |

2.1.2. Kayu karet

| Diameter (mm) | Massa wadah+pelet (kg) | Massa pelet (kg) | Densitas bulk (kg/m ³) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 10 | 0.2299 | 0.2105 | 558.800106 |
| 15 | 0.2079 | 0.1885 | 500.398195 |
| 20 | 0.2063 | 0.1869 | 496.150783 |

2.1.3. Jerami

| Diameter (mm) | Massa wadah+pelet (kg) | Massa pelet (kg) | Densitas bulk (kg/m ³) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 10 | 0.2351 | 0.2157 | 572.604194 |
| 15 | 0.2084 | 0.189 | 501.725511 |
| 20 | 0.207 | 0.1876 | 498.009026 |

2.2. Pengujian pengaruh kandungan air pelet terhadap densitas bulk

2.2.1. Kayu kamper

| Kandungan air (%) | Massa wadah+pelet (kg) | Massa pelet (kg) | Densitas bulk (kg/m ³) |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 4 | 0.2031 | 0.1837 | 487.6559596 |
| 11 | 0.1961 | 0.1767 | 469.0735333 |
| 20 | 0.1912 | 0.1718 | 456.0658349 |

2.1.2. Kayu karet

| Kandungan air (%) | Massa wadah+pelet (kg) | Massa pelet (kg) | Densitas bulk (kg/m ³) |
|-------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|
| 4 | 0.2384 | 0.219 | 581.364481 |
| 11 | 0.2299 | 0.2105 | 558.8001062 |
| 20 | 0.1987 | 0.1793 | 475.9755774 |

2.1.3. Jerami

| Kandungan air (%) | Massa wadah+pelet (kg) | Massa pelet (kg) | Densitas bulk (kg/m ³) |
|-------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|
| 4 | 0.248 | 0.2286 | 606.8489514 |
| 11 | 0.2351 | 0.2157 | 572.6041943 |
| 20 | 0.2056 | 0.1862 | 494.2925405 |

Lampiran 3. Perhitungan jumlah emisi CO₂ yang dikeluarkan

Diketahui: $V_{CO_2} = x$
 $R = 83.14 \text{ bar L/ kmol K}$
 $T = 300 \text{ K}$
 $Mr_{CO_2} = 44.01$
 $P = 1.01325 \text{ bar}$

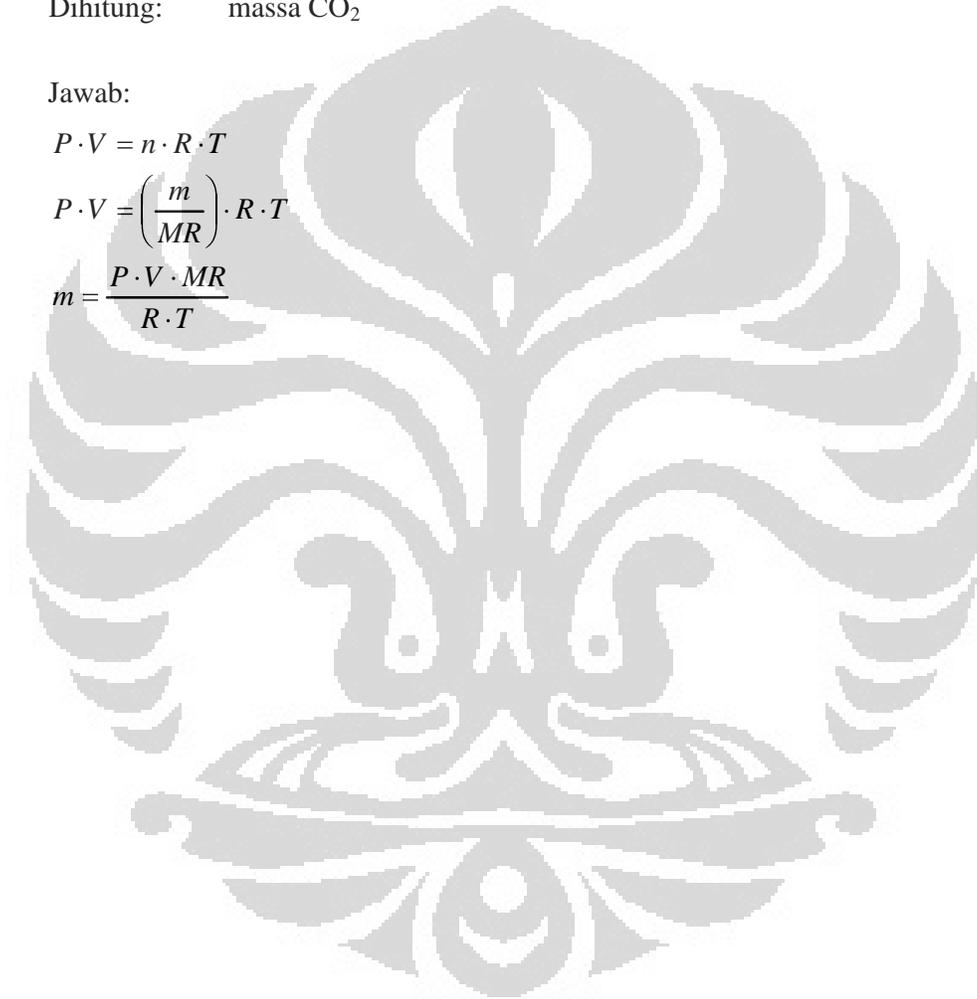
Dihitung: massa CO₂

Jawab:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = \left(\frac{m}{MR} \right) \cdot R \cdot T$$

$$m = \frac{P \cdot V \cdot MR}{R \cdot T}$$



Lampiran 4. Tabel hasil perhitungan jumlah emisi CO₂ yang dikeluarkan

4.1 Pengujian pengaruh diameter pelet terhadap emisi CO₂

4.1.1 Jerami

| Waktu (menit) | massa x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---------------------------------|------------|----------|
| | d = 1 cm | d = 1.5 cm | d = 2 cm |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 1.667191727 | 1.7914489 | 13.7818 |
| 30 | 2.045326902 | 4.7843486 | 22.1839 |
| 40 | 0 | 2.0006301 | 22.6345 |
| 50 | | 0 | 4.74412 |
| 60 | | | 0.9145 |
| 70 | | | 0.44518 |
| 80 | | | 0.4121 |
| 90 | | | 0 |

4.1.2 Kayu karet

| Waktu (menit) | massa x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---------------------------------|------------|-------------|
| | d = 1 cm | d = 1.5 cm | d = 2 cm |
| 10 | 0 | 0 | 3.212808079 |
| 20 | 0.603407193 | 0 | 4.381183193 |
| 30 | 2.926748372 | 0.7312401 | 10.80948116 |
| 40 | 0.506862042 | 21.568902 | 72.83974065 |
| 50 | 0 | 17.4264 | 42.14106445 |
| 60 | | 13.110474 | 14.47283328 |
| 70 | | 5.5200584 | 2.745279246 |
| 80 | | 0.6552555 | |
| 90 | | 0 | |

4.1.2 Kayu kamper

| Waktu (menit) | Massa x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---------------------------------|------------|----------|
| | d = 1 cm | d = 1.5 cm | d = 2 cm |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 2.3033 | 1.2684235 | 1.46493 |
| 40 | 0.53072 | 2.194574 | 2.13739 |
| 50 | 0 | 1.812839 | 17.8207 |
| 60 | | 0.9607805 | 11.6413 |
| 70 | | 0.5774347 | 2.17363 |
| 80 | | | 1.67915 |
| 90 | | | 0 |

4.2 Pengujian pengaruh kadar air pelet terhadap emisi CO₂

4.2.1 Jerami

| Waktu (menit) | massa x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---------------------------------|-----------|----------|
| | mc = 4% | mc = 11% | mc = 20% |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0.910921 | 1.6671917 | 2.415417 |
| 30 | 1.724404 | 2.0453269 | 2.013145 |
| 40 | 0 | 0 | 0 |

4.2.2 Kayu karet

| Waktu (menit) | massa x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---------------------------------|-----------|----------|
| | mc = 4% | mc = 11% | mc = 20% |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0.471105 | 0.6034072 | 0 |
| 30 | 1.450859 | 2.9267484 | 4.702106 |
| 40 | 0 | 0.506862 | 1.349844 |

4.2.3 Kayu kamper

| Waktu (menit) | Massa x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---------------------------------|-----------|----------|
| | mc = 4% | mc = 11% | mc = 20% |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0.532786 |
| 30 | 1.983645 | 2.5566586 | 5.235787 |
| 40 | 0.838513 | 0.5891042 | 1.691328 |
| 50 | 0 | 0 | 0 |

4.2 Pengujian pengaruh masuknya oksigen terhadap emisi CO₂

| Waktu (menit) | Massa CO ₂ x 10 ⁻⁵ (gram) | | |
|------------------|---|------------------------------|------------------------------|
| | Tanpa laju alir oksigen | Laju alir oksigen 30 ml/s | Laju alir oksigen 60 ml/s |
| 10 | 1.976493785 | 2.501234559 | 1.834357868 |
| 15 | 2.862384938 | 4.000366208 | 26.95397585 |
| 20 | 20.09033076 | 25.78738861 | 8.912547731 |
| 25 | 21.74947706 | 2.88026367 | |
| 30 | 8.087444265 | | |
| 35 | 5.316240858 | | |
| 40 | 2.064993506 | | |

Lampiran 5. Tabel hasil perhitungan jumlah emisi CO yang dikeluarkan

| Waktu (menit) | Konsentrasi CO (ppm) | |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Laju alir oksigen 30 ml/s | Laju alir oksigen 60 ml/s |
| 10 | 0 | 2 |
| 15 | 59 | 261 |
| 20 | 542 | 87 |
| 25 | 199 | |

