



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KARAKTERISTIK *GAS BURNER* DARI SISTEM
GASIFIKASI BIOMASSA MENGGUNAKAN *FIXED BED*
*DOWNDRAFT GASIFIER***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

RAKA KAUTSAR LAHIA

06 06 07 34 74

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI

DEPOK

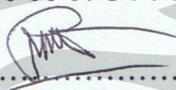
JUNI 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Raka Kautsar Lahia

NPM : 06 06 07 34 74

Tanda Tangan : 

Tanggal : 12 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Raka Kautsar Lahia

NPM : 06 06 07 34 74

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : UJI KARAKTERISTIK GAS BURNER DARI
SISTEM GASIFIKASI BIOMASSA
MENGUNAKAN *FIXED BED DOWNDRAFT
GASIFIER*.

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

Penguji : Prof. Ir. Yulianto Sulistyono, M.Sc., Ph.D

Penguji : Dr. Ir. R. Danardono A S, DEA. PE

Penguji : Prof. Dr. I Made K Dhiputra, Dipl.-Ing

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 Juli 2010

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, 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 Jurusan Teknik Mesin pada 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) Dr. Ir. Adi Surjosatyo., M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Ayah, Ibu, Mas Tomi, Dik Youri keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- 3) Sahabat skripsi saya, Raja dan Angga yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini ;
- 4) Teman-teman Teknik Mesin Universitas Indonesia angkatan 2006; dan
- 5) Sahabat saya Nurdita Kartika yang selalu memberikan semangat tanpa henti

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, 21 Juni 2010

Penulis

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Raka Kautsar Lahia

NPM : 06 06 07 34 74

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

UJI KARAKTERISTIK *GAS BURNER* DARI SISTEM GASIFIKASI BIOMASSA MENGGUNAKAN *FIXED BED DOWNDRAFT GASIFIER*.

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

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 12 Juli 2010

Yang menyatakan



(Raka Kautsar Lahia)

ABSTRAK

Nama : Raka Kautsar Lahia
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Uji Karakteristik *Gas Burner* dari Sistem Gasifikasi Biomassa menggunakan *Fixed Bed Downdraft Gasifier*.

Gasifikasi biomassa merupakan proses untuk mengubah biomassa menjadi gas mampu bakar. Gas hasil gasifikasi biomassa tersebut dinamakan *syngas* yang nantinya akan dicampur dengan udara atau oksidator di dalam gas burner untuk mendapatkan campuran udara bahan bakar yang tepat untuk dapat menghasilkan nyala api yang optimal setelah diignisi. Untuk mendapatkan nyala api yang optimal diperlukan gas burner yang dapat mencampur bahan bakar dan udara dengan baik.

Swirl vane merupakan bagian dari *gas burner* yang berfungsi untuk menyempurnakan campuran antara udara dan bahan bakar. Permasalahannya adalah belum diketahuinya jumlah *swirl vane* yang optimal pada sebuah gas burner. Pada skripsi ini dilakukan percobaan terhadap tiga jenis *gas burner* dengan jumlah *swirl vane* yang berbeda untuk mendapatkan jumlah *swirl vane* yang paling optimal, yakni enam, delapan, dan sepuluh *swirl vane*. Dari percobaan didapatkan hasil yakni *gas burner* dengan delapan *swirl vane* mempunyai temperatur api rata-rata tertinggi (795°C), *Heat release rate* terbesar (11,15 kJ/s). Semakin tinggi temperatur api maka semakin besar *Heat release rate* yang dihasilkan. Efisiensi pembakaran terbaik juga dimiliki *gas burner* dengan 8 *swirl vane* (85,5%), diikuti *gas burner* dengan 10 *swirl vane* (85,1%), dan *gas burner* dengan 6 *swirl vane* (83,1%) pada posisi terakhir. Hasil yang didapat mengindikasikan bahwa *gas burner* dengan 8 *swirl vane* menciptakan zona resirkulasi internal terbaik sehingga percampuran udara dengan bahan bakar pada *gas burner* dengan 8 *swirl vane* berjalan lebih sempurna dan menstabilkan beberapa fraksi hasil pembakaran agar terbakar secara lebih sempurna

Kata kunci
Gasifikasi biomassa, *Gas Burner*, *Swirl vane*, Zona resirkulasi internal

ABSTRACT

Name : Raka Kautsar Lahia
Study Program: Teknik Mesin
Title : Study of Gas Burner Characteristic of Biomass Gasification System using Fixed Bed Downdraft Gasifier.

Biomass gasification is a process to convert biomass to be a combustible gas. That combustible gas named syngas later will be mixed with air or oxidator inside the gas burner to get appropriate mixing or air and fuel then could be produce optimum flame after being ignited. Gas burner that could mix the fuel and the air appropriately needed to get the optimum flame.

Swirl vane is a part of gas burner that has a function to make a perfect mixing of air and fuel. The problem is the optimum number of swirl vane on gas burner still unknown. Experiment of three kinds of gas burner with different number of swirl vane; six, eight, and ten swirl vanes done in this thesis with an objective to find out the most optimum number of swirl vane on gas burner. The results of experiment on variation of swirl vane number on gas burner is gas burner with 8 swirl vanes has the highest average flame temperature (795°C), also the highest heat release rate (11,15 kJ/s). Higher the flame temperature result in higher heat release rate. Combustion efficiency on gas burner with 8 swirl vanes is the best with 85,5%, then gas burner with 10 swirl vanes with 85,1%, and the last gas burner with 6 swirl vanes with 83,1%. Those result indicate that gas burner with 8 swirl vanes could make the best internal recirculation zone (IRZ) so that the mixing of air and fuel in the gas burner with 8 swirl vanes becomes more perfect than the other gas burner result in the most perfect combustion process.

Keyword

Biomass Gasification, Gas Burner, Swirl vanes, Internal recirculation zone

DAFTAR ISI

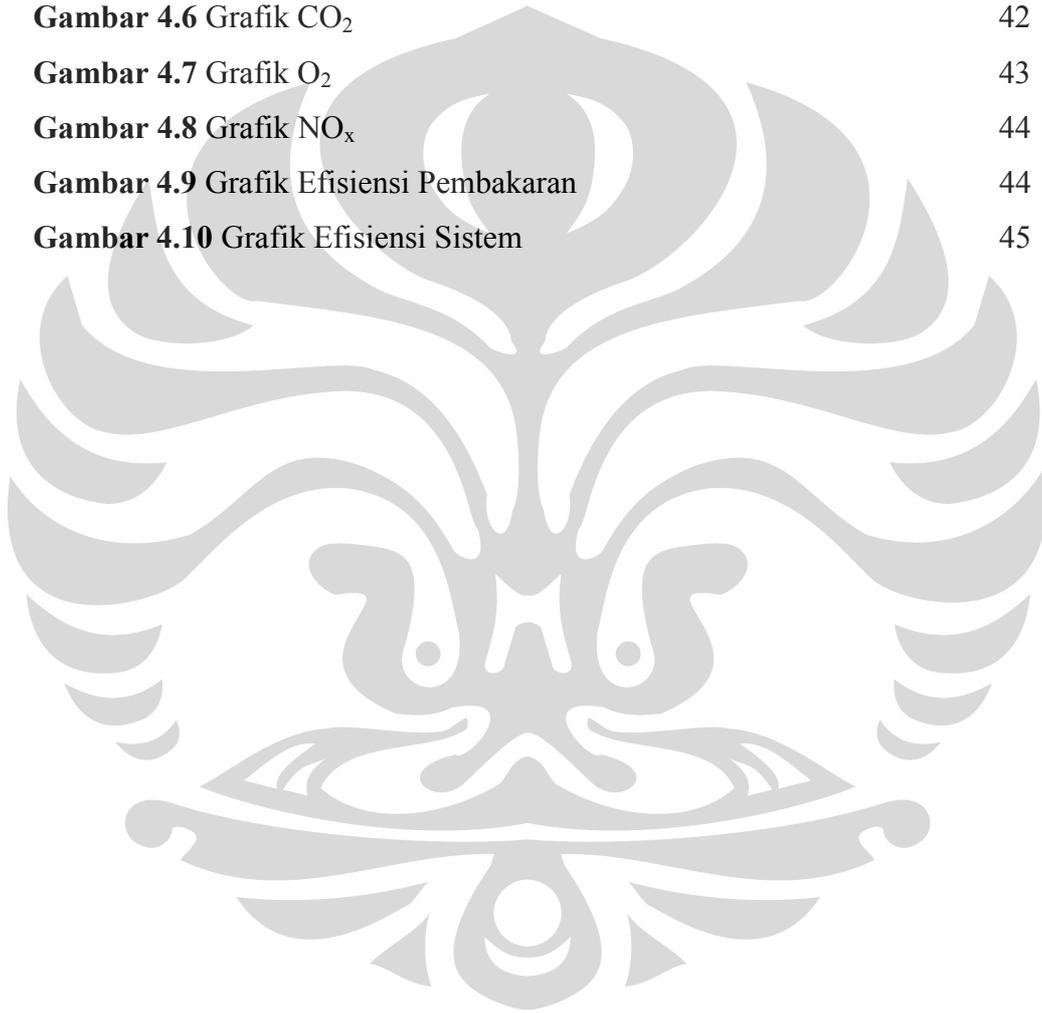
| | |
|---|-----------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| PENGESAHAN..... | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS..... | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| DAFTAR SIMBOL..... | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiv |
| | |
| BAB 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Judul Penelitian..... | 1 |
| 1.2 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.3 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 2 |
| 1.5 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.6 Metodologi Penelitian..... | 3 |
| 1.7 Sistematika Penulisan..... | 3 |
| | |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Bahan Bakar Biomassa (Tempurung Kelapa)..... | 5 |
| 2.2 Gasifikasi | 7 |
| 2.3 <i>Gas Burner</i> | 9 |
| 2.4 <i>Swirl Blade</i> | 10 |
| 2.5 Teori Reaksi Pembakaran | 12 |
| 2.6 Efisiensi Gasifikasi | 13 |
| 2.7 Udara Sekunder Gasifikasi..... | 13 |
| 2.8 Laju Pelepasan Kalor (<i>Heat Release Rate</i>)..... | 13 |
| 2.9 Gas Buang (<i>Flue Gas</i>)..... | 14 |
| 2.10 Neraca Kalor (<i>Heat Balance</i>)..... | 16 |
| 2.11 Efisiensi Sistem..... | 15 |
| 2.11 Efisiensi Pembakaran..... | 15 |
| | |
| BAB 3 PENGUJIAN DAN PENGUKURAN..... | 16 |
| 3.1 Sistem Gasifikasi Biomasa..... | 16 |
| 3.1.1 <i>Gasifier</i> | 16 |
| 3.1.2 <i>Cyclone</i> | 17 |
| 3.1.3 <i>Venturi Scrubber</i> | 18 |
| 3.1.4 <i>Gas Holding Tank</i> | 19 |
| 3.1.5 <i>Burner</i> | 19 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3.1.6 | <i>Combustion Unit</i> | 20 |
| 3.2 | Skematika Alat Pengujian..... | 21 |
| 3.3 | Metodologi Pengujian..... | 22 |
| 3.3.1 | Persiapan Pengujian..... | 22 |
| 3.3.2 | Prosedur Pengujian..... | 23 |
| 3.4 | Metodologi Pengukuran..... | 25 |
| BAB 4 | PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA HASIL | 31 |
| 4.1 | Karakteristik Bahan Bakar..... | 32 |
| 4.2 | Efisiensi Gasifikasi..... | 33 |
| 4.3 | Perhitungan Kalor Pembakaran | 33 |
| 4.4 | Perhitungan Kalor Yang Dihasilkan Udara..... | 33 |
| 4.5 | Perhitungan Laju Pelepasan Kalor | 34 |
| 4.6 | Perhitungan Kalor Gas Buang | 35 |
| 4.7 | Neraca Kalor (<i>Heat Balance</i>)..... | 36 |
| 4.8 | Analisa Hasil..... | 38 |
| 4.8.2 | Temperatur Api..... | 38 |
| 4.8.2 | Heat Release Rate..... | 39 |
| 4.8.3 | Analisa Emisi Gas Buang..... | 40 |
| 4.8.3.1 | Hidrokarbon..... | 40 |
| 4.8.3.2 | Karbon Monoksida dan Karbon Dioksida | 41 |
| 4.8.3.3 | Oksigen..... | 43 |
| 4.8.3.3 | Nitrogen Oksida..... | 43 |
| 4.9 | Efisiensi Pembakaran..... | 44 |
| 4.9 | Efisiensi Sistem..... | 45 |
| BAB 5 | KESIMPULAN DAN SARAN | 47 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 47 |
| 5.2 | Saran..... | 48 |
| | DAFTAR PUSTAKA..... | 49 |

DAFTAR GAMBAR

| Gambar | Keterangan | Halaman |
|--------------------|---|----------------|
| Gambar 2.1 | Skematik Siklus Biomassa | 5 |
| Gambar 2.2 | Tempurung Kelapa | 6 |
| Gambar 2.3 | Daerah-daerah pada downdraft gasifier | 7 |
| Gambar 2.4 | Zona Resirkulasi pada Pusaran | 10 |
| Gambar 2.5 | Zona Resirkulasi pada Non-Premixed Swirl Burner | 11 |
| Gambar 2.6 | Api pada Nozzle Mix Burner | 12 |
| Gambar 2.7 | Heat balance pada combustion unit | 14 |
| Gambar 3.1 | <i>Downdraft Gasifier</i> | 16 |
| Gambar 3.2 | Selang dan Blower untuk primary air | 17 |
| Gambar 3.3 | <i>Cyclone separator</i> | 18 |
| Gambar 3.4 | <i>Venturi Scrubber</i> | 18 |
| Gambar 3.5 | <i>Gas Holding Tank</i> | 19 |
| Gambar 3.6 | <i>Burner</i> | 19 |
| Gambar 3.7 | 1) <i>Gas burner</i> dengan 6 <i>blade</i> ; 2) <i>Gas burner</i> dengan 8 <i>blade</i> ; 3) <i>Gas burner</i> dengan 10 <i>blade</i> | 20 |
| Gambar 3.8 | <i>Combustion Unit</i> | 20 |
| Gambar 3.9 | Rangkaian Sistem Gasifikasi di Laboratorium | 21 |
| Gambar 3.10 | Skematika Alat Pengujian | 21 |
| Gambar 3.11 | Bahan Bakar (Arang; Tempurung Kelapa; Minyak Tanah) | 22 |
| Gambar 3.12 | Manometer Miring <i>Durablock-Dwyer Instrument</i> model H-6640-M | 26 |
| Gambar 3.13 | Hot Wire Anemometer | 27 |
| Gambar 3.14 | Termokopel type K dengan temperatur maksimum 1000 °C | 28 |
| Gambar 3.15 | Digital Temperatur Data Logger 5 channel | 28 |
| Gambar 3.16 | Titik Pengukuran Untuk Termokopel | 28 |
| Gambar 3.17 | Termometer | 29 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.1 1) <i>Gas burner</i> dengan 10 <i>blade</i> ; 2) <i>Gas burner</i> dengan 8 <i>blade</i> ; 3) <i>Gas burner</i> dengan 6 <i>blade</i> | 31 |
| Gambar 4.1 Grafik Temperatur Api | 38 |
| Gambar 4.2 Grafik Heat Release Rate | 39 |
| Gambar 4.3 Grafik Temperatur Api vs HRR | 40 |
| Gambar 4.4 Grafik HC | 41 |
| Gambar 4.5 Grafik CO | 41 |
| Gambar 4.6 Grafik CO ₂ | 42 |
| Gambar 4.7 Grafik O ₂ | 43 |
| Gambar 4.8 Grafik NO _x | 44 |
| Gambar 4.9 Grafik Efisiensi Pembakaran | 44 |
| Gambar 4.10 Grafik Efisiensi Sistem | 45 |



DAFTAR TABEL

| Tabel | Keterangan | Halaman |
|------------------|--|----------------|
| Tabel 1.1 | Produksi biomassa di Indonesia | 6 |
| Tabel 3.1 | <i>Heating value</i> dari unsur <i>producer gas</i> pada 25 ⁰ C | 30 |
| Tabel 4.1 | <i>Analisa Proximat tempurung kelapa</i> | 32 |
| Tabel 4.2 | Komposisi produser gas | 32 |



DAFTAR SIMBOL

| Simbol | Keterangan | Satuan |
|-------------|---|---------------------|
| \dot{m} | Mass flow | kg/s |
| q | Volumetric flow rate fluida | Lpm (liter/menit) |
| Q | Jumlah Kalor | kJ/s |
| AFR | <i>Air Fuel Ratio</i> | dimensionless |
| CV | <i>Calorific Value</i> | kkal/m ³ |
| LHV | Lower Heating Value | kkal/m ³ |
| T_{in} | Temperatur masuk sistem | °C |
| T_{out} | Temperatur keluar sistem | °C |
| P | Tekanan fluida | Pa |
| V | Kecepatan fluida | m/s |
| c_p | Panas spesifik | kJ/kg.K |
| C_d | Discharge coefficient | dimensionless |
| $P_1 - P_2$ | Perbedaan tekanan aliran pada orifis | Pa |
| ρ | Massa jenis fluida | kg/m ³ |
| d | Diameter throat orifis | m |
| D | Diameter pipa alir | m |
| β | Rasio diameter throat dengan diameter pipa alir | dimensionless |

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

Data Perolehan Pengujian



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Judul Penelitian

UJI KARAKTERISTIK *GAS BURNER* DARI SISTEM GASIFIKASI BIOMASSA MENGGUNAKAN *FIXED BED DOWNDRAFT GASIFIER*.

1.2 Latar Belakang Masalah

Persediaan bahan bakar fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama di seluruh dunia semakin menipis dan diperkirakan akan habis dalam waktu 40 tahun ke depan.^[1] Sumber energi alternatif dibutuhkan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Biomassa merupakan salah satu sumber energi alternatif yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Biomasa memiliki keunggulan, yakni sebagai sumber daya alam yang dapat diperbaharui.

Pemanfaatan biomassa secara efektif salah satunya adalah dengan menggunakan biomassa tersebut sebagai bahan bakar untuk proses gasifikasi. Tempurung kelapa yang selama ini penggunaannya hanya sebatas untuk bahan pembuatan arang aktif merupakan biomassa yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk proses gasifikasi. Produksi tempurung kelapa di Indonesia mencapai 1,1 juta ton/tahun dengan potensi energi yang mampu dihasilkan sebesar 18,7 GJ/tahun.^[2]

Gasifikasi biomassa pada prinsipnya adalah suatu proses perubahan biomassa menjadi gas yang mampu bakar. Proses ini melalui beberapa proses kimia dalam reaktor gasifikasi (*gasifier*). Mula-mula biomassa yang sudah diproses secara fisis diumpankan ke dalam reaktor dan akan mengalami proses pemanasan sampai temperatur reaksi serta mengalami proses pirolisa (menjadi bara api). Kecuali bahan pengotor, biomassa bersama-sama dengan oksigen dikonversikan menjadi hidrogen, karbon monoksida dan methana. Nantinya gas mampu bakar hasil gasifikasi inilah yang digunakan sebagai *fuel* dari sebuah *gas burner*. *Gas burner* yang baik diperlukan dalam proses gasifikasi untuk memperoleh tingkat efisiensi sistem yang optimal. Oleh karena itu kami melakukan penelitian dengan judul “ UJI KARAKTERISTIK *GAS BURNER*

DARI SISTEM GASIFIKASI BIOMASSA MENGGUNAKAN *FIXED BED DOWNDRAFT GASIFIER*“.

1.3 Perumusan Masalah

Berdasarkan pengalaman pengujian yang telah dilakukan di laboratorium , terdapat kesulitan-kesulitan yang diidentifikasi atas bagian sebagai berikut :

1. Kualitas api (*flame*) dari *gas burner* kurang memadai dan bersifat diskontinu akibat pasokan dari reaktor sehingga sering terjadi *blow off*
 2. Hasil emisi pembakaran yang masih kurang ramah terhadap lingkungan
- Oleh karena permasalahan di atas, *gas burner* memiliki pengaruh terhadap karakteristik pembakaran yang terjadi di dalam sebuah *combustion chamber*. Perbedaan jumlah *blade* dari sebuah *blade* pada *gas burner* akan mempengaruhi temperatur keluaran, emisi pembakaran, dan energi keluaran dalam *combustion chamber* tersebut.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka penulis bermaksud memfokuskan penelitian untuk mendapatkan :

1. Mendapatkan profil distribusi dan temperatur api pada *combustion unit*, dengan asumsi bahwa aliran tidak mengalami perubahan seiring waktu dan tidak mengalami kebocoran.
2. Mendapatkan nilai kalor sekunder, *Heat Release Rate*, dan nilai kalor gas buang.
3. Mendapatkan *heat balance*, dengan asumsi bahwa aliran tidak mengalami perubahan seiring waktu dan tidak mengalami kebocoran.
4. Mendapatkan karakteristik dari tiga jenis *gas burner* yang digunakan pada gasifikasi biomassa.

1.5 Batasan Masalah

Pengambilan data meliputi pengukuran temperatur sirkulasi air *combustion unit*, temperatur api di dalam *combustion unit* dengan menggunakan termokopel. Pengukuran komposisi *producer gas* dengan menggunakan gas

analyzer, pengukuran komposisi emisi gas dengan menggunakan *gas analyzer*. Pengukuran flowrate udara primer dan sekunder menggunakan digital anemometer yang dikonversikan dengan rpm inverter, pengukuran flowrate *producer gas* dengan *orifice meter*, serta serta pengambilan sampel foto untuk visualisasi nyala api pada variasi gas burner.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Persiapan percobaan
2. Pengujian dan pengambilan data
3. Pengolahan data dan grafik
4. Analisa dan kesimpulan.

1.7 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis membagi menjadi lima bab, yang masing-masing terdiri dari sub-bab. Hal tersebut dimaksudkan untuk mempermudah dan mengarahkan pembahasan agar didapatkan informasi secara menyeluruh. Kerangka penulisan tersebut diuraikan sebagai berikut :

- BAB 1 PENDAHULUAN, berisi :
- Latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.
- BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA, berisi :
- Pengertian gasifikasi dan serta jenis- jenisnya, reaksi – reaksi kimia yang terjadi dalam proses gasifikasi, heat release rate pada combustion unit, heat balance, dll.
- BAB 3 PENGUJIAN DAN PENGUKURAN, berisi :
- Skematik pengujian, metodologi pengujian, dan metodologi pengambilan data.
- BAB 4 HASIL DAN ANALISA, berisi :
- Pengolahan data hasil perhitungan, grafik – grafik hasil pengukuran, dan analisa hasil perhitungan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN, berisi :
Kesimpulan dan saran.

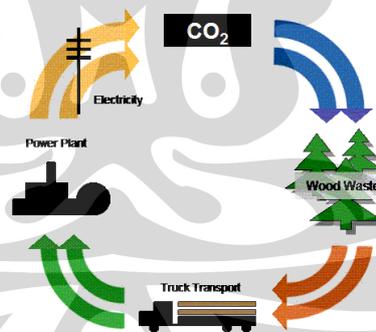


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Bakar Biomassa (Tempurung Kelapa)

Energi biomassa adalah energi yang didapatkan dari sinar matahari yang kemudian ditangkap oleh materi organik seperti tumbuhan ataupun hewan. Sumber dari biomassa terdiri dari :^[13]

1. Residu dari perhutanan (sampah hijau dari limbah penggergajian kayu, dan juga limbah *vegetative* dan kayu).
2. Tumbuhan pertanian yang khusus ditujukan untuk kepentingan energi dan juga limbah agrikultur.
3. Konstruksi kayu dan limbah reruntuhan kayu.
4. Kotoran binatang
5. Limbah etanol
6. Limbah perkotaan dalam bentuk limbah padat (sampah lumpur atau materi organik)
7. Gas dari dalam tanah
8. Limbah industri yang lainnya (sampah kertas dari proses daur ulang)



Gambar 2.1 Skematik Siklus Biomassa ^[15]

Tempurung kelapa merupakan salah satu contoh biomassa. Tempurung kelapa adalah bagian buah kelapa yang memiliki fungsi biologis sebagai pelindung inti buah dan terletak di bagian sebelah dalam sabut kelapa dengan ketebalan 3-6 mm.



Gambar 2.2 Tempurung Kelapa ^[16]

Tempurung kelapa merupakan salah satu biomassa yang mudah didapatkan di Indonesia. Dalam satu tahun, Indonesia dapat menghasilkan 1,1 juta ton tempurung kelapa.

Tabel 1.1 Produksi biomassa di Indonesia ^[2]

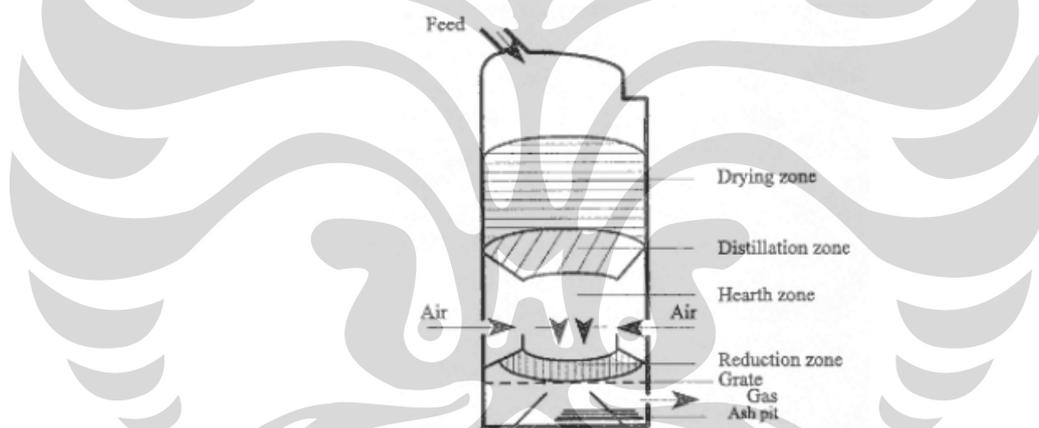
| Sumber/jenis limbah | Produksi | Potensi Kalor (juta GJ/tahun) |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Peremajaan kebun karet | 31,0 juta ton/tahun | 496,0 |
| Sisa logging | 1,15 juta ton/tahun | 11,0 |
| Limbah industri penggergajian kayu | 1,1 juta ton/tahun | 10,6 |
| Tandan kosong kelapa sawit | 3,5 juta ton/tahun | 15,4 |
| Sabut sisa buah sawit | 3,7 juta ton/tahun | 35,3 |
| Cangkang buah sawit | 1,3 juta ton/tahun | 17,2 |
| Bagas tebu | 6,5 juta ton/tahun | 78,0 |
| Sekam padi | 14,3 juta ton/tahun | 179,0 |
| Tempurung kelapa | 1,1 juta ton/tahun | 18,7 |
| Sabut kelapa | 2,0 juta ton/tahun | 24,0 |

Dalam proses dari tempurung kelapa yang masih merupakan bahan baku menjadi tempurung kelapa yang siap menjadi bahan bakar hanya diperlukan dua proses, yakni pelepasan sabut dan pencacahan tempurung kelapa tersebut menjadi bagian-bagian kecil untuk memudahkannya menjadi bahan bakar dalam proses gasifikasi biomassa.

2.2 Gasifikasi

Gasifikasi adalah suatu proses termokimia yang mengkonversikan bahan bakar padat (biomassa, bricket, batubara, dll) menjadi gas mampu bakar.^[3] Pada prosesnya, bahan bakar padat ini diuraikan melalui reaksi thermal yang dioksidasikan dengan jumlah udara terbatas sehingga terjadi pembakaran tak sempurna (partial combustion). Proses ini menghasilkan produser gas, yaitu campuran gas yang mampu bakar (carbon monoksida, hidrogen, metana), dengan gas yang tidak mampu bakar, seperti emisi (CO_2 , NO_x), bahan padat (*char*, *ash*), dan bahan cair (*steam*, *tar*). Jumlah unsur-unsur dalam produser gas tergantung dari jenis bahan bakar padat itu sendiri dan kondisi operasionalnya.

Selama proses gasifikasi, bahan bakar padat mengalami urutan reaksi yang kompleks (*drying*/pengeringan, pirolisis, *combustion*/pembakaran, reduksi).^[4]



Gambar 2.3 Daerah-daerah pada downdraft gasifier^[17]

Dengan menggunakan *gasifier* jenis *fixed bed downdraft gasifier*, yang dirancang untuk membatasi kandungan minyak dan tar yang terbawa bersama gas produser, maka bahan bakar padat yang dimasukkan melalui bagian atas gasifier akan mengalami proses pengeringan (*drying*) dan pirolisis akibat panas yang dihasilkan pada reaksi oksidasi. Pada tahap pirolisis bahan bakar, dihasilkan uap dan tar. Uap dan tar yang dihasilkan tersebut akan melalui unggun arang panas dan mengalami perengkahan menjadi gas yang lebih sederhana atau arang. Perengkahan ini menghasilkan pembakaran stabil yang menjaga temperatur pada 800 – 1000 °C. Jika temperatur naik (melebihi rentang temperatur tersebut) maka

reaksi endotermik akan mendominasi dan mendinginkan gas, dan jika temperatur turun (kurang dari rentang temperatur tersebut) maka reaksi eksotermik akan mendominasi dan menjaga gas agar tetap panas. Tahap selanjutnya adalah reaksi reduksi. Reaksi reduksi terjadi pada zona dekat dengan *grate*. Pada tahap ini, gas produser dihasilkan. Gas produser yang dihasilkan akan tertarik keluar menuju bagian bawah gasifier.

Berikut ini adalah reaksi kimia yang terjadi pada tiap-tiap daerah/zona yang terjadi di dalam *gasifier*.^[5]

1. Zona Pengeringan

Kadar air dari bahan bakar (biomass) dikeringkan dengan rambatan panas dari zona pembakaran, dan dihasilkan uap air yang juga merupakan bagian dari produser gas. Pengeringan ini terjadi sampai temperatur 200°C.

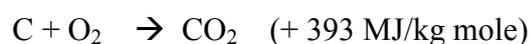
2. Zona Pirolisis

Pada temperatur 200°C - 280°C karbon dioksida, asam asetat, dan air telah dilepaskan dari bahan bakar, lalu pirolisis terjadi pada temperatur 280 – 500°C, menghasilkan Tar dalam jumlah besar dan gas yang mengandung karbon dioksida. Selain tar, gas CH₄ juga terbentuk pada proses ini.

3. Zona Pembakaran (*Combustion Zone/Heart Zone*)

Bahan bakar yang berupa benda padat biasanya tersusun dari elemen karbon, hidrogen, dan oksigen. Pada pembakaran sempurna, karbon dioksida diperoleh dari kandungan karbon pada bahan bakar dan air yang biasanya berupa uap diperoleh dari hidrogen. Reaksi pembakaran merupakan reaksi eksotermis dan memiliki temperatur oksidasi secara teoritis sebesar 1450°C.

Reaksi utamanya adalah :



4. Zona reduksi.

Pada zona reduksi beberapa reaksi terjadi menghasilkan carbon monoksida dan hidrogen sebagai unsur pokok dari produser gas



2.3 Gas Burner

Salah satu komponen terpenting yang mengakhiri proses gasifikasi adalah pada bagian *gas burner*. Pada bagian ini proses yang terjadi adalah pencampuran antara *syngas* dengan oksidator atau injeksi udara tangensial yang kemudian dipicu dengan pematik (*spark*) agar terbentuk api pembakaran. Api dari pembakaran tersebut akan mengisi ruang bakar atau *combustion chamber*, dengan karakteristik tertentu yang dipengaruhi oleh adanya konis.^[6]

Gas burner merupakan bagian dari proses panjang gasifikasi yang berfungsi untuk mencampur bahan bakar (*syngas*) dengan oksidator (injeksi udara tangensial) yang dikombinasikan untuk membentuk nyala api pembakaran. Nyala api hasil pembakaran akan menempati ruang bakar (*combustion chamber*), dimana dibatasi oleh permukaan tahan api dengan limit temperature dan ketebalan tertentu. *Gas burner* biasanya terletak dibagian akhir dari proses gasifikasi.

Gas burner pada sistem gasifikasi memiliki pengaruh penting terhadap optimasi penggunaan gas yang dihasilkan dari gasifikasi. Fungsi dari proses gasifikasi antara lain adalah :

1. Mencampur gas hasil gasifikasi (*syngas*) dengan udara (oksidator).
2. Menentukan karakteristik api yang dihasilkan pada ruang bakar.
3. Melakukan pengapian pada sistem *gasifier*.

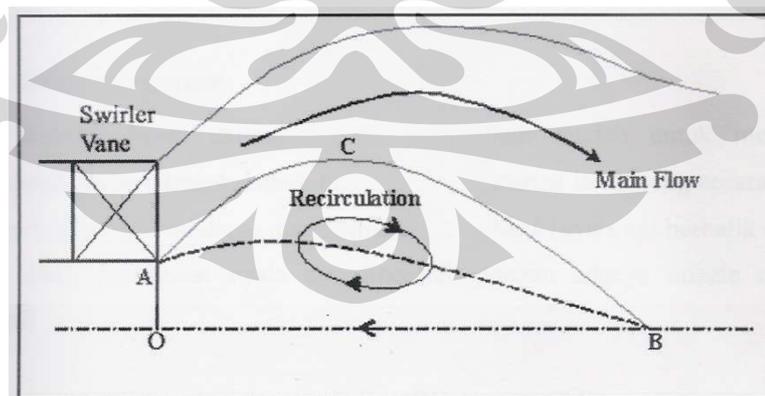
Gas burner memiliki fungsi utama untuk membakar gas hasil gasifikasi untuk kemudian dinyalakan menjadi api pembakaran yang digunakan untuk keperluan khusus lainnya.

2.4 Swirl Blade/ Swirl Vane

Aliran *swirl* digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi. Aliran *swirl* diaplikasikan pada burner turbin gas, *cyclone combustor*, *swirl atomizer*, *cyclone separator*, mesin spray pertanian, *heat exchanger*, dan lain-lain. Pada sistem pembakaran, pengaruh kuat pengaplikasian swirl pada penginjektian udara dan bahan bakar, digunakan sebagai bantuan untuk stabilisasi dalam proses pembakaran intensitas tinggi dan pembakaran ramah lingkungan pada mesin bensin, mesin diesel turbin gas, tungku pembakaran industri dan berbagai peralatan pemanasan yang praktis.^[7]

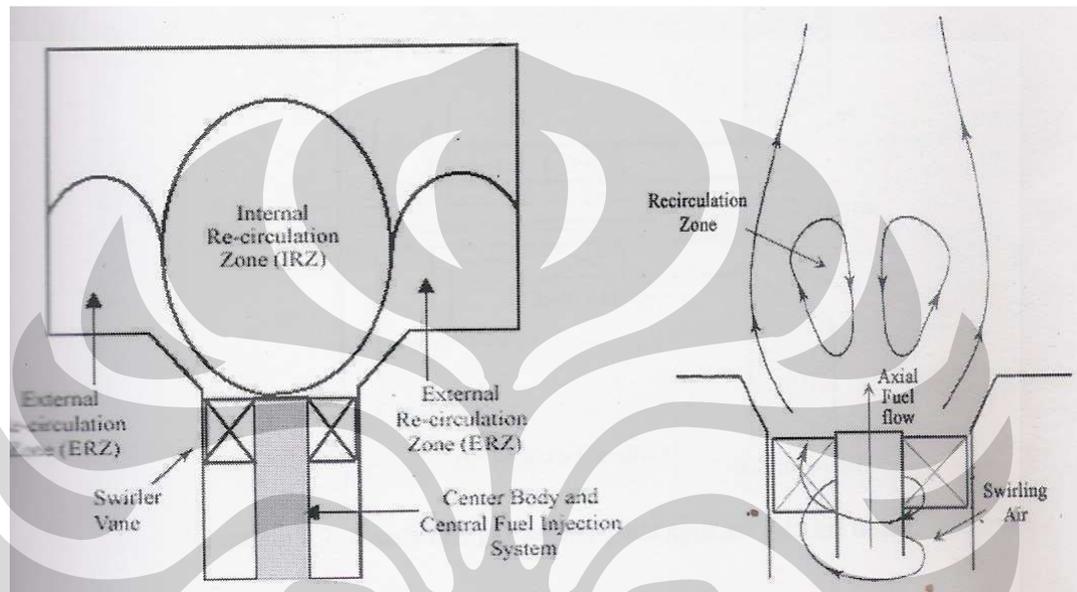
Swirl burner dan *cyclone combustor* pada turbin gas dan tungku pembakaran industri memanfaatkan pusaran kuat untuk meningkatkan kecepatan tumbukan (momentum) antara aliran axial dengan tangensial sehingga mempercepat waktu percampuran bahan-bakar dan udara serta memperpanjang waktu tinggal (residence time)

M N M Jaafar mengemukakan bahwa *swirl* ditimbulkan dari pengaplikasian sebuah pergerakan spiral pada sebuah aliran. Pergerakan spiral ini diperoleh dengan menambahkan aliran tangensial kepada aliran axial. Aplikasi swirl tersebut membangkitkan zona resirkulasi internal



Gambar 2.4 Zona Resirkulasi pada Pusaran ^[18]

Fungsi dari *swirl* adalah untuk menciptakan zona resirkulasi internal (IRZ). Sedangkan zona resirkulasi eksternal (ERZ) timbul akibat ekspansi geometris dari aliran udara pembakaran. Pada pembakaran non-premixed IRZ berfungsi dalam menyempurnakan pencampuran udara dengan bahan bakar agar pembakaran dapat berjalan sempurna, untuk menstabilkan beberapa fraksi hasil pembakaran, agar terbakar kembali sehingga kadar partikel padat pada exhaust gas dapat dikurangi.

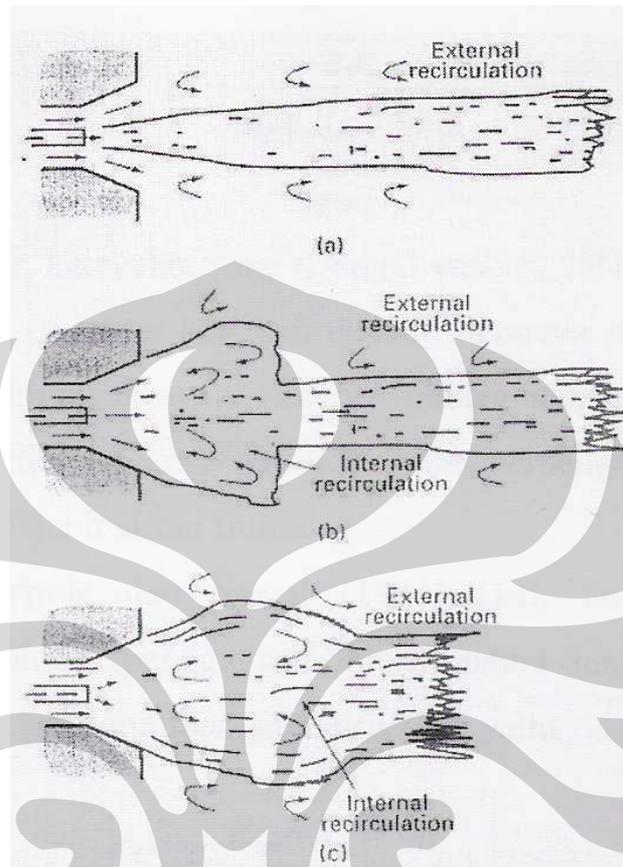


Gambar 2.5 Zona Resirkulasi pada Non-Premixed Swirl Burner

Semakin besar ukuran suatu burner, akan lebih mudah untuk mengontrol pencampuran udara dengan bahan bakar secara eksternal ketimbang secara internal di dalam burner. Hal ini dapat mengeliminasi *flashback*.

Pada aplikasi industri dan utilitas besar, gas burner secara tipikal menggunakan udara primer dan sekunder. Aliran *swirl*, yang dibangkitkan oleh aliran udara sekunder melewati *swirl vane*, berputar melingkari axial *fuel rod* dan nozzle. *Swirl* meresirkulasi produk pembakaran tak sempurna yang bertemperatur tinggi kembali ke akar nyala api. Pencampuran yang baik pada dasarnya mengurangi pembentukan jelaga dan meminimalisir kebutuhan udara berlebih. Zona resirkulasi internal (IRZ) terbentuk oleh gradient radial positif tekanan yang ditimbulkan oleh swirl berkekuatan tinggi. IRZ inilah yang berperan

dalam meningkatkan kualitas pencampuran udara-bahan bakar dan kestabilan nyala api.



Gambar 2.6 Api pada Nozzle Mix Burner. a) Long Jet Flame, No Swirl; b.) Kombinasi Jet Flame dan Zona Resirkulasi Internal Parsial, Intermediate Swirl; c.) Zona Resirkulasi Internal, High Swirl

2.5 Teori Reaksi Pembakaran

Definisi pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara bahan bakar dengan oksigen (reaktan) pada tekanan dan suhu tertentu serta menghasilkan panas, yang hasil pembakarannya disebut produk.

Untuk menghasilkan reaksi pembakaran yang baik diperlukan syarat – syarat tertentu, antara lain adalah: [8]

- Pencampuran reaktan murni
- Suplai udara yang cukup

- Temperatur yang cukup untuk memulai pembakaran
- Waktu yang cukup
- Kerapatan yang cukup untuk merambatkan nyala api

Reaksi oksidasi tiga macam unsur yang dapat terbakar, yaitu karbon, hidrogen, dan sulfur (jika ada) yang berturut – turut diubah menjadi karbon dioksida, uap air dan sulfur dioksida.

2.6 Efisiensi gasifikasi (η)

Efisiensi gasifikasi ialah persentase energi dari biomass (TKS) yang dirubah menjadi hot producer gas(masih mengandung tar). Dengan kata lain rasio dari kandungan panas fuel gas yang dihasilkan gasifikasi biomassa dan kandungan panas dari biomassa bila terbakar sempurna. Persamaan di bawah digunakan untuk menghitung efisiensi gasifikasi [Mathieu, Philippe.,2002]

$$\eta = \left[\frac{\text{Mass Flowrate Producer Gas (kg/s)} \times \text{LHV Producer Gas (MJ/kg)}}{\text{Laju Pemakaian Bahan Bakar (kg/s)} \times \text{LHV Producer Gas (MJ/kg)}} \right]$$

2.7 Udara Sekunder Gasifikasi

Dalam setiap pembakaran, dibutuhkan 3 hal utama, yaitu bahan bakar, udara, dan heat. Apabila salah satu dari 3 syarat itu tidak terpenuhi maka flame tidak akan terjadi. Udara sekunder gasifikasi ini merupakan udara primer bagi combustion unit. Jadi udara disini sangat berperan penting untuk pembakaran yang terjadi di dalam combustion unit.

$$Q_{udara} = m_{udara} \cdot C_{p_{udara}} \cdot \Delta T \quad (2.1 - 9)$$

2.8 Laju Pelepasan Kalor (*Heat Release Rate*)

Air pendingin *combustion unit* disini berfungsi sebagai penyerap kalor yang dilepas oleh flame. Kalor yang diserap oleh air ini bisa menjadi acuan dalam efisiensi dari pembakaran di dalam combustor tersebut. Untuk mengetahui sistem sudah berjalan baik ataupun belum dapat dengan merasakannya secara langsung pada permukaan combustor. Apabila permukaan combustor memiliki temperatur yang tinggi maka sistem tidak berjalan dengan baik.

$$Q_{air} = m_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot \Delta T \quad (2.2 - 9)$$

2.9 Gas Buang (*Flue Gas*)

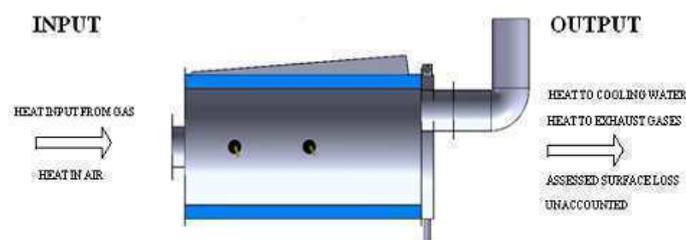
Emisi gas buang terbentuk dari hasil pembakaran dan gas – gas sisa pembakaran. Pada pembakaran sempurna, gas buang terdiri dari komponen – komponen : karbon dioksida, sulfur dioksida (jika ada), uap air dan sisa udara pembakaran yaitu nitrogen. Bila pembakaran tidak sempurna maka akan timbul gas baru yaitu karbon monoksida, karbon, bahan bakar yang tidak terbakar dan oksigen yang berlebih. Jadi gas buang terbentuk dari : CO_2 , H_2O , N_2 , CO , NO_x , O_2 dan sisa bahan bakar yang tidak terbakar. Berdasarkan komposisi kimia, setiap bahan bakar memiliki kebutuhan AFR masing – masing, yang berhubungan dengan jumlah udara yang tersedia, dalam kaitannya dengan jumlah O_2 , untuk mengubah semua karbon dalam bahan bakar menjadi CO_2 dan semua hidrogen menjadi H_2O tanpa ada bahan bakar atau oksigen yang tersisa.

Pada suatu pembakaran, kehilangan energi yang terbesar adalah panas gas buang (hot flue gas). Faktor – faktor yang mempengaruhinya adalah kelebihan udara (excess air) dan suhu dari gas buang. Secara prinsip, panas akan naik (efisiensi turun) sebanding dengan kenaikan kelebihan udara dan suhu gas asap. Oleh sebab itu kedua variabel tersebut harus diminimalkan.

$$Q_{\text{gas buang}} = m_{\text{gas buang}} \cdot C_{p_{\text{gas buang}}} \cdot \Delta T \quad (2.3 - 9)$$

2.10 Neraca Kalor (*Heat Balance*)

Keseimbangan antara energi masuk (*input*) dengan energi berguna (*output*) dan kehilangan energi panas (*losses*). Heat balance dapat memberitahu informasi yang sangat berguna untuk mengetahui efisiensi dari keseluruhan sistem di combustion unit.



Gambar 2.7 Heat balance pada combustion unit

Energi masuk adalah jumlah energi hasil pembakaran bahan bakar, energi berguna adalah energi yang diserap oleh produk (air) dari furnace dan kehilangan energi panas adalah semua kehilangan panas yang disebabkan oleh kondisi pembakaran dan sistem peralatan pembakaran.

2.11 Efisiensi Sistem

Merupakan hasil perbandingan antara kalor yang diserap oleh air dalam combustion unit dengan kalor pembakaran yang masuk dari hasil pembakaran gasifikasi.

$$\eta_{sistem} = \frac{\text{kalor yang diserap air}}{\text{kalor pembakaran}} \times 100 \% \quad (2.4 - 9)$$

2.12 Efisiensi Pembakaran

Merupakan hasil perbandingan antara kalor yang diserap oleh air dalam combustion unit dengan kalor pembakaran yang masuk dari hasil pembakaran gasifikasi.

$$Net\ Efficiency = 100\% - 20,9 \times K1n \times (T_{net}) / K2 \times (20,9 - \%O_{2m}) \quad (2.5 - 9)$$

Dimana

$$K1n = (255 \times \%Carbon\ in\ fuel / Q_{net})$$

$$T_{net} = \text{Flue Temperature} - \text{inlet temperatur}$$

$$K2 = \% \text{ max theoretical } CO_2 \text{ (dry basis)}$$

$$O_{2m} = \% \text{ oxygen in flue gas}$$

BAB 3 PENGUJIAN DAN PENGUKURAN

3.1 Sistem Gasifikasi Biomassa

3.1.1 *Gasifier*

Gasifier merupakan tempat terjadinya proses gasifikasi. *Gasifier* yang digunakan adalah tipe *downdraft* gasifier. *Gasifier* tipe *downdraft* dirancang untuk membatasi kandungan minyak dan tar yang terbawa bersama gas produser.^[10] Bahan bakar padat yang dimasukkan melalui bagian atas *gasifier* akan mengalami proses pengeringan (*drying*) dan pirolisis akibat panas yang dihasilkan pada reaksi oksidasi. Pada tahap pirolisis bahan bakar, dihasilkan uap dan tar. Uap dan tar yang dihasilkan tersebut akan melalui unggun arang panas dan mengalami perengkahan menjadi gas yang lebih sederhana atau arang.



Gambar 3.1 *Downdraft Gasifier*

Bahan bakar dimasukkan pada bagian atas *gasifier*. Bahan bakar tersebut akan mengalami proses pengeringan dan pirolisis akibat panas yang dihasilkan pada reaksi oksidasi. Pada tahap pirolisis bahan bakar uap, tar dan gas produser dihasilkan. Uap dan tar yang dihasilkan tersebut akan melalui unggun arang panas dan mengalami perengkahan menjadi gas yang lebih sederhana atau arang. Perengkahan ini menghasilkan pembakaran stabil yang menjaga temperatur pada 800 – 1000 °C.

Untuk masukan udara *primary air*-nya digunakan blower yang berfungsi meniupkan udara ke dalam gasifier yang disambung menggunakan selang. Untuk mengatur flowratanya digunakan bukaan pada stop kran.



Gambar 3.2 Selang dan Blower untuk *primary air*

3.1.2 Cyclone

Cyclone adalah alat mekanis sederhana untuk menghilangkan partikel yang relatif besar ($> 5-10 \mu\text{m}$) dari aliran gas. Sebuah *cyclone* menggunakan gaya sentrifugal untuk memisahkan partikel dari aliran gas. Aliran gas akan masuk secara tangensial ke dalam *cyclone*, kemudian mengikuti jalan melingkar dan bergerak turun sebagai aliran vortex. Pusaran mulai naik di tengah ketika mencapai bagian kerucut dan kemudian keluar dari atas. Sementara itu partikel mengalami gaya sentrifugal yang mendorong mereka ke luar. Partikel yang lebih besar dengan inersia yang lebih tinggi tidak dapat mengikuti jalan dan dampak pada dinding siklon sementara mereka melakukan perjalanan ke bawah. Partikel yang berdampak baik menempel pada dinding, atau geser ke gerbong di bagian bawah ketika mereka membentuk potongan besar. Dengan demikian, koleksi partikel yang efektif bergantung pada partikel yang berdampak pada dinding siklon sebelum aliran gas mulai naik di pusat.

Setelah sejumlah besar partikel telah dikumpulkan di gerbong, partikel harus dibuang dari gerbong. Kalau tidak, *re-entrainment* dari partikel yang dikumpulkan dapat menjadi masalah.



Gambar 3.3 Cyclone separator

3.1.3 Venturi Scrubber

Venturi scrubber didesain sedemikian rupa untuk secara efektif menggunakan energi yang berasal dari arus *gas exhaust* atau *producer gas* untuk mengatomisasi *scrubbing liquid*. *Gas exhaust* masuk menuju bagian inlet dan seiring luas area mengecil maka kecepatan meningkat. Liquid pencuci gas dimasukkan pada bagian *throat*. *Gas exhaust*, yang dipaksa masuk dengan kecepatan sangat tinggi pada bagian throat yang sangat kecil, menyemprot liquid pada dinding venturi dan menghasilkan droplet sangat kecil dalam jumlah sangat banyak. Pemisahan partikel dan gas terjadi pada bagian throat dimana *gas exhaust* bercampur dengan kabut droplet dari *scrubbing liquid*. *Gas exhaust* kemudian keluar menuju bagian diverging dimana gas dipaksa untuk melambat. Lalu di bagian separator, *gas exhaust* yang masih mengandung air akan dipisahkan kembali dengan bantuan aliran vortex.



Gambar 3.4 Venturi Scrubber

3.1.4 Gas Holding Tank

Agar flame api tidak mengalami fluktuatif dan terus kontinu, gas hasil proses gasifikasi dari reaktor perlu ditampung terlebih dahulu sebelum dibakar di *gas burner*. Pemasangan Drum pada instalasi Gasifikasi inilah bertujuan untuk menampung gas hasil proses gasifikasi dari reaktor, agar suplai gas yang mengalir ke burner menjadi lebih stabil dari yang sebelumnya. Sehingga kualitas *flamena* juga menjadi lebih stabil dan kontinu.



Gambar 3.5 Gas Holding Tank

3.1.5 Burner

Burner ini berfungsi untuk membakar gas produser yang telah dihasilkan. *Burner* yang ada sekarang dapat dikatakan terdiri dari 4 bagian, yaitu: selubung *burner*, pipa gas *burner*, *blade* dan konis. Konis berguna sebagai *flame holder*. Berbentuk kerucut solid. Selain berfungsi menstabilkan nyala api, berguna juga untuk mengakselerisasi aliran gas produser ke dalam *quarl throat* burner (daerah tenggorokan) karena adanya penyempitan area. Konis dapat menciptakan daerah sirkulasi bahan bakar bila laju tinggi akibat kontur konis.



Gambar 3.6 Burner



Gambar 3.7 1)Gas burner dengan 6 blade ; 2)Gas burner dengan 8 blade ; 3)Gas burner dengan 10 blade

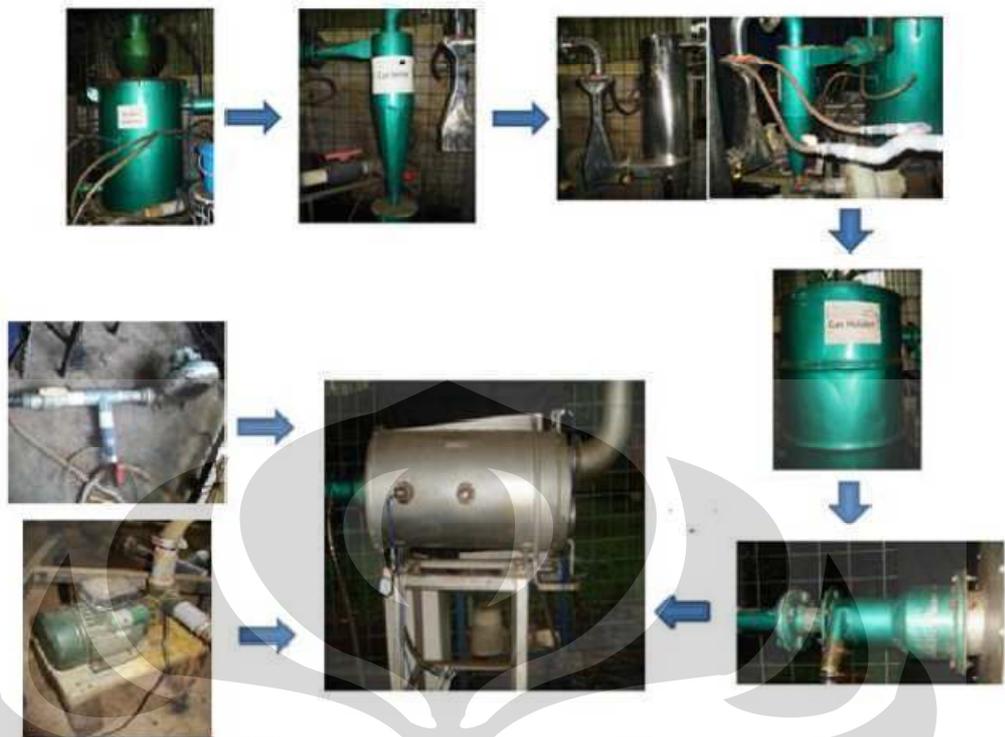
3.1.6 *Combustion Unit*

Combustion unit ini merupakan ruang bakar dari gas produser yang telah dihasilkan. *Combustion unit* ini memiliki sistem penyerapan panas oleh air yang berada di sekeliling tabungnya, yang nantinya air dapat disirkulasi kembali ke dalam *combustion unit* agar penggunaan air tidak menjadi boros. Karena sebagai tempat ruang bakar, maka *combustion unit* ini khusus dibuat dari stainless steel yang memiliki daya tahan temperatur yang tinggi.



Gambar 3.8 *Combustion Unit*

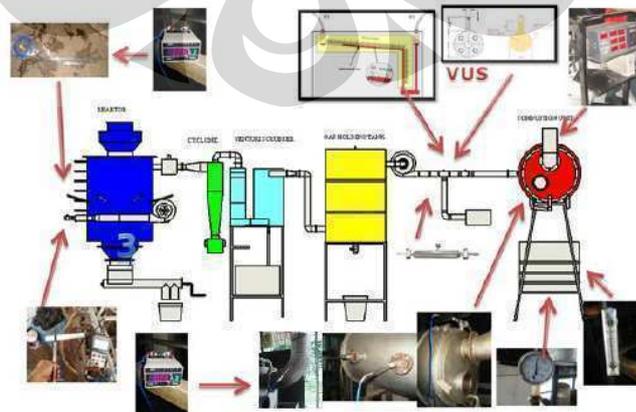
Setiap sistem diatas memiliki fungsinya masing – masing dan apabila dirangkai menjadi satu kesatuan akan menghasilkan suatu rangkaian alat yang dapat berfungsi untuk menjalankan proses gasifikasi dengan baik.



Gambar 3.9 Rangkaian Sistem Gasifikasi di Laboratorium

3.2 Skematika Alat Pengujian

Pengujian untuk pengembangan studi gasifikasi biomassa dengan *fixed bed downdraft gasifier* tak dapat terpisahkan dari keutuhan pengujian, baik pada reaktor gasifikasi dan produser gas. Pengujian berada pada kondisi tekanan atmosfer 1 atm dan temperatur ruang $\pm 27^{\circ}\text{C}$ - 35°C . Proses pengujian dilakukan di kandang laboratorium gasifikasi di daerah pelataran parkir Departemen Teknik Mesin.



Gambar 3.10 Skematika Alat Pengujian

3.3 Metodologi Pengujian

3.1 Persiapan Pengujian

Penggunaan bahan bakar terdiri atas arang yang terdiri atas arang jenis kayu, tempurung kelapa dan sabutnya serta minyak tanah. Arang dan tempurung kelapa sebagai promotor pembakaran awal atau ignisi. Sedangkan minyak tanah sebagai pemercepat proses pembakaran tahap selanjutnya, terutama setelah tempurung kelapa dimasukkan ke dalam gasifier.



Gambar 3.11 Bahan Bakar (Arang; Tempurung Kelapa; Minyak Tanah)

Persiapan yang dilakukan pada arang adalah membuat penyesuaian ukuran. Penggunaan arang kayu digunakan pada sifatnya yang cepat menjadi bara atau cepat terbakar dengan ukuran 3x3 inci, ketebalan mencapai 2 inci. Arang kayu nantinya memudahkan pembakaran dengan waktu yang relatif lebih lama. Sedangkan tempurung kelapa dari jari-jari sesungguhnya 5 inci, kemudian dipotong-potong menjadi 5-7 bagian. Seluruh sabut yang ada dipisahkan dari kelapa. Untuk menjaganya tetap kering, dilakukan teknik penyimpanan di dalam karung-karung yang secara periodik dijemur (sehari sebelum pengujian). Untuk memastikan massa yang dimasukkan ke dalam gasifier, dilakukan dahulu penimbangan secara periodik dengan timbangan biasa.

Setelah itu cek kembali semua alat pengukuran yang ada dan usahakan berada pada posisi yang benar. Untuk air yang ada pada tanki, biasakan pada awal – awal persiapan tutup semua kran yang ada. Setelah dilakukan percobaan baru semua keran dibuka sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan.

3. 3.2 Prosedur Pengujian

Tahap – tahapan pengujian:

1. *Persiapan awal (10 - 20 menit)*

- Menyiapkan arang kayu dan tempurung kelapamasing-masing 2,5-3 kg. Masing-masing dipersiapkan di dalam karung yang siap untuk diambil.
- Memasang termokopel tipe-K (*chromel alumel*) berdiameter 0,65 mm, yaitu 4 buah pada reaktor sesuai posisi yang telah ditentukan, 4 buah termokopel pada combustion unit dengan perincian 2 buah untuk mengukur suhu di dalam combustion, 1 buah untuk mengukur outlet pada air di combustion unit, dan 1 buah untuk mengukur temperatur *flue gas*. Menghubungkan keseluruhan termokopel pada *temperature digital data logger* dengan kabel konduktor.

Tc. 1, 2, 3,4 : Pengukuran temperatur dalam gasifier

Tc 5 : Pengukuran temperatur outlet air combustion unit.

Tc.6,7 : Pengukuran temperatur api pada combustion unit.

Tc 8 : Pengukuran temperatur flue gas

- Memasang *orifice plate* pada *flens* yang telah terpasang *tapping* tekanan.
- Menghubungkan manometer miring pada *tapping* dengan selang.
- Memasang termometer untuk mengukur temperatur inlet air cooling water
- Memasang flowmeter untuk mengukur flowrate air cooling water
- *Valve* suplai udara dari *blower* selalu dibuka penuh. Peran *valve* ditiadakan dengan adanya inverter.
- Memasang blower untuk suplai udara sekunder pada combustion unit.
- Memastikan konektor alat uji utama (reaktor dan *burner*) dan alat-alat pendukung telah terpasang dengan baik dan menyeluruh.
- Memastikan tanki air telah terisi penuh agar suplai air terus berlanjut selama percobaan. Dan bukakan valve tanki pastikan telah terbuka.

2. Pembakaran awal (± 25 menit)

- Memasukkan 1 kg arang kayu pada dasar refraktori reaktor sampai ke tenggorokan kemudian ditambah 1 kg tempurung kelapa yang telah disiram minyak tanah. Kemudian bagian teratas dimasukkan sabut kelapa yang telah terbakar.
- Penyalaan awal dengan bantuan minyak tanah, gunakan sabut kelapa sebagai penyulut untuk memulai proses pembakaran.
- Melakukan *feeding* bahan bakar secara kontinu (tiap 5 menit masing-masing 1 kg) hingga temperatur 2 menunjukkan 900°C hingga (arang dan tempurung telah menjadi bara). Bahan bakar pada pengujian kali ini adalah tempurung kelapa..

3. Pengaturan Suplai Udara Primer

- Setelah timbul asap pekat, ± 20 s/d 25 menit, suplai udara primer mulai diatur dengan mengatur bukaan valve $3/8$ dari 90 derajat.

4. Ignisi (Penyalaan) *Producer Gas*

- Menambahkan bahan bakar tempurung kelapa 1 kg ke dalam gasifier untuk menghasilkan *producer gas* yang pekat dan banyak dari hasil pirolisis (penguraian) tempurung kelapa
- Setelah $\pm 3-5$ menit, asap terlihat pekat. Kepekatan menandakan terdapat banyak komponen mampu bakar pada *producer gas*. Segera tutup feeding door.
- Lakukan penyulutan (ignisi) dengan pemantik kepada ujung *combustion unit*. Bila belum tersulut, lakukan berulang-ulang.
- Setelah Lidah api pada *burner* akan terbentuk dan akan bertahan hingga *blow off* dalam waktu ± 3 s/d 5 menit. Bila sudah bertahan dalam waktu itu, maka turunkan blower utama.
- Buka valve untuk distribusi air pada combustion unit dan nyalakan pompa air sehingga sirkulasi dapat berjalan lancar dan agar alat tersebut tidak mengalami pemanasan yang tinggi. Diusahakan sama setiap percobaan.

- Segera menambahkan kembali bahan bakar tempurung kelapa 2 kg dilihat dari distribusi suhu yang ada pada reaktor (termokopel 2) apabila suhu stagnan dan mulai menurun beberapa saat kemudian.
- Setelah penambahan, dilanjutkan dengan menyalakan *blower mixing* pada *burner*. Lakukan dari bukaan katup terbesar.
- Dan seterusnya hingga bahan bakar seluruhnya terpakai dan produser gas sudah tidak mampu bakar lagi walaupun bahan bakar telah diaduk.

5. Pengukuran

6. Selesai pengujian

- Tetap menyalakan *blower primary air* untuk mengeluarkan seluruh asap dan residu yang masih tersisa di dalam reaktor. Lepaskan seluruh selang saluran *primary air* dari blower utama ke gasifier.
- Setelah ± 2 jam (kondisi reaktor mulai dingin dan bara sudah tidak menyala lagi) mengeluarkan abu sisa pembakaran melalui lubang pembuangan pada reaktor gasifier.
- Melepas semua alat ukur, yaitu termokopel, manometer miring dan *orifice plate*, selang dan memeriksa apakah kondisinya masih baik. Melepas alat pendukung seperti pemipaan suplai udara.
- Kondisi refraktori reaktor dibiarkan menjadi dingin hingga mencapai temperatur ruang, selama 1 hari penuh. Setelah itu membuka tutup reaktor dan membersihkan seluruh bagian dalam reaktor dan *burner* dengan menyemprotkan udara dari kompresor atau *blower* untuk menghindari tar mengeras menjadi kerak

3.4 Metodologi Pengukuran

Producer Gas

- Pengukuran Flowrate

Reaktor gasifier menghasilkan produser gas selama 20 menit untuk pembakaran kontinu setiap 10 kg biomassa. Pengukuran flowrate producer gas dilakukan ketika gas asap yang keluar melalui burner secara visual telah pekat. Ini menandakan gas asap mengandung komponen mampu bakar, yaitu CH_4 , H, dan CO dengan membaca posisi liquid pada tube manometer. Plat orifice dipasang di

antara flange yang menghubungkan dua pipa. Perbedaan tekanan di antara plat orifice di ukur menggunakan manometer miring karena tekanan aliran gas rendah. Digunakan metode flange tap dalam menentukan posisi titik pressure tap pada pipa.

Manometer miring dapat mengukur perbedaan tekanan yang sangat kecil pada suatu aliran fluida yang melewati sebuah plat orifis. Pergerakan fluida raksa di dalam tube sangat signifikan (sangat akurat) terhadap perbedaan tekanan yang terjadi. Manometer ini khusus untuk mengukur producer gas yang keluar dari gas holding tank yang kemudian di atur pengeluarnya oleh blower hisap.

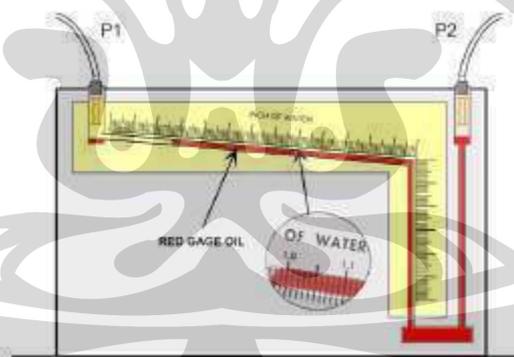
Type : *Durablock Inclined Manometer - Dwyer Instrument*
model H-6640- M

Satuan : inch of water, 1 atm at 0,45 inch

Fluid Properties : red gage oil , spesific gravity 0,826.

Spesifikasi Aplikasi : tekanan maksimum 100 psi (690 kPa)

temperatur maksimum 150°F (65°C)



Gambar 3.12 Manometer Miring *Durablock-Dwyer Instrument* model H-6640-M

Posisi liquid manometer miring pada satuan *inch of water* telah diskalakan dengan ketinggian liquid bila diletakkan secara tegak vertikal. Range nilai satuan *inch of water* pada kemiringan garis ukur manometer miring menunjukkan nilai yang sama dengan garis ukur bila diletakkan vertikal. Maka dari itu berlaku persamaan perbedaan ketinggian terhadap perbedaan tekanan, yaitu :

$$(p_1 - p_2) = \rho_m \cdot g \cdot h. \quad (3.1)$$

$(p_1 - p_2) = \Delta p =$ perbedaan tekanan , $[\text{kg}/\text{m}^2]$

$\rho_m =$ densitas fluida manometer $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$h =$ perbedaan ketinggian liquid manometer $[\text{m}]$

Perbedaan tekanan akibat orifis dapat dihitung menggunakan persamaan (3.1)

Pengukuran Flowrate Primary Air, Secondary Air

Pengukuran flowrate udara ini menggunakan Hot Wire Anemometer. Untuk efektivitas waktu, pengukuran flowrate pada blower utama (menggunakan valve 3/8 sebanyak 8 valve) dan blower mixing (menggunakan valve 2,5) diukur terlebih dahulu sebelum pengujian. Hot wire anemometer jenis Lutron AM-4204 digunakan untuk mendapatkan m/s, selain itu alat ini bisa mendapatkan temperatur. yang dapat mengubah m/s menjadi ft/min. Berdasarkan buku petunjuk alat, jenis anemometer ini bisa mengukur kecepatan dari 0-20 m/s, sedangkan untuk tempetarur dari 0-50 °C.



Gambar 3.13 *Hot Wire Anemometer*

Data – data yang diambil pada pengukuran ini adalah kecepatan laju alir udara pada primary air dengan bukaan katup penuh. Dari kecepatan laju alir ini akan didapatkan nilai flowrate yang ada.

Pengukuran Temperatur

- Termokopel

Pengukuran distribusi temperatur pada reaktor gasifikasi, api pembakaran pada combustion unit, sirkulasi air, dan flue gas menggunakan termokopel type-K. Termokopel yang digunakan berjumlah 8 buah Termokopel tersebut mampu mengukur temperatur hingga 1000 °C.



Gambar 3.14 Termokopel type K dengan temperatur maksimum 1000 °C

Untuk lebih memastikan keakuratan termokopel, maka dilakukan kalibrasi. Temperatur yang terukur oleh kedelapan termokopel tersebut diatas selanjutnya divisualisasikan melalui sebuah *data logger*. Data logger digital ini memiliki 5 channel dan bersatuan °C. Oleh karena itu digunakan 2 (dua) data logger yang dihubungkan dengan 8 termokopel melalui sebuah kabel konduktor.



Gambar 3.15 Digital Temperatur Data Logger yang memiliki 5 channel

Pengukuran yang dilakukan oleh termokopel ini hanya digunakan untuk yang memiliki temperatur tinggi seperti pengukuran tempertatur di gasifier, flame pada combustion unit, temperatur keluar dari cooling water, dan temperatur flue gas.



Gambar 3.16 Titik Pengukuran Untuk Termokopel

- Termometer

Termometer ini digunakan untuk mengukur temperatur inlet cooling water yang berada di combustion unit. Karena temperaturnya yang rendah maka penggunaan termometer lebih baik digunakan daripada termokopel mengingat perbedaan harga yang jauh.



Gambar 3.17 Termometer

Temperatur air pada inlet ini selalu bergantung pada keadaan cuaca karena air berasal dari tanki yang berada di luar laboratorium.

Pengukuran Laju Pemakaian Bahan Bakar

Laju pemakaian bahan bakar dihitung dengan membagi jumlah bahan bakar yang digunakan dalam eksperimen dengan waktu yang diperlukan untuk habisnya bahan bakar. Waktu percobaan dihitung setelah mulai timbul asap pekat ± 20 s/d 30 menit setelah start up eksperimen. Pengujian dianggap selesai jika bahan bakar telah terbakar habis, asap producer gas mulai habis, juga dipastikan tidak ada bara lagi yang masih menyala.

$$M_{bb} = \frac{m_{bb}}{t}$$

dimana :

Mbb = laju pemakaian bahan bakar (kg/ jam)

m_{bb} = massa bahan bakar untuk tiap eksperimen (kg)

t = waktu yang diperlukan untuk tergasifikasinya semua bahan bakar (jam)

Heating Value dari Producer Gas

Data komposisi gas untuk setiap eksperimen bisa digunakan untuk menghitung *lower heating value* dari *producer gas*. *Lower heating value* dari unsur yang berbeda dari *producer gas* pada data standar STP seperti tabel 3.1 bisa digunakan.

Persamaan di bawah bisa digunakan untuk menghitung *lower heating value* dari *producer gas*.

$$CV_G = \sum x_i H_i$$

x_i = fraksi volume dari unsur *producer gas* pada temperatur ruang

H_i = *lower heating value* dari unsur *producer gas* pada temperatur ruang

Tabel 3.1 Heating value dari unsur *producer gas* pada 25° C ^[11]

| Fuel | HHV (MJ/kg) | LHV (MJ/kg) | HHV/LHV | LHV/HHV |
|----------------|-------------|-------------|---------|---------|
| Coal 1) | 34.1 | 33.3 | 1.024 | 0.977 |
| CO | 10.9 | 10.9 | 1.000 | 1.000 |
| Methane | 55.5 | 50.1 | 1.108 | 0.903 |
| Natural gas 2) | 42.5 | 38.1 | 1.115 | 0.896 |
| Propane | 48.9 | 45.8 | 1.068 | 0.937 |
| Gasoline 3) | 46.7 | 42.5 | 1.099 | 0.910 |
| Diesel 4) | 45.9 | 43.0 | 1.067 | 0.937 |
| Hydrogen | 141.9 | 120.1 | 1.182 | 0.846 |



BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA HASIL

Perbandingan karakteristik gas burner akan dibahas dalam bab ini, akan ditinjau dari:

- Emisi gas buang yang dihasilkan
- Temperatur api yang dihasilkan
- *Heat release rate*

Pemakaian tempurung kelapa sebesar 10 kg tiap percobaan. Rasio perbandingan udara/bahan bakar pada percobaan ini adalah 3,2:1. Pada Penelitian ini komposisi syngas diperoleh dari literatur.

Gas burner yang digunakan dalam penelitian ini adalah *gas burner* dengan jumlah *blade* yang berbeda, yakni :

- *Gas burner* dengan 6 *blade*
- *Gas burner* dengan 8 *blade*
- *Gas burner* dengan 10 *blade*



Gambar 4.1 1)Gas burner dengan blade 10; 2)Gas burner dengan blade 8; 3)Gas burner dengan blade 6

Dari percobaan yang telah dilakukan, diperoleh data sebagai berikut:

- *Gas burner* dengan 6 *blade*

| No | Temperatur Api (°C) | Tin Air (°C) | Tout Air (°C) |
|-----|---------------------|--------------|---------------|
| I | 750 | 32 | 41 |
| II | 770 | 28 | 38 |
| III | 780 | 30 | 40 |
| IV | 760 | 25 | 34 |

- *Gas burner dengan 8 blade*

| No | Temperatur Api (°C) | Tin Air (°C) | Tout Air (°C) |
|-----|---------------------|--------------|---------------|
| I | 780 | 30 | 40 |
| II | 800 | 30 | 40 |
| III | 790 | 30 | 40 |
| IV | 810 | 25 | 36 |

- *Gas burner dengan 10 blade*

| No | Temperatur Api (°C) | Tin Air (°C) | Tout Air (°C) |
|-----|---------------------|--------------|---------------|
| I | 770 | 32 | 42 |
| II | 780 | 32 | 41 |
| III | 800 | 32 | 42 |
| IV | 790 | 28 | 38 |

4.1. Karakteristik Bahan Bakar

1. Tempurung Kelapa

Tabel 4.1 Analisa Proximat tempurung kelapa ^[12]

| Analisa Proximat (% berat) | |
|----------------------------|-------|
| Moisture | 5,3 |
| Volatile Mater | 70,7 |
| Ash | 6,26 |
| Fixed Carbon | 17,54 |
| Low Heating Value (kj/kg) | 22000 |
| Analisa Ultimat (% Berat) | |
| C | 47,59 |
| H | 6,0 |
| O | 45,52 |
| N | 0,22 |
| S | 0,05 |

2. *Producer Gas*

Tabel 4.2 Komposisi *producer gas* ^[14]

| Komposisi Gas | |
|-----------------|--------|
| CO | 24,7 % |
| CH ₄ | 6,7% |
| H ₂ | 15,9 % |

$$\text{LHV} = \Sigma((\% \text{ CO} \times \text{Hi CO}) + (\% \text{ H}_2 \times \text{Hi H}_2) + (\% \text{ CH}_4 \times \text{Hi CH}_4))$$

$$\text{LHV} = ((3,05 \text{ MJ/kg}) + (1,55 \text{ MJ/kg}) + (2,19 \text{ MJ/kg}))$$

$$\text{LHV} = 6,79 \text{ MJ/kg}$$

4.2 Efisiensi Gasifikasi

$$\eta = \frac{[\text{Mass Flowrate Producer Gas (kg/s)} \times \text{LHV Producer Gas (MJ/kg)}]}{[\text{Laju Pemakaian Bahan Bakar (kg/s)} \times \text{LHV Bahan Bakar (MJ/kg)}]}$$

Dengan mass flow sebesar 0,008 kg/s

$$\eta = \frac{0,0018(\text{kg/s}) \times 6,79 (\text{MJ/kg})}{0,008 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \times 22 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)}$$

$\eta = 27,9 \%$

4.3 Perhitungan Kalor Pembakaran

$$Q_{\text{syngas}} = \text{mass flow bahan bakar} \times \text{LHV} \quad (4.1 - 9)$$

Dimana :

Mass Flow bahan bakar didapatkan dari pengukuran menggunakan orifice plate
LHV didapatkan dari Pengukuran komposisi gas.

$$\begin{aligned} Q_{\text{syngas}} &= 0,0018 \text{ kg/s} \times 6789,87 \text{ kJ/kg} \\ &= 12,22 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

4.4 Perhitungan Kalor Udara

$$Q_{\text{udara}} = m_{\text{udara}} \cdot C_{p\text{udara}} \cdot \Delta T \quad (4.2 - 9)$$

Dimana :

mass flow udara didapatkan dari pengukuran menggunakan hot wire

Cp udara adalah 1,005 kJ/kg.k

ΔT = selisih temperatur udara masuk kedalam burner dengan temperatur udara

Kalor Udara *Primary Air*

| | | |
|-----------------|--------|---------|
| Mass flow | 0,0112 | kg/s |
| Cp | 1,0005 | kJ/kg.K |
| Tin | 28 | °C |
| Tout | 30 | °C |
| Q udara reaktor | 0,0224 | kJ/s |

Kalor Udara *Secondary Air*

| | |
|------------------|----------------|
| Mass flow | 0,0057 kg/s |
| Cp | 1,0005 kJ/kg.K |
| T _{in} | 28 °C |
| T _{out} | 29 °C |
| Q secondary air | 0,0057 kJ/s |

Kalor Udara Total

| | |
|-----------------|-------------|
| Q udara reaktor | 0,0224 kJ/s |
| Q secondary air | 0,0057 kJ/s |
| Q total | 0,0281 kJ/s |

4.5 Perhitungan Laju Pelepasan Kalor (*Heat Release Rate*)

$$Q_{air} = m_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot \Delta T \quad (4.3 - 9)$$

Dimana :

mass flow air didapatkan dari pengukuran menggunakan flowmeter air

C_p udara adalah 4,184 kJ/kg.k

ΔT = selisih temperatur air masuk kedalam combustion unit dengan temperatur air keluar combustion unit

Gas Burner 6 blade

| | |
|--------------------------|---------------|
| <i>Mass flow</i> air | 0,26 kg/s |
| Cp | 4,184 kJ/kg.K |
| T _{in} | 28,75 °C |
| T _{out} | 38,25 °C |
| <i>Heat Release Rate</i> | 10,33 kJ/s |

Gas Burner 8 blade

| | |
|--------------------------|---------------|
| <i>Mass flow</i> air | 0,26 kg/s |
| Cp | 4,184 kJ/kg.K |
| T _{in} | 28,75 °C |
| T _{out} | 39 °C |
| <i>Heat Release Rate</i> | 11,15 kJ/s |

Gas Burner 10 blade

| | |
|--------------------------|---------------|
| <i>Mass flow air</i> | 0,26 kg/s |
| <i>Cp</i> | 4,184 kJ/kg.K |
| <i>Tin</i> | 31 °C |
| <i>Tout</i> | 40,75 °C |
| <i>Heat Release Rate</i> | 10,6 kJ/s |

4.6 Perhitungan Kalor Gas Buang

Dimana :

mass flow gas buang didapatkan dari penjumlahan mass flow gas produser dengan mass flow udara

Cp gas buang didapatkan dengan penjumlahan kalor jenis tiap komposisi gas buang.

ΔT = selisih temperatur gas buang keluar combustion unit dengan temperatur udara ambient

$$Q_{gas\ buang} = m_{gas\ buang} \cdot C_{p\ gas\ buang} \cdot \Delta T \quad (4.4 - 9)$$

Gas Burner 6 blade

| Komp osisi Gas Buang | % Volume Gas Buang | spesifik heat (J/kg.K) | spesifik heat. Vol (J/kg.K) | flow rate (kg/s) | <i>Tin</i> | <i>To ut</i> | ΔT | Total <i>Cp</i> ΔT | Q (kJ/s) |
|----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|------------------|------------|--------------|------------|----------------------------|----------|
| HC | 0,002 | | | | | | | 0 | 0,66 |
| CO | 0,03 | 1042 | 0,000313 | | | | | 0,14 | |
| CO ₂ | 16,8 | 845 | 0,14196 | 0,0076 | 490 | 28 | 462 | 65,59 | |
| O ₂ | 5 | 916 | 0,0458 | | | | | 21,16 | |
| NO _x | 0,00012 | | | | | | | 0 | |
| Total | 21,832 | | | | | | | 86,89 | |

Gas Burner 8 blade

| Komp osisi Gas Buang | % Volume Gas Buang | spesifik heat (J/kg.K) | spesifik heat. Vol (J/kg.K) | flow rate (kg/s) | T _{in} | T _{o ut} | ΔT | Total Cp ΔT | Q (kJ/s) |
|----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|-------------------|-----|-------------|----------|
| HC | 0,0024 | | | 0,0076 | 475 | 28 | 447 | 0 | 0,64 |
| CO | 0,02 | 1042 | 0,00021 | | | | | 0,093 | |
| CO ₂ | 19,1 | 845 | 0,1614 | | | | | 72,14 | |
| O ₂ | 3,01 | 916 | 0,02757 | | | | | 12,33 | |
| NO _x | 0,00011 | | | | | | | 0 | |
| Total | 22,13 | | | | | | | 84,56 | |

Gas Burner 10 blade

| Komp osisi Gas Buang | % Volume Gas Buang | spesifik heat (J/kg.K) | spesifik heat. Vol (J/kg.K) | flow rate (kg/s) | T _{in} | T _{o ut} | ΔT | Total Cp ΔT | Q (kJ/s) |
|----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|-------------------|-----|-------------|----------|
| HC | 0,0022 | | | 0,0076 | 450 | 28 | 422 | 0 | 0,60 |
| CO | 0,03 | 1042 | 0,00031 | | | | | 0,13 | |
| CO ₂ | 17,3 | 845 | 0,14619 | | | | | 61,69 | |
| O ₂ | 4,5 | 916 | 0,04122 | | | | | 17,39 | |
| NO _x | 0,00012 | | | | | | | 0 | |
| Total | 21,83 | | | | | | | 79,22 | |

4.7 Neraca Kalor (*Heat Balance*)

Neraca kalor digunakan untuk mengetahui jumlah kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar sebagai penghasil kalor serta jumlah kalor yang diserap oleh air sehingga diketahui besar efisiensinya pembakaran di combustor. Dengan analisis neraca kalor ini, dapat diketahui jumlah kalor yang masuk ke dalam combustor dan kehilangan kalor akibat gas buang, konduksi dan lain - lain. Heat loss ini merupakan jumlah kalor yang hilang tanpa diketahui.

Gas Burner 6 blade

| Qin | Jumlah (kJ/s) | Jumlah (kJ/s) | Jumlah (kJ/s) |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Kalor Pembakaran | 12,22 | | |
| Kalor Udara | 0,028 | | |
| Total | | | 12,248 |
| Qout | | | |
| Heat Release Rate | | 10,3 | |
| Kalor Gas Buang | | 0,66 | |
| Total | | | 10,96 |
| Heat loss | | | 1,288 |

Gas Burner 8 blade

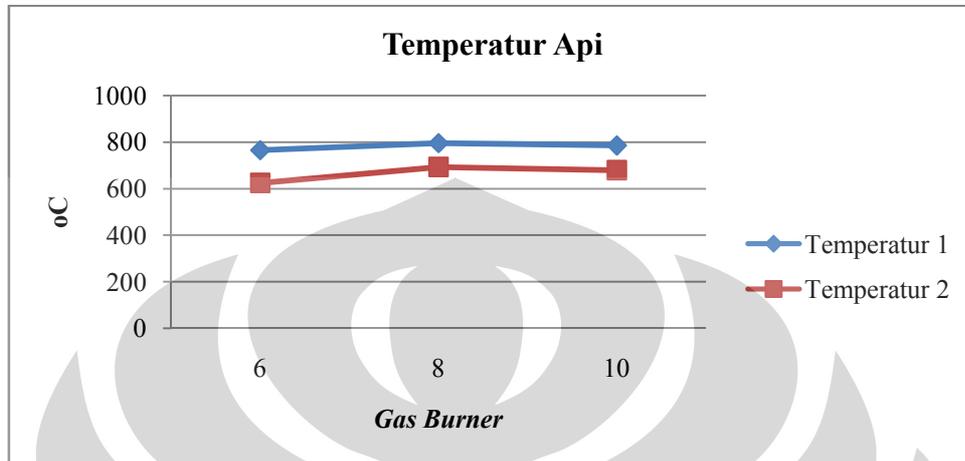
| Qin | Jumlah (kJ/s) | Jumlah (kJ/s) | Jumlah (kJ/s) |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Kalor Pembakaran | 12,22 | | |
| Kalor Udara | 0,028 | | |
| Total | | | 12,248 |
| Qout | | | |
| Heat Release Rate | | 11,15 | |
| Kalor Gas Buang | | 0,64 | |
| Total | | | 11,79 |
| Heat loss | | | 0,458 |

Gas Burner 10 blade

| Qin | Jumlah (kJ/s) | Jumlah (kJ/s) | Jumlah (kJ/s) |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Kalor Pembakaran | 12,22 | | |
| Kalor Udara | 0,028 | | |
| Total | | | 12,248 |
| Qout | | | |
| Heat Release Rate | | 10,6 | |
| Kalor Gas Buang | | 0,6 | |
| Total | | | 11,2 |
| Heat loss | | | 1,048 |

4.8 Analisa Hasil

4.8.1 Temperatur Api



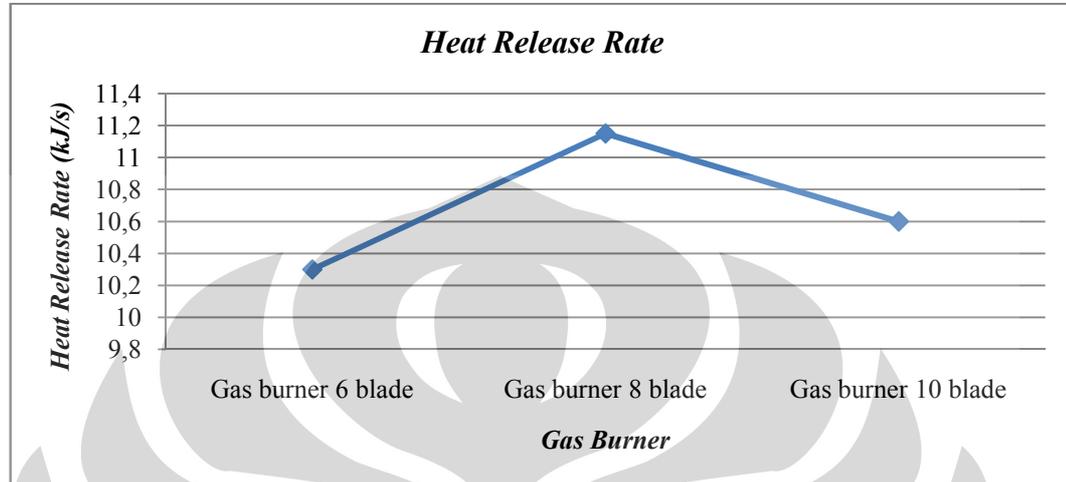
Gambar 4.1 Grafik Temperatur Api

Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa temperatur api rata-rata hasil pembakaran gas hasil gasifikasi biomasa tertinggi adalah sebesar 795 °C untuk gas burner dengan 8 blade, 785 °C untuk gas burner dengan 10 blade, dan 765 °C untuk gas burner dengan 6 blade untuk temperatur pada termokopel 1 dan sebesar 693 °C untuk gas burner dengan 8 blade, 679 °C untuk gas burner dengan 10 blade, dan 624 °C untuk gas burner dengan 6 blade untuk temperatur pada termokopel 2.

Dari hasil di atas dapat dilihat gas burner dengan 8 blade menghasilkan temperatur api paling besar. Hal ini disebabkan pencampuran udara dan bahan bakar pada gas burner dengan 8 blade berlangsung dengan baik. Blade yang berjumlah delapan buah mampu menghasilkan zona resirkulasi internal paling baik. Dengan zona resirkulasi internal yang baik, maka akan didapat pembakaran yang stabil dengan campuran udara dan bahan bakar yang tepat. Residence time dari gas burner dengan 8 blade juga menjadi lebih lama dengan zona resirkulasi internal yang baik. Seluruh bahan bakar yang keluar melalui saluran bahan bakar bakar gas burner terbakar sepenuhnya sebelum meninggalkan ruang bakar. Dengan demikian, seiring dengan semakin sempurnanya proses pembakaran pada

gas burner (dengan zona resirkulasi internal yang baik) maka semakin tinggi temperatur api yang diperoleh.

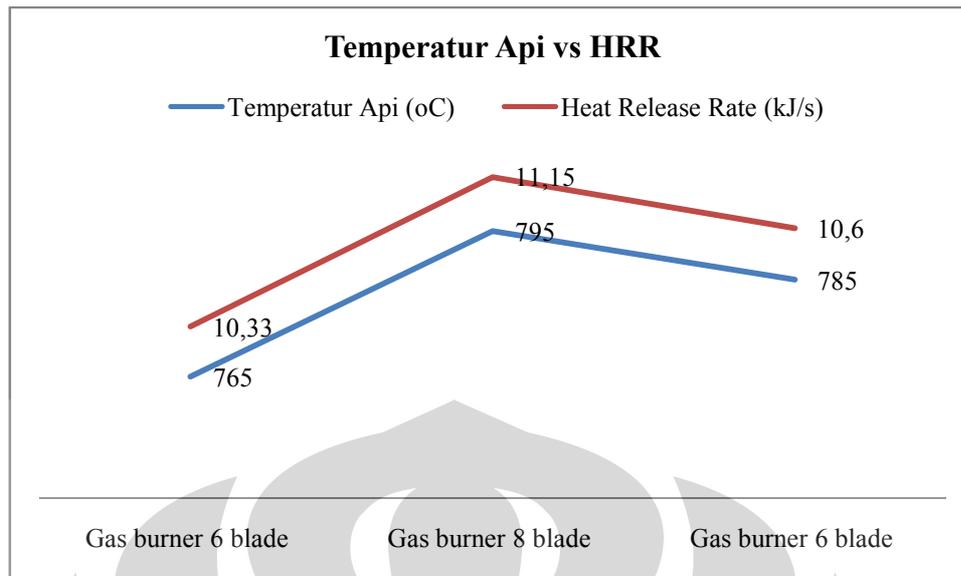
4.8.2 Heat Release Rate



Gambar 4.2 Grafik Heat Release Rate

Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa (Heat Release Rate) kalor yang dilepas oleh api hasil pembakaran gas hasil gasifikasi biomasa tertinggi adalah sebesar 11,15 kJ/s untuk gas burner dengan 8 blade, 10,6 kJ/s untuk gas burner dengan 10 blade, dan 10,3 kJ/s untuk gas burner dengan 6 blade.

Heat Release Rate merepresentasikan besarnya kalor yang dilepas oleh sistem gasifikasi. Heat release rate ini diperoleh dari perpindahan kalor dari api pembakaran pada gas burner menuju air di sekeliling ruang pembakaran. Semakin besar jumlah Heat Release Rate adalah representasi dari semakin besar pula kalor yang dihasilkan oleh sistem. Salah satu hal yang mempengaruhi Heat Release Rate adalah temperatur api. Hubungan antara temperatur api dengan besar Heat Release Rate dapat dilihat di grafik berikut.



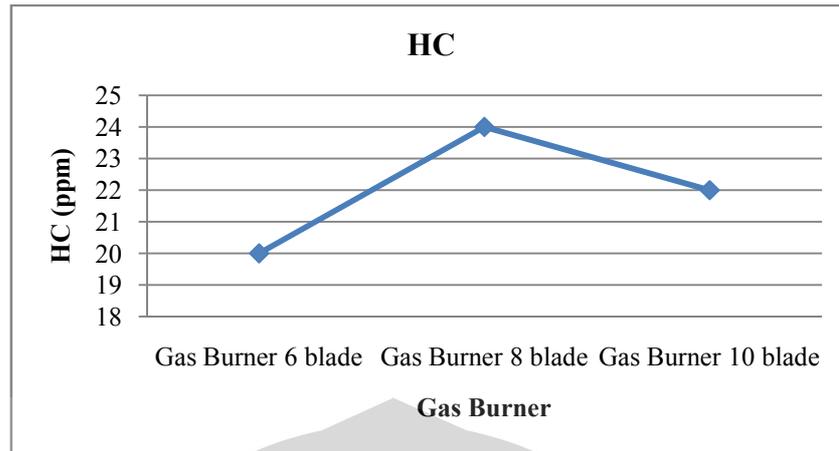
Gambar 4.3 Grafik Temperatur Api vs HRR

Hubungan antara temperatur api pada ruang pembakaran dengan kalor yang diserap oleh air (*Heat Release Rate*) adalah berbanding lurus, artinya semakin besar temperatur api di dalam ruang pembakaran maka semakin besar pula Heat Release Rate yang didapatkan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan adanya zona resirkulasi internal yang baik pada gas burner dengan 8 blade maka akan dihasilkan temperatur api yang paling tinggi dan berdampak pada besar Heat Release Rate yang terbesar.

4.8.3 Analisa Emisi Gas Buang

4.8.3.1 Hidrokarbon

Emisi HC terbentuk karena adanya molekul – molekul hidrogen dan karbon yang tidak terbakar sempurna selama pembakaran berlangsung, yang disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu jumlah excess air, panjang ruang bakar, waktu pembakaran, dan kecepatan rambat nyala api. Keberadaan HC seiring terbentuknya CO, karena keberadaannya menunjukkan terjadinya ketidaksempurnaan oksidasi hidrogen dan karbon selama pembakaran.

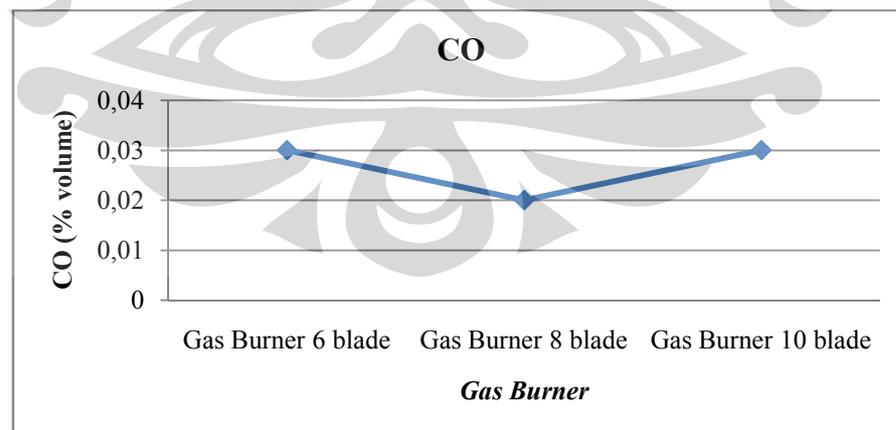


Gambar 4.4 Grafik HC

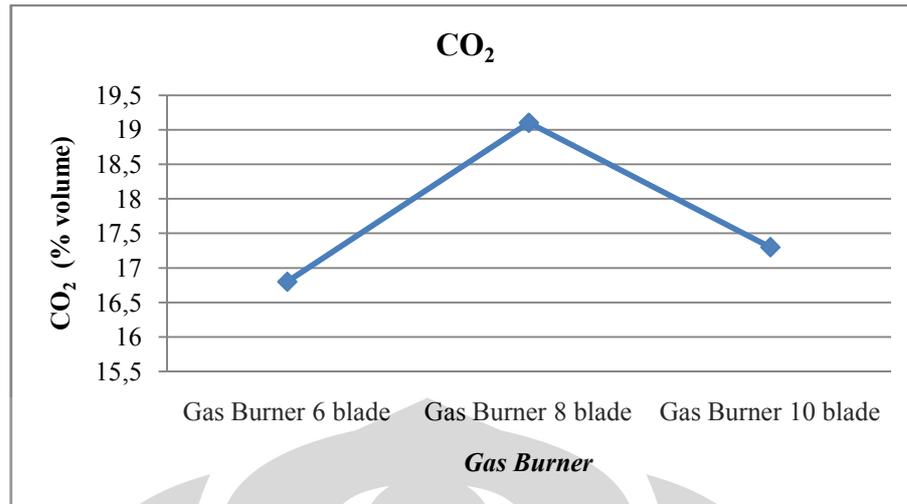
Dari grafik pembentukan HC terlihat pembentukan HC pada masing-masing gas burner berkisar di antara 20-24 ppm. Jumlah yang masih tergolong kecil dibandingkan emisi standar kendaraan bermotor dengan kandungan HC 700 ppm.

4.8.3.2 Karbon Monoksida dan Karbon Dioksida

Gas Karbon Monoksida (CO) dihasilkan oleh pembakaran yang tidak sempurna akibat dari kekurangan oksigen pada pembakaran. Pembentukan CO akan berbanding terbalik dengan pembentukan CO₂. Dengan makin bertambahnya pembentukan gas CO₂ maka pembentukan gas CO makin berkurang. Pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 terdapat grafik pembentukan emisi CO dan CO₂.



Gambar 4.5 Grafik CO

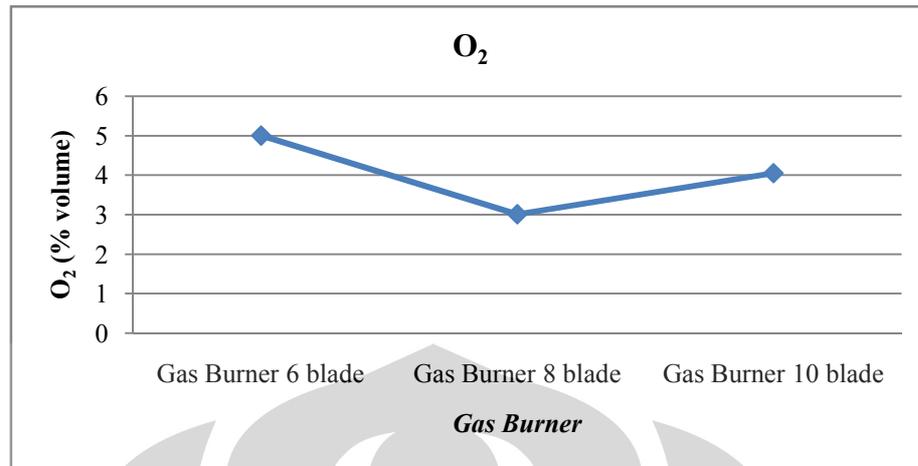


Gambar 4.6 Grafik CO₂

Kandungan gas karbon monoksida berkisar di antara 0,02-0,03 % volume. Jumlah yang masih tergolong aman jika dibandingkan dengan standar emisi gas buang kendaraan bermotor dengan kadar emisi gas CO 4,5% volume. Jumlah CO yang sangat kecil ini menandakan cukupnya suplai oksigen ke dalam ruang bakar sehingga pembakaran bahan bakar dapat berlangsung dengan sempurna dan membentuk gas karbon dioksida (CO₂). Dapat terlihat dari grafik gas burner dengan 8 blade menghasilkan emisi CO paling sedikit dengan kandungan 0,02 % volume.

Proses pembakaran yang sempurna dapat dilihat dari jumlah karbon dioksida yang terbentuk pada emisi gas buang. Pada Gambar 4.6 terlihat karbon dioksida terbanyak terbentuk pada pembakaran dengan gas burner 8 blade, sebesar 19,1 % Volume. Hal ini menandakan pembakaran paling sempurna terjadi pada gas burner 8 blade. Terlihat hubungan yang berbanding terbalik antara kandungan CO dan CO₂ pada emisi gas buang masing-masing gas burner. Pada gas burner dengan 8 blade terdapat kandungan CO terendah (0,02 % volume) namun dengan kandungan CO₂ tertinggi (19,1 % volume).

4.8.3.3 Oksigen

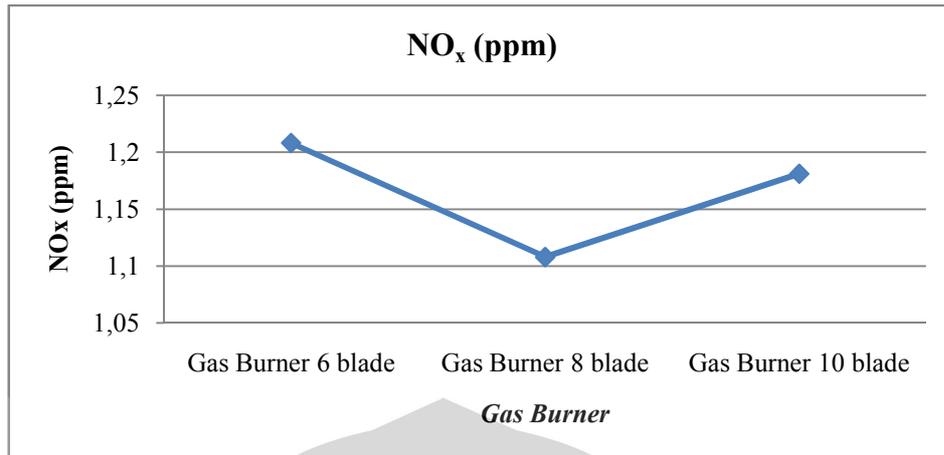


Gambar 4.7 Grafik O₂

Suplai Oksigen untuk pembakaran adalah *secondary air* yang bersumber dari blower. Terdapatnya Oksigen pada gas buang menunjukkan adanya oksigen berlebih pada proses pembakaran. Dilihat dari Gambar kandungan oksigen terendah terdapat pada gas burner dengan 8 blade (3,01 % volume), lalu gas burner dengan 10 blade (4,05 % volume), dan terakhir gas burner dengan 6 blade (5% volume). Kandungan oksigen pada gas buang ini juga dapat merepresentasikan proses pembakaran yang terjadi di dalam ruang pembakaran. Semakin sedikit kandungan oksigen pada gas buang maka semakin banyak oksigen yang bereaksi dalam proses pembakaran dan menghasilkan pembakaran yang semakin optimal.

4.8.3.4 Nitrogen Oksida (NO_x)

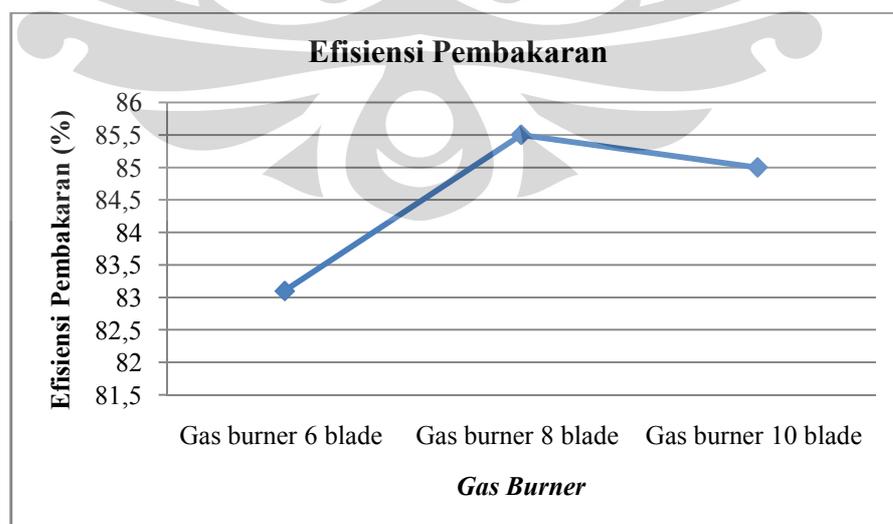
Nitrogen oksida terjadi karena reaksi molekul nitrogen dengan oksigen pada temperature yang tinggi (1800° C). dengan demikian NO_x terbentuk selama berlangsungnya pembakaran yang sempurna, karena pada pembakaran yang sempurna akan menghasilkan panas yang maksimal.



Gambar 4.8 Grafik No_x

Berdasarkan grafik terlihat pembentukan No_x yang sangat kecil dari hasil pembakaran, 1,108 ppm untuk gas burner dengan 8 blade, 1,181 ppm untuk gas burner dengan 10 blade, dan 1,208 ppm untuk gas burner dengan 6 blade. Hal ini disebabkan temperatur pembakaran yang belum terlalu tinggi sehingga belum terjadi proses pembentukan NO_x. Temperatur pembakaran di dalam ruang bakar dengan masing-masing gas burner berkisar di antara 700-850 °C, masih jauh di bawah temperatur pembentukan NO_x yakni 1800°C.

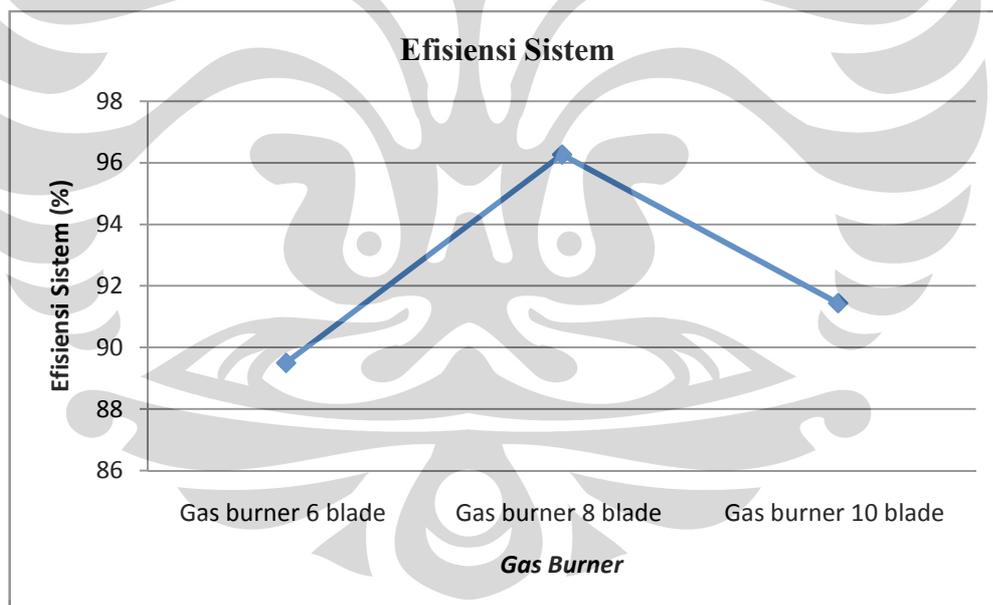
4.9 Efisiensi Pembakaran



Gambar4.9 Grafik Efisiensi Pembakaran

Efisiensi pembakaran merupakan efisiensi dari pembakaran yang terjadi pada masing-masing *gas burner*. Efisiensi ini dapat diketahui dari komposisi gas buang masing-masing *gas burner*. Efisiensi pembakaran tertinggi dimiliki *gas burner* dengan 8 *blade* (85,5%), disusul *gas burner* dengan 10 *blade* (85,1%), dan terakhir *gas burner* dengan 6 *blade* (83,1%). Faktor ini dipengaruhi oleh kadar oksigen yang ada pada gas buang. Semakin sedikit kadar oksigen yang terdapat pada komposisi gas buang maka semakin besar pula efisiensi pembakarannya. Pada *gas burner* dengan 8 *blade* terdapat komposisi oksigen paling kecil, yakni 3,1 persen dan ini berpengaruh pada efisiensi pembakaran paling besar, yakni 85,5 persen.

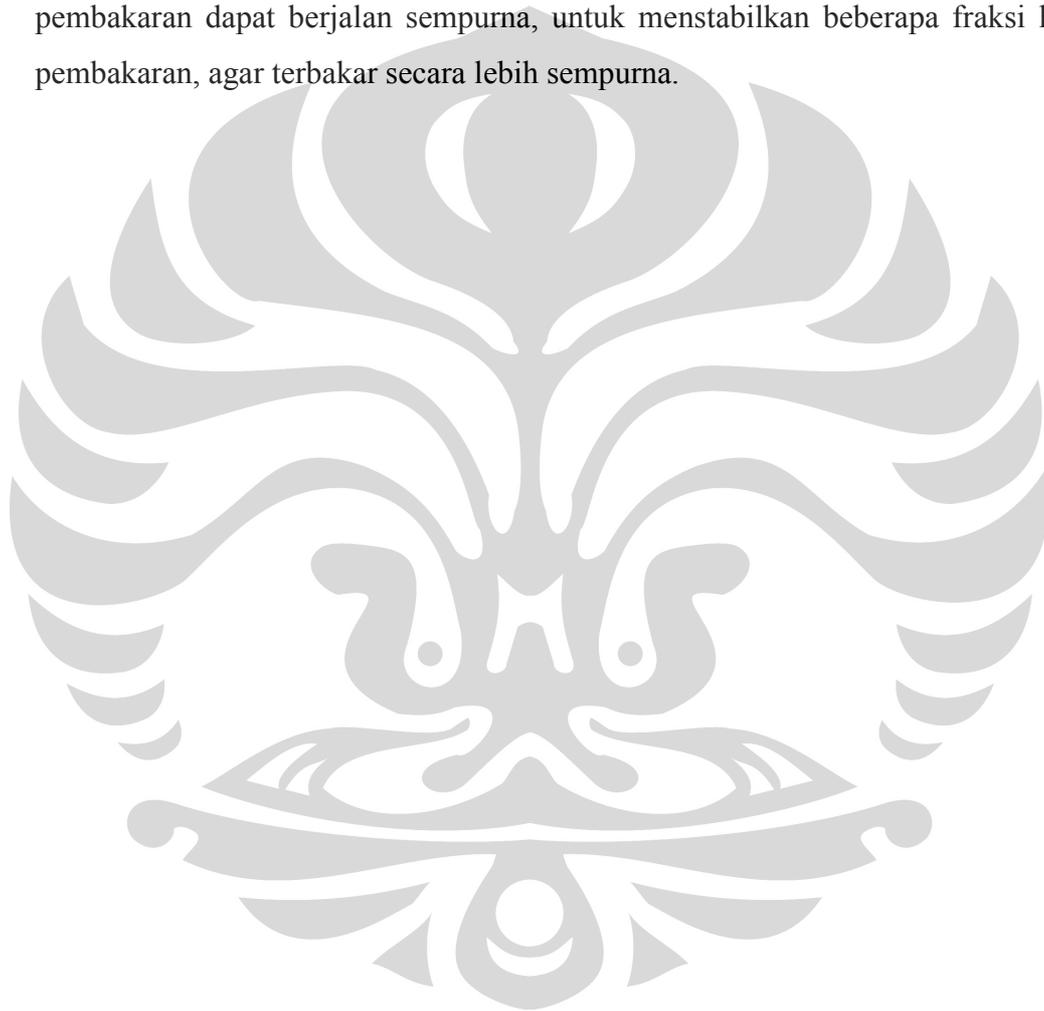
4.10 Efisiensi Sistem



Gambar4.9 Grafik Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem merupakan efisiensi keseluruhan sistem gasifikasi, yakni perbandingan dari kalor yang keluar dari sistem dengan kalor yang masuk ke dalam sistem. Efisiensi sistem tertinggi dimiliki *gas burner* dengan 8 *blade* (96,26%), disusul *gas burner* dengan 10 *blade* (91,44%), dan terakhir *gas burner*

dengan 6 *blade* (89,5%). Efisiensi tersebut terjadi karena berbagai parameter analisa yang telah dibahas sebelumnya, yaitu *gas burner* dengan 8 *swirl blade* memiliki temperatur api tertinggi, memiliki *heat release rate* yang paling baik, dan kadar emisi yang terbaik jika dibandingkan *swirl blade* lainnya. Hal ini dikarenakan *gas burner* dengan 8 *blade* mempunyai zona resirkulasi internal yang paling baik jika dibandingkan dengan 10 dan 6 *blade*, sehingga *gas burner* dengan 8 *blade* menyempurnakan pencampuran udara dengan bahan bakar agar pembakaran dapat berjalan sempurna, untuk menstabilkan beberapa fraksi hasil pembakaran, agar terbakar secara lebih sempurna.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisa yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Ditinjau dari segi kesetimbangan kalor dari sistem gasifikasi biomassa masing-masing gas burner, gas Burner dengan 8 blade merupakan yang terbaik dengan Heat Release Rate sebesar 11,15 kJ/s dan Heat Loss sebesar 0,458 kJ/s, kemudian gas burner dengan blade 10 dengan Heat Release Rate sebesar 10,6 kJ/s dan Heat Loss sebesar 1,048 kJ/s dan terakhir gas burner dengan 6 blade dengan Heat Release Rate sebesar 10,3 kJ/s dan Heat Loss sebesar 1,288 kJ/s
2. Terdapat hubungan linier antara besar temperatur api pada ruang bakar dengan Heat Release Rate yang diperoleh. semakin besar temperatur api di dalam ruang pembakaran maka semakin besar pula Heat Release Rate yang didapatkan.
3. Zona resirkulasi internal terbaik terdapat pada gas burner dengan 8 blade, hal ini ditandai dengan tingginya temperatur api yang berdampak kepada besarnya Heat Release Rate pada gas burner dengan 8 blade.
4. Gas buang dari hasil pembakaran pada masing-masing gas burner tergolong baik dengan kandungan CO maksimal 0,03 % volume (gas burner 6 dan 10 blade), kandungan HC maksimal 24 ppm (gas burner 8 blade), dan kandungan Nox maksimal 1,208 ppm (gas burner 6 blade).

5.2 Saran

Dari pengalaman selama penelitian, peneliti memberikan saran sebagai berikut :

1. Bahan bakar (tempurung kelapa) harus dalam kondisi kering agar proses gasifikasi di dalam *gasifier* dapat berjalan dengan baik.
2. Peralatan keselamatan penelitian seperti masker,kacamata,sepatu sangat diperlukan dalam melakukan penelitian karena kondisi di dalam laboratorium yang penuh akan gas beracun.

3. Melakukan proses pemeliharaan terhadap sistem gasifikasi setiap satu bulan sekali.
4. Penyediaan alat *Gas Analyzer* di laboratorium untuk kepentingan pengujian komposisi gas.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Riset Pengembangan Energi Alternatif Masih Rendah*. Antara News. Diakses tanggal 16 Maret 2010 pukul 20:39 WIB
<http://www.antaraneews.com/berita/1268746762/riset-pengembangan-energi-alternatif-masih-rendah>.
- [2] Budiono, chayun., *Tantangan dan Peluang Usaha Pengembangan Energi Terbarukan di Indonesia*, Konvensi Kelistrikan Indonesia 2003, Jakarta , Oktober 2003, hal 3.
- [3] Reed, Thomas B. Das, Agus., *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*, The Biomass Energy Foundation Press: Colorado, 1988, Chapter 1.
- [4] Rajvanshi, Anil K., *Biomass Gasification*, 1986, hal 4
- [5] Rajvanshi, Anil K., *Biomass Gasification*, 1986, hal 5-6
- [6] Putra, Adam Sina., *Evaluasi Karakteristik Pembakaran Gas Hasil Biomassa dengan metoda 3D Computational Fluid Dynamic*. Skripsi. Depok (2004), hal 7-8
- [7] Putra, Adam Sina., *Evaluasi Karakteristik Pembakaran Gas Hasil Biomassa dengan metoda 3D Computational Fluid Dynamic*. Skripsi. Depok (2004), hal 13-16
- [8] Ir. Syamsir A. Muin. *Pesawat – Pesawat Konversi Energi I*.

- [9] Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*. Mc Graw Hill. 2000
- [10] Rajvanshi, Anil K, *Biomass Gasification*, 1986, hal 3
- [11] Bossel, Ulf., *Well-to-Wheel Studies, Heating Values, and the Energy Conservation Principle*, 2003, European Fuel Cell Forum, hal 3
- [12] Vidian, Fajri., *Gasifikasi Tempurung Kelapa Menggunakan Updraft Gasifier pada Beberapa Variasi Laju Alir Udara Pembakaran*, *Jurnal Teknik Mesin* Vol.10, no. 2, Oktober 2008., hal 90
- [13] *What is Biomass*. Biomass energy Centre. Diakses tanggal 16 Maret 2010 pukul 20:39 WIB <http://www.antaranews.com/berita/1268746762/riset-pengembangan-energi-alternatif-masih-rendah>.
- [14] Sivakumar. Mohan, Khrisna M., *Performance analysis of downdraft gasifier for agriwaste biomass materials*, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 3 No. 1 (Jan 2010)
- [15] http://www.renogy.com/images/BiomassCycleChart_001.gif
- [16] <http://pramukasmansaka.files.wordpress.com/2009/08/tempurung-kelapa.jpg>
- [17] Stassen, Hubert E. 1942. "Small-scale biomass gasifiers for heat and power: a global review". Hal 13
- [18] Jaafar, M N M. *The Influence of Variable Vane Angle Air Swirler on Reducing Emissions From Combustion Process*
- [19] Higan, Christopher. van der Burg, Marten J. *Gasification*. Gulf Professional Publishing: Colorado, 2003

Data Hasil Percobaan

Gas Burner 6 swirl blade

| No | Temperatur Api (°C) (T1) | Temperatur Api (°C) (T2) | Tin Air (°C) | Tout Air (°C) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| I | 750 | 600 | 32 | 41 |
| II | 770 | 630 | 28 | 38 |
| III | 780 | 660 | 30 | 40 |
| IV | 760 | 605 | 25 | 34 |

| Komposisi Gas Buang | Jumlah | T Gas Buang (°C) |
|------------------------|--------|---------------------|
| HC (ppm) | 20 | 490 |
| CO (%vol) | 0,03 | |
| CO ₂ (%vol) | 16,8 | |
| O ₂ (%vol) | 5 | |
| NO _x (%vol) | 1,2 | |

Gas Burner 8 swirl blade

| No | Temperatur Api (°C) (T1) | Temperatur Api (°C) (T2) | Tin Air (°C) | Tout Air (°C) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| I | 780 | 665 | 30 | 40 |
| II | 800 | 700 | 30 | 40 |
| III | 790 | 690 | 30 | 40 |
| IV | 810 | 715 | 25 | 36 |

| Komposisi Gas Buang | % Volume Gas Buang | T Gas Buang (°C) |
|------------------------|--------------------|---------------------|
| HC (ppm) | 24 | 475 |
| CO (%vol) | 0,02 | |
| CO ₂ (%vol) | 19,1 | |
| O ₂ (%vol) | 3,01 | |
| NO _x (%vol) | 1,1 | |

Gas Burner 10 swirl blade

| No | Temperatur Api (°C) (T1) | Temperatur Api (°C) (T2) | Tin Air (°C) | Tout Air (°C) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| I | 770 | 660 | 32 | 42 |
| II | 780 | 670 | 32 | 41 |
| III | 800 | 695 | 32 | 42 |
| IV | 790 | 690 | 28 | 38 |

| Komposisi Gas Buang | % Volume Gas Buang | T Gas Buang (°C) |
|------------------------|--------------------|------------------|
| HC (ppm) | 22 | 450 |
| CO (%vol) | 0,03 | |
| CO ₂ (%vol) | 17,3 | |
| O ₂ (%vol) | 4,5 | |
| NO _x (%vol) | 1,2 | |

