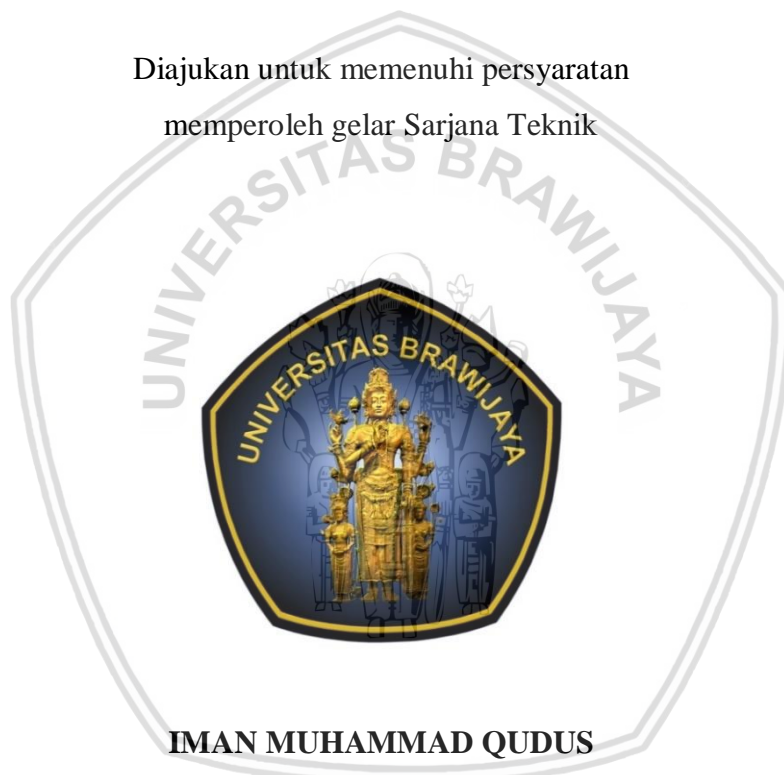


**PENGARUH PENAMBAHAN BATU BARA TERHADAP PROSES
GASIFIKASI *UPDRAFT* TANDAN KELAPA SAWIT PADA
TEMPERATUR 700°C**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



IMAN MUHAMMAD QUDUS

NIM. 125060201111010

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018





JUDUL SKRIPSI :

PENGARUH PENAMBAHAN BATU BARA TERHADAP PROSES GASIFIKASI
UPDRAFT TANDAN KELAPA SAWIT PADA SUHU 700°C

Nama Mahasiswa : Iman Muhammad Qudus

NIM : 125060201111010

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING :

Dosen Pembimbing : Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., MT.

TIM PENGUJI :

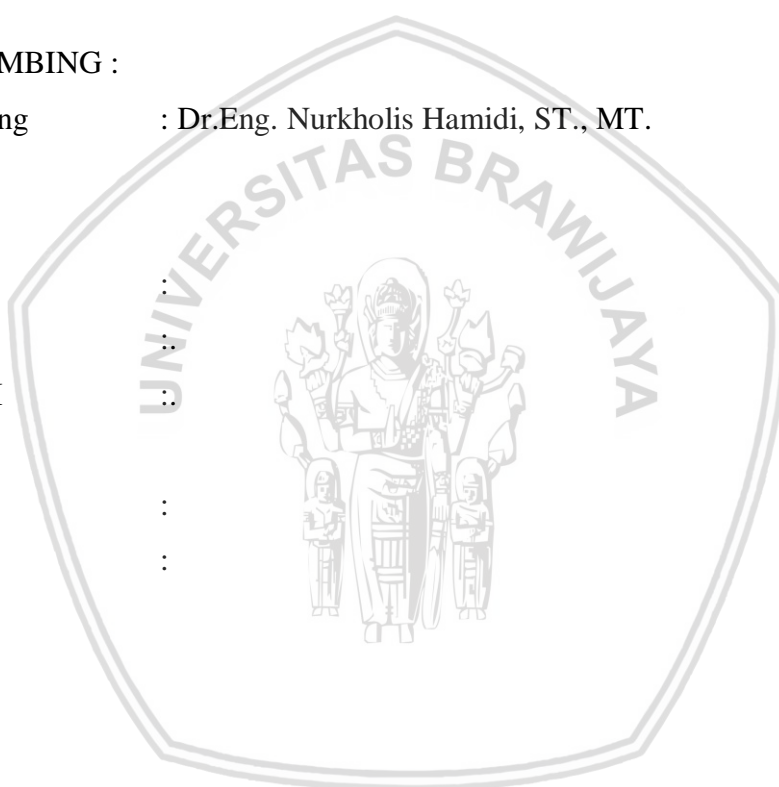
Dosen Penguji I :

Dosen Penguji II :

Dosen Penguji III :

Tanggal Ujian :

SK :





*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada :
Bapak dan Ibu Tercinta*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala limpahan rahmat, nikmat, dan karunia-Nya yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul, **“Pengaruh Penambahan Batu Bara Pada Proses Gasifikasi *Updraft* tandan kelapa sawit dengan suhu 700°C”** dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad Shalallaahu 'Alayhi Wasallam.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat bagi mahasiswa jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang untuk memperoleh gelar sarjana teknik.

Dalam kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu, membimbing, memberi petunjuk, dan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini :

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
3. Ibu Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Eng Nurkholis Hamidi, ST., M Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan motivasi, saran, dan bimbingan yang sangat berguna sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi tepat waktu.
5. Ibu Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konversi Energi.
6. Bapak Dr. Eng Nurkholis Hamidi, ST., M Eng. yang telah membantu penulis dalam merancang dan mempersiapkan reaktor gasifikasi yang digunakan.
7. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko ST.,M.Eng. Selaku dosen pembimbing akademik.
8. Seluruh Dosen Pengajar, Staf Administrasi, dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya untuk mendukung penyusunan skripsi ini.
9. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sudigdo dan Ibu Dwi arti serta Kakak Ari Sekar Wangi dan sang adik Sintia Sitti Aisah. Terimakasih tak terhingga atas seluruh doa, nasihat, inspirasi, dan dukungan yang telah diberikan.

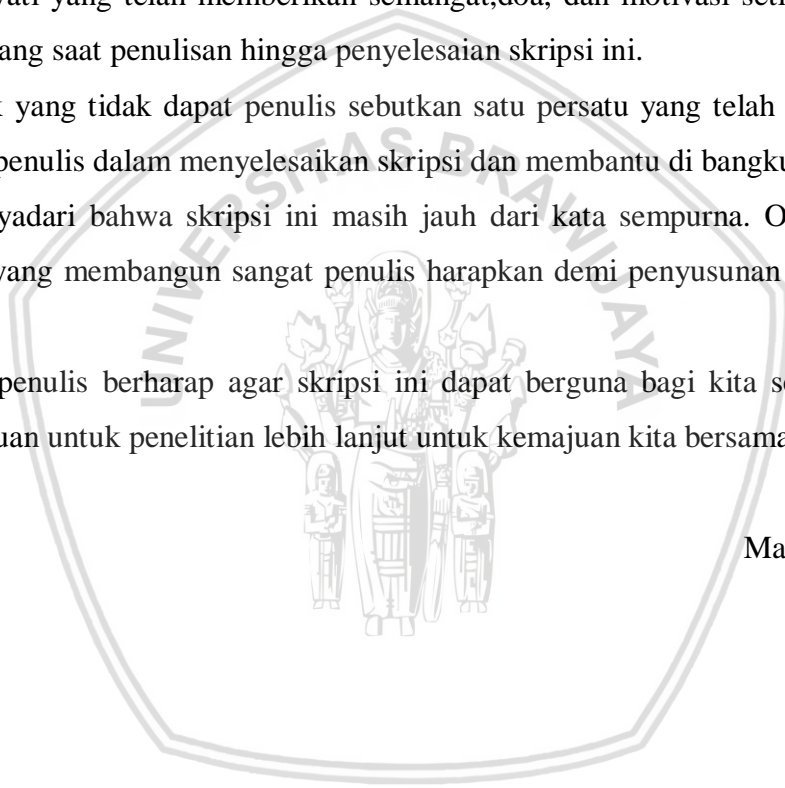
10. Teman-teman seperjuangan skripsi, Achmad Rofiudin, dan Noviendo Tria. Yang sudah membantu menyelesaikan skripsi ini.
11. Teman-teman asisten Laboratorium Motor Bakar Teknik Mesin Universitas Brawujaya yang mempersilahkan penulis menyelesaikan pengujian ini di lab motor bakar.
12. Mas A'yan Sabit'ah sebagai mahasiswa pasca sarjana yang mau menyempatkan waktunya untuk menyelesaikan skripsi ini
13. Teman-teman seperjuangan Mesin 2012 'ADM12AL', terimakasih atas solidaritas, kebersamaan, dan semua memori yang tak akan pernah terlupakan.
14. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
15. Vivi Rismawati yang telah memberikan semangat, doa, dan motivasi setiap kali penulis merasa bimbang saat penulisan hingga penyelesaian skripsi ini.
16. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi dan membantu di bangku perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi penyusunan skripsi dengan baik.

Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut untuk kemajuan kita bersama.

Malang, Mei 2018

Penulis





DAFTAR ISI

	Halaman.
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
SUMMARY	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Kelapa Sawit	6
2.2.1 Perkebunan Kelapa Sawit Di Kalimantan	7
2.2.2 Limbah Perkebunan Kelapa Sawit	7
2.2.3 Tandan Kosong Kelapa Sawit	9
2.3 Batu Bara	12
2.3.1 Klasifikasi Batu Bara	13
2.4 Gasifikasi	15
2.4.1 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Gasifikasi	16
2.4.2 Perhitungan Dasar Gasifikasi	18
2.4.3 Proses-Proses Pada Reaktor Gasifikasi	22
2.5 Jenis Reaktor	25
2.6 Hipotesa	27
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Metodologi Penelitian	29
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	29
3.3 Variabel Penelitian	29

3.4 Alat dan Bahan Penelitian	30
3.4.1 Bahan Penelitian.....	30
3.5 Prosedur Penelitian.....	38
3.6 Skema Penelitian.....	40

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

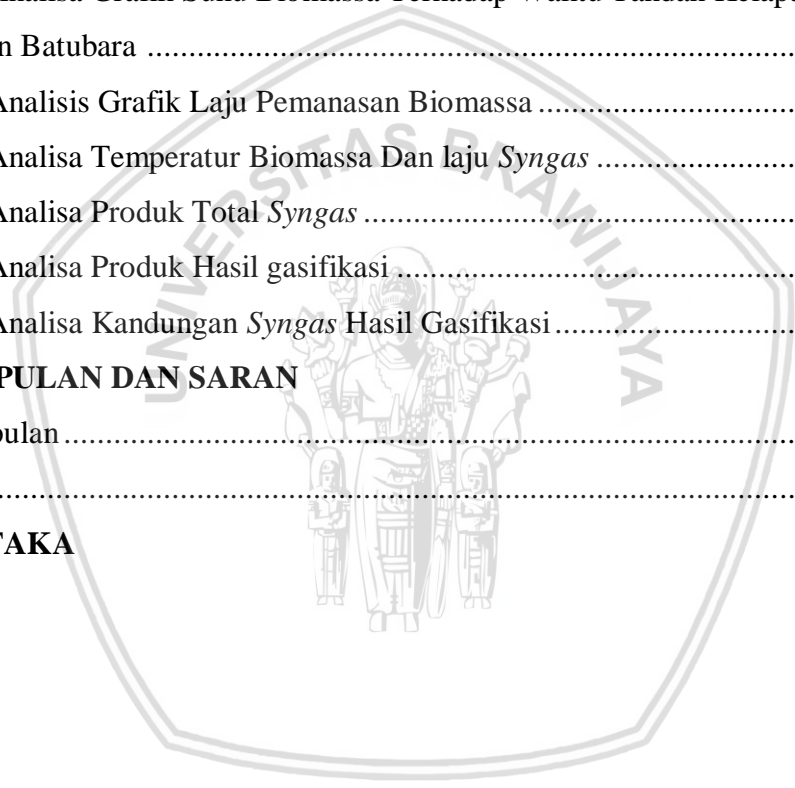
4.1 Pengolahan Data	41
4.2 Perhitungan Laju Pemanasan.....	41
4.3 Data Hasil Penelitian.....	42
4.4 Pembahasan Dan Analisa Grafik	43
4.4.1 Analisa Grafik Suhu Biomassa Terhadap Waktu Tandan Kelapa Sawit Dengan Batubara	43
4.4.2 Analisis Grafik Laju Pemanasan Biomassa	44
4.4.3 Analisa Temperatur Biomassa Dan laju <i>Syngas</i>	45
4.4.4 Analisa Produk Total <i>Syngas</i>	46
4.4.5 Analisa Produk Hasil gasifikasi	47
4.4.6 Analisa Kandungan <i>Syngas</i> Hasil Gasifikasi.....	48

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	50
5.2 Saran.....	50

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Nilai Kalor Dari Limbah Padat Kelapa Sawit.....	8
Tabel 2.2	Komposisi elemen dari berbagai tipe Batu bara.....	14





DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi Ilmiah Kelapa Sawit.....	6
Gambar 2.2	Sebaran Perkebunan Kelapa Sawit Di Kalimantan Selatan.....	7
Gambar 2.3	biomassa kelapa sawit dan seratnya	9
Gambar 2.4	Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	9
Gambar 2.5	Struktur kimia selulosa	10
Gambar 2.6	Struktur kimia hemiselulosa	11
Gambar 2.7	Struktur kimia lignin.....	11
Gambar 2.8	Rumus Bangun Batu Bara.....	13
Gambar 2.9	Batu Bara Antrasit.....	14
Gambar 2.10	Batu Bara Bitumen Dan Subitumin.....	15
Gambar 2.11	Batu Bara Lignit	15
Gambar 2.12	Laju Alir Udara	19
Gambar 2.13	Reaksi Pembentukan Radikal Bebas	25
Gambar 2.14	<i>Updraft Gasifier</i>	26
Gambar 2.15	<i>Downdraft Gasifier</i>	27
Gambar 3.1	Tandan Kelapa Sawit.....	30
Gambar 3.2	Batu Bara	31
Gambar 3.3	Tungku/ <i>Furnace</i>	32
Gambar 3.4	<i>Thermocontroller</i>	32
Gambar 3.5	<i>Advantech USB-4718 Data Logger</i>	33
Gambar 3.6	Laptop.....	33
Gambar 3.7	Tabung Elemyer	34
Gambar 3.8	Tabung Volume	34
Gambar 3.9	<i>Sampling Bag</i>	35
Gambar 3.10	<i>Oven</i>	35
Gambar 3.11	<i>Moisture analyzer</i>	36
Gambar 3.12	Timbangan elektrik	36
Gambar 3.13	<i>Gas Chromatography (GC)</i>	37
Gambar 3.14	Stopwatch.....	38
Gambar 3.15	Skema Alat Pengujian.....	38

Gambar 4.1 Hubungan suhu terhadap waktu gasifikasi tandan kosong kelapa sawit 43

Gambar 4.2 Grafik Hubungan Laju Pemanasan Terhadap Presentase Penambahan Batubara44

Gambar 4.3 Grafik Volume Total gas Hasil gasifikasi.....46

Gambar 4.4 Grafik Komposisi TAR Pada Gasifikasi Tandan Kelapa Sawit Tanpa Batubara Dan Dengan Batubara.....47

Gambar 4.5 Grafik Komposisi arang+abu pada gasifikasi tandan kelapa sawit tanpa batu bara dan penambahan kadar batu bara secara bertahap pada suhu 700°C....47

Gambar 4.6 Grafik Kandungan *Syngas* Pada dengan Suhu 700°C 48



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Hasil Komposisi Gas

Lampiran 2 Pengolahan Data



RINGKASAN

Iman Muhammad Qudus, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2018, Pengaruh Penambahan Batu Bara Terhadap Proses Gasifikasi *Updraft* Tandan Kelapa Sawit Pada Suhu 700°C. Dosen Pembimbing: Nurkholis Hamidi.

Gasifikasi merupakan proses yang menggunakan panas untuk merubah biomassa padat atau padatan berkarbon lainnya menjadi gas sintetik “seperti gas alam” yang mudah terbakar. Melalui proses gasifikasi, kita bisa merubah hampir semua bahan organik padat menjadi gas bakar yang bersih, netral. Gas yang dihasilkan pada gasifikasi disebut gas produser yang kandungannya didominasi oleh gas CO, H₂, dan CH₄. Biomassa adalah bahan organik yang biasa dimanfaatkan untuk sumber energi terbarukan. Pengolahan biomassa yang tepat akan meningkatkan kualitas dari energi yang dihasilkan. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan memvariasikan faktor faktor yang dapat mempengaruhi produk Gasifikasi. Penggunaan batu bara juga dapat mempengaruhi produk akhir gasifikasi, karena batu bara dapat mempercepat reaksi dan memiliki kalori pembakaran yang tinggi. Salah satu batu bara yang dapat digunakan adalah batu bara muda. Mesut Gur, et.al., (2017) mengatakan dalam penelitiannya meneliti tentang karakteristik lignit untuk proses gasifikasi batu bara. Dimana *Syngas* yang dihasilkan selama tahap gasifikasi ditandai dengan nilai kalorinya yang meningkat sebanyak 6-9 MJ / Nm³, kandungan karbon monoksida 23-33 (vol)%, lebih banyak dibandingkan dengan kandungan hidrogen 20-30 (vol)%. Penelitian ini memiliki beberapa tujuan antara lain pengaruh yang terjadi pada saat proses dan hasil *syngas* yang terjadi pada gasifikasi tandan kelapa sawit dengan suhu 700°C.

Penelitian ini dilakukan dengan metode ekperimental nyata. Dengan variabel bebas penambahan batu bara sebesar 10%; 30%; dan 50 % dan pengambilan sampel tiap temperatur pada waktu 120 menit pada saat mencapai suhu 700°C. Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah biomassa yang digunakan berat total 200 gram, dengan presentase (10%:BB:90%TKKS), (30%BB:70%TKKS), (50%BB:50%TKKS). Dan variabel terikat Laju pemanasan, Volume gas total, Presentase berat (wt%) gas total Kandungan gas hasil gasifikasi.

Penelitian ini menghasilkan data sebagai berikut : laju peningkatan temperatur dengan menggunakan batu bara lebih cepat daripada tanpa menggunakan batu bara. Masing masing temperatur memiliki titik optimum laju aliran masing masing. Produk gas yang dihasilkan semakin meningkat, produk tar yang dihasilkan lebih sedikit daripada tanpa batu bara produk char yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan dengan tanpa batu bara. Komposisi CH₄ dan H₂ pada produk gas mengalami peningkatan sedangkan komposisi gas CO₂ menurun dibandingkan dengan tanpa batu bara. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk membuat instalasi gasifikasi yang lebih baik dan menggunakan ala uji komposii yang lebih baik agar data yang didapatkan semakin banyak.

Kata kunci: Gasifikasi, Tandan Kelapa Sawit, Batu Bara, temperature.

SUMMARY

Iman Muhammad Qudus, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Universitas Brawijaya, May 2018, *Effect of Coal Addition on Gasification Process Updraft Oil Palm Bunches At 700OC Temperature*. Supervisor: Nurkholis Hamidi

Gasification is a process that uses heat to convert solid biomass or other carbon solids into synthetic "flammable" natural gas. Through the process of gasification, we can convert almost all solid organic matter into clean, neutral fuel gas. The gas produced in gasification is called a producer gas whose content is dominated by CO, H₂, and CH₄ gases. Biomass is an organic material commonly used for renewable energy sources, biomass processing will improve the quality of the produced energy. Several studies have been conducted by varying the factor factors that may affect the product gaification. coal may also affect gasification end products, as coal can speed up reactions and have high burning calories. One of the coal that can be used is lignite coal. Mesut Gur, et.al. , (2017) said in his research to examine the characteristics of lignite for coal gasification process. Where Syngas generated during the gasification stage is marked with increased caloric value of 6-9 MJ / Nm³, carbon monoxide content of 23-33 (vol)%, more than the hydrogen content of 20-30 (vol)%. This study has several objectives, among others, the influence that occurs during processing and syngas results that occur in the gasification of oil palm bunches with a temperature of 700°C.

This research is done by real experimental method. With independent variables 10% increase of coal; 30%; and 50% and sampling each temperature at 120 minutes at the time of reaching the 700°C temperature. The controlled variables in this study were the biomass used in total weight of 200 gram, with percentage (10%: BB: 90% TKKS), (30% BB: 70% TKKS), (50% BB: 50% TKKS). And the dependent variable Heating rate, Total gas volume, Percentage weight (wt%) of total gas Gas content.

This study produces the following data like : the rate of increase in temperature by using coal faster than without using coal. Each temperature has its own optimum flow rate. The resulting gas product increases, the resulting tar product is less than without char coal produced more than without coal. Compositions of CH₄ and H₂ in the gas product increased while the CO₂ gas composition decreased compared with no coal. In the next study it is suggested to make a better gasification installation and use a better composite test method to get more data.

Keywords: Gasification, Palm's Cluster, Coal, Temperature.

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH PENAMBAHAN BATUBARA TERHADAP PROSES
GASIFIKASI *UPDRAFT* TANDAN KELAPA SAWIT DENGAN SUHU

700°C

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

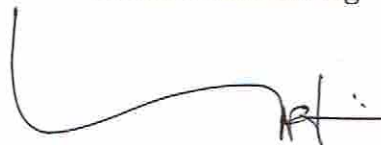


IMAN MUHAMMAD QUDUS

NIM. 125060201111010

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 13 Juli 2018

Dosen Pembimbing



Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M Eng.
NIP. 19740121 199903 1 001



Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

**PENGARUH PENAMBAHAN BATU BARA TERHADAP PROSES
GASIFIKASI *UPDRAFT* TANDAN KELAPA SAWIT DENGAN SUHU
700°C**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



IMAN MUHAMMAD QUDUS

NIM. 125060201111010

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2018

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Penambahan Batu Bara Terhadap Proses Gasifikasi *Updraft* Tandan Kelapa Sawit Dengan Suhu 700°C

Nama Mahasiswa : Iman Muhammad Qudus

NIM : 125060201111010

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING:

Dosen Pembimbing : Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng.

TIM PENGUJI :

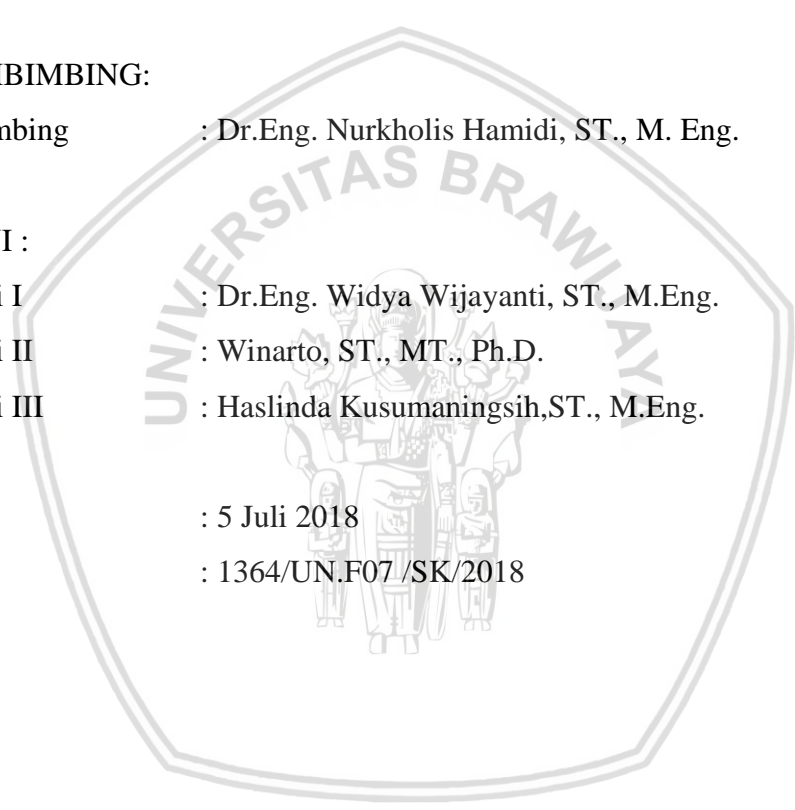
Dosen Penguji I : Dr.Eng. Widya Wijayanti, ST., M.Eng.

Dosen Penguji II : Winarto, ST., MT., Ph.D.

Dosen Penguji III : Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 5 Juli 2018

SK : 1364/UN.F07 /SK/2018





*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada :
Bapak dan Ibu Tercinta*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan area dengan perkebunan kelapa sawit yang sangat luas, khususnya di Kalimantan Selatan dengan luas kurang lebih 372.720 Ha. Lahan area perkebunan kelapa sawit di Kalimantan Selatan terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan kebijakan pemerintah daerah yang mendukung pembukaan lahan baru untuk perkebunan. Namun limbah perkebunan kelapa sawit masih memiliki penanganan yang minim terlebih lagi belum adanya penyuluhan dari pemerintah kepada masyarakat untuk memanfaatkan limbah dari kelapa sawit menjadi energi alternatif.

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintetik, baik berupa produk maupun buangan. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, limbah hutan, tinja dan kotoran ternak. Selain digunakan untuk tujuan primer bahan pangan, pakan ternak, miyak nabati, bahan bangunan dan sebagainya, biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar). Umum yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya.

Indonesia memiliki sumber biomassa yang berlimpah. Di antara sumber-sumber biomassa yang potensial untuk dimanfaatkan tersebut adalah limbah dari pertanian, seperti sekam dan jerami padi, ampas tebu, dan limbah pengolahan minyak sawit. Limbah pengolahan sawit berupa tandan kosong, sabut, cangkang, dan lumpur (*sludge*). Sabut dan cangkang sawit telah dimanfaatkan sebagai sumber energi boiler dalam pabrik pengolahan minyak sawit. Sementara itu, lumpur dan tandan kosong belum dimanfaatkan. Dengan pertumbuhan perkebunan sawit yang terus meningkat, produksi limbah juga semakin meningkat. Pemanfaatan limbah ini menarik ditinjau dari dua aspek, yaitu peningkatan pasokan energi yang bersih dan yang kedua adalah pengendalian limbah. Limbah sawit yang tidak dikelola dengan baik ini memiliki potensi dalam kontribusi pemanasan global antara lain melalui emisi metana. Pada penelitian ini, akan dikaji melalui suatu simulasi pemanfaatan tandan kosong sawit sebagai sumber energi hidrogen melalui proses hidrogen. Simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan model keseimbangan termodinamika.

Gasifikasi merupakan proses konversi energi yang mengubah biomassa padat menjadi biogas yang nantinya menjadi sumber energi bagi kehidupan manusia. Dalam berbagai sumber, dijelaskan bahwa gasifikasi biomassa merupakan pembangkit energi yang terbarukan dan lebih efisien dibandingkan energi fosil yang saat ini telah sangat menipis jumlahnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian cara untuk meningkatkan hasil dari gasifikasi biomassa. Dengan bantuan katalis diharapkan dapat mempercepat proses dekomposisi termal pada biomassa sehingga gas yang dihasilkan pada proses gasifikasi semakin optimal.

Dalam tahapan pada proses gasifikasi, pada gasifier objek akan direduksi oleh steam dan CO₂ menghasilkan gas H₂ dan CO. Peningkatan jumlah atau laju steam mengakibatkan penurunan gas CO pada gas produk, namun akan meningkatkan kandungan H₂ dan CO₂ melalui reaksi geser atau *shift reaction*.

Batu bara muda memiliki nilai kalori pembakaran yang rendah, serta kadar sulfur dan airnya yang tergolong tinggi. Karena itu pemanfaatan batu bara muda sebagai bahan bakar tergolong kurang ekonomis. Bila sumber energi ini dibawa ke lokasi yang jauh dari area tambang, maka biaya transportasinya menjadi lebih mahal. Ketika batu bara muda dibakar, banyak energi yang terbuang untuk menguapkan air, sedangkan nilai kalori yang diperoleh relative rendah. Selain itu, kandungan sulfur yang tinggi akan menjadi gas pencemar. Oleh karena itu diperlukan penanganan untuk memaksimalkan gas hasil pembakaran dari batu bara muda.

Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Gasifikasi

1. Kandungan energi bahan bakar yang digunakan
Bahan bakar dengan kandungan energi yang tinggi akan memberikan pembakaran gas yang lebih baik.
2. Kandungan air dari bahan bakar yang digunakan
Bahan bakar dengan tingkat kelembaban yang rendah akan lebih mudah digasifikasikan daripada bahan bakar dengan tingkat kelembaban yang lebih tinggi.
3. Bentuk dan ukuran bahan bakar
Ukuran bahan bakar yang lebih kecil memerlukan fan/blower dengan tekanan yang lebih tinggi.
4. Distribusi ukuran bahan bakar
Distribusi ukuran bahan bakar yang tidak seragam akan menyebabkan bahan bakar yang digunakan lebih sulit terkarbonisasi, dan mempengaruhi proses gasifikasi.
5. Temperatur reaktor gasifikasi

Temperatur reaktor ketika proses gasifikasi berlangsung sangat mempengaruhi produksi gas yang dihasilkan. Untuk itu reaktor gasifikasi perlu diberi insulasi untuk mempertahankan temperatur didalam reaktor tetap tinggi.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dirumuskan sebuah masalah yaitu:

1. Bagaimana volume *syngas* yang terjadi saat penambahan batu bara saat proses gasifikasi tandan kelapa sawit terjadi?
2. Bagaimana laju produksi *syngas* yang terjadi saat penambahan batu bara saat proses gasifikasi tandan kelapa sawit terjadi?
3. Bagaimana laju pemanasan yang terjadi ketika proses gasifikasi tandan kelapa sawit berlangsung dengan penambahan batubara?
4. Bagaimana penambahan batubara pada hasil komposisi *syngas*?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat batasan-batasan antara lain yaitu:

1. Dalam penelitian ini data yang diambil berupa laju pemanasan selama gasifikasi, volume total gas dan kandungan gas hasil gasifikasi.
2. Biomassa yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit
3. Batu bara yang digunakan adalah Batu bara Muda
4. Gasifikasi dengan metode *updraft*
5. Temperatur awal gasifikasi adalah $25^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}$

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penambahan jumlah batu bara muda terhadap gasifikasi *updraft* tandan kosong kelapa sawit pada temperatur 700°C .

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat menerapkan ilmu yang didapat dari perkuliahan
2. Menghasilkan data penelitian yang nantinya dapat dibandingkan dengan proses proses gasifikasi yang lain
3. Untuk menjadi rujukan atau referensi dalam penelitian selanjutnya agar perkembangan teknologi gasifikasi semakin maju

4. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pengetahuan masyarakat tentang pemanfaatan biomassa agar dapat menjadi energi terbarukan yang memiliki banyak keuntungan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai proses gasifikasi untuk menghasilkan *syngas* telah banyak dilakukan oleh peneliti, masing-masing mempunyai karakteristik dan tujuan yang berbeda. Berikut beberapa penelitian proses gasifikasi yang telah dilakukan dan digunakan sebagai dasar untuk mendukung pelaksanaan penelitian ini.

Menurut Zhang R, *et.al* (2005) sintesis gas yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa mengandung hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), air (H_2O), nitrogen (N_2), metana (CH_4), dan melacak sejumlah hidrokarbon lainnya.

Hardianto, *et, al* (2010) pembakaran biomassa dengan proses perlakuan panas pada 200-300 $^{\circ}C$, serta bertekanan atmosfer tanpa oksigen pada limbah padat menghasilkan nilai kalor pembakaran yang meningkat serta emisi SO_2 , CO dan CO_2 , yang dihasilkan rendah dengan meningkatkan densitas energi dan memperbaiki karakteristiknya sehingga bahan bakar padat bersifat ramah lingkungan yang ditandai dengan kandungan emisi gas buang yang tidak membahayakan bagi kesehatan dan lingkungan.

Mesut Gur, *et. al* (2017) mengatakan dalam penelitiannya meneliti tentang karakteristik lignit untuk proses gasifikasi batu bara. Dimana *syngas* yang dihasilkan selama tahap gasifikasi ditandai dengan nilai kalorinya yang meningkat sebanyak 6-9 MJ/Nm^3 , kandungan karbon monoksida 23-33 (vol)%, lebih banyak dibandingkan dengan kandungan hidrogen 20-30 (vol)%.

Slamet Raharjo (2012) dalam penelitiannya dengan eksperimen *thermogravimetri* terhadap 3 jenis limbah padat kelapa sawit untuk menganalisis karakteristik gasifikasi limbah padat kelapa sawit menyatakan bahwa, kandungan *volatile matter* (VM) TKS lebih besar dari serat dan cangkang, sehingga produksi gas H_2 dari TKS lebih tinggi dibandingkan cangkang dan serat, sedangkan kandungan *fix carbon* (FC) dan *fuel ratio* dalam cangkang lebih besar dari tandan kosong sawit (TKS), mengakibatkan produksi gas CO cangkang kelapa sawit lebih besar dibanding tandan kosong kelapa sawit (TKS).

Dari penelitian didapatkan data hasil *syngas* limbah kelapa sawit yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.

Sampel		Limbah padat kelapa sawit			Sampel		Limbah padat kelapa sawit		
		Cangkang	Serat	TKS			Cangkang	Serat	TKS
Moisture	wt %	4,52	6,69	6,00	C	wt	49,37	45,08	44,10
VM	Air dry	82,86	84,00	84,92	H	%	5,65	6,10	6,41
FC		11,02	2,71	1,48	N	d.a.f	0,44	1,61	1,21
Ash		1,61	8,40	7,59	S		0,02	0,15	0,11
Fuel ratio		0,13	0,03	0,02	O		44,52	47,06	48,17
					H/C		1,37	1,62	1,67

(a)

(b)

Gambar 2.1 Hasil analisis gasifikasi limbah kelapa sawit (a) Hasil analisis *proximate*; dan (b) Hasil analisis *ultimate*

Sumber: Raharjo, S (2012)

Gas	Konsentrasi (Vol.%) pada 900 °C		
	Cangkang	Serat	TKS
H ₂	7,6	7,4	8,2
CO	62,4	60,7	60,2

Gambar 2.2 Konsentrasi bahan bakar gas hasil gasifikasi limbah kelapa sawit

Sumber: Raharjo, S (2012)

Selain itu, dalam penelitian yang dilakukan oleh Yan Zang et al (2016) meneliti tentang Co-Gasifikasi batu bara dan biomassa dengan *fixed bed reactor*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi campuran biomassa dan batu bara terhadap produk hasil gasifikasi. Gasifikasi dilakukan pada temperatur 850°C dengan spesimen yang digunakan yaitu Ningdong Bituminous Coal (NBC) sebanyak 1 gram dan biomassa Chinese Redwood (RW)/Soybean Stalk (SS) sebanyak 0,5 gram. Dalam penelitian ini didapatkan hasil produksi tar dari beberapa pengujian yaitu tar paling tinggi dihasilkan oleh *redwood*, selanjutnya dihasilkan oleh *soybean stalk*, dan yang paling rendah dihasilkan oleh batu bara. Untuk variasi konfigurasi susunan spesimen, tar paling banyak dihasilkan jika *redwood/soybean stalk* diletakkan di atas batu bara. Tar paling sedikit dihasilkan jika batu bara diletakkan di atas *redwood/soybean*.

Setelah mengamati dan mempelajari dengan seksama penelitian-penelitian terdahulu tentang proses gasifikasi, maka peneliti menemukan hal baru untuk diteliti dan belum ada yang melakukannya, yaitu batu bara sebagai bahan bakar tambahan dalam proses gasifikasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui “Karakterisasi Syngas Pada Proses Gasifikasi Batu bara dan Limbah Kelapa Sawit”, dengan menggunakan bahan baku khususnya Batu bara dan limbah tandan kosong kelapa sawit.

2.2 Kelapa Sawit

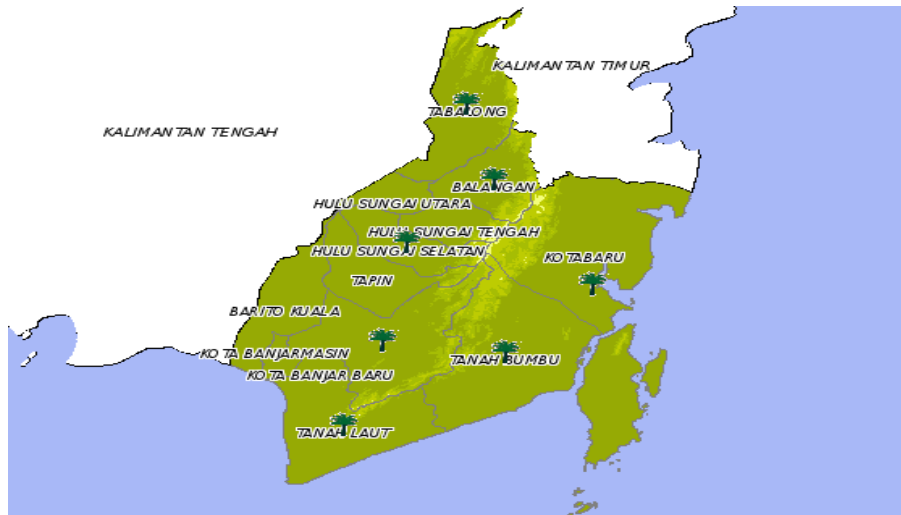
Kelapa sawit merupakan tumbuhan industri penghasil minyak masak, minyak industri, maupun bahan bakar (biodiesel) dan berbagai jenis turunannya seperti margarin, lilin, sabun, industri kosmetika, dan industri farmasi. Sisa pengolahannya dapat dimanfaatkan menjadi kompos dan campuran pakan ternak. Klasifikasi ilmiah kelapa sawit dapat di lihat dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Klasifikasi ilmiah kelapa sawit
Sumber: Muhammad Nur Sukri (2014)

2.2.1 Perkebunan Kelapa Sawit di Kalimantan Selatan

Kalimantan Selatan memiliki area perkebunan kelapa sawit dengan luas $\pm 372,720$ Ha. Lahan area perkebunan kelapa sawit di Kalimantan Selatan terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan kebijakan pemerintah daerah yang mendukung pembukaan lahan baru untuk perkebunan kelapa sawit. Perkebunan kelapa sawit di Kalimantan Selatan dikelola oleh pihak swasta, pemerintah daerah, dan penduduk lokal (Dinas Perkebunan Kalsel, 2013). Sebaran perkebunan kelapa sawit yang ada di Kalimantan Selatan dapat di lihat dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sebaran perkebunan kelapa sawit di Kalimantan Selatan
Sumber: Dinas Perkebunan Provinsi Kalimantan Selatan (2009)

2.2.2 Limbah Perkebunan Kelapa Sawit

Dalam proses produksinya, selain menghasilkan CPO (*Crude Palm Oil*) dan PKO (*Palm Kernel Oil*) pabrik dan perkebunan kelapa sawit juga menghasilkan limbah. Limbah yang dihasilkan berupa batang dari pohon sawit tua dan daun yang merupakan limbah perkebunan, sedangkan cangkang, tandan kosong, dan limbah cair POME (*Palm Oil Mill Effluent*) merupakan limbah dari pabrik pengolahan buah sawit. Karena volume panen yang cukup tinggi per tahunnya, secara otomatis volume limbah yang dihasilkan per tahunnya juga cukup tinggi.

Pemanfaatan limbah perkebunan kelapa sawit khususnya tandan kosong kelapa sawit sebagai sumber energi alternatif masih sangat jarang dilakukan, terlebih lagi belum adanya penyuluhan dari pemerintah kepada masyarakat untuk memanfaatkan tandan kosong kelapa sawit menjadi energi alternatif, misalkan dengan mengolah tandan kosong tersebut dengan cara gasifikasi untuk menghasilkan *syngas*.

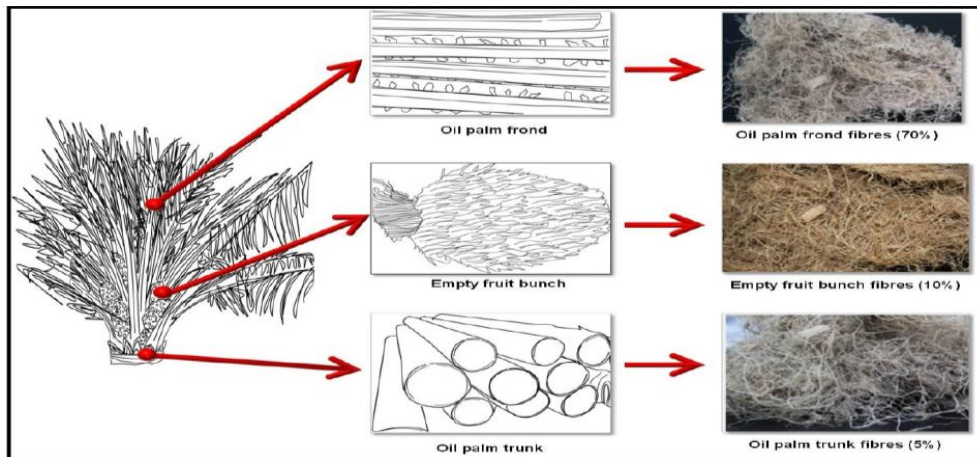
Nilai kalor dari beberapa limbah perkebunan dan pengolahan kelapa sawit ditunjukkan dalam Tabel 2.1 dan biomassa kelapa sawit beserta seratnya dapat di lihat dalam Gambar 2.5.

Tabel 2.1

Nilai Kalor Dari Limbah Padat Kelapa Sawit (Berdasarkan Berat Kering)

Limbah	Rata-Rata <i>Calorific Value</i> (kJ/kg)	Kisaran (kJ/kg)
Serat	19.055	18.800 – 19.580
Tandan kosong	18.795	18.000 – 19.920
Cangkang	20.093	19.500 – 20.750
Batang	17.471	17.000 – 17.800
Pelepah	15.719	15.400 – 15.680

Sumber: Muhammad Nur Sukri (2014)



Gambar 2.5 Biomassa kelapa sawit dan seratnya
 Sumber: Khalil (2012)

2.2.3 Tandan Kosong Kelapa Sawit

Limbah padat yang yang dihasilkan oleh pabrik pengolahan kelapa sawit adalah tandan kosong, serat dan tempurung. Limbah tandan kosong kadang-kadang mengandung buah tidak lepas diantara celah-celah ulir dibagian dalam (Naibaho, 1995).



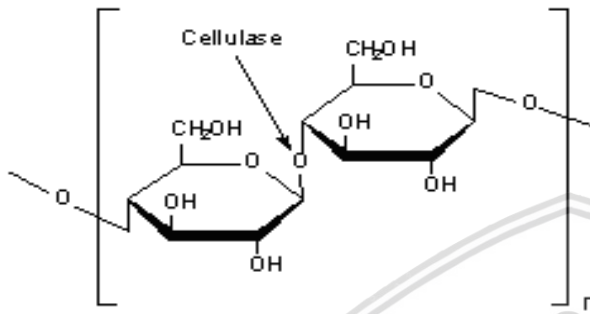
Gambar 2.6 Tandan kosong kelapa sawit

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Pada Gambar 2.6 adalah limbah pabrik kelapa sawit yang jumlahnya sangat melimpah. Setiap pengolahan 1ton TBS menghasilkan 230 kg tandan kosong kelapa sawit. Pengolahan dan pemanfaatan TKKS oleh perusahaan kelapa sawit masih sangat terbatas. Alternatif lain dengan menimbun (*open dumping*) untuk dijadikan mulsa di perkebunan kelapa sawit atau diolah menjadi kompos (anonim, 2008). Menurut Faridah dan Anwar Fuadi, Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) banyak mengandung serat, dimana serat tersebut yang berpotensi menjadi produk yang bernilai tambah ekonomi. Tandan kosong kelapa sawit mempunyai kekhasan pada komposisinya. Komponen terbesar adalah selulosa 40%, disamping hemiselulosa 24% dan lignin 21%.



1. Selulosa

Selulosa dalam Gambar 2.7 merupakan senyawa organik yang paling banyak, karena struktur tumbuh-tumbuhan sebagian besar terdiri dari selulosa. Di dalam selulosa terdapat bentuk serat-serat. Selulosa termasuk dalam polisakarida yang mempunyai rumus $(C_6H_{10}O_5)_n$, dimana n berkisar antara 2000-3000. Adapun sifat-sifat dari selulosa adalah:



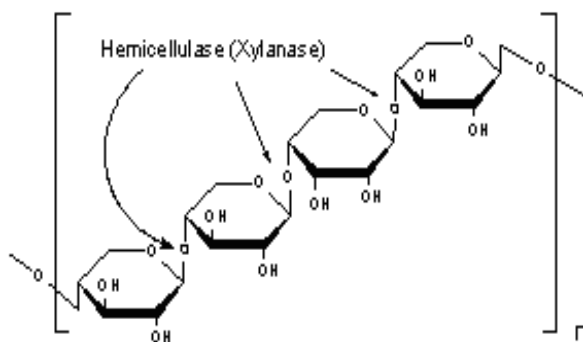
Gambar 2.7 Selulosa

Sumber: Fengel & Wagener Preparation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Waste of Sawdust (1995)

- Tidak berwarna
- Tidak larut dalam NaOH
- Hidrolisa sempurna dalam suasana asam menghasilkan glukosa
- Hidrolisa tak sempurna menghasilkan maltos

Selulosa merupakan unsur struktural dan komponen utama penyusun dinding sel dari tumbuh tumbuhan. Sekitar 33% dari semua materi tanaman adalah selulosa. Selulosa menjadi komponen kimia utama dalam membentuk serat dinding kayu dan berat totalnya sekitar 40-45% dari berat kering kayu (Sjostrom, 1993). Proses dekomposisi selulosa mulai terjadi pada suhu $260-350^{\circ}C$.

2. Hemiselulosa



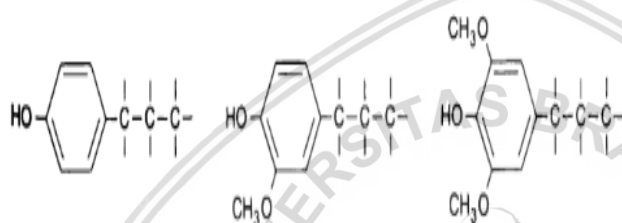
Gambar 2.8 Hemiselulosa

Sumber: Fengel & Wagener Preparation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Waste of Sawdust (1995)

Hemiselulosa dalam Gambar 2.8 merupakan polisakarida dimana unit-unitnya tersusun atas monosakarida. Hemiselulosa adalah heteropolimer dengan berbagai monomer gula dimana rantai molekulnya lebih pendek dari selulosa. Derajat polimerisasi berkisar antara 50 sampai 200. Oleh karena itu derajat polimerisasi lebih kecil dari pada selulosa sehingga lebih mudah terurai jika dibandingkan dengan selulosa, serta hemiselulosa mudah terlarut dalam larutan alkali.

Hemiselulosa tersusun dari pentosan ($C_5H_8O_4$) dan heksosan ($C_6H_{10}O_5$). Berat kandungan hemiselulosa sekitar 20-30% dari berat kering kayu. Dekomposisi hemiselulosa mulai terjadi pada temperatur 200-240°C.

3. Lignin



Gambar 2.9 Struktur lignin

Sumber: Basu, Struktur Lignin Pada Biomassa (2010)

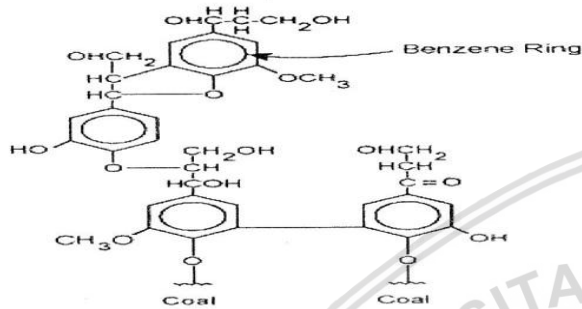
Lignin dalam Gambar 2.9 adalah polimer yang kompleks dengan berat molekul yang tinggi dan tersusun atas unit-unit fenil propana. Meskipun tersusun atas karbon, hidrogen, dan oksigen, tetapi lignin bukan karbohidrat. Lignin terdapat diantara sel-sel dan didalam dinding sel. Diantara dinding sel-sel, lignin berfungsi sebagai pengikat untuk mengikat sel-sel secara bersamaan. Di dalam dinding sel, lignin sangat erat hubungannya dengan selulosa dan berfungsi memberikan ketegaran pada dinding sel.

Dari kandungan yang ada pada tandan kosong kelapa sawit dapat dimanfaatkan menjadi energi alternatif dengan mengolah tandan kosong tersebut dengan cara gasifikasi untuk menghasilkan *syngas*. Berbagai penelitian telah dilakukan menunjukkan bahwa limbah tandan kosong kelapa sawit dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan. (Slamet Raharjo, 2012) dalam penelitian dengan eksperimen thermogravimetri terhadap 3 jenis limbah padat kelapa sawit untuk menganalisis karakteristik gasifikasi limbah padat kelapa sawit dengan menggunakan simulasi proses gasifikasi dengan menggunakan *software* kesetimbangan kimia HSC Chemistry menunjukkan bahwa kandungan *Volatile Matter* (VM) TKS lebih besar dari serat dan cangkang, sehingga produksi gas H_2 dari TKS lebih tinggi dibandingkan cangkang dan serat, sedangkan kandungan *Fix Carbon* (FC) dan *fuel ratio* dalam cangkang lebih

besar dari tandan kosong sawit (TKS), mengakibatkan produksi gas CO cangkang kelapa sawit lebih besar dibanding tandan kosong kelapa sawit (TKS). Berdasarkan hasil perhitungan kesetimbangan kimia, dapat disusun skema reaksi gasifikasi limbah padat kelapa sawit sebagai berikut.



2.3 Batu Bara



Gambar 2.10 Rumus bangun batu bara
Sumber: Yohana Mutiara Dewi (2015)

Komposisi kimia batu bara dalam Gambar 2.10 hampir sama dengan komposisi kimia jaringan tumbuhan, keduanya mengandung unsur utama yang terdiri dari unsur C, H, O, N, S, P. Hal ini mudah dimengerti, karena batu bara terbentuk dari jaringan tumbuhan yang telah mengalami proses pembatu baraan (*coalification*).

Batu bara terbentuk dari sisa-sisa tumbuhan yang sudah mati, dengan komposisi utama terdiri dari selulosa. Proses pembentukan batu bara dikenal sebagai proses pembatu baraan atau *coalification*. Faktor fisika dan kimia yang ada di alam akan mengubah selulosa menjadi lignit, subbitumina, bitumina, atau antrasit. Reaksi pembentukan Batu bara dapat diperlihatkan sebagai berikut.



Selulosa lignit gas metan

Batu bara merupakan terminologi masyarakat yang dipergunakan untuk menyebut semua sisa tumbuhan yang telah menjadi fosil, bersifat padat, berwarna gelap, dan dapat dibakar. Apabila batu bara tersebut mudah dibakar dan menghasilkan kalori tinggi, disebut batu bara, tetapi apabila batu bara tersebut tidak mudah dibakar dan menghasilkan kalori rendah disebut sebagai batu bara muda.

2.3.1 Klasifikasi Batu Bara

Batu bara diklasifikasikan menurut sifat pembakarannya, menjadi antrasit, bitumen, subbitumin, dan lignit. Setiap jenis mempunyai subbagian lagi. Antrasit merupakan bahan bakar rumah tangga yang sangat berguna, karena pembakarannya besar, tetapi cadangannya sudah mulai habis. Batu bara bitumen terutama digunakan dalam pembakaran yang menghasilkan energi atau karbonisasi untuk pembuatan kokas, ter, bahan kimia Batu bara, dan gas pabrik kokas (Austin, Klasifikasi Batu Bara 1996).

Penggolongan tersebut menekankan pada kandungan relatif antara unsur C dan H₂O. Kandungan air dalam batu bara, dikenal sebagai sifat lengas (*moisture*). Dalam usaha untuk mempermudah pengenalan jenis batu bara, berikut ditunjukkan sifat-sifat Batu bara untuk masing-masing jenis setelah sebagai berikut.

Tabel 2.2
Komposisi Elemen Dari Berbagai Tipe Batu Bara

Jenis Batubara	Presentase Massa				
	%C	%H	%O	%H ₂ O	% Vol Matter
lignit	60-70	5-6	20-30	50-70	45-55
Subbitumin	75-80	5-6	15-20	25-30	40-45
Bitumin	80-90	4-5	10-15	5-10	20-40
Antrasit	90-95	2-3	2-3	2-5	5-7

1. Sifat batu bara jenis antrasit
 - a. Warna hitam sangat mengkilat, kompak
 - b. Nilai kalor sangat tinggi, kandungan karbon sangat tinggi
 - c. Kandungan air sangat sedikit
 - d. Kandungan abu sangat sedikit
 - e. Kandungan sulfur sangat sedikit



Gambar 2.11 Antrasit
Sumber: Yohana Mutiara Dewi (2015)

2. Sifat batu bara jenis bitumen/subbitumin
 - a. Warna hitam mengkilat, kurang kompak
 - b. Nilai kalor tinggi, kandungan karbon relatif tinggi
 - c. Kandungan air sedikit

- d. Kandungan abu sedikit
- e. Kandungan sulfur sedikit



Gambar 2.12 Bitumen dan Subbitumin
Sumber: Yohana Mutiara Dewi (2015)

3. Sifat Batu bara jenis lignit



Gambar 2.13 Lignit
Sumber: Yohana mutiara dewi (2015)

- a. Warna hitam, sangat rapuh
- b. Nilai kalor rendah kandungan karbon sedikit
- c. Kandungan air tinggi
- d. Kandungan abu dan sulfur banyak

2.4 Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses yang menggunakan panas untuk merubah biomassa padat atau padatan berkarbon lainnya menjadi gas sintetik “seperti gas alam“ yang mudah terbakar. Melalui proses gasifikasi, kita bisa merubah hampir semua bahan organik padat menjadi gas bakar yang bersih, netral. Gas yang dihasilkan pada gasifikasi disebut gas produser yang kandungannya didominasi oleh gas CO, H₂, dan CH₄.

Bahan bakar yang umum digunakan pada gasifikasi adalah bahan bakar padat, salah satunya adalah batu bara. Jika ditinjau dari produk yang dihasilkan, pengolahan batu bara dengan gasifikasi lebih menguntungkan dibandingkan pengolahan dengan pembakaran langsung. Dengan teknik gasifikasi, produk pengolahan Batu bara lebih bersifat fleksibel

karena dapat diarahkan menjadi bahan bakar gas atau bahan baku industri yang tentunya memiliki nilai jual yang lebih tinggi. Untuk melangsungkan gasifikasi diperlukan suatu reaktor. Reaktor tersebut berfungsi sebagai tungku tempat berlangsungnya proses gasifikasi dimana terjadi kontak antara bahan bakar dengan medium penggasifikasi di dalam *gasifier*.

2.4.1 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Gasifikasi

1. Suhu Bed

Tingkat gasifikasi serta kinerja keseluruhan *gasifier* adalah tergantung suhu. Semua reaksi gasifikasi biasanya reversibel dan titik ekuilibrium dari setiap reaksi dapat digeser dengan mengubah suhu.

2. Tekanan Bed

Tekanan Bed telah dilaporkan memiliki efek yang signifikan pada proses gasifikasi. ,menurun dengan peningkatan tekanan. Namun, pada suhu konstan, konstanta laju orde pertama (k) untuk gasifikasi arang meningkat karena tekanan meningkat. Menggunakan media gasifikasi 50:50 H_2O/N_2 pada suhu $815^\circ C$, nilai-nilai konstanta laju (k) untuk char kayu adalah 0, 101, 1, 212 dan 0, 201 min^{-1} , masing-masing pada tekanan 0, 17, 0, 79 dan 2, 17 MPa.

3. Tinggi Bed

Pada suhu reaktor tertentu, waktu tinggal yang lebih lama (karena ketinggian bed yang lebih tinggi) meningkatnya hasil gas. Sadaka pada penelitiannya tentang pengaruh tinggi bed terhadap proses gasifikasi (1998) menunjukkan bahwa ketinggian bed yang lebih tinggi menghasilkan lebih efisiensi konversi serta suhu bed lebih rendah karena efek *fly-wheel bed* material. Efek *fly-wheel* berkurang secara signifikan ketika jumlah bahan bed berkurang sehingga menghasilkan suhu bed yang lebih tinggi.

4. Kecepatan fluidisasi

Kecepatan fluidisasi memainkan peran penting dalam pencampuran partikel dalam *fluidized bed*. Dalam sistem gasifikasi udara, semakin tinggi kecepatan fluidisasi semakin tinggi suhu bed menghasilkan nilai kalor gas akibat peningkatan jumlah oksigen dan nitrogen dalam gas inlet ke sistem.

5. Rasio Kesetaraan

Rasio kesetaraan memiliki pengaruh kuat pada kinerja *gasifiers* karena itu mempengaruhi suhu bed, kualitas gas, dan efisiensi termal. Peningkatan rasio kesetaraan mengakibatkan tekanan rendah baik di bed padat dan daerah *freeboard*

ketika gasifier dioperasikan pada kecepatan fluidisasi yang berbeda dan ketinggian bed.

6. Kadar air dari bahan

Kadar air dari bahan pakan mempengaruhi suhu reaksi karena energi diperlukan untuk menguapkan air dalam bahan bakar. Oleh karena itu, proses gasifikasi berlangsung pada suhu rendah.

7. Ukuran partikel

Ukuran partikel secara signifikan mempengaruhi hasil gasifikasi. Ukuran partikel kasar akan menghasilkan lebih banyak tar. Tingkat difusi termal dalam partikel menurun dengan peningkatan ukuran partikel, sehingga mengakibatkan tingkat pemanasan yang lebih rendah, hasil gas yang dihasilkan dan komposisi meningkat dengan penurunan ukuran partikel.

8. Rasio udara dan uap

Meningkatkan rasio udara dan uap akan meningkatkan nilai kalor gas sampai memuncak. Tomeczek et al. (1987) menggunakan campuran udara-uap dalam proses gasifikasi Batu bara dalam *fluidized bed* reaktor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh rasio uap dan udara pada arang terutama pada rasio yang lebih rendah karena fakta bahwa uap digunakan pada tahap devolatilisasi memberikan kontribusi terhadap proses gasifikasi bahkan dalam kasus ketika uap tidak ditambahkan. Ketika rasio uap air meningkat, nilai kalor meningkat, mencapai puncaknya pada 0,25 kg/kg.

2.4.2 Perhitungan Dasar Gasifikasi

Selama proses gasifikasi terjadi dua transformasi utama yaitu perpindahan massa dan perpindahan kalor (energi panas). Perpindahan massa ditentukan oleh kesetimbangan massa zat yang masuk dengan massa yang keluar dari sistem tersebut. Sedangkan perpindahan kalor ditentukan oleh kesetimbangan energi yang masuk dengan energi yang keluar. Kesetimbangan massa adalah jumlah semua unsur yang terkandung dalam suatu unit massa input (bahan bakar dan udara) sama dengan jumlah unsur-unsur yang dihasilkan pada *output* berupa syngas dan abu selama proses gasifikasi terjadi. Sedangkan kesetimbangan energi adalah kondisi dimana besar energi kalor yang dihasilkan dalam suatu unit massa bahan bakar dengan nilai kalor spesifik tertentu dikurangi dengan kerugian kalor yang terjadi selama proses gasifikasi.

1. Perhitungan Kesetimbangan Massa (*Mass Balance*)

Perhitungan kesetimbangan massa dan energi secara umum tergantung dengan masing-masing jenis sistem reaktor gasifikasi. Perhitungan ini juga meliputi perhitungan aliran syngas (*flow rate*), laju konsumsi bahan bakar (*mass fuel rate*), dan laju aliran udara gas gasifikasi.

$$\sum Mass Input = \sum Mass Output$$

$$m(\text{bio}) + m(\text{Udara}) = m(\text{syngas}) + m(\text{char}) + m(\text{Ash}) \quad (2-3)$$

Sumber: Cengel (2002)

a. Laju konsumsi bahan bakar

$$M_{Bbc} = \frac{m_{Bb}(\text{kg})}{t(\text{s})} \quad (2-4)$$

Sumber: Cengel (2002)

Dimana:

M_{Bb} = Laju konsumsi bahan bakar (Kg/s)

m_{Bb} = Massa bahan bakar (Kg)

t = Waktu (s)

Menurut Guswendar (2012), laju pemakaian bahan bakar dipengaruhi oleh ketiga faktor yaitu kapasitas bahan bakar dalam reaktor, sisa pembakaran dan durasi operasional. Peneliti ini membandingkan laju bahan bakar pada double outlet *gasifier* dan konvensional *gasifier*.

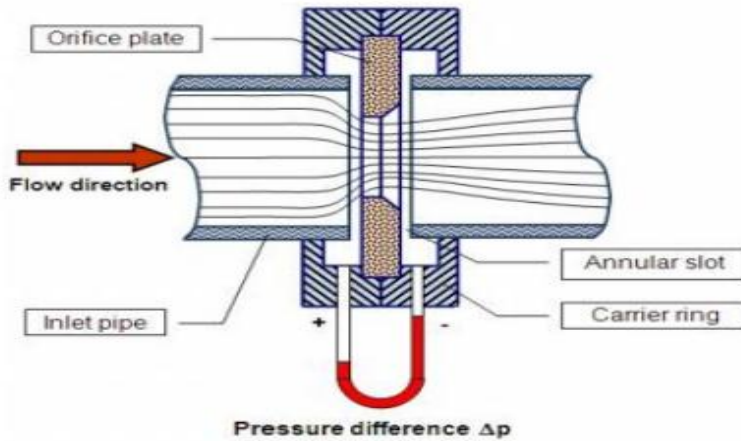
b. Laju Aliran Udara

Jumlah udara gasifikasi sangat tergantung pada reaksi pembakaran masing-masing unsur yang terkandung dalam satuan massa bahan bakar dengan udara secara sempurna dan *Equivalence Ratio* (ER).

$$ER = \frac{\text{laju aliran udara gasifikasi} \times \text{durasi operasional}}{\text{jumlah masa bahan bakar} \times \left(\frac{A}{f}\right) \text{ untuk } \phi = 1} \quad (2-5)$$

Sumber: Cengel (2002)

Pada proses pengoperasian alat gasifikasi, komposisi aliran udara sebagai komponen utama oksidasi harus diberikan dengan tepat. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan proses oksidasi yang baik dan efisien. Blower pada sistem gasifikasi *updraft* berperan untuk memberikan pasokan udara tersebut ke ruang bakar.



Gambar 2.14 Laju alir udara

Untuk mendapatkan komposisi udara oksidasi yang pas, maka pipa pasokan udara blower harus terpasang orifis dan manometer yang tersambung dengan katub untuk mengatur besar kecilnya hembusan udara. *Orifice* adalah salah satu alat pengukur beda tekanan fluida pada suatu sistem tertutup. Alat ini mempunyai sekat pada sambungannya yang telah diberikan lubang dengan diameter tertentu (biasanya setengah dari diameter pipa). Pada bagian depan dan belakang sekat orifis terdapat lubang manometer yang berfungsi sebagai tabung pengukur perbedaan fluida yang masuk dan keluar dari sekat *orifice*. Aliran udara sebelum masuk sekat *orifice* akan lebih besar daripada udara setelah keluar dari *orifice*. Perbedaan tersebut akan menghasilkan perbedaan tinggi fluida yang terjadi pada tabung manometer. Perhitungan laju alir udara dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = C_d \cdot A \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot \Delta P}{\rho_0}} \quad (2-6)$$

Sumber: Cengel (2002)

Dimana:

$C_d = 0,61$ (*discharge coefficient*)

$A = \pi \cdot d^2 / 4$ (luas permukaan pelat *orifice*)

$K =$ Konstanta manometer pipa U

$\Delta P =$ Perbedaan tekanan akibat orifice (kg/m^2)

$\rho_0 =$ Massa jenis udara (kg/m^3)

c. Massa laju alir udara dapat dihitung:

$$\dot{m}_{\text{udara primer}} = Q_{\text{udara primer}} \cdot \rho_0 \quad (2-7)$$

Sumber: Cengel (2002)

d. Massa Jenis Syngas

Massa jenis gas campuran (Kg/m^3), pers:

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (2-8)$$

Sumber: Cengel (2002)

Dimana:

ρ_1, \dots, ρ_2 = Massa jenis dari tiap komponen (Kg/m³)

x_1, \dots, x_2 = Fraksi mol dari tiap komponen gas

e. Massa laju alir *syngas* dapat dihitung:

$$\dot{m}_{\text{syngas}} = Q_{\text{syngas}} \cdot \rho_{\text{mix}} \quad (2-9)$$

Sumber: Cengel (2002)

2. Efisiensi Gasifikasi

Efisiensi gasifikasi adalah persentase energi dari bahan bakar yang diubah menjadi gas mampu bakar (masih mengandung tar). Efisiensi gasifikasi juga dapat diartikan sebagai rasio energi yang dihasilkan oleh pembakaran sejumlah gas *producer* dengan energi yang dihasilkan oleh pembakaran biomassa secara konvensional. Persamaan berikut ini digunakan untuk menghitung efisiensi gasifikasi.

$$\eta = \frac{\text{Flowrate syngas (m}^3/\text{s)} \times \text{LHV syngas (kkal/m}^3\text{)}}{\text{Mass flowrate bahan bakar (kg/s)} \times \text{LHV bahan bakar (kkal/kg)}} \quad (2-10)$$

Sumber: Cengel (2002)

Dimana:

Flowrate syngas = Laju alir syngas (m³/s)

LHV syngas = *Lower Heating Value* (LHV) syngas (kkal/m³)

Mass flowrate bahan bakar = Laju alir massa bahan bakar (kg/s)

LHV bahan bakar = *Lower Heating Value* (LHV) bahan bakar (kkal/kg)

2.4.3 Proses-Proses Pada Reaktor Gasifikasi

Gasifikasi secara sederhana dapat dijelaskan sebagai proses pembakaran bertahap. Hal ini dilakukan dengan membakar bahan bakar padat dengan ketersediaan oksigen yang terbatas sehingga gas yang terbentuk dari hasil pembakaran masih memiliki potensi untuk terbakar. Bahan bakar gasifikasi dapat berupa material padatan berkarbon biasanya biomassa (kayu atau limbah berselulosa) atau Batu bara. Semua senyawa organik mengandung atom karbon (C), hydrogen (H) dan oksigen (O), dalam wujud molekul kompleks yang bervariasi. Gasifikasi terdiri dari empat tahapan terpisah yang terdiri dari proses Pengeringan: $T > 150^\circ\text{C}$, Pirolisis/Devolatilisasi: $150 < T < 700^\circ\text{C}$, Oksidasi/pembakaran: $700 < T < 1500^\circ\text{C}$, Reduksi: $800 < T < 1000^\circ\text{C}$.

1. Pengeringan

Pada pengeringan, kandungan air pada bahan bakar padat diuapkan oleh panas yang diserap dari proses oksidasi. Reaksi ini erletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah di dalam reaktor yaitu di bawah 150°C. Proses pengeringan ini sangat penting dilakukan agar pengapian pada burner dapat terjadi lebih cepa dan lebih stabil.

2. Pirolisis

Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Pada pirolisis, pemisahan volatile matters (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari arang atau padatan karbon bahan bakar juga menggunakan panas yang diserap dari proses oksidasi. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis yang dimulai secara lambat pada T 700°C. Komposisi produk yang tersusun merupakan fungsi temperatur, tekanan, dan komposisi gas selama pirolisis berlangsung. Produk cair yang menguap mengandung tar dan PAH (polyaromatic hydrocarbon). Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H₂, CO, CO₂, H₂O, dan CH₄), tar, dan arang.

3. Oksidasi (Pembakaran)

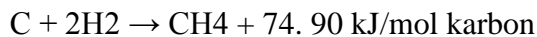
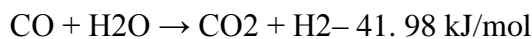
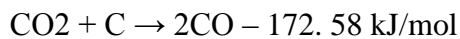
Untuk melakukan reaksi oksidasi (pembakaran) terdapat tiga elemen penting yang saling mengisi satu sama lain yaitu panas, bahan bakar, dan udara. Reaksi pembakaran sangat berkaitan dengan keberadaan ketiga elemen tersebut karena apabila salah satu dari ketiga elemen tersebut tidak ada maka hampir dapat dipastikan tidak akan terjadi proses pembakaran.

Oksidasi atau pembakaran arang merupakan reaksi terpenting yang terjadi di dalam gasifier. Proses ini menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik. Oksigen yang dipasok ke dalam gasifier bereaksi dengan substansi yang mudah terbakar. Hasil reaksi tersebut adalah CO₂ dan H₂O yang secara berurutan direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada pirolisis. Reaksi yang terjadi pada proses pembakaran adalah: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 393.77 \text{ kJ/mol karbon}$.

4. Reduksi (Gasifikasi)

Reduksi atau gasifikasi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Produk yang dihasilkan pada proses ini adalah gas bakar, seperti H₂, CO, dan CH₄. Reaksi berikut ini merupakan empat reaksi yang umum terlibat pada gasifikasi.

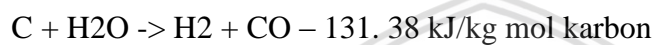
$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO - 131.38 \text{ kJ/kg mol karbon}$



Berikut merupakan tahapan-tahapan reduksi:

a. *Water-gas reaction*

Water-gas reaction merupakan reaksi oksidasi parsial karbon oleh kukus yang dapat berasal dari bahan bakar padat itu sendiri (hasil pirolisis) maupun dari sumber yang berbeda, seperti uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air. Reaksi yang terjadi pada *water-gas reaction* adalah:



Pada beberapa *gasifier*, kukus dipasok sebagai medium penggasifikasi dengan atau tanpa udara/oksigen

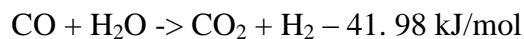
b. *Boudouard reaction*

Boudouard reaction merupakan reaksi antara karbondioksida yang terdapat di dalam *gasifier* dengan arang untuk menghasilkan CO. Reaksi yang terjadi pada *Boudouard reaction* adalah:



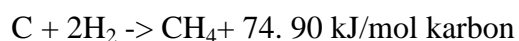
c. *Shift conversion*

Shift conversion merupakan reaksi reduksi karbonmonoksida oleh kukus untuk memproduksi hidrogen. Reaksi ini dikenal sebagai *water-gas shift* yang menghasilkan peningkatan perbandingan hidrogen terhadap karbonmonoksida pada gas produser. Reaksi ini digunakan pada pembuatan gas sintetik. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.



d. *Methanation*

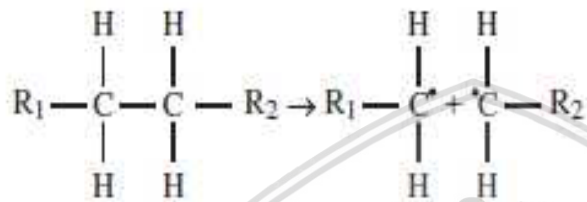
Methanation merupakan reaksi pembentukan gas metan. Reaksi yang terjadi pada *methanation* adalah:



e. *Thermal Cracking*

Thermal cracking merupakan proses pemecahan struktur kimia ikatan karbon dengan karbon (C – C) pada rantai panjang yang pemecahanan stuktur kimia disebabkan oleh kalor (panas) sehingga biomasa dapat terdekomposisi secara termal. Dimana proses tersebut bertujuan untuk mengkonversi kandungan pada

biomassa menjadi produk yang mampu bakar (Sadeghibeigi, 2012). Proses thermal cracking sangat erat hubungannya dengan fungsi temperatur dan waktu. Proses reaksi utama pada thermal cracking adalah terbentuknya radikal bebas. Radikal bebas merupakan molekul yang tidak mempunyai pasangan electron dan sangat reaktif sehingga menyebabkan menarik pasangan elektron lainnya. Radikal bebas terbentuk akibat terputusnya ikatan rantai karbon. Berikut merupakan contoh reaksi pemutusan ikatan karbon yang diakibatkan oleh energi panas yang menyebabkan terbentuknya radikal bebas.



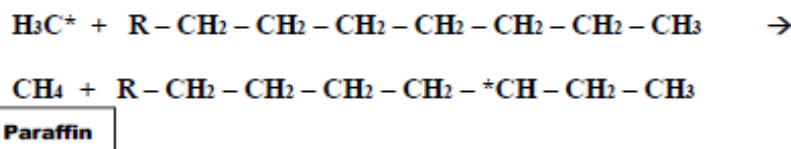
Gambar 2.15 Reaksi pembentukan radikal bebas
Sumber: Sadeghibeigi (2012)

Dengan adanya radikal bebas dapat menyebabkan terjadi proses *beta-scission* dan *alphascission*. *Beta-scission* adalah proses pemecahan ikatan karbon (C – C) yang diakibatkan oleh radikal bebas sehingga dapat menghasilkan olefin (ethylene) dan radikal bebas yang lainnya. Sementara itu proses *alpha-scission* menghasilkan metil radikal, yang mana dapat mengekstrak atom hydrogen dari kandungan molekul hidrokarbon netral pada biomassa. Ekstraksi hydrogen tersebut menghasilkan paraffin yaitu gas metan (CH₄) dan radikal bebas sekunder.

Reaksi *Beta-scission* :



Reaksi *Alpha-scission*:



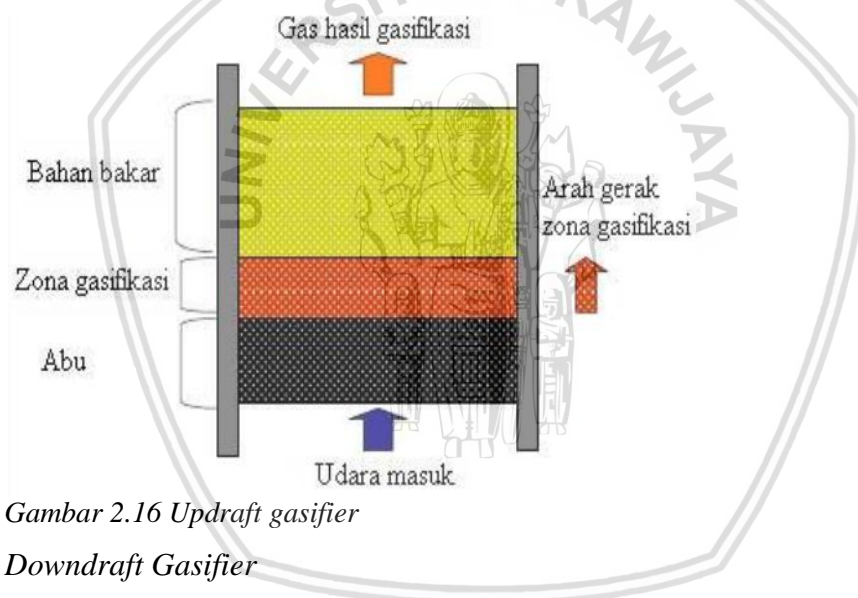
2.5 Jenis Reaktor

Teknologi gasifikasi yang terus berkembang mengarahkan klasifikasi teknologi sesuai dengan sifat fisik maupun system yang berlangsung dalam menciptakan proses gasifikasi. Berdasarkan mode fluidisasinya, gasifier dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: mode gasifikasi unggun tetap (*fixed bed gasification*) mode gasifikasi unggun

terfluidisasi (*fluidized bed gasification*), mode gasifikasi *entrained flow*. Sampai saat ini yang digunakan untuk skala proses gasifikasi skala kecil adalah mode gasifier unggun tetap (Reed and Das, 1988). Berdasarkan arah aliran, *fixed bed gasifier* dapat dibedakan menjadi:

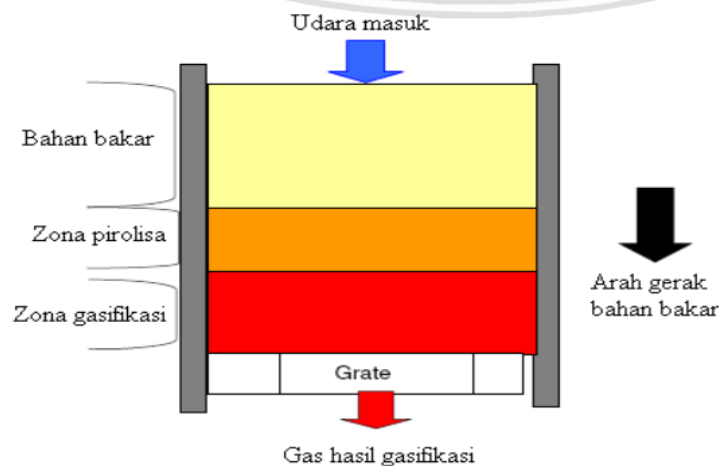
a. *Updraft Gasifier*

Pada *updraft gasifier*, udara masuk melalui bagian bawah gasifier melalui grate dan aliran bahan bakar masuk dari bagian atas. Proses ini terjadi secara berlawanan arah (*counter current*). Gas produser yang dihasilkan keluar dari bagian atas sedangkan abu diambil di bagian bawah. Reaksi pembakaran (oksidasi) pada jenis ini terjadi di dekat *grate* dan diikuti reaksi reduksi (proses gasifikasi) kemudian gas produser menembus unggun bahan bakar menuju ke daerah yang memiliki temperatur lebih rendah. Sistem *Updraft Gasifier* dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Updraft gasifier

b. *Downdraft Gasifier*



Gambar 2.17 Downdraft gasifier

Pada *downdraft gasifier* udara dimasukkan ke dalam aliran bahan bakar padat (*packed bed*) pada atau di atas zona oksidasi. Aliran udara ini searah (*cocurrent*) dengan aliran bahan bakar yang masuk ke dalam *gasifier*. Udara dimasukkan dari bagian atas. Gas hasil pembakaran dilewatkan pada bagian oksidasi dari pembakaran dengan cara ditarik mengalir ke bawah sehingga gas yang dihasilkan akan lebih bersih karena tar dan minyak akan terbakar sewaktu melewati bagian tadi. Sistem *downdraft gasifier* dapat dilihat pada Gambar 2.17.

c. *Crossdraft gasifier*

Pada *Crossdraft gasifier*, udara disemprotkan ke dalam ruang bakar dari lubang arah samping yang saling berhadapan dengan lubang pengambilan gas sehingga pembakaran dapat terkonsentrasi pada satu bagian saja dan berlangsung secara lebih banyak dalam suatu satuan waktu tertentu.

2.6 Hipotesis

Hipotesis yang dapat diambil berdasarkan penelitian sebelumnya, bahwa batu bara sendiri memiliki kandungan tertinggi pada CH_4 dan kandungan H yang tinggi pada tandan kelapa sawit, diharapkan nantinya syngas yang dihasilkan dari proses gasifikasi *updraft* tandan kelapa sawit dengan batu bara dapat meningkatkan kadar CH_4 (*methane*).

BAB III METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini penulis meneliti tentang pengaruh gasifikasi campuran tandan kosong kelapa sawit dan batu bara. Jadi konsentrasi penambahan batu bara di buat bervariasi dengan tujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap hasil *syngas* dari proses gasifikasi campuran tandan kosong kelapa sawit.

3.1 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan adalah dengan cara eksperimen nyata dimana penulis secara langsung melakukan proses gasifikasi tandan kelapa sawit dan hasil *syngas* diperiksa di lab untuk mengetahui unsur–unsur dari *syngas* yang hasil gasifikasi.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dimulai pada bulang Desember 2017 bertempat di Laboratorium Motor Bakar, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya adapun yang dilakukan ialah pengujian proses gasifikasi dari campuran tandan kosong kelapa sawit dan batu bara berdasarkan persentase berat.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel di dalam penelitian ini adalah variabel bebas dimana variabel yang besarnya ditentukan dan variabel ini dijadikan sebagai acuan dari berlangsungnya penelitian ini. Variabel terikat merupakan variabel yang hasilnya dipengaruhi variabel bebas, serta variabel terkontrol yang merupakan kondisi yang harus dijaga agar penelitian ini dapat dianggap valid dengan nilai perbandingan yang dihasilkan dari penelitian ini.

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah penambahan batu bara terhadap tandan kosong kelapa sawit adalah: 10% TKKS : 90% BB, 30% TKKS: 70%BB, 50% TKKS: 50% BB.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dari penelitian ini adalah laju pemanasan, volume gas total, presentase berat (wt%) gas total Kandungan gas hasil gasifikasi

3.3.3 Variabel Terkontrol

Di dalam penelitian ini variabel terkontrol yang dipilih adalah suhu konstan pada 700°C.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Bahan

1. Tandan kosong kelapa sawit

Tandan kosong kelapa sawit pada Gambar 3.1 merupakan bahan utama di dalam penelitian ini hal ini dikarenakan tandan kosong kelapa sawit memiliki densitas yang cukup tinggi dan mempunyai kandungan selulosa yang cukup tinggi. Tandan kosong kelapa sawit dipotong terlebih dahulu supaya ukuran partikelnya menjadi lebih kecil yang menyebabkan muatan bahan bakar menjadi lebih optimal.



Gambar 3.1 Tandan kosong kelapa sawit

Tandan kosong kelapa sawit dilakukan pengeringan ke dalam oven pada temperatur kurang lebih 100°C selama 1 jam. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kandungan air yang ada di dalam tandan kosong kelapa sawit. Setelah proses pengeringan tandan kosong kelapa sawit di letakkan pada *moisture analyzer*. Untuk menguji kandungan air yang ada di dalam tandan kosong kelapa sawit sampai kadar air yang ada di dalamnya mencapai kurang dari 2%, dan ditimbang pada timbangan elektrik hingga mencapai berat yang ditentukan apabila kandungan airnya telah mencapai kurang dari 2%.

2. Batu bara

Batu bara pada Gambar 3.2 digunakan sebagai campuran bahan bakar. Dengan penambahan atau pencampuran batu bara ini diharapkan terjadi penambahan hasil

syngas yang diperoleh. Batu bara sebelum di gunakan dihaluskan terlebih dahulu supaya bisa lebih merata pada saat proses gasifikasi.



Gambar 3.2 Batu bara

Batu bara juga di proses sama seperti tandan kosong kelapa sawit yaitu dengan menghilangkan kadar air batu bara ke dalam oven hingga batu bara mempunyai kandungan air kurang dari 2% ketika di ukur pada *moisture analyzer*.

3.4.2 Alat dan Skema Penelitian

1. Tungku Biomassa/*Furnace*

Gambar 3.3 merupakan tungku biomassa/*furnace* berupa besi berbentuk silinder dengan ukuran diameter 20 cm.



Gambar 3.3 Tungku /*furnace*

2. *Thermocouple*

Digunakan dua buah *thermocouple*. Keduanya menggunakan tipe K agar dapat diubah ke dalam data digital. *Thermocouple* yang pertama digunakan untuk mengukur besarnya pemanasan yang diberikan oleh heater yang akan terbaca oleh *thermocontroler*. Sementara *thermocouple* yang kedua digunakan untuk mengukur suhu biomassa yang ada didalam tungku yang akan terbaca oleh data logger.

3. *Thermocontroller*

Gambar 3.4 digunakan untuk mengatur arus yang masuk ke dalam heater sehingga dapat mengatur temperatur di dalam *gasifier*, *thermocontroller* ini juga berfungsi sebagai saklar dari *gasifier*.



Gambar 3.4 *Thermocontroller*

4. *Heater*

Heater digunakan untuk pemanas *gasifier* yang berasal dari kumparan pemanas.

5. *Data Logger*

Data logger pada Gambar 3.5 digunakan untuk mengukur temperatur pada biomassa sekaligus dapat mengukur laju pemanasan yang terjadi pada biomassa selama proses gasifikasi berlangsung.



Specifications

Analog Input

- Channels 16 single-ended/ 8 differential (software programmable)
- Resolution 16 bits
- Max. Sampling Rate 200 kS/s (for USB 2.0)

Gambar 3.5 *Advantech USB-4718 data logger*

6. *Laptop*

Gambar 3.6 digunakan untuk mendapatkan data dari data logger yang telah di ubah menjadi fungsi temperatur dan waktu selama 2 jam.



Gambar 3.6 Laptop

7. Tabung Elemeyer

Gambar 3.7 digunakan untuk menampung kandungan *tar* pada proses gasifikasi. *Tar* dapat hilang akibat proses kondensasi, oleh karena itu dibutuhkan suhu yang lebih rendah saat proses kondensasi sehingga kandungan *tar* pada gas dapat terurai pada tabung elemeyer.



Gambar 3.7 Tabung elemyer

8. Tabung Volume

Gambar 3.8 digunakan untuk mengukur volume total gas yang dihasilkan selama proses gasifikasi berlangsung. Gas yang terukur merupakan gas yang telah melalui proses kondensasi.



Gambar 3. 8 Tabung volume

9. *Sampling Bag*

Gambar 3.9 digunakan untuk menampung gas hasil gasifikasi yang telah dikondensasi.



Gambar 3.9 Sampling bag

10. *Oven*

Gambar 3.10 digunakan sebagai tempat untuk mengeringkan tandan kelapa sawit dan batu bara.



Gambar 3.10 Oven

11. *Moisture Analyzer*

Gambar 3.11 digunakan untuk mengukur kandungan kadar air pada tandan kelapa sawit dan batu bara.



Gambar 3.11 Moisture analyzer

Spesifikasi:

- Type: MOC-120H*
- Measurement Format: Evaporation weight loss method*
- Sample weight: 0, 5-120 g*
- Minimum display: Moisture content 0, 01%; weight: 0. 001 g*

- e. *Measurable quantities: Moisture content (wet and dry base), weight, solid.*
- f. *Heater temperature: 30-200°C*
- g. *Display: Backlit LCD (137 x 43mm)*
- h. *Heat source: 625 Watt*
- i. *Power Supply: AC 100-120/220-240 V (50/60 Hz)*
- j. *Power consumption: Max 640 Watt*

12. Timbangan Elektrik

Gambar 3.12 digunakan untuk menimbang massa dari tandan kelapa sawit dan batu bara sebelum proses gasifikasi berlangsung.



Gambar 3.12 Timbangan elektrik

Spesifikasi:

- a. Merk: ACIS BC 500
- b. Kapasitas maksimal: 500 gram

13. Gas Chromatography (GC)

Gambar 3.13 merupakan alat yang digunakan untuk menganalisa kandungan komposisi kimia pada gas untuk mengidentifikasi zat-zat berbeda dalam suatu sampel. Pada penelitian ini GC digunakan untuk menguji kandungan komposisi kimia pada gas hasil gasifikasi.



Gambar 3.13 Gas chromatography (GC)

Spesifikasi:

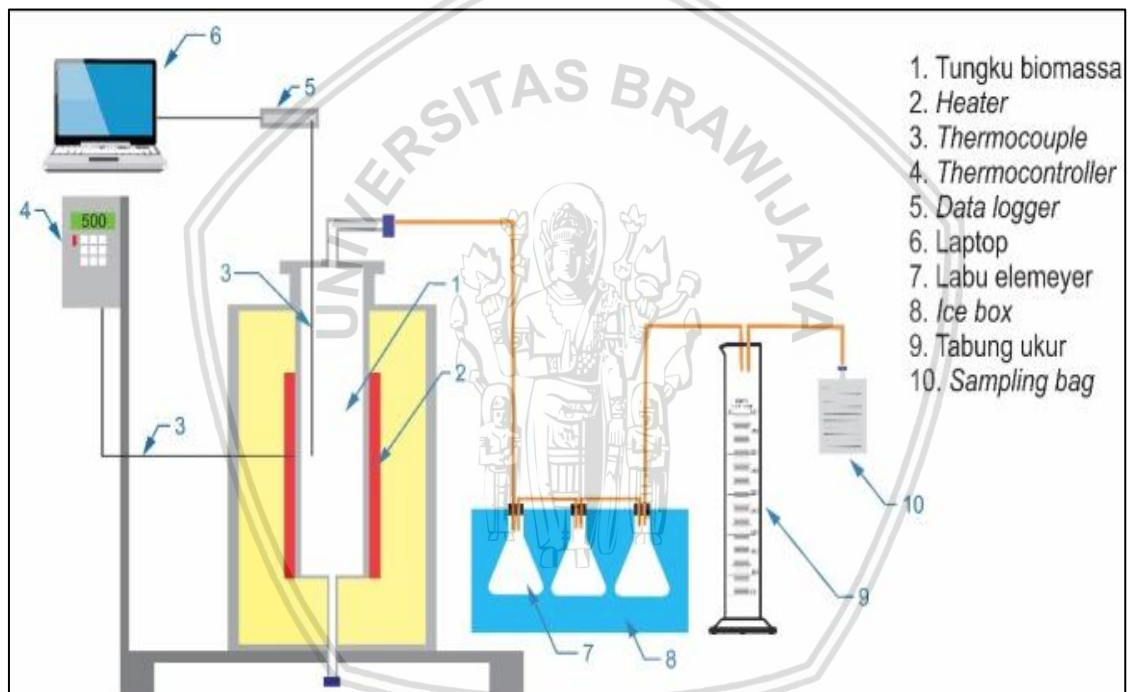
- a. Merk: Agilent teknologi 5973 inert MSD

14. Stopwatch

Gambar 3.14 digunakan untuk menghitung durasi waktu dalam proses pencatatan temperatur dalam penelitian.



Gambar 3.14 Stopwatch



Gambar 3.15 Skema alat pengujian

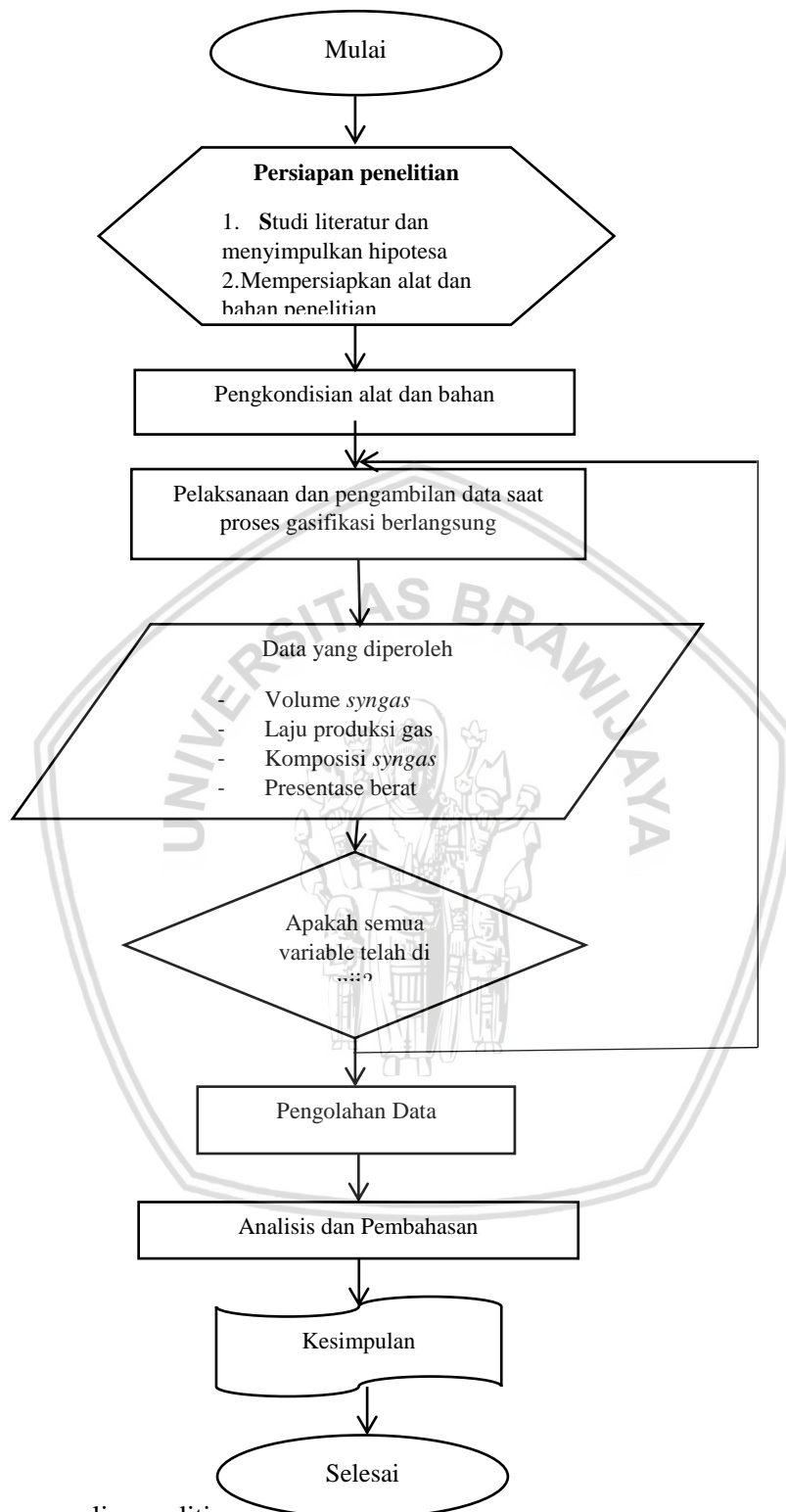
3.5 Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini ada dua prosedur utama yang pertama adalah pembuatan spesimen uji dan pengambilan data. Prosedur pertama adalah pembuatan spesimen uji dimulai dengan mengeringkan tandan kelapa sawit dan batu bara yang didapat selama 24 jam untuk mengurangi kadar airnya dan dhaluskan sesuai dengan variabel yang digunakan untuk memudahkan masuk ke dalam tungku. Kemudian melakukan proses penimbangan batu bara, dan tandan kelapa sawit, sesuai dengan variabel yang telah di tentukan dan mencampurkan *spesimen* sampai merata dan memberikan kode pada *sampling bag* untuk tidak terjadinya kesalahan pada saat analisa komposisi kimia pada *syngas* yang ada di

dalam *sampling bag*. B0 untuk campuran tandan kelapa sawit tanpa penambahan batu bara, B1 penambahan 10% batu bara, B2 untuk penambahan 30% dan B3 untuk penambahan 50%.

Setelah sampel telah siap langkah selanjutnya adalah proses gasifikasi dari sampel tersebut. hal ini dilakukan dengan cara memasukkan sampel ke dalam tungku setelah itu, tutup tungku gasifikasi ditutup hingga rapat dan memastikan bahwa instalasi tersebut tidak terjadi kebocoran gas agar volume gas yang di hitung sesuai. Setelah dipastikan tidak ada kebocoran pada instalasi tersebut. Hidupkan saklar pada *thermocontroler* atur temperatur sesuai yang diinginkan dan secara bersamaan tekan tombol *start* pada aplikasi *data logger*. Selama proses gasifikasi berjalan catat temperatur heater dan temperatur biomassa setiap 10 menit dan catat volume gas yang dihasilkan setiap kenaikan 50 °C. Ketika temperature sudah sesuai yang diinginkan jaga temperature tersebut agar konstan dan ambil sampel gas pada temperatur tersebut dengan *sampling bag*. Setelah *sampling bag* terisi penuh, simpan *sampling bag* dan pastikan tidak terjadi kebocoran. Setelah beberapa menit dijaga konstan sesuai dengan temperature yang diinginkan matikan semua instalasi yang hidup dan simpan total hasil gas, *tar* dan *char* yang terbentuk dan mengulangi proses ini sampai semua variabel yang telah di tentukan telah diuji.

3.6 Skema Penelitian



Gambar 3. 16 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengolahan Data

Penelitian ini dimulai pada temperatur tungku gasifikasi pada temperatur 27°C hingga mencapai temperatur yang ditentukan. Reaktor gasifikasi diatur pada temperatur 700°C untuk setiap variasi. Data berupa temperatur pemanasan, laju pemanasan, laju produksi gas, volume total, dan persentase produk hasil gasifikasi diambil selama proses gasifikasi. Sedangkan untuk data kandungan *syngas* hasil gasifikasi diambil hanya pada temperatur reaktor gasifikasi mencapai 700°C.

Data pada penelitian ini diambil pada saat *heater* pada tungku *gasifier* di nyalakan. Pada tahap pengoperasian alat suhu tandan kelapa sawit didalam *gasifier* dipanaskan sehingga suhu mencapai 700°C sesuai dengan variabel penelitian. Alat ukur volume yang digunakan tabung ukur khusus dan sarana penyimpanan data menggunakan laptop.

Pada tahap pengoperasian, langkah pertama yaitu tandan kelapa sawit dan batu bara dimasukkan kedalam *gasifier*. Kemudian *heater* dinyalakan bersama dengan *data logger*. *Heater* digunakan untuk memanaskan *gasifier* sehingga campuran tandan kelapa sawit dan batu bara diubah menjadi gas dengan perbandingan: TKS (90 %):BB (10 %), TKS (70 %): BB (30 %), dan TKS (50 %): BB (50 %) pada masing masing pengujian, kemudian gas di alirkan ke tabung ukur dan dilakukan pengambilan data selama 2 jam.

Pengambilan data laju pemanasan menggunakan sensor *thermocouple type-K* di letakkan di dalam tungku *gasifier* dimana *thermocouple type-K* khusus untuk membaca suhu dari biomassa. Data yang terbaca dihubungkan dengan *data logger* sehingga dapat disimpan di dalam laptop penguji. Data yang diperoleh *data logger* berupa data digital dalam satuan °C (derajat celcius) dan di konversi ke bentuk grafik sehingga dapat memudahkan dalam pengolahan data dan analisis data.

4.2 Perhitungan Laju Pemanasan

Untuk mengetahui laju pemanasan di dalam *gasifier* di lakukan perhitungan dengan menjadikan waktu pengambilan data selama 2 jam dan perbandingan biomassa TKS (90%): BB (10%), TKS (70%): BB (30%), dan TKS (50%): BB (50%) pada suhu 700°C sebagai tolak ukur yang sesuai dengan variabel kontrol penelitian.

Perhitungan laju pemanasan biomassa tandan kelapa sawit dengan dan tanpa batu bara pada suhu 700°C.

1. Laju Pemanasan Gasifikasi *updraft* tandan kelapa sawit (100%)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{653 \text{ }^{\circ}\text{C} - 27 \text{ }^{\circ}\text{C}}{70 \text{ menit} - 0 \text{ menit}} = \frac{626 \text{ }^{\circ}\text{C}}{70 \text{ menit}} = 8,94 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$$

2. Laju Pemanasan Gasifikasi *updraft* tandan kelapa sawit dengan batu bara dengan perbandingan (90%:10%)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{645^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}}{80 \text{ menit} - 0 \text{ menit}} = \frac{618^{\circ}\text{C}}{80 \text{ menit}} = 7,72 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$$

3. Laju Pemanasan Gasifikasi *updraft* tandan kelapa sawit dengan batu bara dengan perbandingan (70%:30%)

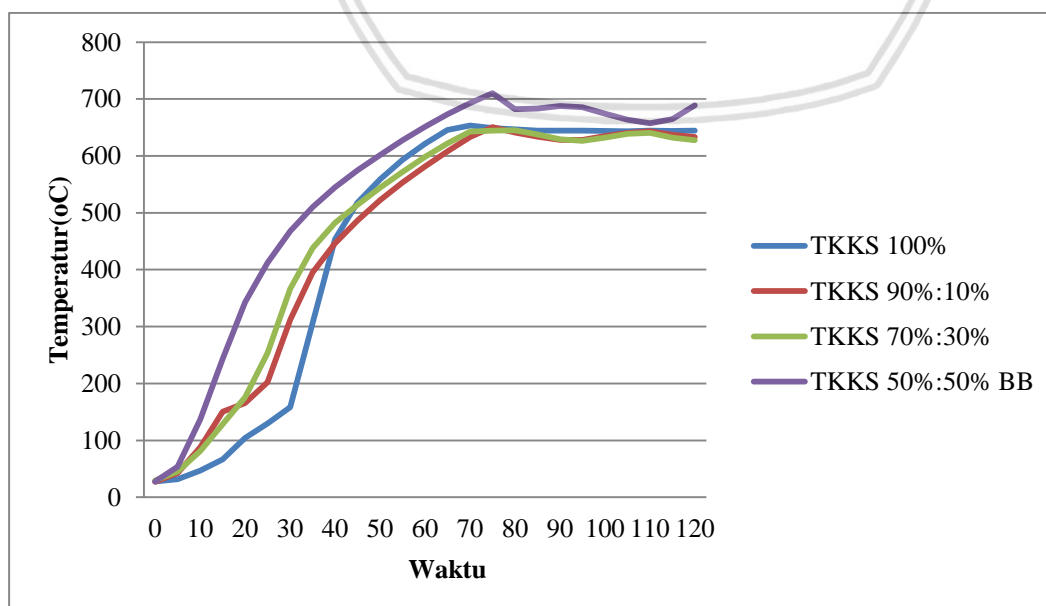
$$\frac{dT}{dt} = \frac{650^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}}{75 \text{ menit} - 0 \text{ menit}} = \frac{623^{\circ}\text{C}}{75 \text{ menit}} = 8,30 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$$

4. Laju Pemanasan Gasifikasi *updraft* tandan kelapa sawit dengan batu bara dengan perbandingan (50% :50%)

$$\frac{dT}{dt} = \frac{710^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C}}{75 \text{ menit} - 0 \text{ menit}} = \frac{683^{\circ}\text{C}}{75 \text{ menit}} = 9,1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$$

4.3 Data Hasil Penelitian

Hasil penelitian yang terdapat dalam Gambar gasifikasi dengan batu bara pada perbandingan (10:90) (30:70) (50:50). Data penelitian ini memperoleh data berupa volume gas dalam satuan Liter (L), Laju produksi *syngas* dalam (cm^3/menit), Laju pemanasan dalam satuan derajat celcius ($^{\circ}\text{C}$) dan komposisi gas yang terkandung dalam persentase di tampilkan dalam bentuk grafik yang di bahas dalam pembahasan.



Gambar 4.1 Hubungan suhu terhadap waktu gasifikasi tandan kosong kelapa sawit

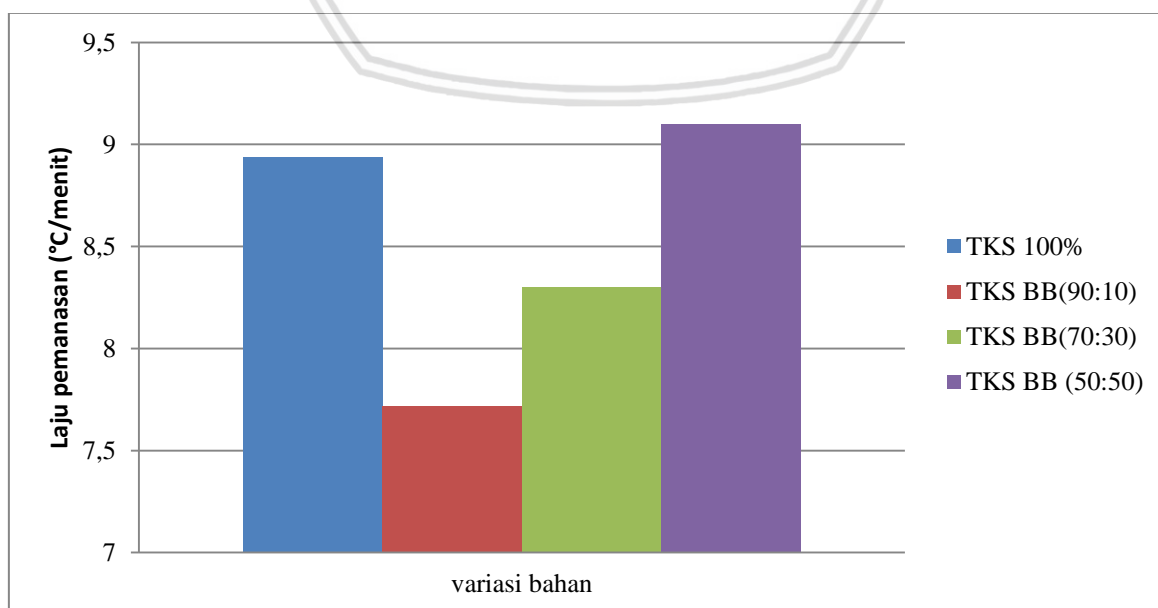
4.4 Pembahasan dan Analisis Grafik

4.4.1 Analisis Grafik Suhu Biomassa Terhadap waktu Tandan Kelapa Sawit dengan Batu Bara

Gambar 4.1 menjelaskan tentang grafik hubungan temperatur pemanasan biomassa terhadap waktu dengan variasi penambahan batu bara. Pada gambar 4.1 grafik meningkat seiring dengan bertambahnya waktu sampai temperatur 700°C dan ditahan sampai 120 menit. Terdapat perbedaan untuk setiap variasi yang mana dengan penambahan batu bara mampu mempercepat kenaikan temperatur biomassa, dengan kenaikan temperatur tertinggi pada penambahan batubara 50%, lalu diikuti dengan penambahan batubara 30% dan 10%. Sedangkan untuk variasi tanpa batu bara yang paling rendah, yang dapat dilihat bahwa variasi tanpa batu bara grafiknya yang paling landai.

Penambahan batu bara mampu mempercepat penambahan temperatur biomassa, hal ini dikarenakan dari volatile matter tinggi yang terkandung pada batu bara mampu meningkatkan penyerapan panas dari tungku ke biomassa. Yang mana kandungan *volatile matter* mencapai 45-55%. Namun pada penambahan batubara 30% dan 10%, kenaikan temperatur biomassa cenderung lebih rendah dari penambahan batubara 50%. Hal tersebut disebabkan karena pada penambahan batubara 30% dan 10% berat specimen tandan kelapa sawit didalam tungku lebih banyak dibandingkan penambahan batu 50%. Dari Gambar 4.1 dapat disimpulkan penambahan batubara mampu mempercepat kenaikan temperatur biomassa dengan hasil paling optimal pada penambahan batubara 50%.

4.4.2 Analisis Grafik Laju Pemanasan Biomassa

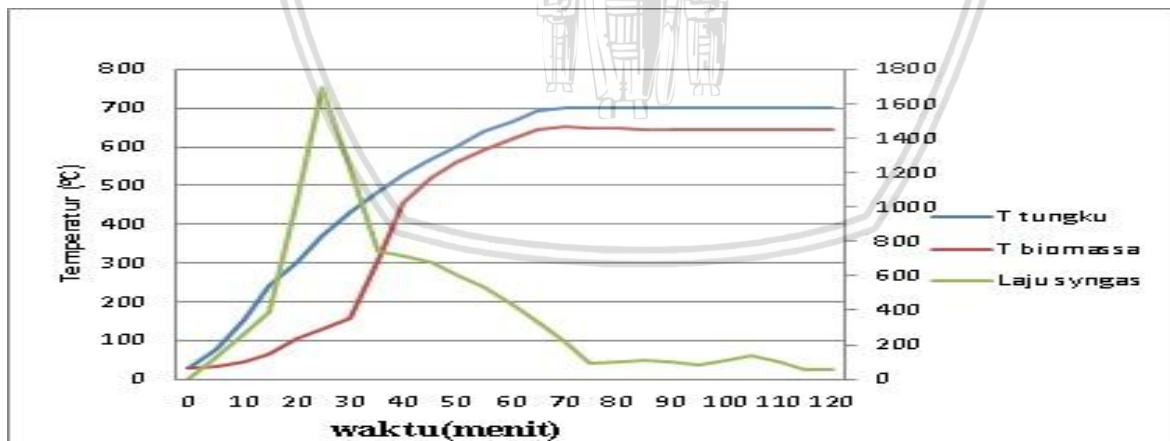


Gambar 4.2 Grafik hubungan laju pemanasan terhadap persentase penambahan batu bara

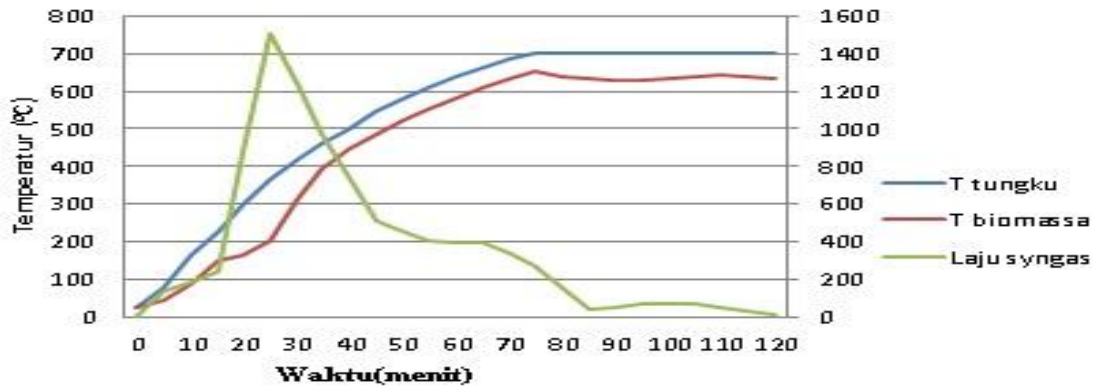
Pada Gambar 4.2 perbandingan laju pemanasan untuk tiap variasi mengalami perbedaan, dimana penambahan Batubara berpengaruh terhadap laju pemanasan biomassa. Yang mana laju pemanasan tertinggi pada variasi penambahan batubara 50% sebesar 9,1 °C/menit. Namun pada penambahan batubara 10% dan 30%, kenaikan laju pemanasan cenderung lebih rendah dari penambahan batubara 50%. Hal tersebut disebabkan karena pada saat penambahan batubara 10% dan 30% kandungan air yang terdapat pada spesimen uji masih memiliki kandungan yang lebih dari 3% dan dapat menghambat proses laju pemanasan.

4.4.3 Analisis Temperatur Biomassa Dan Laju Produksi Syngas

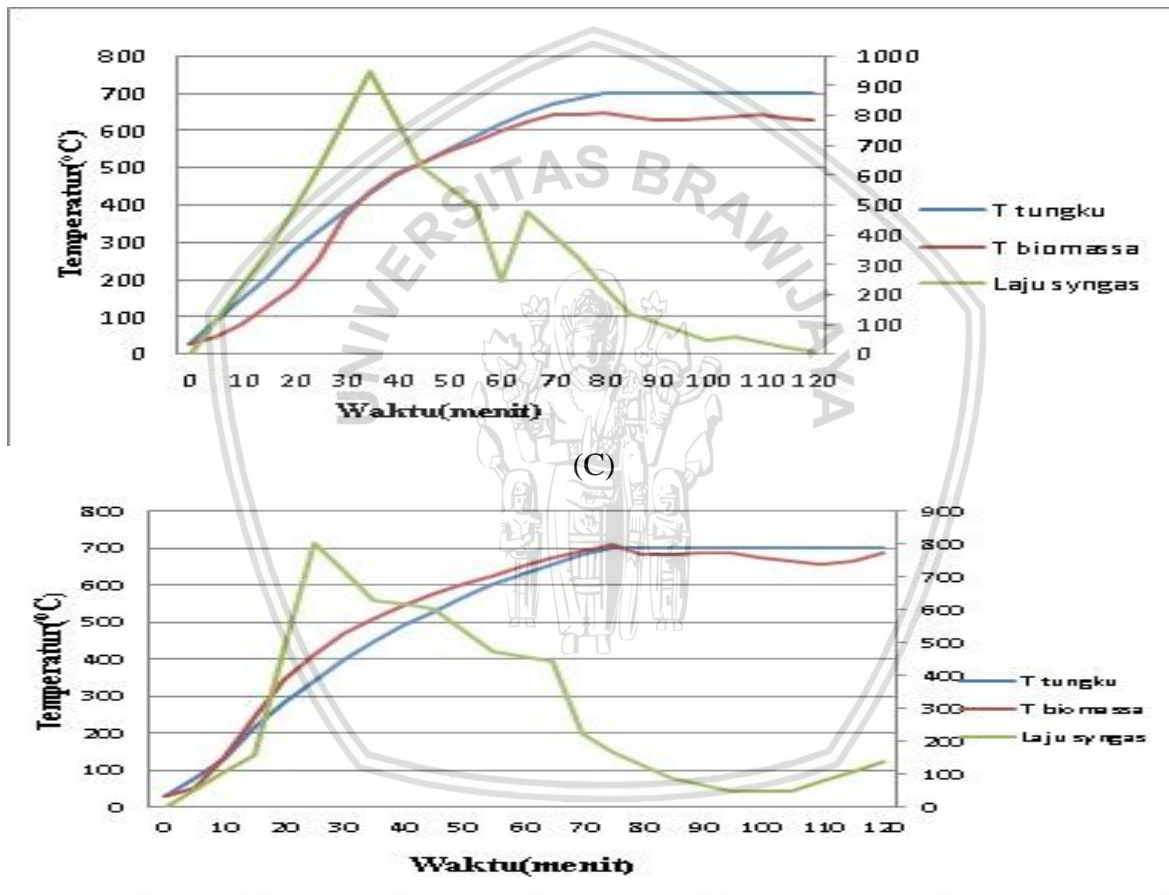
Gambar 4.3 menjelaskan tentang grafik hubungan laju produksi *syngas* dan temperatur pemanasan biomassa dan *heater* pada proses gasifikasi selama 2 jam. Dapat dilihat bahwa penambahan batu bara berpengaruh terhadap temperatur pemanasan biomassa, dimana semakin banyak batubara akan membuat selisih antara temperatur *heater* dan temperatur biomassa menjadi kecil. Hal ini berarti batu bara dapat membantu mengoptimalkan peningkatan panas terhadap biomassa. Pada Gambar 4.3 laju produksi *syngas* tertinggi dari berbagai variasi adalah pada menit ke-25 proses gasifikasi dan pada temperatur 350°C. Hal ini membuktikan bahwa penguraian biomassa tandan kosong kelapa sawit dan batu bara optimal pada temperatur 350°C.



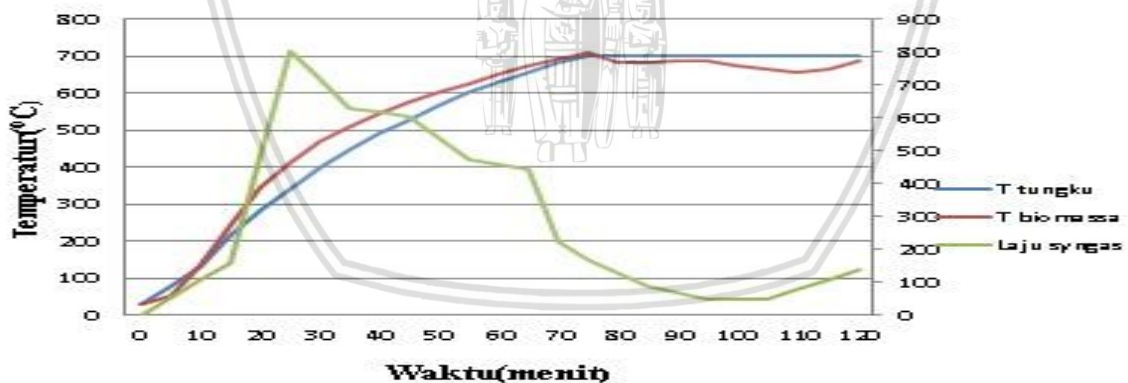
(A)



(B)



(C)



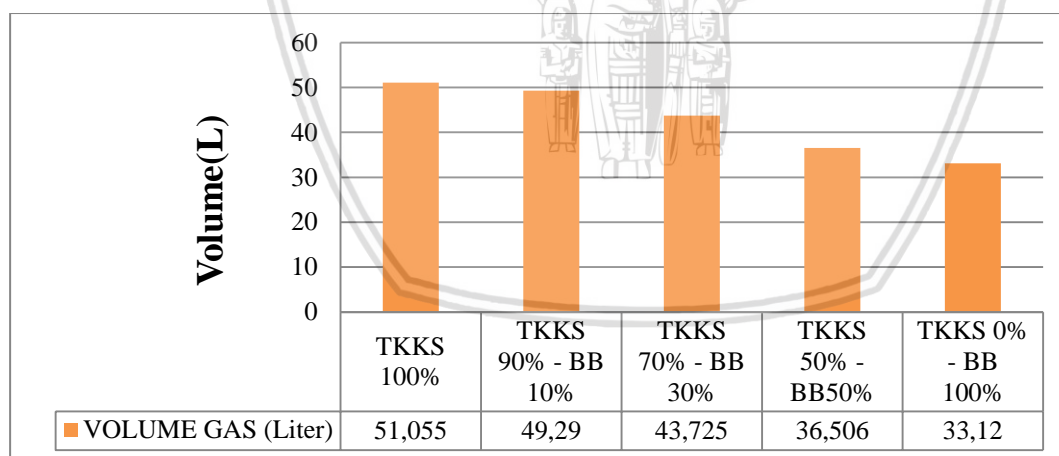
(D)

Gambar 4.3 Grafik hubungan laju syngas dan temperatur pemanasan biomassa terhadap waktu (a) tanpa batubara (b) 90%tkks:10% batubara (c) 70%tkks:30% batubara (d) 50%tkks:50% batu bara

Dapat dilihat bahwa penambahan batubara berpengaruh terhadap laju produksi syngas. Jika laju produksi syngas dirata-rata maka urutan dari yang terendah adalah variasi dengan penambahan batu bara 50% sebesar 805,082 cm³/menit, penambahan 10% batu bara sebesar 1505,4 cm³/menit, 30% batubara sebesar 949,96 cm³/menit, dan tanpa batubara sebesar 1694,54 cm³/menit. Penambahan batubara mampu menurunkan laju produksi syngas dikarenakan kandungan air yang terdapat pada batu bara masih memiliki

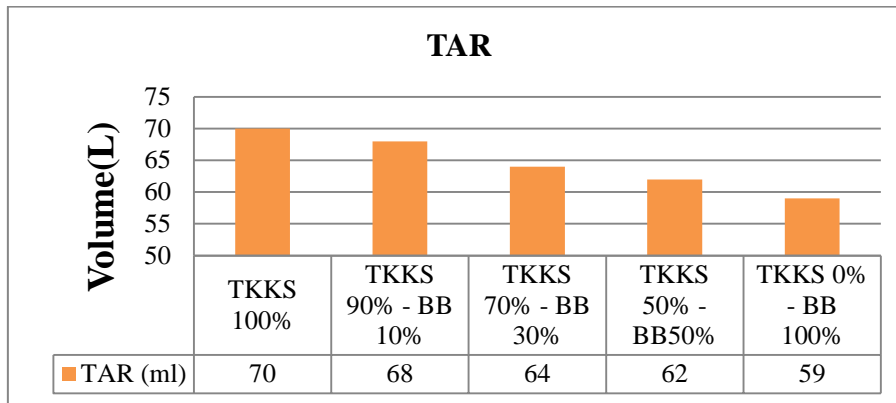
kandungan air yang tinggi sehingga sulit teruirainya batu bara pada saat proses gasifikasi berlangsung. Semakin banyak penambahan batubara dapat menurunkan laju produksi *syngas*. Hal ini terjadi karena semakin banyak penambahan batubara maka semakin sedikit luas bidang kontak antara batubara dan biomassa. Sehingga biomassa lebih banyak terkena pengaruh batu bara itu sendiri. Jadi dapat disimpulkan bahwa penambahan batubara pada proses gasifikasi tandan kelapa sawit mampu meningkatkan laju produksi gas.

Pada penelitian ini didapatkan volume total produksi gas hasil gasifikasi selama 2 jam, dengan pengambilan dimulai dari temperatur awal pengujian yaitu 27°C. Pada Gambar 4.4 membandingkan volume total produksi gas dengan variasi penambahan batubara. Dapat dilihat bahwa penambahan batubara berpengaruh terhadap volume total produksi gas, yang mana dengan semakin banyak penambahan batubara dapat menurunkan volume total produksi gas dengan urutan tanpa batubara sebesar 51,055 liter, penambahan batubara 10% sebesar 49,29 liter, batubara 30% sebesar 43,725 liter, dan yang terendah pada penambahan batu bara 50% sebesar 36,506 liter, Hal ini terjadi karena semakin banyak penambahan batubara maka semakin sedikit luas bidang kontak antara batubara dan biomassa. Sehingga biomassa lebih banyak terkena pengaruh batu bara itu sendiri. Jadi dapat disimpulkan bahwa penambahan batubara pada proses gasifikasi tandan kelapa sawit mampu menurunkan volume gas seiring penambahan batubara pada setiap variasi.

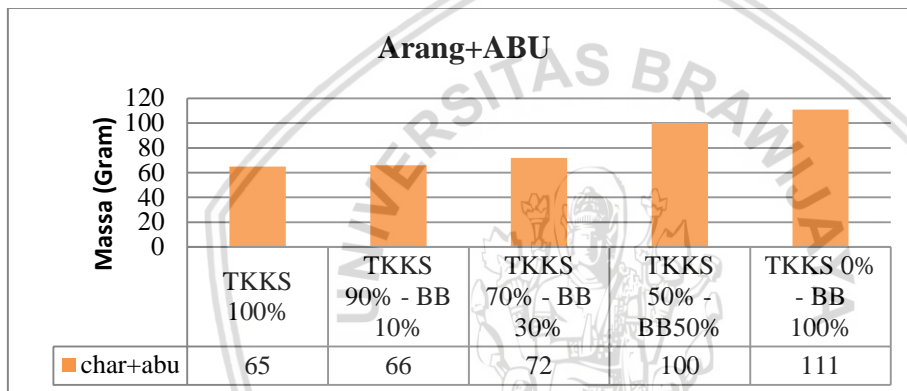


Gambar 4.4 Grafik volume total produksi gas hasil gasifikasi

4.4.4 Analisis Produk Hasil Gasifikasi



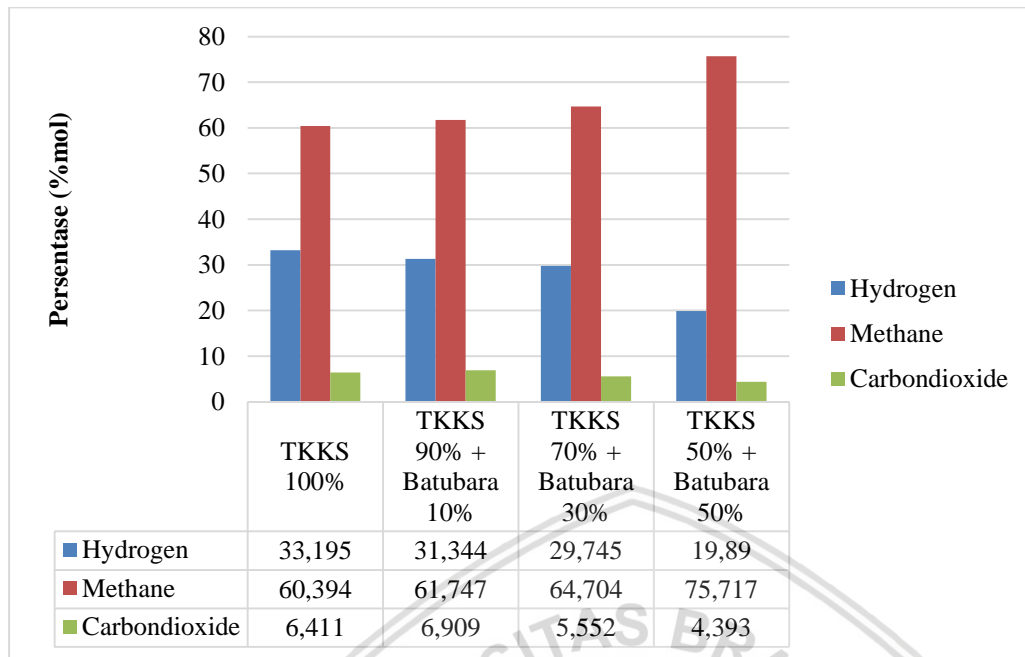
Gambar 4.5 Grafik komposisi tar pada gasifikasi tandan kelapa sawit tanpa batu bara dan penambahan kadar batu bara secara bertahap pada suhu 700°C



Gambar 4.6 Grafik komposisi arang+abu pada gasifikasi tandan kelapa sawit tanpa batu bara dan penambahan kadar batu bara secara bertahap pada suhu 700°C

Gasifikasi menghasilkan produk utama yaitu gas mampu bakar dan juga produk sampingan seperti tar dan arang+abu. Data produk hasil gasifikasi diambil selama waktu 2 jam gasifikasi dengan temperatur awal tungku gasifikasi 27°C. Pada Gambar 4.4 dan 4.5 dapat dilihat bahwa penambahan batubara berpengaruh terhadap produk hasil gasifikasi yang berupa char dan tar, Persentase massa dari produk tar cenderung menurun seiring penambahan batubara namun berbeda dengan produk arang+abu yang cenderung meningkat seiring penambahan batubara. Hal ini dikarenakan kurang terdekomposisinya batubara pada saat proses gasifikasi yang dapat menghambat proses penguraian gas sehingga didapatkan meningkatnya kecenderungan berat akhir dari biomassa tandan dengan batu bara.

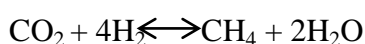
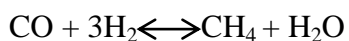
4.4.5 Analisis Kandungan Syngas Hasil Gasifikasi



Gambar 4.7 Grafik kandungan syngas dengan temperatur 700°C

Gambar 4.7 menjelaskan tentang kandungan gas hasil gasifikasi yang diambil sampelnya pada temperatur 700°C untuk berbagai variasi. Variasi campuran tandan kosong kelapa sawit 200 gram dan batu bara 0 gram ditulis dengan notasi TKKS 100%.

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat karakteristik masing-masing dari gasifikasi tandan kosong kelapa sawit dan batu bara. Karakteristik gas tandan kosong kelapa sawit memiliki lebih banyak kandungan CH₄ dan H₂ dibandingkan gas dari batu bara. Sedangkan karakteristik gas dari batu bara cenderung memiliki lebih banyak kandungan CO₂. Hal ini terjadi karena pada analisis ultimate tandan kosong kelapa sawit memiliki lebih banyak kandungan H dibanding batu bara, sedangkan batu bara memiliki kandungan C jauh lebih banyak dibanding tandan kosong kelapa sawit. Pada gasifikasi campuran 50% tandan kosong kelapa sawit dan 50% batu bara memiliki kandungan CH₄ yang lebih banyak dibandingkan dengan gasifikasi tandan kosong kelapa sawit dan batu bara yang 10% dan 30%. Gasifikasi campuran tandan kosong kelapa sawit dan batu bara mampu meningkatkan hasil gas CH₄ dikarenakan dari karakteristik hasil gas tandan kosong murni cenderung banyak menghasilkan gas H₂ dan hasil gas batu bara murni cenderung banyak menghasilkan CO dan CO₂. Sehingga jika keduanya dicampur, maka akan terjadi reaksi *methanation* seperti pada persamaan berikut.



Pada Gambar 4.6 dapat dilihat kandungan gas campuran tandan kosong kelapa sawit dan batu bara memiliki hasil CH_4 lebih besar dan hasil H_2 yang lebih kecil dibanding gas hasil tandan kosong kelapa sawit murni. Hal ini membuktikan bahwa H_2 yang terbentuk dari tandan kosong kelapa sawit bereaksi dengan karbon pada batu bara sehingga menghasilkan CH_4 .

Efisiensi Energi Gasifikasi Dengan persentase 50% TKKS:50%BB.

$$\eta = \frac{\text{Flowrate syngas (m}^3/\text{s)} \times \text{LHV syngas (kkal/m}^3)}{V \text{ (volt)} \times I \text{ (A)} \times t \text{ (s)}}$$

$$\eta = \frac{1067976 \text{ J}}{15840000 \text{ J}} \times 100\%$$

$$\eta = 6,742272\%$$

Efisiensi Energi Gasifikasi Dengan persentase 70% TKKS:30%BB.

$$\eta = \frac{\text{Flowrate syngas (m}^3/\text{s)} \times \text{LHV syngas (kkal/m}^3)}{V \text{ (volt)} \times I \text{ (A)} \times t \text{ (s)}}$$

$$\eta = \frac{115312 \text{ J}}{15840000 \text{ J}} \times 100\%$$

$$\eta = 7,281011\%$$

Efisiensi Energi Gasifikasi Dengan persentase 90% TKKS:10%BB.

$$\eta = \frac{\text{Flowrate syngas (m}^3/\text{s)} \times \text{LHV syngas (kkal/m}^3)}{V \text{ (volt)} \times I \text{ (A)} \times t \text{ (s)}}$$

$$\eta = \frac{1256431 \text{ J}}{15840000 \text{ J}} \times 100\%$$

$$\eta = 7,932011\%$$



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis pembahasan pengaruh penambahan batu bara terhadap hasil gasifikasi *updraft* tandan kelapa sawit, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Laju pemanasan dengan penambahan batu bara lebih besar dibandingkan tanpa batu bara dimana dengan menambah batu bara laju pemanasan $9,1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{menit}}$, $7,72 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{menit}}$ dan $8,30 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{menit}}$ sedangkan tanpa batu bara sebesar $8,94 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{menit}}$, dengan laju pemanasan optimal terjadi pada persentase tandan kelapa sawit dan batu bara sebesar 50%:50%.
2. Volume gas yang dihasilkan pada gasifikasi *updraft* dengan penambahan batu bara sebesar 36,506L, 43,725L, 49,290L dan tanpa batu bara sebesar 51,055L dengan penambahan batu bara volume gas yang dihasilkan menjadi lebih sedikit.
3. Komposisi *syngas* yang dihasilkan pada gasifikasi tandan kelapa sawit berupa CH_4 , CO , dan H_2 .
4. Laju produksi *syngas* optimal terjadi pada persentase bahan 100% Tandan Kelapa sawit.
5. Berat tar tertinggi hingga terendah saat proses gasifikasi berlangsung saat tanpa penambahan kadar batu bara sebesar 70 ml dan terendah terdapat pada penambahan batu bara 50% sebesar 59ml, dan berat Char/abu tertinggi terdapat pada penambahan batu bara 50% sebesar 100 gram, dan terendah tanpa adanya batu bara didapatkan sebesar 65 gram.

5.2 Saran

Adapun saran sang penulis harapan dari penelitian tentang pembuatan *syngas* dari campuran tandan kelapa sawit dengan batu bara dengan metode gasifikasi *updraft* ini adalah:

1. Sebaiknya untuk pengujian dengan penambahan batu bara menggunakan suhu yang lebih tinggi agar mengoptimalkan proses dekomposisi atau penguraian yang terjadi pada saat pengujian.

2. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut tentang medium terbaik untuk menghasilkan *syngas* seperti uap dan oksigen pada tandan kelapa sawit.
3. Sebaiknya sebelum melakukan pengujian tentang gasifikasi jangan diruangan yang tertutup untuk mencegah kebocoran gas.



DAFTAR PUSTAKA

- Bahrin, D. 2009. Analisa proksimat terhadap batu bara pada gasifikasi *Updraft*. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Surabaya : Universitas Teknologi Surabaya
- C. Turare, Biomass Gasification Technology and Utilization, Artes Institute, University of Flensburg, Flensburg, Germany, 1997.
- Fauzi, Darnoko et al, 2002. Low Rank Coal Pre-treatment to Increase Its Reactivity Towards Gasification with Biomass
- Fuadi Anwar, Faridah. 2003. Energi Alternatif pada *Agriculture*. Jakarta (INA)
- Jang sawang, W., Klimanek, A., & Gupta, A.K., 2005, Enhanced yield of hydrogen from wastes using high temperature steam gasification, *Trans. ASME, J. Energy Resources Technology*
- Jarungthammachote, S. & Dutta, A., 2006, Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier, *The 2nd Joint Intl. Conf. on Sustainable Energy and Environment*, Bangkok, 21 – 23 November
- Jay, D.C., Sipila, K.H., Rantanen, O.A., and Nylund, N.O. (1995) Wood pyrolysis oil for diesel engines, in *ASME Fall Technical Conference, ICE-Vol. 25-3*
- Khadse, A., Parulekar, P., Aghalayam, P., & Ganesh, A., 2006, Equilibrium model for biomass gasification, *Advances in Energy Research*,
- Kurniawan, (2012). Karakteristik Konvensional *Updraft Gasifier* dengan Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet Melalui Pengujian Variasi *Flow Rate* Udara. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Depok L Universitas Indonesia
- Ma dan Yousuf. 2005. Analisa Proksimat Gasifikasi Terhadap Tandan Kosong Kelapa Sawit
- Melgar, A., Perez, J.F., Laget, H., & Horillo, A., 2007, Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process, *Energy Conversion and Management* 48, 59–67
- Mutasim. 2007. ASTM D6866 Testing for Partially Renewable Fuel. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Surabaya : Universitas Pembangunan Nasional
- Purwantana Bambang, *Gasifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Updraft Gasifier*. Jurnal. Universitas Gadjah Mada
- Raharjo Slamet, 2012. Gasifikasi-Uap Biomassa Untuk Menghasilkan Hidrogen – Simulasi dengan Model Keseimbangan
- S.Samy, Sadaka, A.E.Ghaly and M.A.Sabbah, Two phase biomass air-steam gasification model for fluidized bed reactors: Part I—model development. *Biomass and Bioenergy*, 22, pp. 439 –462, 1998

Sjöström, K.; Chen, G.; Yu, Q.; Brage, C.; Rosén, C. Promoted reactivity of char in co-gasification of biomass and coal: Synergies in the thermochemical process. *Fuel* 1999, 78, 1189–1194

Subroto, Dwi Prastiyo. 2013. Unjuk Kerja Tungku Gasifikasi Dengan Bahan Bakar Sekam Padi Melalui Pengaturan Kecepatan Udara Pembakaran. Surakarta, Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta.

Sukandarrumidi, 2006. batubara dan pemanfaatannya: pengantar teknologi batubara menuju lingkungan bersih

Tirasonjaya, F., 2006. Ilmu batubara.wordpress.com/2006

Tomeczek et al. 1992. Spalanie wqgla [Coal combustion]

Yunita Purnamasari, 2000, “Pembuatan Briket Dari Batubara Kualitas Rendah Dengan Proses Non Karbonisasi Dengan Menambahkan MgO dan MgCl₂”, UPN”Veteran” Jawa Timur

Zhang et al. 2013. *Biomass gasification Demonstration Projects in China*

