KARAKTERISTIK PRODUK TOREFAKSI BIOMASSA DAN POTENSI PEMANFAATAN TORGAS SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR

(Skripsi)

Oleh

Ivan Wijaya

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019

ABSTRACT

CHARACTERISTICS OF BIOMASS TORREFACTION PRODUCTS AND TORREFACTION GAS UTILIZATION POTENTIAL AS FUEL IN CONTINUOUS TUBULAR REACTOR

By

Ivan Wijaya

Indonesia is well known for its agriculture products, with crude palm oil, coffee beans, and cassava as some of the products with higher production rates. The high availability of these products and their wastes makes the potential of torrefaction to produce solid fuel to replace fossil fuels in Indonesia more than promising. Unfortunately the total energy needed in the heating process of torrefaction is relatively high, depending on the reactor types and biomass characteristics. Among the attempts done to overcome this issue, utilization of torrefaction gas, a side product of torrefaction, is one that is pretty popular. On its standard condition (275 °C, 30 min) torrefaction is carried out for the three stated biomass wastes, the energy content of torrefaction gas and its significance to the total energy needed in the heating process is investigated in this study. With an average heating energy of 54730 kJ per sample, the torrefaction gas of empty fruit bunches, coffee husks, and cassava peels has the energy content of 2094.5 kJ, 2701.2 kJ and 3216.3 kJ that makes their energy saving potential 3.83 %, 4.94 % and 5.88 % consecutively.

Keywords : Torrefaction, Torrefaction Products, Torrefaction Gas, EFB, Coffee Husks, Cassava Peels.

ABSTRAK

KARAKTERISTIK PRODUK TOREFAKSI BIOMASSA DAN POTENSI PEMANFAATAN TORGAS SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR

Oleh

Ivan Wijaya

Indonesia memiliki beberapa produk-produk perkebunan yang cukup terkenal, beberapa contohnya seperti minyak kelapa, kopi dan singkong. Tingginya laju produksi bahan-bahan ini menyebabkan limbah yang dihasilkan juga sangat tinggi. Dengan melimpahnya jumlah bahan-bahan biomassa dan limbahnya ini, potensi pemanfaatan proses torefaksi untuk menghasilkan bahan bakar padat terbarukan untuk mengganti bahan bakar fosil di Indonesia lebih dari menjanjikan. Dalam usaha untuk mengurangi kebutuhan energi pada proses pemansannya, pemanfaatan gas torefaksi, sebuah produk sampingan dari proses torefaksi, adalah salah satu yang paling umum. Pada kondisi standar (275 °C, 30 min), torefaksi dilakukan untuk ketiga limbah biomassa diatas, karakteristik produk torefaksi dan signifikansi pemanfaatan torgas pada kebutuhan energi pemanasan pada reaktor kontinu tipe tubular adalah hasil yang diamati pada penelitian ini. Dengan energi pemanasan rata-rata sebesar 54730 kJ untuk tiap sampel, gas torefaksi dari tandan kosong sawit, kulit kopi dan kulit singkong memiliki kandungan energi sebesar 2473.5 kJ, 2701.2 kJ and 3216.3 kJ yang membuat potensi penghematan energi pemanasan sebesar 4.52 %, 4.94 % and 5.88 % secara berturut-turut.

Kata kunci: Torefaksi, Produk Torefaksi, Gas Torefaksi, TKKS, Kulit Kopi, Kulit Singkong

KARAKTERISTIK PRODUK TOREFAKSI BIOMASSA DAN POTENSI PEMANFAATAN TORGAS SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR

Oleh

Ivan Wijaya

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2019

Judul Skripsi : **KARAKTERISTIK PRODUK TOREFAKSI BIOMASSA DAN POTENSI PEMANFAATAN TORGAS SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA REAKTOR KONTINU TIPE TUBULAR**

Nama Mahasiswa : *Ivan Wijaya*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1515021014

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Amrul, S.T., M.T.	**Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP 19710331 199903 1 003	NIP 19700202 199803 1 004

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Amrul, S.T., M.T.** .....

Anggota Penguji : **Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.** .....

Penguji Utama : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik

Prof. Dr. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **28 Oktober 2019**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN REKTOR NO. 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, 20 November 2019

Yang menyatakan

METERAI TEMPEL

TGL.

43DCFAFF737098424

6000

ENAM RIBU RUPIAH

Ivan Wijaya

NPM. 1515021014

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Kecamatan Teluk Betung Utara, Kota Bandar Lampung pada tanggal 22 Desember 1997. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Bapak Ho Beng Lay dan Ibu Dewi Sartika. Penulis menyelesaikan pendidikan taman kanak-kanak di TK Taman Siswa Bandarlampung pada tahun 2003. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Taman Siswa Bandarlampung pada tahun 2009, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Bandarlampung pada tahun 2012, dan pendidikan menengah atas di SMA Immanuel Bandarlampung pada tahun 2015. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan di Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung pada tahun 2015 melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah aktif di dalam organisasi kemahasiswaan, diantaranya, Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota bidang DIKLAT (Pendidikan dan Pelatihan) pada periode 2016-2017 dan 2017-2018 dan Dewan Pembina pada periode 2018-2019. Selain itu penulis juga pernah mengambil peran sebagai moderator pada beberapa kegiatan seperti MEE (Mechanical Engineering Expo) pada tahun 2016, ICETsAS (International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences) pada tahun 2018 dan SIMTEK (Simposium Nasional Ilmu Teknik) pada tahun 2019. Penulis juga telah melaksanakan Program Kerja Praktik (KP) di MPP 4x25 MW Tarahan Lampung pada tahun 2018. Pada tahun 2019, penulis yang mengambil konsentrasi konversi energi melakukan penelitian dengan judul “Karakteristik Produk Torefaksi Biomassa dan Potensi Pemanfaatan Torgas sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Kontinu Tipe Tubular” dibawah bimbingan Bapak Dr. Amrul S.T., M.T. dan Dr. Amrizal S.T., M.T., Ph.D.

MOTTO

The LORD is gracious and righteous; our God is full of compassion.

The LORD protects the simplehearted; when I was in great need, He saved me.

Be at rest once more, O my soul, for the LORD has been good to you.

For You, O Lord, have delivered my soul from death, my eyes from tears, my feet from stumbling.

That I may walk before the LORD in the land of the living.

Psalms 116 : 5 – 9 (NIV)

Then Moses said to Him, "If Your presence does not go with us, do not send us up from here. How will anyone know that You are pleased with me and with your people unless You go with us? What else will distinguish me and your people from all the other people on the face of the earth?"

And the Lord said to Moses, "I will do the very thing you have asked, because I am pleased with you and I know you by name"

Exodus 33 : 15-17 (NIV)

"Sebab Aku ini mengetahui rancangan-rancangan apa yang ada pada-Ku mengenai kamu"

demikianlah firman TUHAN

"yaitu rancangan damai sejahtera dan bukan rancangan kecelakaan, untuk memberikan kepadamu hari depan yang penuh harapan"

Yeremia 29 : 11 (TB)

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Tuhan Yesus Kristus atas seluruh anugerah dan kasih setia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsinya yang berjudul "**Karakteristik Produk Torefaksi Biomassa dan Potensi Pemanfaatan Torgas sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Kontinu Tipe Tubular**" ini sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan dan mencapai gelar Sarjana Teknik pada Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa selama proses pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, dukungan serta motivasi dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis dengan rendah hati mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Suharno, M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T., M.T., selaku Ketua Juruan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Pembimbing I pada penelitian ini, atas seluruh bimbingan, saran, perhatian dan motivasi yang diberikan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Amrizal, S.T., M.T., selaku Pembimbing II pada penelitian ini, yang telah memberikan kemudahan, masukkan dan kritik untuk skripsi ini agar menjadi lebih baik.
5. Bapak Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku pembahas pada penelitian ini, yang telah memberikan semangat, dukungan dan motivasi kepada penulis, serta kritik dan saran untuk tulisannya.
6. Seluruh jajaran dosen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung untuk ilmu dan bimbingan, serta motivasi baik secara langsung ataupun tidak

langsung yang telah diberikan kepada penulis selama penulis menjalani masa studinya.

7. Keluargaku, untuk papa (Ho Beng Lay), mama (Dewi Sartika), koko (Dani Wijaya) dan dede (Collen Dora) atas segenap perhatian, kasih sayang, doa, motivasi dan hiburan yang diberikan kepada penulis. Thank you.
8. Seluruh teman-teman penelitian torefaksi, Mas Zaenal, Bang Cakra, Bang Algo dan terutama Ocid dan Mas Retno atas kerjasama dan hiburan yang diberikan selama proses pelaksanaan penelitian.
9. Teman-teman Pejuang ST, Natal, Willy, Theo, Ray, Memed dan Raja atas dukungan dan telah menjadi teman baik.
10. Seluruh teman-teman Teknik Mesin angkatan 2015 yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
11. Seluruh pihak yang secara langsung ataupun tidak langsung telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Biarlah kiranya skripsi ini boleh bermanfaat dan seluruh kebaikan, bantuan serta dukungan yang telah diberikan kepada penulis dapat dikembalikan menurut porsinya masing-masing dari Tuhan YME. Akhir kata, saya ucapkan terima kasih.

Bandarlampung, 28 November 2019
Penulis,

Ivan Wijaya

DAFTAR ISI

COVER ..... **i**
ABSTRAK ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
HALAMAN JUDUL ..... **iv**
HALAMAN PERSETUJUAN ..... **v**
HALAMAN PENGESAHAN ..... **vi**
PERNYATAAN PENULIS ..... **vii**
RIWAYAT HIDUP ..... **viii**
MOTTO ..... **ix**
SANWACANA ..... **x**
DAFTAR ISI ..... **xi**
DAFTAR TABEL ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiv**

I. PENDAHULUAN
A. Latar Belakang 1
B. Tujuan 5
C. Manfaat Penelitian 5
D. Batasan Masalah 5
E. Sistematika Penulisan 6

II. TINJAUAN PUSTAKA
A. Biomassa 8
B. Tandan Kosong Sawit 13
C. Limbah Kulit Kopi 16
D. Limbah Kulit Singkong 17

E. Torefaksi 18
F. Torgas 34
G. Estimasi Nilai Kalor Produk Torefaksi 39

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian 42
B. Alat dan Bahan 43
C. Metode Pengambilan Data 49
D. Pengujian Laboratorium 50
E. Diagram Alir Penelitian 50
F. Rancangan Eksperimen Torefaksi 51

IV. DATA DAN PEMBAHASAN

A. Data 54
B. Pembahasan 60

V. PENUTUP

A. Simpulan 72
B. Saran 73

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2.1	Jenis, Potensi dan Pemanfaatan Limbah Pabrik Kelapa Sawit	15
2.2	Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit	15
2.3	Komposisi Penyusun Kulit Singkong	17
3.1	Rencana Kegiatan Penelitian	42
4.1	Data Hasil Analisis *Proximate*	54
4.2	Data Hasil Analisis *Ultimate*	55
4.3	Data Kandungan Energi Produk Padat	57
4.4	Data Kandungan Energi Produk Gas	58
4.5	Data Potensi Penghematan Energi Dengan Pemanfaatan Torgas	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

2.1 Diagram alur pengolahan kelapa sawit 14
2.2 Skema perubahan berat komponen lignoselulosa pada biomassa 20
2.3 Mekanisme peluruhan komponen lignoselulosa 20
2.4 Perubahan massa dan energi dari bahan biomassa yang ditorefaksi ... 21
2.5 Produk yang dihasilkan dari torefaksi biomassa 28
2.6 Balans massa dan energi dari proses torefaksi kayu dengan temperatur dan waktu tinggal 250˚C dan 30 min 34
2.7 Proses kombinasi pengeringan dan torefaksi yang dikembangkan oleh *Energy Research Center of Netherlands* (ECN) 37
3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular yang akan digunakan dalam penelitian 44
3.2 Sistem pemanas reaktor torefaksi yang digunakan 44
3.3 Gas LPG sebagai bahan bakar proses torefaksi 45
3.4 Termokopel untuk mengukur temperatur pemanasan pada reaktor 45
3.5 Timbangan digital untuk menimbang massa biomassa yang akan dimasukkan ke reaktor 46
3.6 Gas nitrogen untuk membuat kondisi *inert* pada reaktor 46
3.7 *Stopwatch* untuk mengukur waktu tinggal 47
3.8 Limbah TKKS 48
3.9 Limbah kulit singkong 48
3.10 Limbah kulit kopi 48
3.11 Diagram alir penelitian 51
4.1 Komposisi produk gas torefaksi tandan kosong, kulit singkong dan kulit kopi 56

4.2 Mass yield produk padat, gas dan cair hasil torefaksi yang diperoleh 56
4.3 Balans energi proses torefaksi tandan kosong kelapa sawit 59
4.4 Balans energi proses torefaksi kulit singkong 60
4.5 Balans energi proses torefaksi kulit kopi..... 60
4.6 Hasil analisis proksimat produk padat torefaksi 61
4.7 Hasil analisis ultimat produk padat torefaksi..... 62
4.8 Nilai HHV dan LHV sampel mentah dan produk torefaksi 62
4.9 Kandungan energi bahan mentah dan produk padat torefaksi..... 63
4.10 Energy yield produk padat torefaksi..... 65
4.11 Kandungan kalor produk gas torefaksi 68
4.12 Nilai potensi penghematan energi pemanasan dengan pemanfaatan energi torgas..... 70
4.13 Neraca energi proses torefaksi TKKS, kulit singkong dan kulit kopi . 71

BAB I
PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bahan bakar fosil merupakan sumber energi yang saat ini masih paling banyak digunakan dalam kehidupan manusia. Kebutuhan manusia atas energi fosil yang semakin meningkat menyebabkan kesediaan bahan bakar ini di alam semakin menipis akibat waktu yang dibutuhkan untuk pembentukkannya tidak dapat mengimbangi laju penggunaannya. Selain akibat kelangkaannya, penggunaan bahan bakar fosil dalam jumlah besar dan terus menerus dalam jangka waktu yang lama mengakibatkan masalah lingkungan yang serius dan telah menjadi perhatian global. Gas hasil pembakaran bahan bakan fosil menyebabkan fenomena yang disebut efek rumah kaca yang dapat mempengaruhi iklim global. Akibat kedua alasan tersebut, banyak negara yang telah menetapkan aturan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan mencari bahan bakar alternatif yang dapat terbarukan.

Di Indonesia sendiri telah ditetapkan peraturan pemerintah No.79 tahun 2014 yang mengatur tentang kebijakan energi nasional yang mencakup memaksimalkan penggunaan energi terbarukan dengan pertimbangan

ekonomis, meminimalisir penggunaan bahan bakar fosil serta memanfaatkan gas bumi dan energi baru (Salmina, 2018). Energi terbarukan adalah energi yang dapat dipulihkan atau dibarukan dengan cepat dan alami dalam proses yang berkelanjutan. Jenis energi ini dihasilkan dari sumber energi yang secara alami tidak akan habis apabila dikelola dengan baik. Beberapa contoh dari energi terbarukan adalah seperti panas bumi, air, angin, sinar matahari, gelombang air laut, serta bahan biomassa.

Bahan biomassa sebagai salah satu sumber energi terbarukan, merupakan salah satu yang paling diminati karena pengolahannya yang relatif mudah dan murah dibandingkan jenis sumber energi terbarukan lain sampai menjadi energi. Biomassa sendiri secara sederhana dapat diartikan sebagai komponen-komponen dari mahluk hidup yang masih hidup ataupun telah mati. Bahan ini dikatakan terbarukan karena kesediaannya yang berlimpah dan dapat diperbaharui dengan cepat. Selain itu, bahan biomassa juga disebut sebagai sumber energi ‘bersih’ karena karbon dioksida yang dilepaskan dari pembakaran bahan bakar biomassa dikompensasi oleh karbon dioksida yang telah diserapnya selama dia hidup, sehingga secara praktis dapat dikatakan bahan bakar biomassa tidak berkontribusi pada efek rumah kaca.

Jenis energi yang diperoleh dari pengolahan biomassa pada umumnya adalah energi kalor dari pembakaran bahan bakar biomassa, baik dalam bentuk padat, cair ataupun gas. Pengolahan bahan biomassa menjadi bahan bakar dikelompokkan menjadi dua kategori besar, yaitu *biological treatment* dan *thermal treatment*. Dari namanya, *biological treatment* adalah metode

mengolah bahan biomassa menjadi bahan bakar dengan memanfaatkan agen-agen biologis, beberapa metodenya seperti dengan fermentasi serta pencernaan aerobik dan anaerobic. *Thermal treatment* adalah jenis metode pengolahan bahan biomassa menjadi bahan bakar dengan memanfaatkan bantuan temperatur tinggi, beberapa metodenya seperti pirolisis, torefaksi, gasifikasi serta pembakaran.

Salah satu bahan biomassa yang paling banyak dan berpotensi di Indonesia adalah kelapa sawit. Indonesia yang merupakan produsen dan eksporter terbesar minyak kelapa sawit (CPO) di dunia, dengan 14,03 juta hektar lahan perkebunan sawit dan memenuhi sekitar 37,8 juta ton atau 56,6% kebutuhan minyak kelapa sawit dunia pada tahun 2017, juga merupakan negara dengan potensi limbah biomassa sawit terbesar di dunia (Salmina, 2018). Limbah padat yang diperoleh dari pengolahan tandan sawit segar (TBS) meliputi tandan kosong (EFB) dengan persentase sekitar 23% berat TBS, abu boiler mencapai 0,5% berat TBS, serat mencapai 12,5% berat TBS, dan cangkang yang mencapai 5,5% berat TBS. Tandan kosong (TKKS) yang merupakan limbah padat dengan persentase terbesar masih belum banyak dimanfaatkan, kebanyakan hanya menjadi pupuk ataupun makanan ternak. Padahal dengan komponen selulosa 41,3%-46,5%, hemiselulosa 25,3%-32,5% dan lignin 27,6%-32,5%, TKKS memiliki potensi sebagai sumber energi yang cukup besar (Chang, 2014).

Torefaksi adalah metode pemanasan lambat biomassa dalam kondisi sedkit sekali sampai tanpa oksigen pada temperatur 200-300˚C dan kemudian

menahannya sampai waktu tertentu (Basu, 2014). Metode yang juga dikenal dengan *soft pyrolysis* ini merupakan salah satu metode pengolahan bahan biomassa mentah menjadi bahan bakar biomassa. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan *energy density* dan nilai kalor biomassa dengan cara meningkatkan kandungan karbon dan mengurangi kandungan oksigen serta hydrogen pada bahan biomassa. Produk utama dari torefaksi adalah produk padatan yaitu sekitar 70% berat biomassa masuk (Basu, 2014), produk torefaksi ini umumnya akan dipadatkan lagi menjadi pelet ataupun briket yang akan lebih lagi meningkatkan densitas energinya hingga memiliki karakteristik pembakaran menyerupai batubara dan dapat digunakan dalam *co-combustion* bersama batubara.

Metode torefaksi ini masih sangat terbuka untuk pengembangan. Mulai dari mempelajari parameter torefaksi optimal, jenis reaktor dan kelebihannya masing-masing, sampai cara-cara untuk meningkatkan efisiensi dari proses torefaksi. Dalam usaha meningkatkan efisiensi, salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan energi panas dari gas hasil torefaksi atau torgas. Torgas yang pada umumnya mencakup 30% berat bahan biomassa masuk ini merupakan campuran volatile serta gas-gas lainnya dengan kandungan utama berupa CO_2, CO, CH_4 serta H_2 (Stelte, 2012). Oleh sebab itu, penulis tertarik untuk menulis melakukan penelitian mengenai potensi kalor dari produk gas torefaksi beberapa jenis bahan biomassa seperti limbah tandan kosong sawit, campuran limbah biomassa serta limbah kulit singkong menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular.

B. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis komposisi produk torefaksi biomassa menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular.
2. Mengetahui neraca energi dari reaktor torefaksi kontinu tipe tubular.
3. Menentukan potensi pemanfaatan kalor gas buang hasil torefaksi biomassa sebagai bahan bakar pada proses pemanasan.

C. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan penulis dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat memahami cara kerja dan kelebihan dari pengolahan bahan biomassa menggunakan metode torefaksi.
2. Dapat mengetahui karakteristik dari produk gas dan padat hasil torefaksi.
3. Dapat mengetahui potensi kalor yang dapat dimiliki oleh gas hasil torefaksi.

D. Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan lebih terfokus dan dapat mencapai tujuan yang telah ditetapkan, berikut beberapa batasan masalah dari penelitian ini:

1. Penelitian dilakukan mengunakan beberapa jenis bahan biomassa, diantaranya adalah limbah tandan kosong kelapa sawit, limbah kulit

singkong dan limbah kulit kopi menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular skala lab yang ada di jurusan Teknik Mesin UNILA.

2. Reaktor torefaksi yang digunakan menggunakan sistem pemanas *oil jacket* dengan fluida pemanas berupa *heat transfer fluid type* CAFLO™ AF merk PETROCANADA.
3. Komponen torgas yang akan diujikan hanya mencakup komponen-komponen utama torgas, yaitu karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), hidrogen (H_2) dan metana (CH_4) yang diperoleh melalui literatur.
4. Proses torefaksi diasumsikan berlangsung pada tekanan atmosfir dan kondisi *steady*.
5. Penelitian dilakukan pada temperatur 275˚C dan waktu tinggal 30 menit.

E. Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan oleh penulis dalam penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Berisi uraian latar belakang, tujuan dan batasan masalah dalam penulisan laporan serta sistematika yang digunakan penulis dalam menyusun laporannya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori-teori dasar atau literatur yang menjadi pedoman atau acuan yang berhubungan dengan penelitian ini.

III. METODE PENELITIAN

Berisi mengenai waktu dan tempat, alur atau tahapan, serta metode-metode yang digunakan oleh penulis dalam pelaksanaan penelitian.

IV. DATA dan PEMBAHASAN

Berisikan data-data yang diperolah dari hasil penelitian yang telah dilakukan beserta pembahasan pengaruh berbagai parameter yang pada penelitian ini.

V. PENUTUP

Berisikan simpulan dari hasil penelitian yang diperoleh serta saran yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya

DAFTAR PUSTAKA

Berisi sumber dan referensi yang digunakan oleh penulis dalam menyusun laporan penelitian ini.

LAMPIRAN

Berisi data pelengkap seperti gambar, dan beberapa data pendukung untuk menunjang kredibilitas laporan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Biomassa

Biomassa terbentuk dari mahluk hidup seperti tanaman dan hewan, atau apapun yang hidup atau baru saja mati. Tidak seperti bahan bakar fosil, biomassa tidak membutuhkan jutaan tahun untuk dapat digunakan. Tanaman menggunakan cahaya matahari melalui fotosintesis untuk memproses karbon dioksida di atmosfer dan air untuk tumbuh. Hewan kemudian tumbuh dengan menerima energi dari bahan biomassa. Berbeda dari bahan bakar fosil, biomassa dapat bereproduksi, dan karena alasan inilah biomassa dikategorikan sebagai energi terbarukan. Sifatnya yang mudah diperbaharui inilah juga yang membuat banyak orang tertarik untuk menggunakannya sebagai sumber energi (Basu, 2013).

Setiap tahun, biomassa berkembang dengan jumlah yang sangat besar melalui fotosintesis dengan cara menyerap CO_2 dari lingkungan. Ketika biomassa dibakar, maka ia akan melepaskan karbon dioksida yang telah diserapnya dari lingkungan beberapa waktu yang lalu (mulai dari beberapa jam sampai beberapa tahun lalu). Oleh sebab itu, pembakaran bahan biomassa tidak menambahkan jumlah karbon dioksida di bumi sehingga biomassa juga dapat

disebut “*carbon-neutral*). Namun pada praktiknya, biomassa akan mengalami penambahan jumlah karbon yang diterimanya selama budidaya, penggunaan pupuk/pestisida, pemanenan ataupun pengangkutan. Hal ini dapat menjadi meningkatkan jumlah karbon dioksida yang diproduksi oleh bahan bakar biomassa. Sehingga jumlah karbon tambahan yang diterima biomassa selama proses produksinya dapat menentukan klasifikasi bahan bakarnya, dari bahan bakar berkarbon rendah bahkan netral. Namun biomassa tetap menjadi perhatian karena jika dibandingkan dengan karbon yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil, karbon tambahan dari produksi biomassa sangat kecil atau bahkan dapat diabaikan (Tajalli, 2015).

1. Produk Biomassa

   Tiga produk utama yang dapat dihasilkan dari biomassa adalah sebagai berikut: (Basu, 2013)

   a. Bahan bakar cair

      Meliputi: ethanol, biodiesel, methanol, minyak sayur dan minyak pirolisis

   b. Bahan bakar gas

      Meliputi: biogas (CH_4, CO_2), *producer gas* (CO, H_2, CH_4, CO_2), syngas (CO, H_2) dan gas alam pengganti (CH_4)

   c. Bahan bakar padat

      Meliputi: arang, biomassa torefaksi, *biocoke*, *biochar*.

2. Konversi Biomassa

Proses konversi bahan mentah biomassa menjadi bahan bakar biomassa secara umum terbagi menjadi dua kategori besar, yaitu : (Basu, 2013)

a. *Biochemical Conversion*

Sesuai namanya, *Biochemical conversion* adalah metode pengolahan biomassa menjadi bahan bakar dengan bantuan agen-agen biologis atau kimia. Disini molekul biomassa akan dipecah menjadi molekul yang lebih kecil oleh bakteri atau enzim. Proses ini memakan waktu yang jauh lebih lama dibandingkan dengan konversi termal, namun tidak memerlukan energi yang besar. Beberapa contohnya adalah sebagai berikut:

1) Pencernaan Aerobik

Disebut juga dengan proses pengomposan, adalah proses pemecahan molekul biomassa dengan kehadiran oksigen, Proses ini menggunakan banyak jenis mikroorganisme yang dapat mengakses oksigen dari udara, memproduksi karbon dioksida, panas, dan *digestate* padat.

2) Pencernaan Anaerobik

Produk utama proses ini adalah metana dan karbon dioksida dan juga residu padat. Proses ini terjadi pada lingkungan tanpa oksigen dan bantuan bakteri, sehingga bakteri akan mengambil oksigen dari bahan biomassa tersebut.

3) Fermentasi

Dalam fermentasi, bagian dari biomassa diubah menjadi gula menggunakan asam atau enzim. Gula kemudian diubah menjadi etanol ataupun bahan kimia lain dengan bantuan ragi. Lignin dari biomassa tidak dapat diubah sehingga akan tertinggal baik untuk pembakaran ataupun untuk konversi termal. Tidak seperti proses pencernaan, produk fermentasi pada umumnya adalah cairan.

b. *Thermal Conversion*

Konversi termal adalah metode pengolahan bahan biomassa menjadi bahan bakar dengan memanfaatkan bantuan temperatur yang tinggi, beberapa metodenya seperti: (Basu, 2013)

1) Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi eksotermik antara oksigen dan komponen hidrokarbon dalam biomassa dan menghasilkan dua komponen stabil yaitu H_2O dan CO_2.

2) Pirolisis

Tidak seperti pembakaran, pirolisis membutuhkan lingkungan tanpa oksigen. Proses ini memecah molekul biomassa secara termal menjadi komponen gas, cair dan padat dengan pemanasan cepat biomassa diatas 300-400 $^{\circ}$C. Pada pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) produk utamanya adalah bahan bakar cair, dikenal dengan bio-oil, sedangkan pada pirolisis lambat (*slow pyrolysis*) produk utamanya adalah padatan dan sedikit gas.

3) Torefaksi

Torefaksi dianggap sebagai pemanfaatan yang efektif dari biomassa sebagai bahan bakar padat yang bersih dan mudah. Pada torefaksi, biomassa dipanaskan secara lambat dengan sedikit sekali sampai tanpa oksigen pada temperatur 200-300 ˚C. Proses ini mengubah struktur dari hidrokarbon biomassa dan meningkatkan kandungan karbon dan mengurangi kandungan oksigen dan hidrogennya. Torefaksi juga meningkatkan densitas energi dan membuatnya hidrofobis. Sifat ini meningkatkan nilai komersil kayu untuk produksi dan pemindahan energi.

4) Gasifikasi

Gasifikasi mengubah bahan bakar fosil dan non-fosil (padat, cair, gas) menjadi gas-gas dan bahan kimia yang berguna. Proses ini membutuhkan medium untuk reaksi, dapat berupa gas atau air superkritis. Media gas nya dapat berupa udara, oksigen, uap subkritis atau campuran dari ketiganya. Gasifikasi juga membuang oksigen dari bahan bakar untuk meningkatkan densitas energinya.

5) Liquifaksi

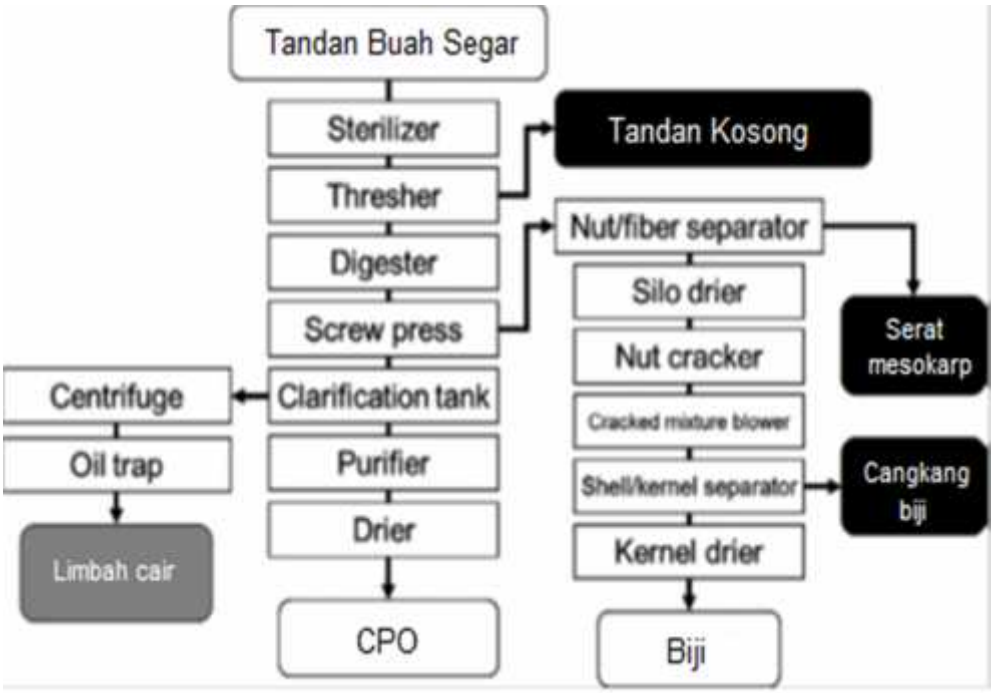
Liquifaksi bahan biomassa padat menjadi bahan baakr cair dapat dilakukan melalui pirolisis, gasifikasi ataupun proses hidrotermal. Pada proses ini, biomassa dikonversi menjadi cairan berminnyak dengan menkontakkan biomassa dengan air pada temperatur 300-350 ˚C dan tekanan 12-20 MPa selama beberapa waktu.

B. Tandan Kosong Sawit

Tanaman kelapa sawit yang memiliki nama latin *Elaeis guineensis Jack* merupakan tanaman penghasil minyak kelapa sawit (CPO) serta inti kelapa sawit dan telah menjadi salah satu primadona tanaman perkebunan yang menjadi sumber penghasil devisa non-migas bagi Indonesia. Indonesia masih dinobatkan sebagai produsen dan eksportir CPO terbesar dunia dengan produksi yang mencapai 37,8 juta ton pada akhir tahun 2017. Nilai yang setiap tahunnnya terus meningkat ini diprediksi akan mencapai angka 40 juta ton atau lebih pada tahun 2020. Ini membuat potensi kelapa sawit serta produk-produknya sangat besar di Indonesia (Salmina, 2018).

Proses pengolahan tandan buah segar (TBS) kelapa sawit hingga menjadi CPO terdiri dari tahapan. Tahap pertama adalah jembatan timbang yang bertujuan untuk mengetahui berat dari TBS yang diterima oleh pabrik, kemudian melalui proses penyortiran dimana kualitas dan kematangan buah sawit harus diperiksa dengan baik, dilanjutkan dengan proses perebusan buah sawit (*sterilizer*) yang bertujuan untuk mengurangi peningkatan asam lemak bebas, mempermudah proses perontokkan buah dan menurunkan kadar air pada buah sawit, setelah ini buah sawit akan dipisahkan dari tandan sawit dengan cara dibanting dan dimasukkan ke *empty bunch conveyor*, buah kemudian dicincang didalam *digester* dan diperas dengan cara ditekan menggunakan *presser* dan menghasilkan minyak kasar sawit atau *Crude Palm Oil* (CPO) dan ampas press. Proses terakhir adalah proses pemurnian minyak pada *clarification station* untuk memurnikan *crude oil* menjadi CPO (Latif

dkk., 2014). Gambar 2.1 berikut menunjukkan diagram alur proses pengolahan kelapa sawit.



Gambar 2.1 Diagram alur pengolahan kelapa sawit (Uemura, 2011)

Pengolahan kelapa sawit menjadi CPO menghasilkan beberapa jenis limbah padat seperti tandan kosong sawit, cangkang serta serat. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan limbah utama dari pengolahan kelapa sawit. Dari pengolahan 1 ton TBS akan dihasilkan minyak sawit kasar (CPO) sebesar 0,21 ton (21%) dan minyak inti sawit (PKO) sebesar 0,05 ton (5%) dan sisanya adalah limbah dengan jumlah TKKS 0,23 ton (23%), serat 0,135 ton (13,5%) dan cangkang biji 0,55-0,65 ton (5,5-6,5%) (Salmina, 2018). Selain limbah padat dihasilkan juga limbah cair. Limbah padat dan cair ini dapat diolah lagi menjadi produk yang memiliki manfaat serta nilai ekonomi yang lebih tinggi. Tabel 2.1 menampilkan potensi dari limbah kelapa sawit.

Tabel 2.1 Jenis, Potensi dan Pemanfaatan Limbah Pabrik Kelapa Sawit

Jenis	Potensi per ton TBS (%)	Manfaat
Tandan Kosong	23,0	Pupuk, kompos, pulp kertas, papan artikel, energi
Wet Decanter Solid	4,0	Pupuk, kompos, makanan ternak
Cangkang	6,5	Arang, karbon aktif, papan partikel
Serat	13,0	Energi, pulp kertas, papan partikel
Limbah Cair	50,0	Pupuk, kompos
Air Kondensat		Air umpan boiler

Sumber: tim PT. SP (2000) cit Ditjen PPHP (2006)

Tandan kosong kelapa sawit yang merupakan 23% dari tandan buah segar, mengandung bahan lignoselulosa sebesar 55-60% dari berat kering. Dengan produksi sawit 36-38 ton tandan buah segar per tahun, maka akan dihasilkan sekitar 4,5- 5,2 ton bahan lignoselulosa. Bahan lignoselulosa terdiri dari hemiselulosa, selulosa dan lignin. Tabel 2.2 berikut ini menunjukkan karakteristik analisis *proximate* dan *ultimate* serta komposisi lignoselulosa dari tandan kosong kelapa sawit (Chang, 2014).

Tabel 2.2. Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit

Properties	*Values (%)*
Moisture	2.40 – 14.28
Proximate Analysis	
Volatile Matter	70.03 – 83.86

Fixed Carbon	8.97 – 18.30
Ash	1.30 – 13.65
Ultimate Analysis	
C	43.80 – 54.76
H	4.37 – 7.46
O	38.29 – 47.76
N	0.25 – 1.21
S	0.0035 – 1.10
Chemical Composition	
Cellulose	23.7 – 65.0
Hemicellulose	20.58 – 33.52
Lignin	14.1 – 30.45
Extractive	3.21 – 3.70

Sumber: *Siu Hua Chang (2014)*

C. Limbah Kulit Kopi

Indonesia yang terkenal dengan kopi luwak membuat kopi menjadi salah satu komoditas perkebunan yang sangat menjanjikan di Indonesia. Indonesia menempati posisi keempat sebagai produsen kopi terbesar di dunia setelah Brazil, Vietnam dan Kolombia dengan produksi tahunan sebesar 0,67 juta ton pada akhir tahun 2017. Kopi merupakan salah satu jenis tanaman yang pada proses pengolahannya menghasilkan jumlah limbah yang tidak sedikit, sekitar 40-50 % dari berat buah kopi mentah merupakan biji kopi yang dapat diolah menjadi bubuk kopi, sisanya merupakan limbah berupa kulit luar dan kulit ari buah kopi (Melisa, 2018). Limbah kopi yang mencapai 50% dari berat total panen kopi ini masih belum banyak dimanfaatkan selain dijadikan kompos dan pakan ternak.

D. Limbah Kulit Singkong

Produksi singkong Indonesia yang mencapai rata-rata 20 juta ton tiap tahunnya (Kemtan, 2015) dan berat kulit singkong yang mencapai kurang lebih 20% dari berat umbi utuhnya membuat Indonesia menghasilkan sekitar 4 juta ton limbah kulit singkong setiap tahunnya. Namun limbah kulit singkong ini masih belum banyak dimanfaatkan oleh masyarakat, hanya digunakan sebagai pakan ternak ataupun dibuat pupuk kompos. Meskipun dengan beberapa pengolahan yang telah ada, jumlah limbah singkong masih sangat banyak sehingga tidak dapat dimanfaatkan semuanya dan akhirnya kulit singkong ini umumnya menjadi limbah pada pabrik-pabrik pengolahan singkong. Tabel 2.3 dibawah ini menunjukkan komposisi dari kulit singkong pada umumnya.

Tabel 2.3 Komposisi Penyusun Kulit Singkong

Komposisi Kimia	**Persentase**
Air	7.9 – 10.32%
Pati	44 – 59%
Protein	1.5 – 3.7%
Lemak	0.8 – 2.1%
Abu	0.2 – 2.3%
Serat	17.5 – 27.4%
Kalsium	0.42 – 0.77%
Magnesium	0.12 – 0.24%
Fosfor	0.02 – 0.1%

Sumber : Nur Richana (2013)

E. Torefaksi

1. Definisi Torefaksi

Torefaksi berasal bahasa Perancis yang artinya memanggang/*roasting*. Secara umum torefaksi didefinisikan sebagai proses termokimia yang terjadi pada kondisi lingkungan tanpa atau sedikit sekali oksigen, dimana biomassa dipanaskan secara lambat sampai rentang temperatur tertentu dan ditahan selama beberapa waktu dan menghasilkan degradasi kandungan hemiselulosa dan memaksimalkan *mass* dan *energy yield* dari produk padatnya. Rentang suhu proses torefaksi pada umumnya berada antara 200 – 300 ˚C.

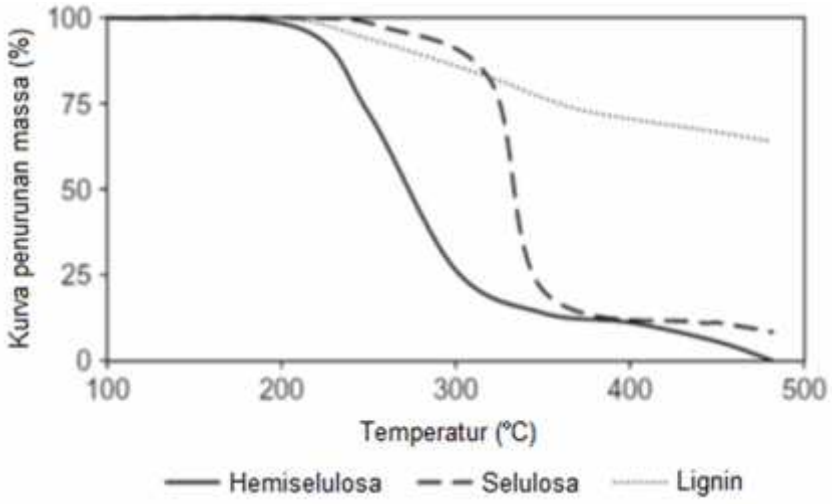
Torefaksi diatas suhu ini akan menghasilkan devolatilisasi serta karbonisasi lanjutan pada polimer produk. Selain itu, penguraian lignin akan sangat cepat diatas 300 ˚C, ini akan menyebabkan produk torefaksi sulit untuk dipelet. Pemanasan diatas 300 ˚C juga dapat menyebabkan perengkahan termal cepat selulosa yang menghasilkan pembentukkan tar pada temperatur 300 – 320 ˚C (Prins dkk., 2006).

Pemanasan lambat adalah salah satu karakteristik penting dari torefaksi. Tidak seperti pada pirolisis, laju pemanasan pada torefaksi harus cukup rendah untuk dapat memaksimalkan kandungan padat dari produk. Laju pemanasan pada torefaksi umumnya tidak melebihi 50 ˚C/min. Laju pemanasan yang lebih tinggi akan menyebabkan peningkatan pada

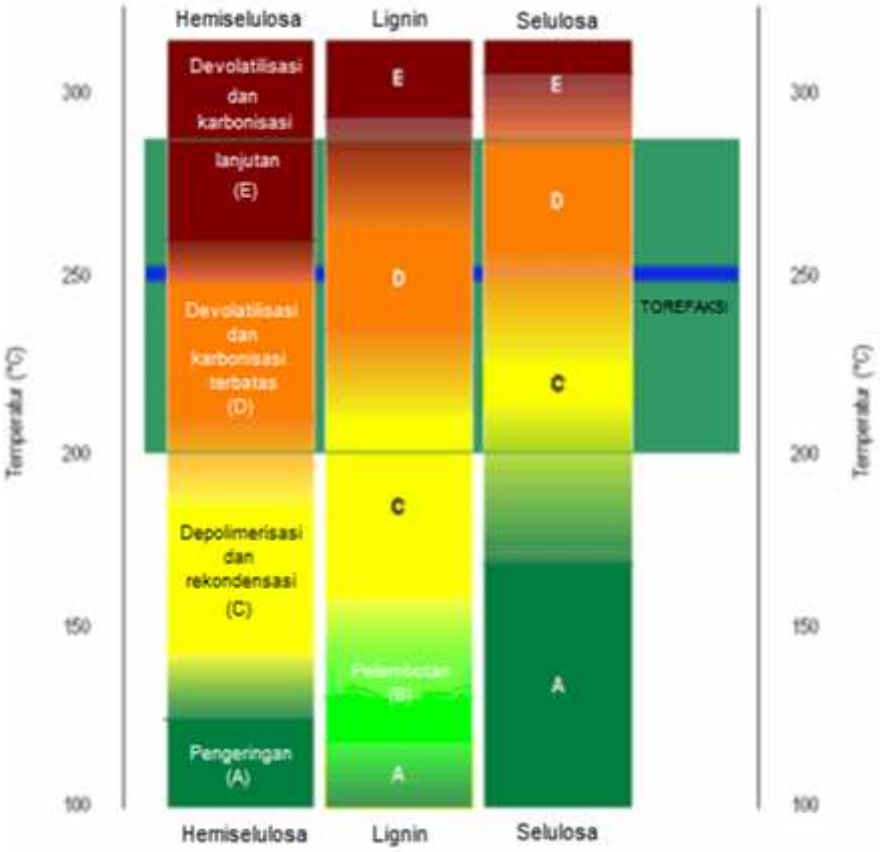
kandungan cairan dan mengurangi kandungan padatan dari produk torefaksi (Bergman dkk., 2005).

Dekomposisi atau penguraian termal pada biomassa terjadi melalui beberapa tahapan reaksi kimia. Pada rentang suhu 100-260 ˚C, hemiselulosa secara aktif terurai, namun penguraian besar-besaran (*major degradation*) nya mulai pada temperatur diatas 200 ˚C. Selulosa terurai pada suhu yang sedikit lebih tinggi, yaitu diatas 275 ˚C, namun penguraian besar nya terjadi pada rentang suhu yang sempit, yaitu pada 270 – 350 ˚C. Sedangkan lignin adalah komponen lignoselulosa yang paling sulit terurai karena membutuhkan temperatur yang lebih tinggi. Lignin terurai secara berkala pada rentang suhu 250 – 500 ˚C, meskipun lignin sudah mengalami pelunakkan pada temperatur 80 – 90 ˚C (Cielkosz, 2011).

Skema penurunan berat komponen lignoselulosa akibat penguraian yang dialami akibat pemanasan ditunjukkan oleh Gambar 2.2. Selain kurva penurunan berat, berikut adalah skema mekanisme peluruhan komponen lignoselulosa pada biomassa akibat peningkatan temperatur yang diberikan, ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



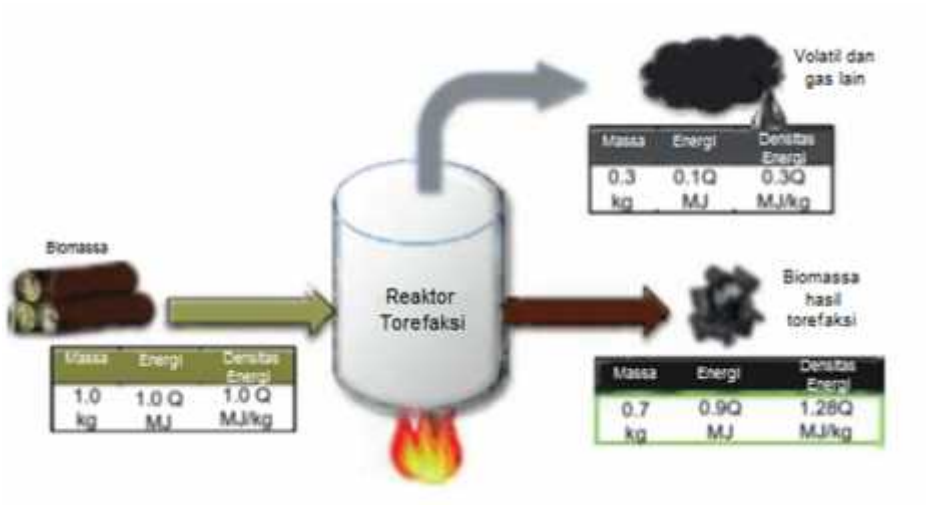
Gambar 2.2 Skema perubahan berat komponen lignoselulosa pada biomassa akibat pemanasan (Cielkosz, 2011)



Gambar 2.3 Mekanisme peluruhan komponen lignoselulosa (Akinrinola, 2014)

2. Proses Torefaksi

Torefaksi adalah sebuah proses termal yang dilakukan dengan mengkontakkan bahan biomassa dengan media pemanas. Gambar 2.4 berikut ini menunjukkan ilustrasi sederhana tentang perubahan kandungan energi dan massa dari bahan biomassa menjadi produk torefaksi (Basu. 2013).



Gambar 2.4 Perubahan massa dan energi dari bahan biomassa yang ditorefaksi (Basu, 2013)

Pada proses torefaksi, biomassa akan mengalami beberapa tahapan pemanasan pada rentang temperatur yang berbeda. Tahapan dari proses torefaksi meliputi: (Basu, 2013)

a. Pengeringan Awal (*Predrying*)

Adalah tahapan pertama dari proses torefaksi. Pada proses ini bahan biomassa dipanaskan dari temperatur ruang sampai temperatur pengeringan (~100 ˚C). Dengan mengasumsikan tidak ada panas yang

terbuang, energi yang dibutuhkan pada tahap ini (Q_{pd}) dapat dituliskan dalam Persamaan 2.1 berikut:

$$Q_{pd} = m_f . C_{pw} . (100 - T_0) \quad (2.1)$$

Dimana:

m_f = massa biomassa mentah (kg)

C_{pw} = panas spesifik biomassa mentah (kJ/kgK)

T_0 = temperatur awal biomassa mentah (K)

b. Pengeringan (*Drying*)

Tahap pengeringan bertujuan untuk menguapkan seluruh kandungan cairan yang ada didalam bahan biomassa. Tahap awal dari proses pengeringan terjadi pada temperatur yang relatif konstan sampai seluruh cairan permukaan biomassa telah menguap. Temperatur baru akan mulai naik ketika titik kritis telah tercapai dan laju penguapan telah berkurang. Tahap pengeringan akan membuat bahan biomassa kering seperti tulang (*bone-dry*).

Dengan mengasumsikan tidak ada panas yang hilang, energi yang dibutuhkan pada tahap pengeringan ini (Q_d) dapat dituliskan dengan Persamaan 2.2 berikut:

$$Q_d = L\, m_f\, M \quad (2.2)$$

Dimana:

L = Kalor laten penguapan pada 100 ˚C (~2260 kJ/kg)

m_f = Massa biomassa (kg)

M = Persentase cairan dalam biomassa pada basis *as-received* (%)

c. Pemanasan Lanjut (*Postdrying Heating*)

Setelah dikeringkan, bahan biomassa perlu dipanaskan lebih lanjut sampai mencapai temperatur torefaksi yang diinginkan (T_t). Temperatur pada tahapan ini biasanya berada diatas 200 ˚C karena sedikit sekali penguraian yang terjadi pada temperatur dibawahnya. Pada tahap ini seluruh cairan yang terikat secara fisik dan sedikit komponen organik bahan biomassa akan hilang. Energi yang dibutuhkan pada proses ideal untuk tahapan ini (Q_{pdh}) dapat dituliskan dengan Persamaan 2.3 dibawah ini:

$$Q_{pdh} = m_f(1 - M)C_{pd}(T_t - 100) \quad (2.3)$$

Dimana:

C_{pd} = Panas spesifik biomassa kering (kJ/kgK)

d. Torefaksi

Tahap torefaksi adalah tahapan utama pada keseluruhan proses torefaksi karena penguraian besar-besaran terjadi pada tahapan ini. Pada tahap ini dibutuhkan waktu tertentu agar biomassa dapat mencapai titik depolimerisasi yang diingkan, waktu ini disebut *residence time* atau waktu tinggal. Perhitungan waktu tinggal dilakukan mulai dari ketika bahan biomassa mencapai rentang suhu torefaksi (200 ˚C) karena hampir tidak ada penguraian biomassa yang

terjadi pada suhu dibawah ini. Karena proses torefaksi bersifat eksotermik pada temperatur 250 – 300 ˚C, maka apabila rugi panas (*heat loss*) diabaikan, tahap ini membutuhkan sedikit sekali energi bahkan dapat diabaikan.

e. Pendinginan (*Cooling*)

Produk meninggalkan reaktor pada temperatur torefaksi, dan biasanya temperatur ini berada diatas temperatur nyala dari biomassa hasil torefaksi pada umumnya. Dengan begitu, tanpa dilanjutkan dengan proses pendinginan produk torefaksi akan terbakar ketika bersentuhan dengan udara. Oleh sebab itu produk torefaksi harus didinginkan sampai temperatur yang aman (T_p) untuk proses selanjutnya. Panas yang dilepaskan dari proses pendinginan ini (Q_{cool}) dapat dituliskan dalam Persamaan 2.4.

$$Q_{cool} = m_f(1 - M)MY_{db}C_{pt}(T_t - T_p) \tag{2.4}$$

Dimana:

MY_{db} = *Mass yield* produk torefaksi (%)

C_{pt} = Panas spesifik produk torefaksi (kJ/kgK)

3. Parameter Proses Torefaksi

Proses torefaksi memiliki beberapa parameter operasi yang akan mempengaruhi kualitas serta karakteristik produk yang dihasilkan.

Berikut adalah beberapa parameter serta pengaruh yang dapat ditimbulkan pada proses torefaksi:

a. Temperatur

Temperatur torefaksi merupakan salah satu parameter yang memiliki pengaruh yang paling penting pada proses torefaksi karena proses penguraian termal biomassa ditentukan oleh temperatur pemanasannya sendiri. Temperatur pemanasan yang lebih tinggi akan menghasilkan produk dengan *yield* massa dan energi yang lebih rendah namun densitas energi yang lebih tinggi. Persentase dari karbon tetap pada produk biomassa akan meningkat sedangkan oksigen dan hydrogen akan berkurang dengan meningkatnya temperatur pemanasan (Bridgeman dkk., 2008).

Variasi pada temperatur torefaksi sendiri membuat proses torefaksi dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

1) Torefaksi ringan (*Light torrefaction*)

   Terjadi pada rentang temperatur 220 – 240 ˚C atau pada 230 ˚C ketika hanya hemiselulosa yang terurai tanpa mempengaruhi selulosa dan lignin.

2) Torefaksi sedang (*Medium torrefaction*)

   Terjadi pada temperatur 240 – 260 ˚C atau pada 250 ˚C ketika selulosa mulai terpengaruhi dan terurai.

3) Torefaksi berat (*Severe torrefaction*)

Terjadi pada 260 – 300 ˚C atau pada 275 ˚C yang dicirikan dengan penguraian lignin, selulosa juga hemiselulosa pada biomassa.

b. Waktu Tinggal

Waktu tinggal biomassa didalam reaktor torefaksi juga dapat mempengaruhi penguraian termal dari biomassa. Laju pemanasan yang lambat adalah salah satu karakteristik yang membedakan proses torefaksi dengan proses pirolisis yang memiliki laju pemanasan yang cepat. Waktu tinggal yang lebih lama pada umumnya akan memberikan produk dengan *mass* dan *energy yield* yang lebih rendah namun densitas energi yang lebih tinggi. Namun pengaruh yang diberikan oleh waktu tinggal tidak sesignifikan pengaruh dari temperatur torefaksi (Stelt dkk., 2011).

c. Ukuran *Feed*

Parameter ini mungkin tidak terlalu berpengaruh pada ukuran partikel yang halus, namun cukup berpengaruh pada *feed* dengan partikel besar. Proses torefaksi mencakup proses konveksi dari reaktor ke permukaan biomass, konduksi pada bagian dalam biomassa dan akhirnya reaksi yang terjadi didalamnya. Bilangan Biot adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan rasio laju konveksi di fluida dengan laju konduksi pada benda dan dipengaruhi oleh panjang karakteristik. Pada *feed* dengan partikel besar bilangan Biot akan cenderung lebih besar sehingga laju konduksi pada biomassa akan

menjadi lebih rendah dibandingkan dengan *feed* dengan partikel yang kecil atau halus (Brue dkk., 2012).

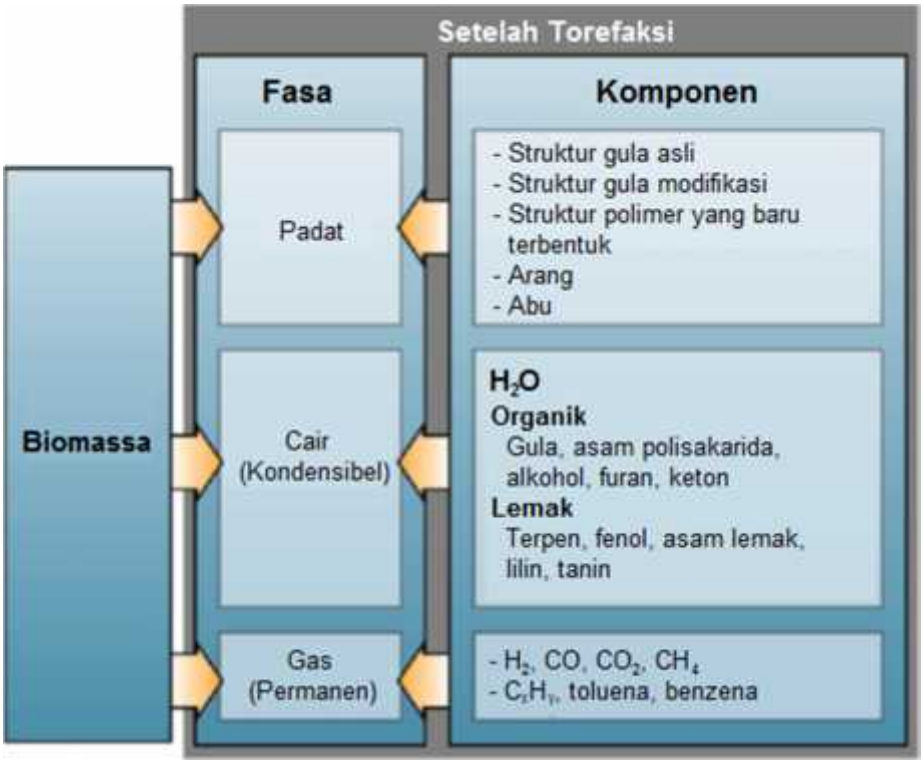
d. Jenis Biomassa

Jenis bahan biomassa yang ditorefaksi juga merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi proses torefaksi. Perbedaan komposisi kandungan lignoselulosa pada bahan biomassa yang berbeda akan mempengaruhi *mass* dan *enegy yield* dari produk torefaksi. Selain itu, mass yield dari produk torefaksi bahan biomassa keras (*hardwood*) berbeda dari bahan biomassa lunak (*softwood*) meskipun memiliki komposisi lignoselulosa yang serupa. Pada *hardwood* komponen xylan, kandungan aktif dalam hemiselulosa, lebih tinggi dibandingkan kandungan xylan pada *softwood* (Prins dkk., 2006).

4. Produk Torefaksi

Produk proses torefaksi bahan biomassa pada umumnya terdiri dari tiga jenis fasa, fasa padatan, gas dan juga cair. Produk torefaksi pada umumnya akan didominasi produk padatan dengan kisaran yang sangat bervariasi antara 50 – 90 % berat biomassa mentah tergantung dari jenis bahan biomassa serta parameter pemanasannya, disusul dengan produk gas dengan kisaran 10 – 40 % berat biomassa mentah dan produk cair dengan persentase 5-20 % tergantung dari bahan biomassa yang

digunakan. Gambar 2.5 berikut ini menunjukkan beberapa produk yang dihasilkan dari proses torefaksi.



Gambar 2.5 Produk yang dihasilkan dari torefaksi biomassa (Tumuluru, 2011)

Kualitas dari produk padatan torefaksi pada umumnya dapat diungkapkan dalam tiga sifat, yaitu *mass yield*, densitas energi, serta *energy yield*. Berikut adalah penjelesannya:

a. *Mass Yield*

Mass yield menunjukkan perbandingan antara massa produk padatan yang dihasilkan dari produk torefaksi dengan massa biomassa mentah. Biomassa pada umumnya tersusun dari cairan, bahan organik dan bahan anorganik (abu). Selama proses torefaksi penguraian yang dialami oleh bahan biomassa baik secara fisik maupun kimiawi dapat

mempengaruhi *mass yield*. Pada proses torefaksi, semakin tinggi temperatur dan atau semakin lama waktu tinggal maka *mass yield* dari produk torefaksi akan semakin rendah karena semakin banyak komponennya yang terurai (Stelt, 2011).

Mass yield tiap produk torefaksi bahan biomassa pada umumnya berbeda-beda. Penelitian yang dilakukan oleh Yoshimitsu Uemura apda tahun 2011 menunjukkan bahwa produk torefaksi dari bahan biomassa yang lunak (memiliki kandungan hemiselulosa yang tinggi) cenderung akan memiliki nilai mass yield yang lebih rendah dibandingkan dengan produk torefaksi dari bahan biomassa yang lebih keras atau yang memiliki kandungan hemiselulosa yang lebih banyak (Uemura, 2011).

b. *Energy Density* dan Nilai Kalor

Densitas energi adalah parameter penting lain dari produk hasil torefaksi. Densitas energi menunjukkan jumlah energi yang dapat dihasilkan ketika produk torefaksi sebesar 1 kg atau satuan massa lain terbakar sampai habis dan produknya telah dingin. Densitas energi juga sering dihubungkan dengan energi spesifik dan nilai kalor karena ketiganya memiliki satuan yang sama yaitu kJ/kg, Btu/lb ataupun kCal/kg.

Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana densitas energi sebuah sampel biomassa dapat meningkat setelah melalui proses torefaksi. Dimana pada sebuah sampel biomassa bermasa 100 satuan massa dengan

kandungan energi 100 satuan energi ditorefaksi dan menghasilkan produk padat dengan massa 70 dan kandungan energi 90 serta produk gas dengan massa 30 dan kandungan energi 10. Sehingga densitas energi biomassa akan meningkat dari [100/100] kJ/kg menjadi [90/70] kJ/kg (Basu, 2013).

Pada proses torefaksi, komponen-komponen biomassa dengan kandungan energi yang rendah akan dihilangkan, sehingga hanya komponen-komponen dengan kandungan energi yang tinggi saja yang masih tersisa didalam biomassa. Komponen biomassa dengan kandungan energi rendah contohnya seperti air dan hemiselulosa, selain itu dengan berkurangnya persentase oksigen dan hydrogen pada biomassa menyebabkan rasio O/C dan H/C bahan biomassa akan berkurang. Semua hal ini akan menyebabkan peningkatan jumlah energi yang dapat dihasilkan oleh produk torefaksi ketika dibakar dibandingkan biomassa mentah dengan massa yang sama.

c. *Energy Yield*

Energy yield menunjukkan perbandingan antara total energi yang dimiliki oleh produk torefaksi dengan total energi yang dimiliki oleh bahan biomassa mentah (sebelum ditorefaksi). Kandungan energi dapat diperoleh dengan mengalikan massa biomassa dengan nilai kalor dari komponen biomassa yang bersangkutan. Pada proses torefaksi, komponen-komponen dengan kandungan energi tinggi tetap dijaga didalam biomassa sedangkan komponen dengan kandungan

energi rendah dibuang. Ini menyebabkan terjadinya penurunan energi total yang sebenarnya dimiliki oleh biomassa, namun karena massa komponen *energy-lean* cukup besar, densitas energi dari produk torefaksi akan meningkat (Basu, 2013).

5. Sifat Fisik Produk Torefaksi

Selain perubahan kimia, torefaksi juga menyebabkan beberapa perubahan fisik pada bahan biomassa. Berikut adalah beberapa sifat fisik bahan biomassa yang dipengaruhi oleh proses torefaksi:

a. Penampilan / warna

Perubahan yang paling mencolok dan mudah untuk dilihat dari produk torefaksi pada penampilan luarnya. Produk hasil torefaksi umumnya akan memiliki warna yang lebih gelap. Semakin tinggi temperatur torefaksi yang digunakan, warna produk torefaksi yang dihasilkan juga akan cenderung semakin gelap (Uemura, 2011).

b. Densitas dan Volume

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa pada proses torefaksi massa produk torefaksi akan lebih rendah dibandingkan massa biomassa mentahnya. Perubahan ini tidak jarang juga akan menyebabkan penurunan volume dari biomassa meskipun penurunan volume yang terjadi tidak sesignifikan penurunan massanya. Terjadinya penurunan massa dan volume pada produk torefaksi juga akan mempengaruhi densitas atau massa jenis dari produk torefaksi (Jenkins, 1989).

c. *Grindability*

Biomassa mentah pada umumnya memiliki sifat yang sangat berserat dan serat permukaannya memiliki ikatan yang sangat kuat. Selain itu, sifat biomassa mentah yang plastis juga menyebabkan sangat sulit dan membutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk menggiling atau menghaluskan biomassa mentah menjadi ukuran yang halus dibandingkan dengan produk torefaksi. Proses torefaksi yang merupakan perombakan struktur sel secara besar-besaran membuat partikelnya menjadi getas, halus dan kurang berserat sehingga lebih mudah untuk menghaluskan partikel biomassa produk torefaksi (Phanphanich dkk., 2011).

d. Hidrofobisitas

Biomassa pada umumnya memiliki sifat yang higroskopik (menyerap air dari udara). Sehingga biomassa mentah akan cenderung menyerap air di udara meskipun telah dikeringkan. Ini menyebabkan dibutuhkan energi yang lebih besar dalam pembakaran atau pengolahan termal biomassa lainnya karena dibutuhkan energi tambahan untuk menguapkan cairan yang ada pada biomassa mentah tadi. Sifat higroskopik biomassa paling besar dipegang oleh kandungan hemiselolsanya, disusul oleh selulosa dan lignin. Proses torefaksi yang merupakan proses perombakkan besar-besaran sampai total dair hemiselulosa akan menurunkan kapasitass higroskopik biomassa secara drastic dan menghasilkan produk yang hidrofobik (Felfli dkk., 2005).

e. Pemadatan

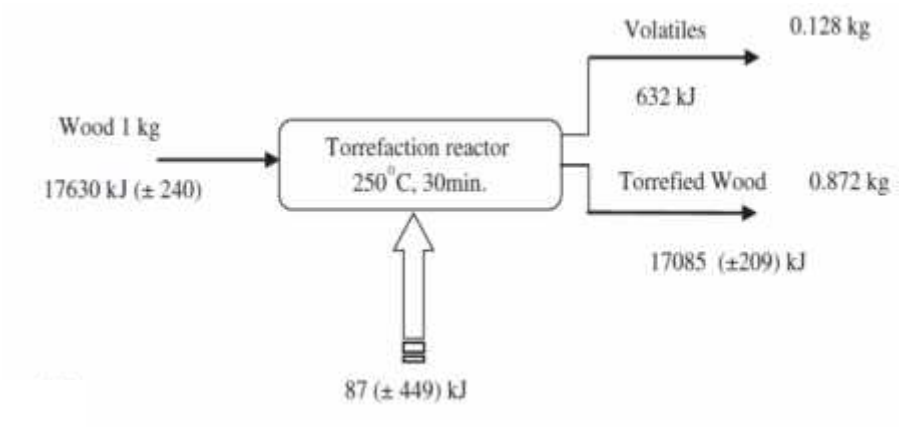
Biomassa dikategorikan sebagai salah satu jenis bahan bakar dengan kandungan dan densitas energi yang rendah. Ini membuat transportasi biomassa mentah menjadi lebih mahal jika dibandingkan dengan produk torefaksi untuk kapasitas energi yang sama. Sehingga untuk meningkatkan densitas energinya, proses pemadatan, seperti pemeletan atau pembriketan, merupakan salah satu cara yang paling diminati. Proses pemeletan pada umumnya dilakukan setelah proses torefaksi, karena selain produk torefaksi yang memiliki densitas energi yang lebih tinggi dari biomassa mentah, energi yang dibutuhkan untuk menghaluskan dan menekan produk torefaksi juga jauh lebih rendah (Mani dkk., 2006).

6. Balans Massa dan Energy Proses Torefaksi

Sama seperti proses-proses pengolahan energi lainnya, torefaksi juga mengikuti dua prinsip umum, yaitu prinsip kekekalan massa dan prinsip kekekalan energi. Prinsip kekekalan massa dan energi diartikan sebagai massa dan energi yang masuk pada suatu proses harus sama dengan massa dan energi yang dikeluarkan dari proses tersebut, baik dalam bentuk produk ataupun limbah atau buangan.

Pada proses torefaksi, pemanasan pada temperarur yang lebih tinggi akan menghasilkan jumlah volatile yang cenderung lebih tinggi, sehingga *mass yield* dari produk padat torefaksi akan semakin berkurang. Produk gas dari

torefaksi pada umumnya didominasi oleh karbon dioksida, karbon monoksida dengan sedikit hidrogen dan metana. Dari percobaan yang dilakukan oleh Prins dkk. (2006) dengan mentorefaksi kayu *willow* pada temperatur 250 ˚C selama 30 menit dihasilkan balans massa dan energi seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Balans massa dan energi dari proses torefaksi kayu dengan temperatur dan waktu tinggal 250˚C dan 30 min (Prins, 2006)

F. Torgas

Pemanasan yang terjadi selama proses torefaksi menyebabkan terjadinya pelepasan produk gas dari bahan biomassa. Komponen utama dari gas torefaksi ini adalah uap air dan karbon dioksida. Namun, selain dua komponen utama tersebut, gas torefaksi juga mengandung beberapa kandungan gas organik yang dapat terbakar. Jumlah gas yang dihasilkan dalam torefaksi sangat bergantung pada parameter torefaksi yang digunakan, seperti suhu torefaksi, waktu tinggal, laju pemanasan serta jenis bahan

biomassa yang digunakan. Produk torefaksi bahan biomassa yang telah kering total dapat menghasilkan uap air yang mencapai 50% (wt) dari total gas torefaksi, dengan karbon dioksida mencapai 10% akibat reaksi kimia dalam bahan biomassa. Sehingga kandungan gas tidak mampu bakar (*incombustible gas*) dalam gas torefaksi dapat mencapai 60% berat gas torefaksi (Stelte, 2012).

Penelitian yang dilakukan oleh Bergman dkk., (2005) menunjukkan bahwa air merupakan komponen penyusun terbesar dari gas torefaksi, mencapai 50 – 80% (tidak termasuk kandungan cairan dari biomassa mentah). Jumlah total cairan yang dihasilkan meningkat seiring meningkatnya waktu tinggal dan temperatur, namun jumlah relatifnya menurun dengan perbandingan dengan komponen gas torefaksi lainnya. Jumlah gas *combustible* juga meningkat dengan peningkatan temperatur dan waktu tinggal. Berikut

Nilai kalor yang dapat dihasilkan oleh *combustible gas* dari gas torefaksi berkisar antara 5.3 – 16.2 MJ/Nm^3. Tumuluru dkk. (2010) melakukan perbandingan nilai kalor dari gas torefaksi dengan *producer gas* dari proses gasifikasi termal biomassa (4 – 5 MJ/Nm^3) dan *syngas* pada proses gasifikasi dengan pemanasan tak langsung (15 – 20 MJ/NM^3). Perbandingan ini menunjukkan bahwa nilai kalor dari gas torefaksi layak untuk dimanfaatkan.

1. Komponen Torgas

   Komponen gas pada gas torefaksi pada umumnya dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu:

a. *Condensable Gas*

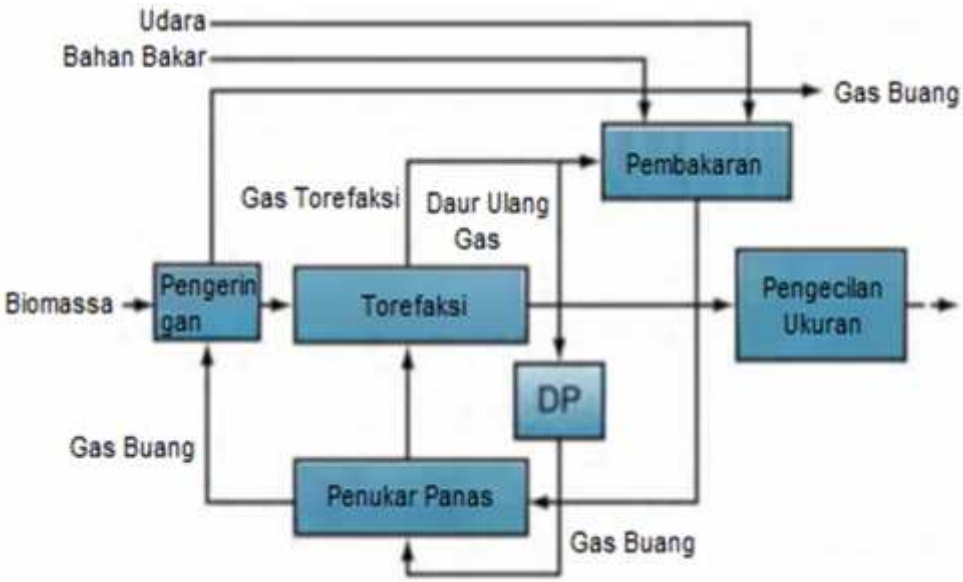
Condensable gas atau gas yang dapat dicarikan memegang komposisi terbesar dari gas torefaksi. Pada torefaksi, produk *condensable* terbesar pada gas torefaksi adalah air, yang dilepaskan dari penguapan ataupun akibat reaksi dehidrasi antara molekul organic. Produk *condensable gas* lainnya seperti asam asetat, asam format dan juga methanol yang bersumber dari penguraian hemiselulosa. Selain produk-produk diatas, terdapat juga beberapa produk minor dari *condensable gas* seperti asam laktat, furfural, hidroksiaseton dan juga fenol. Jumlah gas yang dihasilkan dari proses torefaksi akan meningkat pada temperatur yang lebih tinggi dan waktu tinggal yang lebih lama, sehingga otomatis jumlah *condensable gas* juga akan meningkat.

b. *Uncondensable Gas*

Sesuai namanya, *uncondensable gas* adalah gas yang tidak dapat dicairkan, atau dikenal juga dengan istilah *permanent gas*. Pada produk gas torefaksi, *uncondensable gas* didominasi oleh karbon dioksida (CO_2) dan karbon monoksida (CO). Dimana karbon monoksida merupakan sumber panas utama dibandingkan dengan komponen u*ncondensable gas* lainnya pada torgas. Selain kedua gas ini, *uncondensable gas* juga memiliki beberapa komponen minor lain seperti CH_4, H_2O, Ar, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, benzene, toluene, dan xylene (Tumuluru dkk., 2011).

2. Pemanfaatan Torgas

Proses torefaksi dianggap sebagai proses pemadatan energi, dimana energi kimia dipindahkan dari bahan biomassa menjadi produk torefaksi dengan sifat bahan bakar yang meningkat. Dengan upaya untuk meningkatkan efisiensi energi proses torefaksi dengan biaya yang rendah, beberapa teknologi dikembangkan. Gas volatil yang dihasilkan dari proses torefaksi memiliki nilai kalor yang relatif rendah, namun gas ini masih dapat terbakar. Dengan kemampuannya untuk terbakar, gas torefaksi ini dapat dimanfaatkan untuk memanaskan reaktor atau mengeringkan bahan biomassa dalam suatu siklus seperti yang disarankan oleh Bergman dkk. (2005) pada Gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Proses kombinasi pengeringan dan torefaksi yang dikembangkan oleh *Energy Research Center of Netherlands* (ECN) (Bergman, 2005)

Dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) untuk mengidentifikasi jumlah dan komposisi kandungan dari gas torefaksi, dapat ditentukan persentase gas yang dapat terbakar, berapa temperatur yang dibutuhkan untuk membakar seluruh *combustible gas* tersebut, serta nilai kalor teoritis yang dapat dimiliki oleh gas tersebut. Dengan mengetahui beberapa hal ini, potensi penggunaan dari gas torefaksi sebagai sumber energi tambahan untuk reaktor dapat ditentukan.

3. Gas Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit

Data komposisi gas torefaksi TKKS adalah nilai rata-rata yang diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Gabriel Talero, 2018 mengenai torefaksi bahan biomassa berupa limbah padat kelapa sawit, S.B. Nam pada tahun 2016 tentang karakteristik reaksi torefaksi beberapa jenis limbah biomassa, serta Mohamad Azri Sukiran, 2017 mengenai review torefaksi limbah kelapa sawit sebagai biofuel, diperoleh produk gas dengan komposisi rata-rata 69,1 % gas karbon dioksida (CO_2), 28,2 % gas karbon monoksida (CO), dan sedikit gas hidrogen (1,39 H_2) dan gas metan (1,31 CH_4).

4. Gas Torefaksi Kulit Kopi

Dalam penelitian perbandingan analisis torefaksi kulit kopi secara eksperimental dan numerik yang dilakukan oleh Eliseu Monteiro, dkk. pada tahun 2013 diperoleh hasil bahwa pada torefaksi kulit kopi menghasilkan produk gas dengan komposisi seperti dibawah ini: 68,1 %

gas karbon dioksida (CO_2), 27,7 % gas karbon monoksida (CO), 2,38 % gas hidrogen (H_2) dan 1,17 % gas metan (CH_4).

5. Gas Torefaksi Kulit Singkong

Penelitian yang dilakukan oleh Natthaya Punsuwan pada tahun 2015 menyatakan bahwa produk gas torefaksi limbah kulit singkong terdiri dari gas karbon dioksida sebesar 74,25 %, gas karbon monoksida sebesar 22,18 %, gas hidrogen sebesar 2,38 % serta gas metan sebesar 1,17 %.

G. Estimasi Nilai Kalor Produk Torefaksi

Nilai kalor dari sebuah bahan bakar dapat diartikan sebagai jumlah energi yang dilepaskan ketika satu unit massa atau volume bahan bakar terbakar secara sempurna dengan oksigen yang cukup. Nilai kalor sendiri dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

1. HHV (*High Heating Value*)

HHV yang sering disebut juga dengan *gross calorific value* diartikan sebagai jumlah energi atau panas yang dilepaskan oleh satu unit massa atau volume bahan bakar yang terbakar sempurna dan seluruh produknya telah kembali ke suhu ruang. Yang artinya HHV juga mencakup energi evaporasi dari uap air menjadi air. Metode eksperimental adalah metode yang paling akurat dan dapat dipercaya untuk menentukan nilai kalor dari sebuah bahan bakar. Namun jika percobaan langsung tidak

memungkinkan, korelasi empiris seperti persamaan Dulong – Berthelot dapat digunakan. Channiwala dan Parikh (2002) mengembangkan persamaan berikut ini untuk menentukan atau memprediksi nilai HHV dari sebuah bahan bakar. Persamaan tersebut dituliskan oleh Persamaan 2.5 dibawah ini.

$$HHV = 349.1C + 1178.3H + 100.5S - 103.4O - 15.1N - 21.1ASH \quad (2.5)$$

Dimana C, H, S, O, N dan ASH secara berturut-turut adalah persentase karbon, hydrogen, sulfur, oksigen, nitrogen dan abu pada bahan bakar yang diperoleh dari *ultimate analysis*. Persamaan ini berlaku untuk bahan bakar dengan 0<C<92%, 0.43<H<25%, 0<O<50%, 0<N<5.6%, 0<ASH<71%, dan 4745<HHV<55345 kJ/kg (Basu, 2013).

2. LHV (*Low Heating Value*)

Lower heating value atau yang dikenal juga dengan istilah nilai kalor bersih, adalah nilai kalor yang lebih realistis dibandingkan dengan HHV. Temperatur dari gas buang bahan bakar pada umumnya berada pada rentang suhu 120 – 180 ˚C. Produk ini pada praktiknya jarang sekali didinginkan sampai ke temperatur awal bahan bakar atau temperatur ruang. Ini menyebabkan kandungan uap air dalam gas buang tidak mencair sehingga energi laten yang dimiliki oleh uap air tidak dapat dimanfaatkan. LHV atau *net calorific value* akan selalu memiliki nilai yang lebih rendah dari HHV. Hubungan antara LHV dan HHV dapat dituliskan dalam Persamaan 2.6 berikut: (Basu, 2013)

$$LHV = HHV - h_g\left(\frac{9H-M}{100}\right) \quad (2.6)$$

Dimana:

h_g = kalor laten uap air (2260 kJ/kg pada 100 ˚C)

H = persentase hydrogen pada bahan bakar (%)

M = persentase cairan pada bahan bakar (%)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu pelaksanaan penelitian yang direncanakan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Tempat Penelitian

   Pengambilan data dari penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung serta Laboratorium Biomassa Teknologi Hasil Penelitian Universitas Lampung

2. Waktu Penelitian

   Penelitian ini diharapkan akan dapat diselesaikan dalam kurun waktu empat bulan, dimulai dari bulan Maret 2019 sampai dengan bulan September 2019. Tabel 3.1 dibawah ini menunjukkan rincian rencana kegiatan penelitian yang dilakukan penulis.

Tabel 3.1 Rencana Kegiatan Penelitian

Kegiatan		Feb			Mar			Apr			Mei			Jun			Jul			Aug			Sep		
1	Studi Literatur																								
2	Persiapan alat dan bahan																								

3	Pengujian																							
4	Pengujian Lab.																							
5	Analisis data																							
6	Penulisan laporan akhir																							

B. Alat dan Bahan

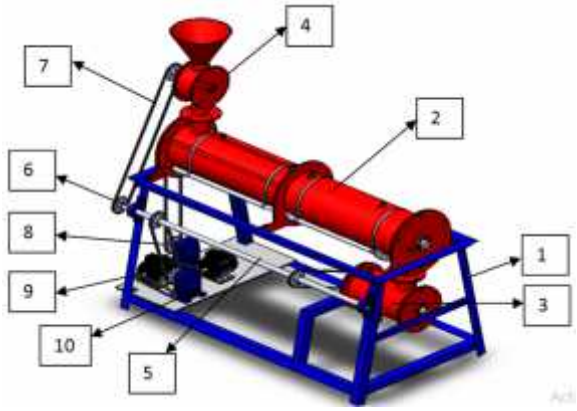
Berikut adalah alat dan bahan yang akan digunakan penulis dalam penelitian ini:

1. Alat

   Adapun alat yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

   a. Reaktor Kontinu Tipe Tubular

      Reaktor yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor torefaksi kontinu tipe tubular yang merupakan reaktor buatan mahasiswa Teknik Mesin Unila, Muhammad Fariz, sebagai proyek tugas akhirnya pada tahun 2017. Reaktor jenis ini memiliki bentuk tabung dengan dinding yang diam dan biomassa didalamnya digerakkan dengan menggunakan sistem *screw conveyor* serta sumber panas yang digunakan untuk memanaskan reaktor dan bahan biomassa bersumber dari pemanas eksternal. Gambar 3.1 menunjukkan gambaran reaktor kontinu tipe tubular yang akan digunakan dalam penelitian ini.



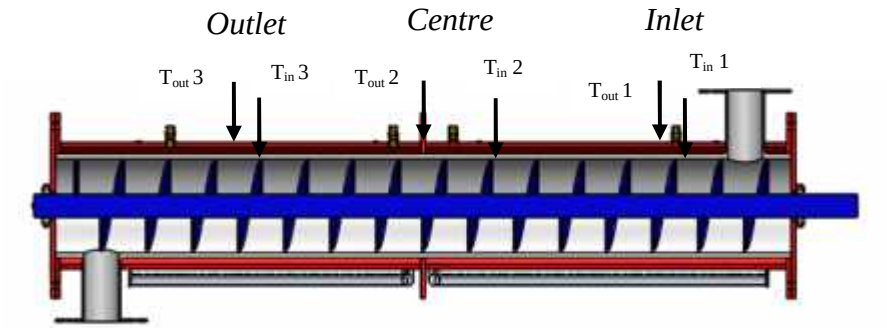
Gambar 3.1 Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular yang akan digunakan dalam penelitian (Fariz, 2017)

Keterangan:

1) Rangka
2) Tabung Reaktor
3) Tabung *Cooling Char*
4) *Rotary Valve*
5) Poros *Rotary Valve*
6) *Pillow Block*
7) *Chain*
8) *Sprocket*
9) *Gearbox*
10) Motor Listrik

b. Sistem Pemanas Reaktor

Panas yang digunakan dalam proses torefaksi pada penelitian ini bersumber dari sistem pemanas eksternal seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Sistem pemanas reaktor torefaksi yang digunakan (Fariz, 2017)

c. Gas LPG

Bahan bakar yang digunakan sebagai sumber panas pada penelitian ini adalah gas LPG. Contoh gas LPG yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.3 dibawah ini.

Gambar 3.3 Gas LPG sebagai bahan bakar proses torefaksi

d. Termokopel

Sensor ini digunakan untuk mengukur reaktor jaket oli dan bagian dalam reaktor untuk membantu proses pengambilan data. Gambar 3.4 dibawah menunjukkan contoh termokopel yang digunakan.

Gambar 3.4 Termokopel untuk mengukur temperatur pemanasan pada reaktor

e. Timbangan Digital

Pada penelitian ini timbangan digunakan untuk memudahkan penulis menentukan berat dari bahan baku yang akan masuk dan keluar dari reaktor untuk memudahkan perhitungan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.5.

Gambar 3.5 Timbangan digital untuk menimbang massa biomassa yang akan dimasukkan ke reaktor

f. Tabung Gas Nitorgen

Gas nitrogen digunakan untuk membuat lingkungan inert didalam reaktor. Gambar 3.6 menunjukkan contoh tabung gas nitrogen yang akan digunakan

Gambar 3.6 Gas nitrogen untuk membuat kondisi *inert* pada reaktor

g. *Stopwatch*

Stopwatch digunakan untuk mengukur lama proses torefaksi sehingga waktu tinggal yang ditetapkan dapat dicapai. Contoh *stopwatch* yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.7.

Gambar 3.7 *Stopwatch* untuk mengukur waktu tinggal

2. Bahan

Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa jenis bahan biomassa, yaitu limbah TKKS, limbah kulit singkong serta limbah kulit kopi seperti berturut-turut yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8, Gambar 3.9 dan Gambar 3.10. Limbah TKKS yang telah dibersihkan dan dikeringkan kemudian digiling dan dihaluskan untuk kemudian siap dimasukkan kedalam reaktor. Limbah kulit singkong dan kopi hanya melewati proses pengeringan sebelum siap dimasukkan kedalam reaktor.

Gambar 3.8 Limbah TKKS

Gambar 3.9 Limbah Kulit Singkong

Gambar 3.10 Limbah Kulit Kopi

C. Metode Pengambilan Data

Adapun tahapan pengujian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengecekkan kondisi dan persiapan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular serta bahan-bahan biomassa yang akan digunakan.
2. Menekan tombol ON pada control untuk menghidupkan motor listrik yang terhubung ke *rotary valve* pada saluran pengumpanan dan *screw conveyor* di dalam reaktor.
3. Memulai proses pemanasan dengan cara membuka katup LPG dan menghidupkan *burner* yang ada pada reaktor hingga temperatur 275 ˚C.
4. Mencatat waktu proses pemanasan, tekanan dan bukaan katup regulator LPG untuk data perhitungan konsumsi bahan bakar.
5. Mengalirkan gas N_2 kedalam reaktor melalui kran *inlet* dan membuka kran outlet agar O_2 terdorong keluar dan menciptakan lingkungan *inert* bagi biomassa selama proses torefaksi berlangsung.
6. Memasukkan bahan baku TKKS kedalam reaktor ketika temperatur reaktor sudah stabil.
7. Menghidupkan *timer* pada *stopwatch* agar proses torefaksi berlangsung selama 30 menit.
8. Menjaga temperatur reaktor torefaksi dengan cara mengatur bukaan katup regulator LPG agar tetap stabil selama proses torefaksi.
9. Karena keterbatasan akses pengujian komposisi gas menggunakan *gas chromatography – thermal conductivity detector* (GC-TCD), data komposisi gas diperoleh dari referensi penelitian sejenis.

10. Melakukan pengujian laboratorium berupa analisis ultimat dan proksimat pada sampel produk padat torefaksi.

D. Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengetahui komponen penyusun dari sampel produk padat dan gas hasil torefaksi yang diperoleh. Untuk produk padatan dilakukan analisis ultimat dan proksimat, sedangkan untuk produk gas dianalisis dengan studi literatur dengan tujuan utama yaitu untuk mengetahui nilai kalor pembakaran dari kedua produk.

1. Analisis Proksimat

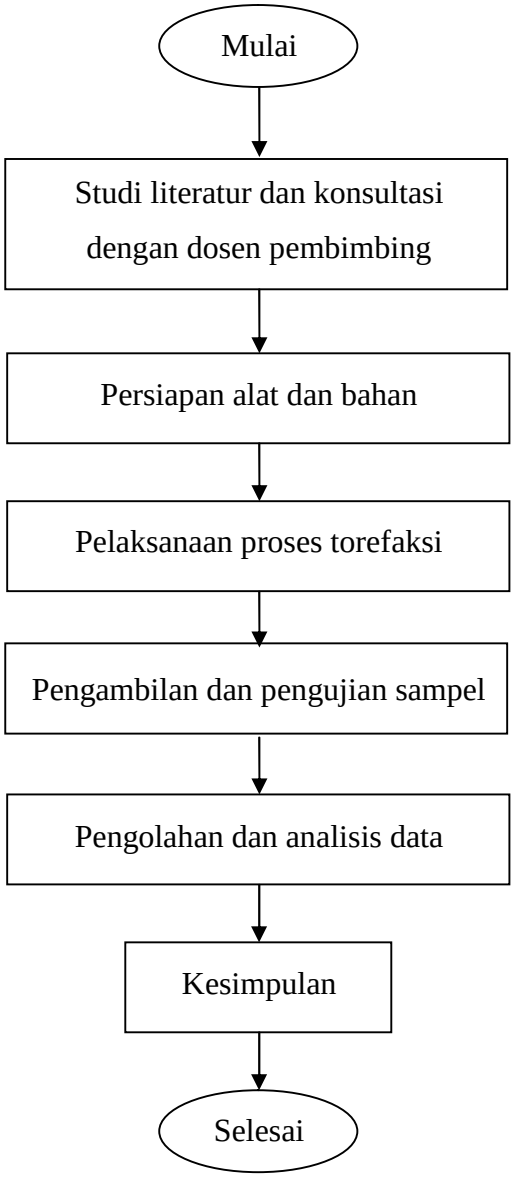
   Analisis proksimat digunakan untuk mengetahui komposisi penyusun umum bahan bakar padat seperti kandungan cairan (*moisture content*), bahan volatil (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*) dan abu (*ash*).

2. Analisis Ultimat

   Analisis ultimat digunakan untuk mengetahui komposisi unsur kimia seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen, abu serta cairan yang menyusun produk padat torefaksi.

E. Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian yang dilakukan oleh penulis secara garis besar digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 3.11 dibawah ini:



Gambar 3.11 Diagram alir penelitian

F. Rancangan Eksperimen Torefaksi

Eksperimen torefaksi penelitian ini dilakukan pada temperatur optimum dari torefaksi, yaitu 275 ˚C dan waktu tinggal 30 menit dengan jenis bahan

biomassa yang divariasikan. Bahan biomassa yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari limbah TKKS, limbah kulit singkong serta limbah kulit biji kopi. Variasi dari bahan biomassa ini diharapkan dapat menunjukkan perbedaan potensi gas torefaksi yang dihasilkan oleh bahan biomassa yang berbeda. Potensi gas torefaksi yang dimaksud adalah nilai kalor dari gas torefaksi yang dapat dimanfaatkan untuk mengurangi konsumsi energi pada saat proses pemanasan ataupun pengeringan bahan biomassa didalam reaktor.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui *energy balance* biomassa pada proses torefaksi menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular. Energi biomassa masuk diperoleh dari referensi. Energi biomassa keluar diperoleh dengan perhitungan dan pengolahan data dari sampel padat dan gas yang diperoleh. Uji analisis ultimat pada sampel padat akan menunjukkan persentase komponen penyusun produk padat dari torefaksi. Data yang diperoleh kemudian diolah untuk mendapatkan nilai HHV dari produk padat dengan menggunakan Persamaan 2.5. Dan energi keluar dari sampel padat dapat diperoleh dengan mengalikan HHV produk dengan mass yield produk padatan (MY_s) yang diperoleh dari Persamaan 3.1 dibawah ini.

$$MY_s = \frac{M_{sp}}{M_f} \tag{3.1}$$

Dimana Msp adalah massa produk padatan hasil torefaksi (*solid product*) dan Mf adalah massa dari biomassa yang dimasukkan (*feedstock*) yang diperoleh dengan melakukan penimbangan manual menggunakan timbangan digital.

Perhitungan dari potensi energi gas torefaksi dilakukan dalam beberapa tahap. Setelah sampel gas torefaksi dari tiap bahan biomassa yang diujikan, pengujian *gas chromatography* dilakukan sehingga data komposisi dari gas torefaksi diperoleh. Pada penelitian ini, hanya komponen-komponen utama dari gas torefaksi yang akan diteliti yaitu CO_2, CO, H_2 dan CH_4.

Dengan diketahuinya persentase gas penyusun dari gas torefaksi, langkah selanjutnya adalah menentukan berat masing-masing komponen gas *combustible* dengan mengalikan dengan massa gas torefaksi (M_{gp}) yang dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.2 berikut ini.

$$M_{gp} = M_{RM} - M_{sp} - M_{lp} \tag{3.2}$$

Karena hanya komponen yang dapat terbakar yang dapat menghasilkan energi kalor, maka penentuan nilai kalor dari gas torefaksi merupakan penjumlahan dari energi kalor yang dapat dihasilkan oleh komponen mampu bakar dengan jumlah yang cukup besar yang ada pada gas torefaksi, yaitu karbon monoksida (CO), hydrogen (H_2) dan metana (CH_4).

Perhitungan kebutuhan energi yang dilakukan dengan mengalikan massa gas LPG yang dibutuhkan untuk tiap kali *running* dengan nilai kalor dari gas LPG seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 3.3 berikut ini.

$$Q_{in} = m_{LPG} \times HHV_{gas} \tag{3.3}$$

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Adapun beberapa hal yang dapat penulis simpulkan dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Torefaksi tandan kosong kelapa sawit pada 275 °C dan waktu tinggal 30 menit menghasilkan produk dengan *mass yield* padat 74 %, gas 20,7 % dan cair 5,3 %. Pada kondisi pengujian yang sama, limbah kulit singkong dan limbah kulit kopi menghasilkan *mass yield* padat 71 % dan 75 %, gas 19,9 % dan 16,8 %, serta cair 9,1 % dan 8,2 % secara berturut-turut.
2. Pada torefaksi tandan kosong kelapa sawit, *energy balance* yang diperoleh sebesar 99 % dengan 96,3 % energi awal dibawa oleh produk padat, 2,7 % energi awal dibawa oleh produk gas dan 1 % energi awal menjadi *losses*. Torefaksi limbah kulit singkong memiliki *energy balance* sebesar 92,7 %, dengan 89,1 % energi awal berada pada produk padat, 3,6 % berada pada produk gas dan 7,3 % energi awal menjadi *losses*. Sama seperti tandan kosong, *energy balance* dari reaksi torefaksi limbah kulit kopi juga mencapai 99 %, dengan produk padat memiliki 93,2 % energi

awal dan produk gas memiliki 5,8 % energi awal yang membuat 1 % menjadi *losses*.

3. Pada kapasitas maksimum reaktor, yaitu 5 kg, dengan asumsi peningkatan jumlah gas bersifat linier, produk gas torefaksi TKKS memiliki kandungan energi sebesar 2095 kJ yang merupakan 3,83% energi yang dibutuhkan. Pada situasi yang sama, produk gas torefaksi limbah kulit singkong dan kulit kopi dapat menghasilkan energi sebesar 2702 kJ dan 3216 kJ secara berturut-turut, yang dapat menghemat energi yang dibutuhkan sebesar 4,93 % untuk kulit singkong dan 5,87 % untuk kulit kopi.

B. Saran

Berikut adalah beberapa saran yang dapat penulis berikan terkait penelitian yang telah dilakukan.

1. Sampel tandan kosong kelapa sawit yang akan dimasukkan ke dalam reaktor torefaksi sebaiknya dibuat lebih halus dari yang digunakan dalam penelitian ini untuk memudahkan proses pemasukkan sampel tandan kosong kelapa sawit.
2. Sampel yang digunakan sebaiknya bersih dari tanah atau pengotor lain untuk menghasilkan hasil pengujian yang lebih akurat dan konsisten.
3. Rentang waktu pengujian antar sampel sebaiknya tidak terlalu jauh untuk menghindari perubahan nilai cairan dalam biomassa mentah yang akan digunakan.

4. Penyimpanan sampel, baik untuk yang mentah ataupun sudah melewati proses torefaksi, harus diperhatikan. Sebaiknya sampel disimpan dalam tempat yang dapat membatasi interaksi sampel dengan udara terbuka agar tidak terjadi perubahan kandungan cairan dalam sampel, terutama bila pengujian mengandung pengulangan.

DAFTAR PUSTAKA

Akinrinola, F.S., 2014. “Torrefaction and Combustion Properties of some Nigerian Biomass”. School of Chemical and Process Engineering, University of Leeds.

Basu, Prabir, 2013.”Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction : Practical Design and Theory (Second Edition)”.

Bergman, P.C.A., Kiel, J.H.A., 2005. “Torrefaction for Biomass Upgrading”. Fourteenth Europian Biomass Conference and Exhibition, Paris.

Brue, J., Darr, M.J., Medic, D., 2012. “Effects of Torrefaction on Particle Size Distribution of Corn Stover”. Agricultural and Biosystem Engineering. Iowa State University.

Chang, Siu Hua, 2014. “An Overview of Empty Fruit Bunch from Oil Palm as Feedstock for Bio-Oil Production”. Faculty of Chemical Engineering, Universiti Teknologi MARA (UTM) Malaysia, Pematang Pauh, Penang, Malaysia.

Cielkosz, D., Wallace, R., 2011. “Review: torrefaction for bioenergy feedstock production”. Biofuels Bioproducts and Biorefining.

Felfli, F.F., Luengo, C.A., Suarez, J.A., Beaton, P.A., 2005. “Wood Briquette Torrefaction”. Centro de Tecnologia da UNICAMP. Brazil.

Jenkins, B.M., 1989. “Physical Properties of Biomass : a Biomass Handbook”. Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam.

Latif, Marina. Dkk., 2014. “Pengolahan Kelapa Sawit Menjadi CPO dan KPO”. Politeknik Pertanian Negeri Pangkep.

Mani, S., Sokhansanj, S., Bi, X., Turhollow, A., 2006. “Economics of Producing Fuel Pellets from Biomass”. NACE Conference, New Orleans, LA.

Monteiro, Eliseu, dkk., 2013. “Experimental and Numerical Analysis of Coffee Husks Biomass Torrefaction”. Instituto Politecnico de Portalegre, Portugal.

Nam, S.B., et.al., 2016. “Torrefaction Reaction Characteristic of various Biomass Waste on Pilot Scale of Torrefaction Reaction System”. Plant Engineering Center, Institute of Advanced Engineering, Yongin-Si, South Korea.

Phanphanich, M., Mani, A., 2011. “Impact of Torrefaction on the Grindability and Fuel Characteristics of Forest Biomass”. Biochemical Engineering Progam, Faculty of Engineering, University of Georgia, Athena.

Prins., M.J., Kryztof, J.P., Janssen, F.J.J.G., 2006. “More Efficient Biomass Gasification via Torrefaction”. Department of Chemical Engineering and Chemistry, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

Prins, M.J., Ptasinski, K.J., Jansen, F.J.J.G., 2006. “Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of Products”. J. Department of Chemical Engineering and Chemistry, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

Punsuwan, Nathaya, dkk., 2015. “Torrefaction of Cassava Peels with CO2 and KOH: Effects of Temperature, Chemical Loading, and Introduced Carbonization Step on the Properties of Syngas and Porous Carbon Product”. Department of Chemical Engineering, Ubon Rachathani University, Japan.

Safrizal, 2014. “Distributed Generation Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Kota Type Incinerator Solusi Listrik Alternatif Kota Medan”. Fakultas Sains dan Teknologi, UNISNU, Jepara.

Salmina, 2018. “Studi Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Oleh Masyarakat di Jorong Koto Sawah Nagari Ujung Gading Kecamatan

Lembah Melintang". Program studi Pendidikan Geografi STKIP PGRI Sumatera Barat.

Sukiran, A.M., et.al., 2017. "A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production".Department of Chemical Engineering, University of Malaya, Malaysia.

Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., Ptasinski, K.J., 2011. "Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels : A Review. Biomass Bioenergy. Department of Chemical Engineering and Chemistry, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

Stelte, W., 2012. "Torrefaction of Unitilized Biomass Resources and Characterization of Torrefied Gasses". Center for Renewable Energy and Transport, Danish Technological Institute.

Talero, Gabriel, dkk., 2018. "Biomass Torrefaction in a Standard Retort: A Study on Oil Palm Solid Residues". Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Tajalli, Arief, 2015. "Panduan Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia". Penabulu Alliance. Jakarta.

Tumuluru, J.S., Hess, J.R., Sokhansanj, S., Wright, C.T., 2011. "A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy Applications". Industrial Biotechnology. Idaho National Laboratory, Idaho Falls, USA.

Tumuluru, J.S., Hess, J.R., Sokhansanj, S., Wright, C.T., 2011. “Biomass Torrefaction Process Review and Moving Bed Torrefaction System Model Development”. Industrial Biotechnology. Idaho National Laboratory, Idaho Falls, USA.

Uemura, Y., Omar, W.N., Tsutsui, T., Yusup, S.B., 2011. “Torrefaction of Oil Palm Wastes”. Department of Chemical Engineering, Kagoshima University, Japan.