

**SIMULASI PROSES TOREFAKSI SAMPAH SISTEM KONTINU
MENGUNAKAN *SOFTWARE* ASPEN PLUS**

(Skripsi)

**Oleh
DEDI TRIYADI**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2017

ABSTRAK

SIMULASI PROSES TOREFAKSI SAMPAH SISTEM KONTINU MENGUNAKAN SOFTWARE ASPEN PLUS

OLEH

DEDI TRIYADI

Potensi energi yang dapat dibangkitkan dari sampah melalui proses torefaksi mencapai 6.000 kcal/kg atau 25,2 MJ/kg. Tantangan yang dihadapi saat ini adalah bagaimana mengembangkan sistem reaktor kontinu untuk mendapatkan bahan bakar padat dari produk torefaksi sampah. Tujuan penelitian ini adalah melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ASPENTM untuk memodelkan proses torefaksi sampah pada sistem kontinu dengan reaktor tubular. Kapasitas umpan sampah sebesar 5 kg/jam dengan variasi kandungan air umpan sampah 30-80%. Sistem simulasi terdiri dari sebuah reaktor pengering (*Rstoic*), reaktor torefaksi (*RYield*), *separator* dan *splitsparator*. Proses pengeringan ditahan pada temperatur 100°C dan torefaksi pada 275°C, terjadi secara kontinu pada reaktor tubular. Hasil simulasi menunjukkan kandungan air sampah umpan memberikan pengaruh terhadap kebutuhan energi pada proses pengeringan dan proses torefaksi sampah. Kebutuhan energi torefaksi meningkat sekitar 1,3 kW – 3,2 kW pada variasi kandungan air sampah umpan 30-80%, sedangkan produksi bahan bakar padat berkurang sekitar 1,9 kg/jam menjadi 0,5 kg/jam.

Keywords: *Sampah kota, torefaksi, kontinu, simulasi, Aspen*

ABSTRACT

Torrefaction Process Simulation of Continuous Waste System Using Aspen Plus Software

BY

DEDI TRIYADI

Municipal Solid Waste becomes one of the most unbreakable major problem in cities in Indonesia than other problem. The heat that can be generated from municipal waste reaches 25,2 MJ / kg (6.000 kcal / kg) into one potential alternative energy source to be developed. One development that can be done is to do heat treatment with a solid fuel end product or called torrefaction. The objective of the study was to obtain solid fuel products equivalent to sub-bituminous coal. Developing a laboratory scale system for laboratory waste dumping using a tubular tube, calculates the energy requirement of waste dumping process with 50-80% moisture content in feed waste. The study used ASPENTM simulation software is to simulate the municipal solid waste system laboratory scale process using tubular reactor. The waste system's waste capacity is 5 kg / hour. The simulation system consists of a reactor dryer (Rstoc), reorefaction reactor (RYield), separator and splitsparator. The process of cultivation is retained at 100°C and the torefaction at 275°C occurs continuously on the tubular tube. The simulation results show that the waste water content of the baits has an effect on the energy needs in the drying process and the process of torefaction to the city. Drying energy requirements increased 1,3 kW-3,2 kW on waste water content variation 30-80%, while solid fuel production reduced about 1,9 kg/hour to 0,5 kg/hour.

Keywords: Waste, torrefaction continuous, simulation, Aspen plus.

**SIMULASI PROSES TOREFAKSI SAMPAH SISTEM KONTINU
MENGUNAKAN SOFTWARE ASPEN PLUS**

**Oleh
DEDI TRIYADI**

Skripsi

Sebagai satu syarat untuk mencapai gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2017

Judul Skripsi

**: SIMULASI PROSES TOREFAKSI SAMPAH
SISTEM KONTINU MENGGUNAKAN
SOFTWARE ASPEN PLUS**

Nama Mahasiswa

: Dedi Triyadi

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1215021027

Jurusan

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP. 19710331 199903 1 003

Indra Mamad Gandidi, S.T., M.T.

NIP. 19700307 199903 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

NIP. 19740816 200012 1 001

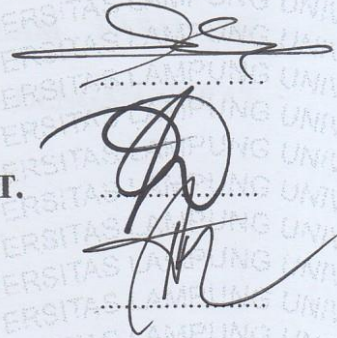
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

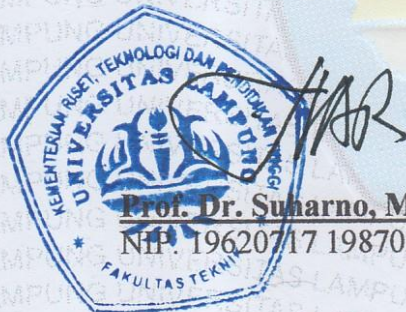
Ketua : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**

Anggota Penguji : **Indra Mamad Gandidi, S.T., M.T.**

Penguji Utama : **Dr. Amrizal, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Prof. Dr. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 7 Agustus 2017

PERNYATAAN PENULIS

TUGAS AKHIR 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

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



DEDI TRIYADI
NPM. 1215021027

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Margomulyo 04 Desember 1994, sebagai anak ketiga dari empat bersaudara pasangan Bapak Sutarno dan Ibu Darmini. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 02 Margomulyo Kecamatan Tegineneng Kabupaten Pesawaran pada tahun 2006, menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah

Pertama di SMP Negeri 1 Natar Kecamatan Natar Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2009, menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Negeri 2 Bandar Lampung Kota Bandar Lampung 2012, dan pada tahun 2012 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam organisasi internal kampus, yaitu sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Sekretaris Bidang Organisasi dan Kepemimpinan pada tahun 2013-2014, pada tahun 2014-2015 menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Kepala Bidang Organisasi dan Kepemimpinan. Pada Tahun 2015-2016 penulis menjabat sebagai Kepala Dinas Internal dan Advokasi di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM-FT)

Pada bidang akademik, penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Isuzu Astra Motor Indonesia (IAMI) yang berlokasi di Karawang, Jawa Barat pada tahun

2015. Pada tahun 2016 penulis melakukan penelitian pada bidang konsentrasi Konversi Energi dengan judul tugas akhir “Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan *Software* Aspen Plus” dibawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Indra M. Gandidi, S.T., M.T.

Bandar Lampung, 07 Agustus 2017

Penulis

Dedi Triyadi

PERSEMBAHAN

*Dengan Kerendahan Hati meraih Ridho Illahi Robbi dan syafaat nabi
Muhammad SAW Kupersembahkan karya Kecilku ini untuk orang-orang yang
aku sayangi*

Ayah dan Ibuku

*Kedua orang tua, Bapak Sutarno dan Ibu Darmini atas segala pengorbanan
yang tak terbalaskan, do'a, kesabaran, keikhlasan, cinta dan kasih sayang
yang tidak ada putusnya.*

Kakak, Adik & Keponakanku

*Kepada kedua kakakku Agus Sudaryanto, Sugihartini dan Adikku Winda Mira
Diana sebagai teman, kakak, sahabat dalam segala suasana duka dan suka
serta kebersamaan tanpa batas selama ini. Nurhani Saputri, Asyfa Jiyon Aulia
dan Aqila Hanifa Zahira keponakan – keponakan tercinta.*

Dosen Teknik Mesin

*Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran serta saran baik
secara akademis maupun non akademis*

Tim Padepokan Termodinamika

*Yang selalu membantu, memberikan semangat, teman belajar menuju
keberhasilan*

Keluarga Teknik Mesin '12

*Yang selalu memberi semangat dan selalu berdiri bersama dalam perjuangan
menuju kesuksesan.*

Mechanical Archery Club

*Yang mejadi wadah pembelajaran, motivasi dan pengingat dalam
perjuangan.*

MOTTO

"Hidup Adalah Perubahan"

"Innama a'malu bin niat"

SAN WACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbilalamin, puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan mempersembahkan judul “*Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan Software Aspen Plus*” dengan sebaik-baiknya.

Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan seluruh alam Nabi Muhammad SAW, sahabatnya, serta para pengikutnya yang selalu istiqomah diatas jalan agama Islam hingga hari ajal menjemput.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT dengan segala kuasa-NYA pemberi rahmat, hidayah dan ampunan bagi hamba-NYA termasuk penulis. Terimakasih ya Allah, semoga semua hal yang telah penulis lakukan dan kerjakan bernilai ibadah dan mendapat pahala dari-MU. Amin ya rabb
2. Nabi Muhammad SAW, untuk segala hal yang telah beliau lakukan dahulu. Menyempurnakan ahlaq sehingga semua ummat yang hidup hingga sekarang dapat merasakan nikmat iman dan islam secara utuh serta tanpa keragu – ragan.

3. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama tugas akhir, yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi bagi penulis.
4. Bapak Indra Mamad Gandidi, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua tugas akhir, yang telah banyak memberikan waktu, pengalaman, motivasi dan pemikiran bagi penulis.
5. Bapak Dr. Amrizal, S.T., M.T. selaku dosen pembahas yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
6. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
7. Staf Akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Untuk kedua orang tua-ku Ayahanda Sutarno dan Ibunda tercinta Darmini yang selalu menjadi pondasi dan motivasi utama penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin, atas segala do'a, dukungan dan setiap tetes keringat yang telah didedikasikan tanpa pamrih kepada penulis.
9. Agus Sudaryanto, Suguhartini dan Winda Mira Diana sebagai Kakak dan Adik yang terus memberikan dukungan.
10. Keponakan – keponakanku, Nurhani Saputri, Asyfa Jiyan Aulia dan Aqila Hanifa Zahira yang memberikan keceriaan bagi penulis.
11. M. Faris selaku rekan penelitian, sahabat dan Ketua Hima yang selalu mendampingi dalam perjalanan penulis menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

12. Rekan-rekan Trabas Muhammad Rifa'i, Muchdy Kurniawan, Farid Nanda Syanur, Kiki Eko Suwanto, I Komang Suariandi, Nur Imam Subagyo, Ahmad Alfian, Abdul Aziz dan Joel Aritonang yang telah berbagi pengalaman bersama dalam suka dan duka.
13. Seluruh angkatan Teknik Mesin 2012 untuk kebersamaan yang telah dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dan juga beban dari angkatan 2012.
14. Mechanical Girls Wafda Nadhira, Anggun N Wisastra, Intan Sunaryo Putri Rabiah Surrianingsih, Jumaliya dan semua perempuan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
15. Mechanical Archery Club, Dwi Andri Wibowo, S.T., Opi Sumardi, Wahyu Adi Saputra, Fahmi Bastiar, Heru Isworo, Imron, Arif Rahman Sadimin dan rekan-rekan lainnya yang telah menjadi motivasi, sahabat sharing, latihan dan belajar bersama.
16. Rekan-rekan BEM-FT dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga yang sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 07 Agustus 2017
Penulis,

Dedi Triyadi

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PERSETUJUAN	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	iv
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
SANWACANA	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 <i>Biomasa Wastes</i>	6
2.2 Sampah Kota.....	7
2.2.1 <i>Ultimate Analysis</i>	8
2.2.2 <i>Proximate Analysis</i>	8

2.3 Torefaksi	10
2.3.1 Proses Torefaksi	11
2.3.2 Parameter-Parameter Torefaksi	13
2.4 Perangkat Lunak Aspen Plus	16
III. METODE PENELITIAN	20
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	20
3.2 Alur Tahapan Pelaksanaan.....	22
3.3 Pengumpulan Data	24
3.4 Pemodelan dan Simulasi Aspen Plus.....	24
3.4.1 Pemodelan Torefaksi Sampah Sistem Kontinu	24
3.4.2 Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu	25
3.5 Metode Simulasi	29
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Hasil Simulasi Torefaksi.....	31
4.2 Analisis Produk Torefaksi.....	32
4.3 Analisis Kebutuhan Panas Proses Torefaksi.....	36
V. KESIMPULAN DAN SARAN	41
5.1 Kesimpulan	41
5.2 Saran	42
DAFTAR KEPUSTAKAAN	43
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Torefaksi.	11
Gambar 2.2 Produk Torefaksi.	16
Gambar 2.3 Lembar kerja Aspen Plus.....	17
Gambar 3.1 Diagram alir (<i>flow chart</i>) penelitian	23
Gambar 3.2 Reaktor tubular	25
Gambar 3.3 Alur tahap pembuatan model simulasi pada <i>software</i> Aspen Plus..	26
Gambar 3.4 (a) Skema simulasi Aspen Plus torefaksi sampah sistem kontinu...	27
(b) Skema perhitungan simulasi Aspen Plus	27
Gambar 3.5 Pemvariasian kandungan air sampah umpan.....	29
Gambar 4.1 Hasil <i>flowsheet running</i> simulasi torefaksi sampah sistem kontinu.	31
Gambar 4.2 Grafik pengaruh kandungan air sampah umpan terhadap produksi bahan bakar padat.....	33
Gambar 4.3 Grafik pengaruh kandungan air sampah umpan terhadap produksi gas.	34
Gambar 4.4 Grafik perbandingan produk torefaksi sampah sistem kontinu.	34
Gambar 4.5 Grafik pengaruh kandungan air sampah umpan terhadap kebutuhan panas pada proses pengeringan	36
Gambar 4.6 Grafik pengaruh kandungan air sampah umpan terhadap kebutuhan panas pada proses torefaksi.....	37
Gambar 4.7 Grafik perbandingan kebutuhan panas proses.	38

Gambar 4.8 Grafik kebutuhan energi panas total pada model torefaksi sampah sistem kontinu. 39

Gambar 4.9 Grafik pengaruh kandungan air sampah umpan terhadap keseimbangan panas sistem..... 40

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rencana kegiatan penelitian	20
Tabel 3.2 Data komposisi komponen sampah kota	24
Tabel 3.3 Deskripsi model unit blok Aspen Plus	28
Tabel 4.1 Hasil simulasi proses torefaksi sistem kontinu	32

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sampah adalah komponen heterogen dengan kandungan air dan densitas energi yang rendah. Selama ini, sampah dikenal sebagai salah satu sumber masalah khususnya di kota-kota besar di Indonesia, yang memiliki potensi sebagai sumber bahan bakar alternatif yang potensial untuk dikembangkan. Nilai kalor yang dapat dibangkitkan dari sampah kota sekitar 25,2 MJ/kg (Pasek dkk., 2007). Namun, dalam aplikasi pengolahan sampah itu sendiri memiliki berbagai kendala, baik itu kendala teknis ataupun kendala non teknis.

Melihat keadaan tersebut diperlukan suatu metode yang tepat untuk dapat mengelola dan memanfaatkan sampah menjadi sumber bahan bakar alternatif yang mampu mengurangi jumlah sampah secara signifikan. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengkonversi sampah menjadi bahan bakar padat yang memiliki nilai kalor tinggi adalah torefaksi.

Torefaksi atau pirolisis ringan adalah proses perlakuan panas pada temperatur 200-300°C pada tekanan atmosfer tanpa adanya oksigen. Hasil utama dari proses torefaksi berupa padatan dan gas. Torefaksi sampah dapat menghasilkan bahan bakar setara batu bara Sub-bituminous (Amrul dkk., 2010). Karakteristik emisi gas

pembakaran bahan bakar padat hasil torefaksi yang berasal dari sampah kota menghasilkan gas buang yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan gas emisi pembakaran sampah kota secara langsung (Hardianto dkk., 2010).

Keunggulan lain dari proses torefaksi adalah proses yang berlangsung pada temperatur dan tekanan yang relatif rendah dibandingkan dengan teknologi lain, serta efisiensi konversi energi yang tinggi yakni hingga 90% (Bergman, 2004).

Untuk dapat melakukan pengolahan dan pemanfaatan sampah, diperlukan sebuah sistem pengolahan kontinu yang diharapkan dapat mengurangi sampah dalam jumlah besar serta mampu menghasilkan bahan bakar dengan laju produksi yang lebih tinggi dari sistem *batch*. Berkaitan dengan hal tersebut, dibutuhkan suatu penelitian dan eksperimen-eksperimen lebih lanjut untuk mendapatkan parameter, hasil serta kebutuhan energi pada proses torefaksi sampah sistem kontinu sebagai pendukung dari pengembangan torefaksi sampah kontinu skala massal atau industri.

Proses penelitian dan eksperimen-eksperimen tersebut tentu membutuhkan waktu yang cukup lama, biaya besar dan percobaan yang berulang-ulang untuk mendapatkan hasil dan kebutuhan energi dari proses torefaksi sampah sistem kontinu. Untuk meminimalisir dan memberikan efisiensi dalam proses penelitian, digunakan sebuah program lunak simulasi Aspen plus, yang diharapkan mampu mendapatkan estimasi rendemen dan kebutuhan energi total pada proses torefaksi sampah sistem kontinu.

Berdasarkan latarbelakang yang sudah dijabarkan, penulis tertarik untuk melakukan penelitian terkait simulasi proses torefaksi sampah sistem kontinu menggunakan perangkat lunak untuk mendapatkan estimasi rendemen dan kebutuhan energi total pada proses torefaksi sampah sistem kontinu. Topik penelitian yang diangkat saat ini adalah simulasi proses torefaksi sampah sistem kontinu skala lab, untuk mendukung penelitian pada proses torefaksi sampah sistem kontinu skala industri dengan menggunakan simulasi perangkat lunak.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian yang akan dicapai dari latar belakang yang telah dipaparkan adalah :

1. Mendapatkan estimasi rendemen produk dari model simulasi proses torefaksi sampah sistem kontinu skala lab dengan variasi kandungan air sampah umpan menggunakan perangkat lunak.
2. Menghitung kebutuhan energi total pada proses torefaksi sampah sistem kontinu skala lab.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian simulasi torefaksi sampah kontinu menggunakan perangkat lunak Aspen plus ini, dilakukan pembatasan masalah dengan ruang lingkup sebagai berikut :

1. Sampah umpan yang menjadi objek penelitian adalah sampah kota jenis biomassa yang diambil dari data skunder pada penelitian sebelumnya.
2. Pada model sistem, proses yang terjadi adalah berupa *steady state* dengan kondisi *isothermal*.
3. Reaktor torefaksi sistem kontinu yang digunakan pada proses adalah menggunakan reaktor tubular.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan oleh penulis dalam menyusun tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini menguraikan tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan landasan teori dan literatur yang digunakan dalam mendukung penelitian yang dilakukan.

BAB III : METODE PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir, yaitu tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan, dan prosedur pengujian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan hasil dan pembahasan dari data-data yang telah diperoleh dari pengujian.

BAB V : SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisikan tentang hal-hal yang disimpulkan dari hasil penelitian, serta saran-saran yang disampaikan peneliti terkait penelitian yang telah dilaksanakan.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi sumber referensi yang digunakan penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomass Wastes

Biomassa sampah atau limbah dapat dibagi menjadi empat kategori: sampah kota, limbah pertanian, ternak dan limbah kayu. Untuk mendapatkan penjelasan lebih lanjut dari empat kategori biomassa sampah dapat dilihat dibawah ini :

a. Sampah Kota

Sampah kota adalah salah satu biomassa dengan kategori khusus. Pada dasarnya ada dua jenis sampah kota yang dapat digunakan sebagai sumber energi adalah sampah kota (MSW, Sampah perkotaan, sampah) dan biosolid (limbah, lumpur). Masing-masing memiliki karakteristik tersendiri sebagai sumber energi biomassa (Klass, 1998).

b. Limbah Pertanian

Limbah hasil pertanian adalah salah satu sumber daya biomassa yang sangat penting yang diproduksi setiap tahun. Residu pertanian yang bersifat musiman dapat digunakan sebagai bahan bakar setiap tahun. Hasil pengolahan tebu yang

menghasilkan limbah bagas, pengolahan padi yang menghasilkan jerami keram dan sekam dari proses pengolahan kelapa serta tanaman lain yang memiliki bahan sisa hasil pengolahan yang dapat digunakan sebagai sumber energi (Klass, 1998).

c. Limbah Peternakan

Limbah ternak atau residu peternakan adalah salah satu sumber biomassa yang memiliki kategori khusus. Residu hasil peternakan sebagian adalah dalam bentuk kotoran dengan kandungan energi yang lebih rendah. Teknik pengolahan limbah peternakan yang banyak dilakukan adalah dengan menggunakan digester biomassa menjadi biogas (Klass, 1998).

d. Limbah Kayu

Limbah kayu terdiri dari hutan, perkebunan, residu hasil penebangan pohon, residu hasil pengolahan kayu. Residu kayu ini sendiri mulai dari batang, tunggul, dedaunan, ranting, kulit kayu, akar kayu, pohon yang mati dan serbuk hasil pengolahan kayu (Klass, 1998).

2.2 Sampah Kota (MSW)

Municipal solid waste atau sampah kota didefinisikan sebagai limbah rumah tangga, limbah padat komersial, limbah kondisional dan limbah padat industri. Sampah kota terdiri dari komponen-komponen berupa sisa makana, sampah perumahan, sampah komersial dan limbah industri (limbah produksi pengolahan kayu) (Valkenburg dkk., 2008). Sampah kota atau msw adalah campuran dari limbah yang terutama dari perumahan dan komersial yang terdiri dari sisa makanan, limbah taman, produk kertas, plastik, dan kayu (Dixon, 2004).

Dalam proses pengolahan dan peningkatan energi terhadap limbah padatan kota diperlukan suatu metode khusus untuk mendapatkan hasil maksimal, untuk dapat mendukung metode ataupun teknologi yang akan digunakan, diperlukan sifat-sifat dari limbah padatan kota yaitu melalui analisis *proximate* dan analisis *ultimate* dari limbah padatan kota (Young, 2010).

2.2.1 *Ultimate Analysis*

Ultimate Analysis adalah komposisi hidrokarbon bahan bakar yang dinyatakan dalam unsur elemen dasar yaitu C, H, O, dan S sedangkan kelembaban, kandungan anorganik dan abu (*ash*) tidak terkait dalam *ultimate analysis*.

$$C + H + O + N + S + ASH + M = 100\% \quad \dots(1)$$

Kandungan C, H, O, N dan S adalah presentase massa karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan belerang, masing-masing dalam bahan bakar (Basu, 2010).

2.2.2 *Proximate Analysis*

Proximate analysis adalah analisis yang memberikan komposisi biomassa dalam hal komponen kelembaban (M), zat terbang (*Volatile Meter*), abu (*ASH*) dan karbon tetap (*Fixed carbon*).

a. Zat Terbang (*Volatile Meter*)

Volatile meter atau zat terbang adalah kandungan dari bahan bakar yang dapat terkondensasi dan atau tidak terkondensasi pada saat bahan bakar dipanaskan. Jumlah dari zat terbang tergantung pada tingkat pemanasan dan suhu pemanasan yang digunakan (Basu, 2010).

b. Abu (*ash*)

Ash atau abu adalah residu padat anorganik yang tersisa setelah bahan bakar benar-benar terbakar. Bahan utama dari abu adalah silika, aluminium, besi, dan kalsium, adapun sejumlah kecil lainnya yaitu magnesium, titanium, natrium dan kalium (Basu, 2010).

Kandungan kadar abu pada biomassa umumnya sangat kecil tetapi memiliki peran yang sangat penting dalam pemanfaatan biomassa apabila terdapat kandungan logam alkali seperti kalium, hilda seperti klorin. Komponen-komponen tersebut sangat berpengaruh pada boiler atau *gasifier* terutama pada efek tingkat korosi (Mettanant dkk., 2009).

c. Kelembaban (*Moisture*)

Kadar air atau kelembaban yang tinggi merupakan karakteristik utama dari biomassa. Kandungan kadar air pada suatu biomassa dapat setinggi 90 % (db). Dimana pada beberapa biomassa (kayu) terdapat dua macam kelembaban, yaitu *free moisture* dan *inherent moisture*.

Free moisture adalah kandungan kadar air pada biomassa (kayu) yang terletak diluar dinding sel biomassa. Sedangkan untuk *inherent moisture* adalah kandungan kadar air yang melekat pada dinding-dinding sel biomassa (Basu, 2010).

d. Karbon tetap (*Fixed Carbon*)

Fixed carbon atau karbon tetap adalah karbon padat dalam biomassa yang tetap *dichar* didalam proses pirolisis setelah devolatilisasi. Karbon tetap pada bahan bakar ditentukan dari persamaan berikut :

$$FC = 1 - M - VM - ASH \quad \dots(2)$$

Pada batu bara, *fixed carbon* termasuk unsur karbon dalam bahan bakar asli ditambah residu karbon yang terbentuk saat pemanasan (Basu, 2010).

2.3 Torefaksi

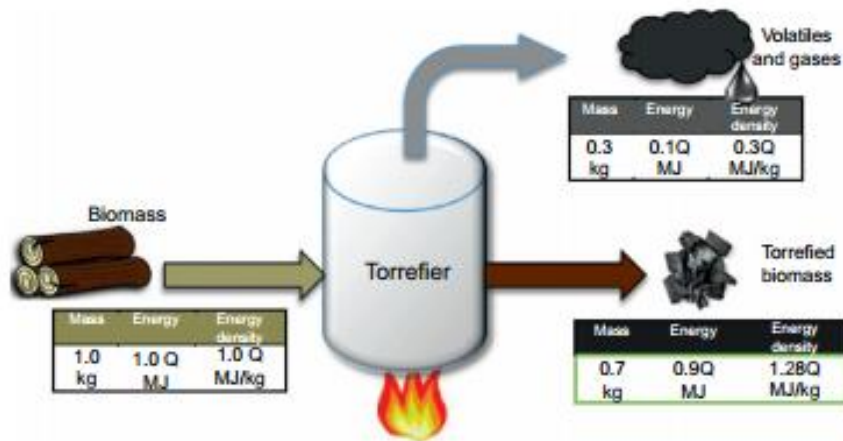
Torefaksi adalah proses termokimia yang sebenarnya merupakan proses *incomplete pyrolysis*, dan ditandai dengan parameter suhu reaksi 200-300°C, laju pemanasan kurang dari 50°C per menit, tanpa adanya oksigen, tekanan tetap dan bahan baku yang fleksibel. Jumlah oksigen dalam reaktor sangat mempengaruhi pentingnya untuk menghindari oksidasi dan terjadinya pembakaran api (IEA, 2010).

Torefaksi merupakan proses perlakuan panas pada temperatur sekitar 200-320°C pada tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen. Torefaksi pada biomassa berhasil memperbaiki karakteristik biomassa sebagai bahan bakar, yang ditandai dengan meningkatnya nilai kalor, densitas energi yang tinggi, kandungan air yang rendah, dan hidrofobia (Chen, 2011).

Dengan melakukan metode torefaksi pada biomassa didapatkan keuntungan peningkatan energi. Kepadatan energi bahan bakar pelet yang dihasilkan dari torefaksi dapat mencapai 14.000 MJ m^{-3} atau setara dengan batubara tingkat rendah (Stelte dkk., 2011). Biomassa yang telah mengalami proses torefaksi terbukti memiliki sifat hidrofobik (tahan terhadap penyerapan air), tahan terhadap kelembaban dan dapat disimpan diluar ruangan (Acharjee dkk., 2011).

2.3.1 Proses Torefaksi

Dijelaskan bahwa torefaksi adalah proses termal yang dilakukan dengan kontak pemanas pada kondisi menengah, atau dapat digambarkan seperti berikut :



Gambar 2.1 Mekanisme Torefaksi (Basu, 2013)

Dari gambaran tersebut menunjukkan bagaimana terjadinya proses perubahan biomassa dengan dikonversi menggunakan energi panas yang digambarkan dengan pemanas api menjadi sebuah produk torefaksi. Untuk menjadi sebuah produk yang digambarkan pada Gambar 2.1, biomassa mengalami beberapa

pemanasan yang bertahap.

Tahap pemanasan pada proses torefaksi biomassa ini menunjukkan terkait perubahan (dalam kondisi ideal) massa, suhu dan konsumsi energi dari sebuah biomassa dalam proses torefaksi. Untuk mendapatkan pengertian yang lebih lanjut mengenai tahap pemanasan adalah sebagai berikut :

a. Tahap Pemanasan Awal (*Predrying*)

Tahap pemanasan awal adalah langkah pertama dalam proses pemanasan, dimana keadaan atau kondisi pemanasan biomassa dari suhu kamar menuju suhu pengeringan ($\sim 100^{\circ}\text{C}$) (Basu, 2013).

b. Tahap Pengeringan (*Drying*)

Tahap pengeringan adalah langkah kenaikan suhu ($\sim 100^{\circ}\text{C}$) yang dilakukan untuk menguapkan kandungan air yang terdapat pada biomassa dengan suhu konstan hingga hilangnya kandungan air pada permukaan biomassa (Basu, 2010).

c. Tahap Pengeringan Lanjut (*Postdrying*)

Setelah mengalami pengeringan, biomassa dipanaskan lebih lanjut dengan suhu yang lebih lanjut ($\sim 200^{\circ}\text{C}$) sebelum pada proses torefaksi. Selama proses ini, semua unsur terkait kelembaban, senyawa organik telah hilang dari biomassa (Bergman dkk., 2005).

d. Tahap Torefaksi

Tahap torefaksi adalah tahap kunci dari seluruh proses, karena pada tahap ini terjadi proses depolimerisasi biomassa. Diperlukan rentang waktu

tertentu untuk proses ini sesuai dengan suhu reaksi yang diberikan. Didalam proses torefaksi terjadi sedikit reaksi eksotermis pada rentang suhu (250-300°C) (Prins, 2005).

e. Tahap Pendinginan

Produk hasil dari torefaksi yang keluar dari tahap torefaksi memiliki suhu tertinggi pada proses torefaksi. Sehingga dikhawatirkan dengan suhu tinggi dapat menyebabkan beberapa produk torefaksi mengalami oksidasi setelah berkontak dengan udara. Selain itu untuk melakukan penanganan lebih lanjut pada produk, tidak dimungkinkan pada keadaan suhu tinggi. Untuk itu diperlukan proses pendinginan ini.

2.3.2 Parameter-Parameter Torefaksi

Pada proses torefaksi terdapat beberapa parameter-parameter yang mempengaruhi selama proses torefaksi dilakukan, parameter-parameter tersebut adalah:

a. Temperatur

Temperatur pada proses torefaksi sangat berpengaruh pada proses torefaksi itu sendiri. Diketahui bahwa degradasi termal yang terjadi pada biomassa adalah tergantung pada temperatur yang diberikan. Selain itu didapat bahwa semakin meningkat temperatur yang diberikan pada proses torefaksi akan mempengaruhi massa produk yang dihasilkan.

Temperatur reaksi yang tinggi akan menghasilkan jumlah massa padatan yang lebih sedikit dan akan memberikan nilai bahan bakar padat yang lebih tinggi. Nilai *fix carbon* pada sampel meningkat sedangkan hidrogen dan oksigen berkurang karena suhu torefaksi yang meningkat (Bridgeman dkk., 2008).

b. Waktu Tinggal

Lamanya waktu tinggal atau waktu reaksi yang diberikan pada saat proses torefaksi akan berpengaruh terhadap degradasi termal yang terjadi pada biomassa. Lambatnya tingkat pemanasan yang diberikan adalah hal yang membedakan antara torefaksi dengan pirolisis yang tingkat pemanasannya dilakukan dengan cepat.

Waktu tinggal yang lebih lama akan menghasilkan massa produk padatan yang lebih rendah akan tetapi memiliki energi padatan yang lebih tinggi, walaupun efek dari waktu tinggal tidak sedominan dengan pengaruh temperatur proses. Efek dari waktu tinggal pada penurunan massa berkurang setelah sekitar 1 jam (Stelt dkk., 2011).

c. Jenis Biomassa

Jenis biomassa yang digunakan pada proses torefaksi akan sangat berpengaruh terhadap produk hasil torefaksi. Hemiselulosa adalah kandungan yang akan banyak mengalami reaksi pada proses torefaksi, dengan semakin banyaknya kandungan hemiselulosa pada biomassa akan dapat mempengaruhi kerugian massa dari produk.

d. Ukuran Partikel

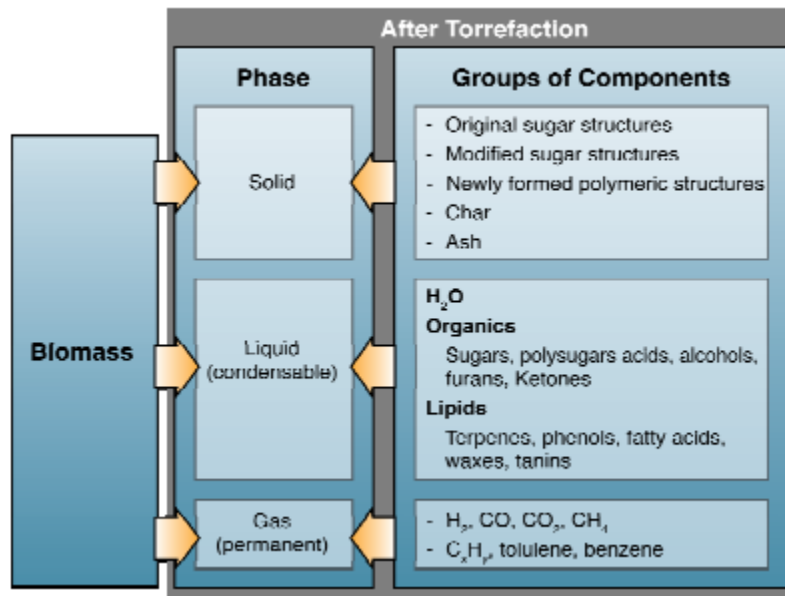
Ukuran partikel biomassa pada umpan dapat mempengaruhi hasil produk pada proses torefaksi. Efek adanya perbedaan ukuran tidak terlalu menonjol untuk ukuran umpan partikel yang normal, akan tetapi akan berefek lebih ketika ukuran umpan partikel besar.

Hal ini dapat terjadi akibat adanya perpindahan panas dari reaktor ke pada permukaan biomassa, oleh sebab itu dalam hal ini ukuran partikel dapat berpengaruh pada hasil produk torefaksi. Hasil massa menunjukkan peningkatan dengan adanya peningkatan diameter volume rata-rata (Basu dkk., 2013).

2.3.3 Produk Torefaksi

Selama proses torefaksi, banyak produk yang dihasilkan akibat adanya reaksi antara material torefaksi dengan energi panas yang diberikan. Karakteristik hasil produk proses torefaksi sangat bervariasi, yang sangat bergantung pada temperatur dan waktu tinggal (Pach dkk., 2002).

Produk dari proses torefaksi terdiri dari padatan, cairan dan sedikit gas, akan tetapi dalam pengaplikasian penggunaan dari proses torefaksi, produk yang diharapkan adalah bahan bakar padat. Perolehan massa dan energi padatan menjadi parameter penting dari produk torefaksi (Bergman dkk., 2004). Untuk dapat mengetahui produk dari torefaksi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Produk Torefaksi (Bergman dkk., 2005).

Dari gambar menjelaskan bahwa produk torefaksi diklsifikasikan berdasarkan temperatur proses yang dialami yaitu pada keadaan padat, cair dan gas.

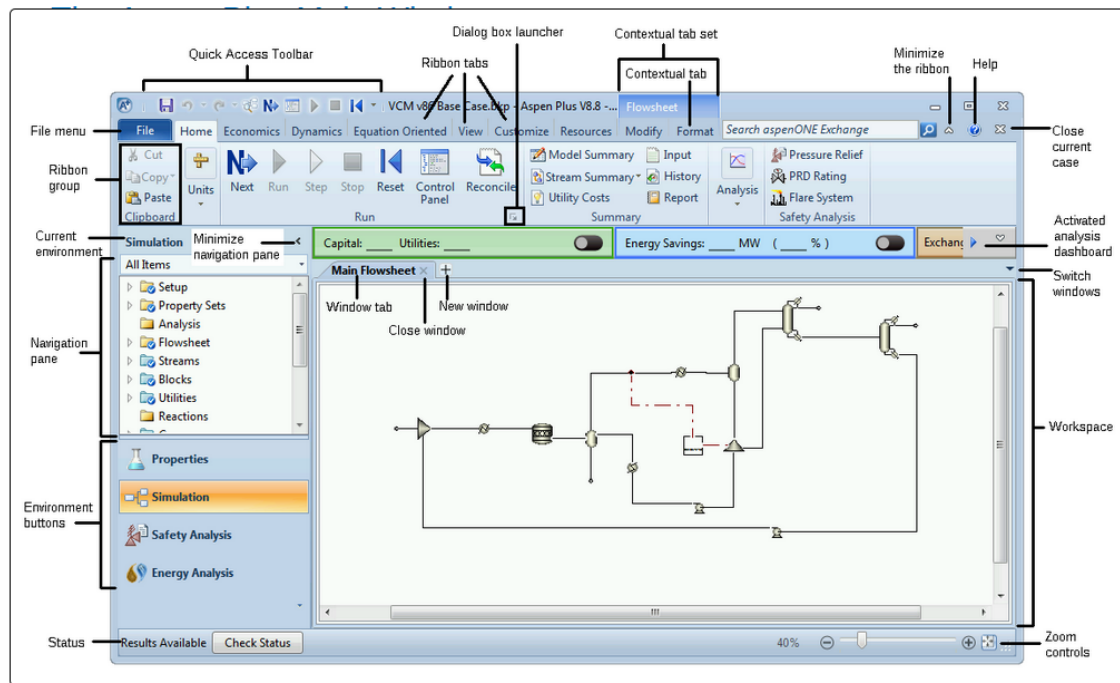
2.4 Perangkat Lunak Aspen Plus

Penggunaan *simulator* dalam bentuk *flowsheet* sangat bermanfaat dalam tahapan penelitian dan pengembangan, desain dan produksi. Dalam tahap penelitian dan pengembangan, sangat dibutuhkan untuk membantu mengurangi percobaan-percobaan yang dilakukan di laboratorium serta mengurangi bentuk-bentuk pabrik percobaan atau percontohan.

Sedangkan pada tahap desain membantu dalam melakukan pengembangan yang lebih cepat dengan perbandingan yang lebih sederhana. Untuk tahap produksi, penggunaan

simulator dapat digunakan sebagai analisis beberapa resiko dari pengembangan yang sedang dilakukan.

Perangkat lunak Aspen plus sendiri merupakan suatu program simulasi yang menggunakan hubungan antara besaran fisika seperti neraca massa, neraca panas, kesetimbangan termodinamika, persamaan kecepatan untuk memprediksi performa suatu proses seperti sifat aliran dan kondisi operasi ukuran alat (Scoot dkk., 2002) dan berbagai proses konversi batubara termasuk sintesis methanol (Kundsen dkk., 1982).



Gambar 2.3 Lembar kerja Aspen plus

Penggunaan simulasi Aspen plus dalam bentuk *flowsheet* di indentifikasikan dalam bentuk aliran umpan, unit operasi, aliran antara unit operasi dan aliran produk operasi. Kondisi operasi dan teknis disertakan dalam tingkat detail dari *flowsheet*.

Dari gambar 2.3 menunjukkan lembar kerja dan bagian-bagian utama yang terdapat pada *software* Aspen plus. Bagian-bagian utama dari lembar kerja memiliki fungsi-fungsi yang berbeda-beda, fungsi-fungsi tersebut adalah :

a. *Title Bar*

Title bar adalah bagian horizontal yang terletak pada jendela atas lembar kerja yang menunjukkan nama dari lembar kerja yang sedang dijalankan.

b. *Ribbon*

Ribbon adalah deretan menu yang berisi perintah-perintah yang tergabung dalam *ribbon tabs*, terletak dibawah *title bar*.

c. *File Menu*

File menu terletak diujung sebelah kiri dari *ribbon tabs*, berisi perintah-perintah seperti *opening*, *saving*, *exporting* dan *importing file*.

d. *Navigation Panel*

Navigation panel adalah panel navigasi berupa ikon folder yang digunakan untuk melihat lembar kerja didalamnya.

e. *Workspace*

Workspace adalah bagian utama dari Aspen plus yang digunakan sebagai ruang kerja untuk membuat dan menampilkan *flowsheets* simulasi, plot dan lain-lain.

f. *Main Flowsheet*

Main flowsheet adalah jendela yang digunakan untuk membangun *flowsheet* tersebut.

g. Status

Terletak pada kiri bawah lembar utama, menampilkan keadaan yang sedang dilakukan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Substansi penelitian yang akan dilakukan adalah membuat simulasi torefaksi sampah sistem kontinu menggunakan perangkat lunak Aspen plus untuk mendapatkan estimasi rendemen produk torefaksi sampah sistem kontinu serta analisis kebutuhan energi total pada proses torefaksi sampah sistem kontinu skala lab dengan reaktor tubular sebagai pendukung terhadap model sistem torefaksi sampah sistem kontinu skala industri.

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung. Adapun waktu pelaksanaan penelitian akan dilakukan dari bulan Januari 2017 sampai bulan Juni 2017. Deskripsi kegiatan yang akan dilakukan dalam waktu penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini :

Tabel 3.1 Rencana kegiatan penelitian

[illegible]

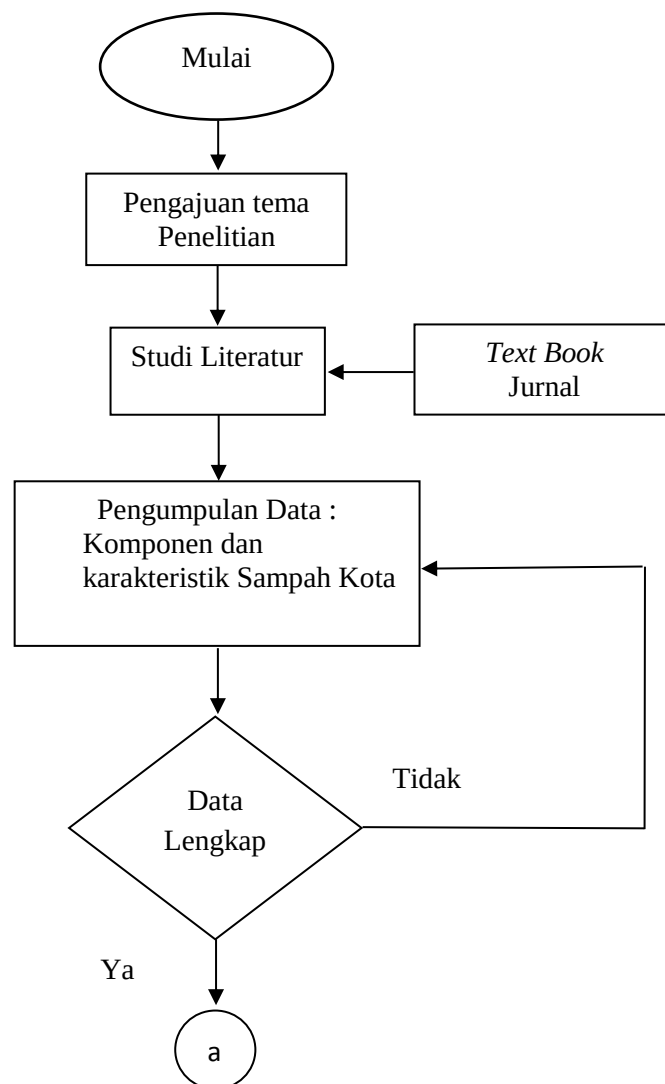
perhitungan keseimbangan energi yang dibutuhkan sistem untuk menghasilkan produk torrefaksi sampah secara kontinu skala lab.

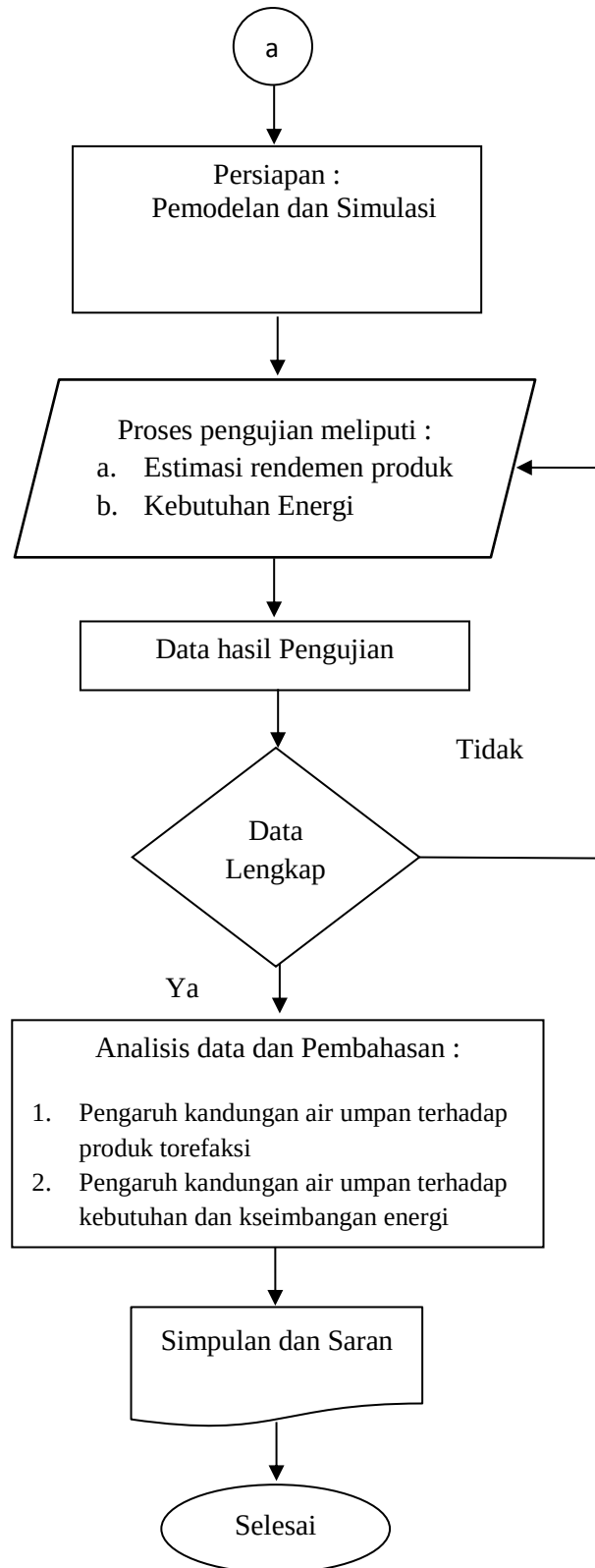
5. Pembuatan Laporan Akhir

Memberikan kesimpulan dan pembuatan laporan akhir hasil penelitian.

3.2 Alur Tahapan Pelaksanaan

Secara umum alur penelitian dapat dijabarkan melalui *flowchart* dibawah ini :





Gambar 3.1 Diagram alir (*flowchart*) penelitian

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang dilakukan adalah pengumpulan karakteristik sampah yang akan digunakan sebagai umpan pada proses simulasi torefaksi. Karakteristik komponen sampah umpan yang digunakan adalah berupa analisis *ultimate* dan *proximate* dari sampah. Adapun karakteristik *ultimate* dan *proximate proximate* yang digunakan adalah didapat dari data primer yang dapat dilihat pada table dibawah ini :

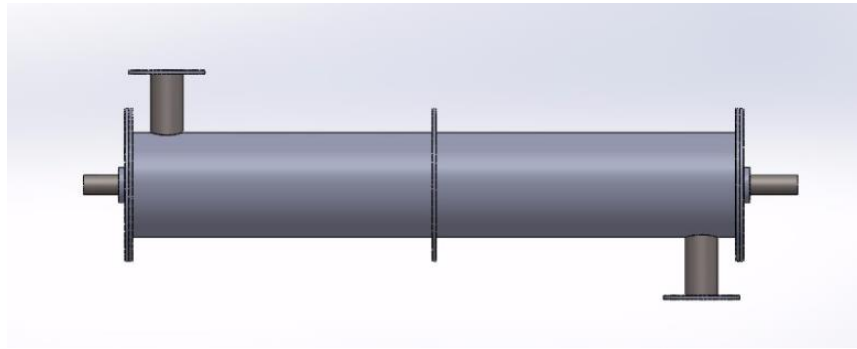
Tabel 3.2 Data komposisi komponen sampah kota (Amrul dkk., 2010)

Data Komposisi Komponen Sampah Kota								
Analisis Proksimat (%) <i>adb</i>				Analisis Ultimat (%) <i>adb</i>				
MC	VM	FC	Abu	C	H	N	S	O
11,51	70,97	11,14	6,38	47,59	6,85	1,18	0,19	37,83

3.4 Pemodelan dan Simulasi Aspen Plus

3.4.1 Pemodelan Torefaksi Sampah Sistem Kontinu

Kapasitas sistem yang diharapkan adalah 5 kg/jam dengan kandungan air umpan divariasikan 30-80 % dengan selang variasi sebesar 5%. Sistem torefaksi sampah yang disimulasikan terdiri dari proses pengeringan dan proses torefaksi. Kedua proses berlangsung dalam sebuah reaktor tubular. Pada Gambar 3.2 dapat dilihat reaktor tipe tubular yang akan digunakan untuk melakukan proses torefaksi sampah.



Gambar 3.2 Reaktor tubular

Temperatur pada proses torefaksi di asumsikan pada temperatur 275-300°C dengan media pemanas yang digunakan pada proses torefaksi adalah dengan media burner api. Nilai bahan bakar padat produksi torefaksi sampah diasumsikan sebesar 25,2 MJ/kg (Pasek dkk., 2010).

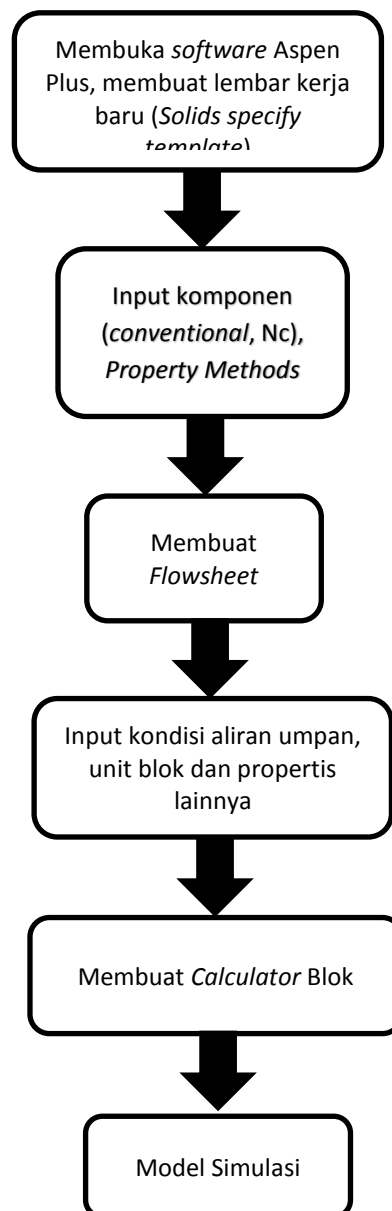
3.4.2 Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu

Model torefaksi sampah sistem kontinu dapat disimulasikan menggunakan perangkat lunak Aspen plus. Proses torefaksi sampah sistem kontinu dibagi menjadi dua tahap proses, proses pertama adalah proses pengeringan atau pengurangan kadar air pada sampah umpan. Untuk proses kedua adalah proses dekomposisi sampah menjadi komponen volatil dan *char*.

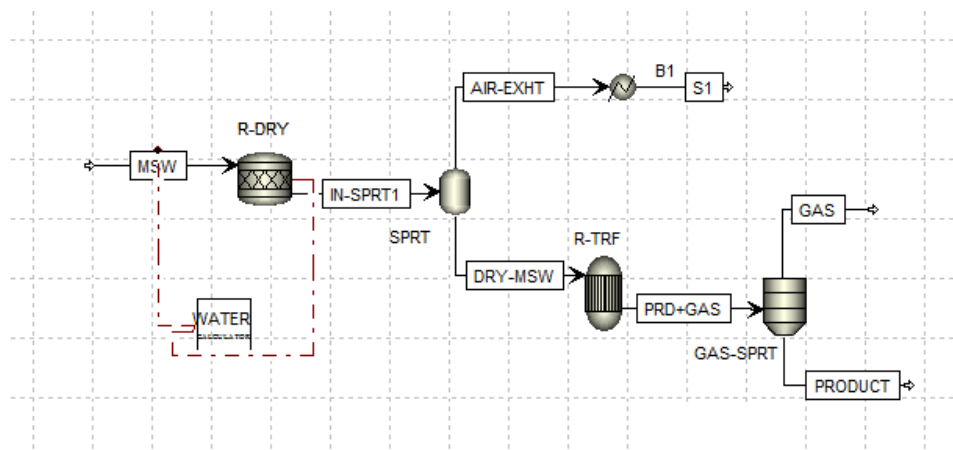
Skematik model proses torefaksi sampah sistem kontinu menggunakan Aspen Plus dapat dilihat pada Gambar 3.4. Sedangkan asumsi dasar yang digunakan pada simulasi proses torefaksi sampah sistem kontinu adalah :

1. Proses simulasi yang terjadi adalah *steady state*
2. Kondisi proses adalah sistem *isothermal*

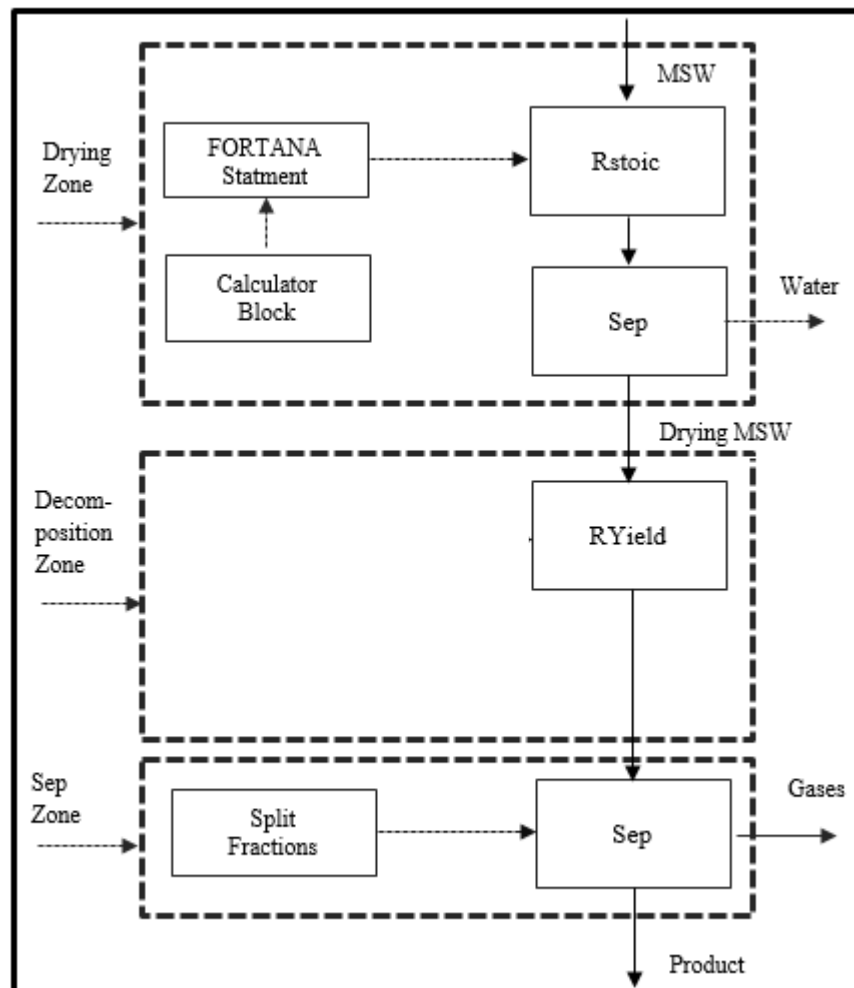
Dalam melakukan pembuatan model simulasi terdapat langkah-langkah yang digunakan untuk membuat model simulasi torefaksi sampah sistem kontinu dengan perangkat lunak :



Gambar 3.3 Alur tahap pembuatan model simulasi pada *software* Aspen Plus



(a)



(b)

Gambar 3.4 (a) Skema simulasi Aspen Plus torefaksi sampah sistem kontinu, (b) Skema perhitungan Simulasi Aspen Plus

Pada simulasi Aspen plus, proses pengeringan terjadi pada unit blok Rstoic, dilanjutkan pada unit blok Flash2 dengan dua *output* yaitu uap air dan sampah kering. Reaksi dekomposisi akan terjadi setelah sampah kering diteruskan menuju unit blok RYield. Proses dekomposisi pada simulasi dapat terjadi dengan memberikan informasi analisis *proximate* dan *ultimate* yang terkandung pada sampah.

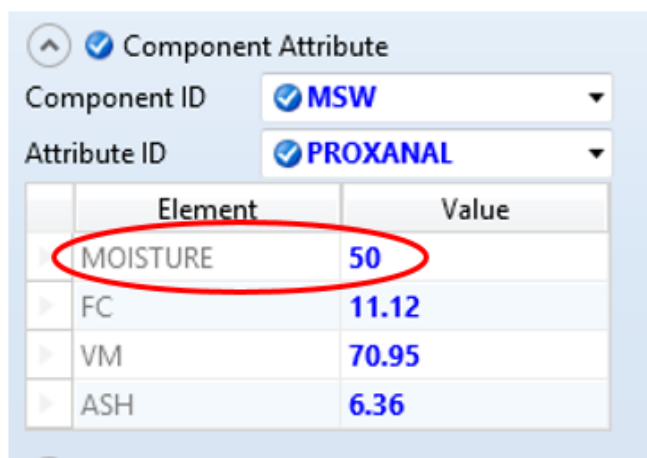
Output dari proses dekomposisi pada unit blok RYield dapat berupa *conventional* ataupun *nonconventinal* produk yang selanjutnya akan dipisahkannya produk padatan dari gas atau cairan dengan unit blok SSplit.

Tabel 3.3 Deskripsi model unit blok Aspen Plus

Aspen Plus ID	Blok ID	Deskripsi
Rstoic	R-Dry	Digunakan untuk mengurangi kadar air pada umpan proses torefaksi
Flash2	SPRT	Flash2 digunakan sebagai pemisah dengan 2 aliran keluaran, satu <i>outlet vapor</i> dan satu <i>outlet liquid</i> .
RYield	R-TRF	Reaktor yield mengkonversikan komponen <i>non-conventional</i> pada umpan menjadi komponen <i>conventional</i> .
SSplit	GAS-SPRT	Pemisah yang digunakan untuk melakukan pemisahan padatan dari gas atau cairan.

3.5 Metode Simulasi

Metode simulasi dilakukan dengan melakukan variasi terhadap kandungan air pada sampah umpan untuk mendapatkan estimasi rendemen produk dan kebutuhan energi yang dibutuhkan pada proses torefaksi sampah sistem kontinu. Kandungan air pada sampah umpan divariasikan pada keadaan 30-80% dengan selang sebesar 5%.



Element	Value
MOISTURE	50
FC	11.12
VM	70.95
ASH	6.36

Gambar 3.5 Pemvariasian kandungan air sampah umpan

Pemvariasian kandungan air sampah umpan dapat dilakukan dengan mengubah indikator aliran sampah umpan pada tabel *component id* kolom *moisture* dan mengubah nilai indikator sesuai dengan pemvariasian keadaan yang akan digunakan.

Running simulasi dapat dilakukan setelah mengganti nilai indikator kandungan air pada sampah umpan. Setelah *running* dilakukan dapat dilakukan pengamatan pada model simulasi terkait dengan hasil proses simulasi, serta informasi-informasi yang diperlukan dari hasil proses simulasi yang telah dilakukan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari simulasi model dan pembahasan yang sudah dilakukan pada bab sebelumnya berkaitan dengan proses torefaksi sampah sistem kontinu, dapat disimpulkan bahwa:

1. Estimasi produksi bahan bakar padat atau rendemen tertinggi dari model simulasi proses torefaksi sampah sistem kontinu adalah sebesar 1,975 kg/jam dan terendah 0,564 kg/jam dari sampah umpan dengan kondisi kandungan air 30% dan 80%.
2. Kebutuhan panas total pada simulasi proses torefaksi sistem kontinu tertinggi didapatkan sebesar 3.240 watt pada kondisi kandungan air sampah umpan 80%, serta kebutuhan panas terendah sebesar 1.220 watt pada kondisi kandungan air sampah umpan 30%.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian dan diperoleh data dan kesimpulan, maka saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Diperlukannya penelitian terkait kinetika reaksi pada proses torefaksi sampah sistem kontinu untuk mendapatkan parameter-parameter yang lebih dalam untuk pengembangan penelitian.
2. Diperlukan penyempurnaan pada model simulasi terkait dengan penggunaan media pemanas yang akan digunakan pada model perancangan torefaksi sampah sistem kontinu.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharjee Tapas C., Charles J., Coronella dan Victor R.Vasquez. 2011. *Effect of Thermal Pretreatment on Equilibrium Moisture Content of Lignocellulosic Biomass*.
- Amrul, T. Hardianto, A. Suwono, dan A.D. Pasek. 2010. *Upgrading of Municipal Solid Waste as Solid Fuel to Subituminus Coal Grade by Torrefaction Process, Proceeding of Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Bali, February 9- 10, 2010, ISBN: 978-602-96269-02
- Basu Pabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Elsevier, Oxford, UK.
- Basu Pabir. 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory*, Second Edition. Elsevier, Oxford, UK.
- Basu Pabir dan Dhungana A. 2013. *An Investigation Into the Effect of Biomass Particle Size on its Torrefaction*. Chem. Eng.

- Bergman P.C.A., Boersma A.R., dan Jacob H.A. 2004. *Torefaction for Entrained-Flow Gasification of Biomass*, Energy Research Center of Netherlands (ECN), Unit ECN Biomass, Einhoven.
- Bergman P.C.A., A.R. Boersma, J.H.A. Kiel, M.J. Prins, K.J. Ptasinski dan F.J.J.G. Jansen. 2005. *Torrified Biomass for Entrained-Flow Gasification of Biomass*. Report ECN-C-05-026.
- Bridgeman T., Jones J.M. dan Williams P.T. 2008. *Torrefaction of Reed Canary Grass, Wheat Straw and Willow to Enhance Solid Fuel Qualities and Combustion Properties*. Fuel 87, 844-856.
- Chen W.H. dan Kuo P.C. 2011. *Torrefaction and Co-Torrefaction Characterization of Hemisellulose, Cellulose and Lignin as Well as Torrefaction of Some Basic Constituents in Biomass*. Energy 36 (2), 803-811.
- Dixon Neil, D. Russell dan V. Jones. 2004. *Engineering Properties of Municipal Solid Waste*. Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, Leicestershire, LE11 3TU, UK.
- Hardianto T., Suwono A., Pasek A.D. dan Amrul. 2010. *Karakteristik Sifat-Sifat Pembakaran Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan yang Berasal dari Sampah Kota*, Digital Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin IX, Hotel Arya Duta Palembang, 13-15 Oktober 2010, ISBN: 978- 602-97742-0-7.

I.E.A. Bioenergy. 2010. *Pyrolysis of biomass*. www.pine.co.uk

Klass D.L. 1998. *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*. Academic Press, pp. 30, 276-277, 233, 239.

Kudsen R.A., Bailey T. dan Fabiano L.A. 1982. *Experience With ASPEN While Simulating a New Methanol Plant*. AIChE Symposium Series, 78:214.

Pach M., Zanz R. dan Björnbom R. 2002. *Torrefied Biomass a Substitute for Wood and Charcoal*, 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Kuala Lumpur.

Pasek A.D., Hardianto T., Ardiansyah W. dan Suwono A. 2007. *Laporan Akhir Studi Kelayakan Pembangkit Listrik dengan Bahan Bakar Sampah di Kota Bandung*, LPPM ITB, Bandung

Prins M.J. 2005. *Thermodynamic Analysis of Biomass Gasification and Torrefaction*. Technische Universiteit Eindhoven, 2005.

Scott Folger H. dan Gurmen Nihat M. 2002. *Aspen Plus Workshop for Reaction Engineering and Design*. Department of Chemical Engineering, The University of Michigan, Ann arbor, MI.

Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A. dan Ptasinski K.J. 2011. *Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: a Review*. Biomass Bioenergy 35, 3748-3762.

Valkenburg C., Walton C.W., Thompson B.L, Gerber M.A., Jones S.B. dan Stevens D.J. 2008. *Municipal Solid Waste (MSW) to Liquid Fuels Synthesis, Volume 1: Availability of Feedstock and Technology*. Pacific Northwest National Laboratory Richland. Washington.

Young Gary C. 2010. *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes: Economic, Technical, and Renewable Comparisons*. Hooboken, New Jersey.