

**Perancangan dan Simulasi Termal Reaktor Torefaksi
Kontinu Tipe *Tubular* Untuk Produksi Bahan Bakar
Padat dari Sampah Kota**

(Skripsi)

Oleh :
Muhammad Fariz



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2017**

ABSTRAK

PERANCANGAN DAN SIMULASI TERMAL REAKTOR TOREFAKSI KONTINU TIPE *TUBULAR* UNTUK PRODUKSI BAHAN BAKAR PADAT DARI SAMPAH KOTA

Oleh

Muhammad Fariz

Torefaksi adalah salah satu metode pengolahan sampah melalui proses termal menjadi bahan bakar padat berkualitas setara batubara subbituminus. Untuk mendapatkan bahan bakar padat dari proses torefaksi sampah dalam jumlah yang cukup besar perlu dikembangkan sebuah sistem torefaksi kontinu. Jenis reaktor yang akan dikembangkan adalah reaktor kontinu tipe *tubular* dengan sistem pemanas selimut fluida (*fluid jacket heater*). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan dimensi reaktor torefaksi tipe *tubular* (*screw conveyor*) dengan kapasitas 5 kg/jam, temperatur 275°C dan waktu tinggal 30 menit. Parameter perancangan yang digunakan adalah massa jenis (ρ) = 230 kg/m³, kecepatan putaran (n) = 0,5 rpm, *loading efficiency* (η) = 0.25, jarak *pitch* (S) = 0,5 D. Hasil yang didapatkan dimensi reaktor: $D_t = 8$ in, $D_{screw} = 195$ mm, jarak *pitch* (S) = 100 mm, Panjang Reaktor = 1600mm. Analisis keseimbangan energi menunjukkan bahwa kebutuhan panas untuk proses torefaksi ini adalah sebesar 1,27 kW. Dengan cara analisa energi dan simulasi termal menggunakan perangkat lunak Solidworks, untuk temperatur dalam reaktor sebesar 275°C didapatkan temperatur luar sebesar 311°C.

Kata kunci: Torefaksi, reaktor *tubular*, pemanas selimut fluida, *molten salt*.

ABSTRACT

DESIGN AND THERMAL SIMULATION OF TORREFACTION CONTINUOUS TUBULAR TYPES REACTORS FOR THE PRODUCTION OF SOLID FUELS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE

By

Muhammad Fariz

Torrefaction is one method of processing waste by a thermal process into a quality solid fuel equivalent to subbituminous. To obtain solid fuel from the process of waste torrefaction in large quantities, it is necessary to develop a torrefaction continuous system. The type of reactor to be developed is a tubular type continuous reactor with fluid blanket heat system. The purpose of this experiment was to obtain the dimensions of the tubular type (screw conveyor) with a capacity of 5 kg/h, temperature 275°C and residence time of 30 minutes. Parameters of design used are (ρ) = 230 kg/m³, rotation speed (n) = 0,5 rpm, loading efficiency (η) = 0.25, pitch distance (S) = 0,5 D. the results obtained are reactor dimension Dt = 8 in, Dscrew = 195 mm, pitch distance (S) = 100 mm, length of reactor = 1600mm. an energy balance analysis shows that the heat requirement for this torrefaction process is 1.27 kW. By means of energy analysis and thermal simulation using Solidworks software, for the temperature of reactor is 275°C we obtain external temperature is 311°C.

Keywords: Torrefaction, Tubular reactors, Fluid blanket heaters, Molten salt.

**PERANCANGAN DAN SIMULASI TERMAL REAKTOR TOREFAKSI
KONTINU TIPE *TUBULAR* UNTUK PRODUKSI BAHAN BAKAR
PADAT DARI SAMPAH KOTA**

Oleh

Muhammad Fariz

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2017

Judul Skripsi : **PERANCANGAN DAN SIMULASI TERMAL REAKTOR TOREFAKSI KONTINU TIPE TUBULAR UNTUK PRODUKSI BAHAN BAKAR PADAT DARI SAMPAH KOTA**

Nama Mahasiswa : **Muhammad Fariz**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1215021053**

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



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 : 25 Juli 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



Muhammad Fariz
NPM. 1215021053

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Palembang Provinsi Sumatera Selatan pada tanggal 3 Mei 1994, yang merupakan anak kelima dari 5 bersaudara, dari pasangan Ibrahim Basef dan Rogaiyah Hassan. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar Negeri (SDN) 2 Gotong Royong pada tahun

2006, kemudian pendidikan Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 25 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2009 dan kemudian penulis melanjutkan pendidikan pada Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 8 Bandar Lampung dan diselesaikan pada tahun 2012. Selama masa sekolah, penulis mengikuti kegiatan ekstrakurikuler yaitu PRAMUKA dan OSIS. Pada tahun 2012, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Undangan berdasarkan nilai rapor.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Sekertaris Bidang Penelitian dan Pengembangan (2013 s.d. 2014) dan Ketua Umum (2014 s.d. 2015), lalu Dewan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik (DPM-FT) Universitas Lampung sebagai Wakil Ketua I (2015 s.d. 2016). Pada tahun 2015, penulis melakukan kerja praktik di PT. Indal Steel Pipe, Gresik-Jawa Timur, dengan topik bahasan yaitu Studi Proses *Three Layer Polyethylene Coating* Pada Pipa Spiral Konstruksi. Penulis melakukan penelitian tugas akhir dengan judul “**Perancangan dan Simulasi Termal Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Untuk Produksi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota**”.

PERSEMBAHAN INI PENULIS TUNJUKKAN KEPADA

UMI TERCINTA (Rogaiyah Hassan)

ABAH TERCINTA (Ibrahim Basef)

KAKAK-KAKAK TERSAYANG (Afif Ismail Basef, Abdurahman Basef,

Farhad Basef, Muhammad Haikal Basef)

DOSEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS LAMPUNG

SAHABAT-SAHABAT BAXIAN BROTHERS

TEMAN-TEMAN TEKNIK MESIN 2012

UNIVERSITAS LAMPUNG

Motto

يُسْرًا الْعُسْرُ مَعَ فَإِنَّ يَسْرًا الْعُسْرُ مَعَ إِنَّ

"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan,
(5) sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. (6)"
(QS. Asy Syarh [94] : 5 ; 6)

تَكْذِبَانَ رَبِّكُمْ آلاءَ فَبَأَيِّ ﴿١٣﴾

"Maka nikmat Tuhan kamu yang manakah yang kamu
dustakan?"
(QS. Ar Rahman [55] : 13)

"Apabila kamu telah membulatkan tekad, maka bertawakkallah
kepada Allah. Sesungguhnya Allah menyukai orang-orang yang
bertawakkal kepada-Nya" (QS. Ali Imron [3] : 159)

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdu lillahi rabbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang senantiasa mencurahkan nikmat, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul "Perancangan dan Simulasi Termal Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe *Tubular* Untuk Produksi Bahan Bakar Padat Dari Sampah Kota" dengan sebaik-baiknya. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Selama pelaksanaan dan penyusunan skripsi ini, penulis banyak menerima bantuan, baik berupa moril maupun materil dan bimbingan dari semua pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing utama Tugas Akhir, atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, memberi dukungan, membimbing, memberi kritik maupun saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.
2. Bapak Indra Mamad Gandidi, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing pendamping atas kesediaannya membimbing dan memberi masukan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, serta memberikan banyak motivasi dan semangat kepada penulis.

3. Bapak Dr. Amrizal, S.T., M.T. selaku dosen pembahas dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini, yang telah memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
4. Bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T. sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, yang selalu memberikan semangat motivasi dan nasihat kepada penulis selama menjalani perkuliahan di Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin yang banyak memberikan ilmu selama penulis melaksanakan studi, baik berupa materi perkuliahan maupun teladan dan motivasi sehingga dapat dijadikan bekal untuk terjun ke tengah masyarakat.
6. Keluarga tercinta, terutama untuk dua orang terhebat dalam hidup penulis, Umi dan Abah, juga kakak-kakak (Afif Ismail, Abdurahman, Farhad, Muhammad Haikal) yang telah memberikan dukungan semangat, moril maupun materil serta selalu mendoakan yang terbaik untuk penulis.
7. Dedi Triyadi (Komti) sahabat dan rekan tugas akhir yang sudah banyak membantu penulis dalam mengerjakan penelitian ini.
8. Tim torefaksi Mas Agus, Mbak Nuning, Yudha dan Neneng yang sudah bekerja sama dalam mengerjakan proyek Torefaksi. Dan teman-teman padepokan Termodinamika.
9. Teman-teman Baxian Brother (Purnadi, Faisal, Imam, Akbari, Agus, Aldi, Suef, Yusuf, dan Joel) yang sudah menjadi sahabat-sahabat terbaik.

10. Teman-teman Kosan Griya 77 (Bang Dwi, Rifai, Mas Salpa, Bang Bowo, Muchdy, Wahyu kiting, dan Zuhri) yang sudah membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
11. Teman-teman Setsoters (Burda, Telly, Rayi, Vinda) sahabat-sahabat yang selalu memberikan semangat kepada penulis
12. Rekan-rekan Teknik Mesin angkatan 2012, Anjun, Dara, Emon, Farid, Komang, Opi, Christian, Ipin, Alfian, Doni, Wahyu D3 dan lain-lain yang tidak bisa saya tuliskan satu persatu, terima kasih telah memberikan dukungan dan semangatnya.
13. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kesalahan serta kekurangan. Menyadari hal tersebut dengan segala kerendahan hati penulis akan menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca untuk kesempurnaan skripsi ini, yang tentunya akan lebih mendorong kemajuan penulis dikemudian hari.

Semoga skripsi ini dapat berguna bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya. Akhir kata penulis ucapkan terimakasih.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, Juli 2017
Penulis,

Muhammad Fariz

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|----------------------------------|---------|
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | ii |
| HALAMAN JUDUL | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iv |
| PERNYATAAN PENULIS | v |
| RIWAYAT HIDUP | vi |
| PERSEMBAHAN | vii |
| MOTTO | viii |
| SANWACANA | ix |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR GAMBAR | xiv |
| DAFTAR SIMBOL | xvi |
| I. PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.3. Batasan Masalah | 4 |
| 1.4. Sistematika Penulisan | 4 |

| | |
|--|----|
| II. TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1. Sampah Kota | 6 |
| 2.2. Torefaksi | 10 |
| 2.3. Karakteristik Bahan Bakar Padat | 13 |
| 2.4. Biomassa | 17 |
| 2.5. Reaktor Torefaksi | 19 |
| 2.6. Parameter Reaktor Torefaksi | 25 |
| 2.7. <i>Molten Salt</i> | 26 |
| III. METODOLOGI PENELITIAN | |
| 3.1. Waktu dan Tempat Pelaksanaan | 27 |
| 3.2. Alur Tahapan Pelaksanaan | 28 |
| 3.3. Waktu dan Tempat Pelaksanaan | 29 |
| 3.4. Alat | 30 |
| IV. PERANCANGAN REAKTOR | |
| 4.1. Perancangan Dimensi Reaktor | 31 |
| 4.2. Analisa Kebutuhan Energi Reaktor | 34 |
| 4.3. Simulasi Perpindahan Panas | 37 |
| V. PEMBAHASAN | |
| 5.1. Perancangan Dimensi Reaktor | 42 |
| 5.2. Analisis Energi Yang Dibutuhkan Reaktor | 46 |
| 5.3. Spesifikasi Reaktor | 51 |
| 5.4. Simulasi Perpindahan Panas Reaktor | 54 |
| VI. Penutup | |
| 6.1. Kesimpulan | 57 |

| | |
|------------------|----|
| 6.2. Saran | 57 |
|------------------|----|

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

| Tabel | Halaman |
|---|---------|
| 2.1. Komposisi sampah kota di beberapa kota besar di Indonesia | 7 |
| 2.2. Karakteristik komponen sampah kota yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar | 9 |
| 3.1. Jadwal kegiatan penelitian | 30 |
| 4.1 Parameter awal perancangan | 32 |
| 5.1. Parameter perhitungan dimensi reaktor | 42 |
| 5.2. Parameter perhitungan kebutuhan energi proses torefaksi | 48 |
| 5.3. Parameter perhitungan perpindahan panas pada reaktor | 49 |
| 5.4. Spesifikasi reaktor | 52 |

DAFTAR GAMBAR

| Gambar | Halaman |
|---|---------|
| 2.1. Komposisi sampah kota Bandar Lampung | 8 |
| 2.2. Reaktor tipe <i>fixed bed</i> | 20 |
| 2.3. Reaktor tipe <i>fluidized bed</i> | 21 |
| 2.4. Reaktor tipe <i>rotary kiln</i> | 23 |
| 2.5. Reaktor tipe <i>tubular</i> | 24 |
| 2.6. Aplikasi <i>molten salt</i> | 26 |
| 3.1. Diagram alir penelitian | 29 |
| 4.1. Model 3D <i>molten salt</i> | 38 |
| 4.2. Meng- <i>input</i> sifat material <i>molten salt</i> | 38 |
| 4.3. Model 3D udara | 39 |
| 4.4. Mengatur tipe simulasi yang digunakan | 39 |
| 4.5. Cara mengatur <i>mesh</i> | 40 |
| 4.6. Cara mengisi temperatur awal komponen | 40 |
| 4.7. Mengatur beban termal | 41 |
| 5.1. Dimensi <i>screw</i> reaktor | 45 |
| 5.2. Dimensi tabung reaktor | 45 |
| 5.3. Neraca kesetimbangan energi | 46 |

| | |
|--|----|
| 5.4. Sistem pemanasan reaktor | 51 |
| 5.5. <i>Rotary valve</i> | 52 |
| 5.6. Hasil rancangan reaktor torefaksi kontinu tipe <i>tubular</i> | 53 |
| 5.7. Hasil simulasi dengan waktu 30 menit..... | 54 |
| 5.8. Hasil simulasi dengan waktu 60 menit..... | 54 |
| 5.9. Hasil simulasi dengan waktu 90 menit..... | 55 |
| 5.10. Hasil simulasi dengan waktu 120 menit | 55 |
| 5.11. Gambar hasil simulasi potongan depan | 56 |

DAFTAR SIMBOL

| | |
|-----------|-------------------------|
| A | Luas area radiasi |
| A_t | Luas diameter reaktor |
| c | Faktor koreksi |
| C_{pa} | Panas spesifik air |
| C_{ps} | Panas spesifik sampah |
| D_s | Diameter <i>screw</i> |
| D_t | Diameter tabung |
| hfg | Nilai enthalphy |
| k | Konduktivitas termal |
| L | Panjang reaktor |
| n | Kecepatan putaran |
| Q_{kon} | Energi panas konduksi |
| Q_{la} | Energi penguapan air |
| Q_r | kapasitas reaktor |
| Q_{rad} | Energi panas radiasi |
| Q_s | Energi sampah |
| Q_{sa} | Energi pemanasan air |
| r_0 | Jari-jari luar reaktor |
| r_1 | Jari-jari dalam reaktor |

| | |
|-----|----------------------------------|
| S | Jarak <i>pitch</i> |
| t | Waktu tinggal |
| Tr | Temperatur ruangan |
| Tdd | Temperatur dinding dalam |
| Tdl | Temperatur dinding luar |
| Vs | Volume sampah (m ³) |
| Vt | Volume tabung |
| | <i>Loading efficiency</i> |
| | Massa jenis (kg/m ³) |
| | Laju sembur |
| | Nilai emisivitas |
| | Konstanta Boltzman |

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Cadangan energi Indonesia sudah menipis, menurut BP MIGAS cadangan minyak bumi Indonesia diperkirakan sekitar 4,7 miliar barrel. Pemerintah Indonesia memperkirakan cadangan minyak bumi Indonesia akan habis dalam 15 tahun, gas alam dalam 60 tahun, dan batubara habis dalam 150 tahun (Purba, 2007). Permasalahan ini dapat mempengaruhi ketahanan energi di Indonesia, untuk itu diperlukan energi alternatif sebagai pengganti energi tersebut.

Sampah merupakan salah satu sumber energi alternatif yang tersedia dalam jumlah yang banyak secara kontinu. Karena sampah merupakan material energi yang mengandung energi 10,46 MJ/kg dengan jumlah sampah kota Bandar Lampung mencapai 850 ton/hari (WALHI, 2017), total energi yang dihasilkan sekitar 8.891.000 MJ/hari.

Beberapa jenis pengolahan sampah kota menjadi energi antara lain yaitu; pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis. Sistem pengolahan sampah dengan pembakaran (*combustion*) mempunyai keunggulan mampu mengelola

sampah secara besar dengan waktu yang relatif singkat. Panas dari sistem ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Kekurangan dari sistem ini adalah dampak emisi gas buang dan sisa pembakaran yang dianggap bahan buangan berbahaya (Naryono, 2013).

Berikutnya adalah pengolahan sampah dengan gasifikasi, pada metode ini produk yang dihasilkan berupa gas yang dapat dimanfaatkan sebagai pemanas, bahan bakar, penggerak turbin dan lain-lain. Proses gasifikasi membutuhkan temperatur diatas 400°C. Sehingga membutuhkan material yang tahan temperatur dan tekanan tinggi.

Terakhir pengolahan sampah dengan pirolisis (*pyrolysis*), pirolisis adalah degradasi termal dimana sampah diubah menjadi padatan (*solid*), cairan (*liquid*), dan gas pada temperatur tinggi tanpa adanya oksigen. Biasanya temperatur berkisar antara 400°C–600°C. Proses ini bertujuan untuk memecah rantai hidrokarbon panjang menjadi rantai hidrokarbon pendek (Indra, 2016). Salah satu bagian dari pirolisis adalah *mild pyrolysis*. *Mild pirolisis* atau torefaksi adalah pengolahan sampah dengan proses termal yang produk utamanya berupa bahan bakar padatan. Temperatur yang digunakan pada proses torefaksi rendah yaitu antara 250°C–300°C, sehingga teknologi yang digunakan sederhana dan biaya yang digunakan rendah. Produk yang dihasilkan dari proses torefaksi setara dengan batubara subbituminous.

Penelitian tentang torefaksi sampah sudah banyak dilakukan salah satunya dilakukan oleh Amrul (2014) dengan menggunakan reaktor *batch*. Nilai kalor (HHV) terbaik yang diperoleh adalah sekitar 5300–5800 kcal/kg, setara dengan batubara subbituminous B dengan temperatur yang digunakan sebesar 285°C. Kelemahan dari reaktor *batch* adalah kapasitas yang rendah sekitar 600g/*bed* dalam satu kali proses torefaksi dibandingkan dengan reaktor kontinu yang mempunyai kapasitas 50 kg/jam.

Reaktor tipe *tubular* adalah reaktor berjalan secara kontinu, reaktor bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas yang lebih besar, sintetic gas yang mudah bereformasi, serta operasional dan biaya konstruksi yang rendah. Ciri khas dari reaktor ini adalah *screw conveyor reactor* dengan kecepatan *screw* dapat bervariasi dari 0,5–25 rpm, dengan demikian *residence time* reaktor dapat diubah. Reaktor ini cocok untuk skala kecil dan menengah. Dari dasar inilah penulis tertarik untuk merancang reaktor torefaksi kontinu. Hal ini bertujuan untuk pengolahan biomasa secara massal sehingga dapat menjadi energi alternatif guna mencegah krisis energi.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut;

1. Merancang reaktor torefaksi kontinu tipe *tubular* sebagai pengolahan sampah menjadi bahan bakar padat.

2. Menganalisa perpindahan panas yang terjadi pada reaktor dengan menggunakan simulasi perangkat lunak Solidworks.

1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian perancangan reaktor torefaksi tipe *tubular* ini, dilakukan pembatasan masalah dengan ruang lingkup sebagai berikut :

1. Reaktor dirancang sebagai pengolah sampah yang berasal dari biomassa.
2. Temperatur reaktor sekitar 275°C, kapasitas reaktor 5 kg/jam dengan kecepatan putaran reaktor diasumsikan 0,5 rpm dan waktu tinggal antara 30–40 menit.
3. Material yang digunakan dalam perancangan reaktor adalah *Carbon Steel* AISI 1045
4. Simulasi termal menggunakan program perangkat lunak Solidworks.

1.4. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan, menguraikan latar belakang masalah secara jelas, tujuan; yang memaparkan diadakannya penelitian ini, batasan masalah; yang diberikan pada penelitian agar hasil penelitian lebih terarah, sistematika penulisan; format yang dipakai pada penulisan laporan.

Bab II Tinjauan Pustaka, berisi landasan teori yang menunjang pada penelitian dan merupakan teori-teori dasar yang meliputi: penjelasan tentang

biomassa, torefaksi, reaktor torefaksi, perancangan reaktor tubular, serta parameter reaktor torefaksi.

Bab III Metodologi, berisi tempat dan waktu penelitian akan dilakukan, dan alur tahapan pelaksanaan penelitian.

Bab IV Perancangan reaktor, berisi tentang perancangan dimensi reaktor *tubular*, desain reaktor, cara mendapatkan nilai perpindahan panas pada reaktor serta simulasi nya menggunakan solidworks.

Bab V Hasil dan Pembahasan, berisi tentang hasil rancangan reaktor tipe *tubular* dan analisis energi yang dibutuhkan oleh reaktor serta hasil simulasi reaktor.

Bab VI Penutup, berisi kesimpulan dan saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sampah Kota

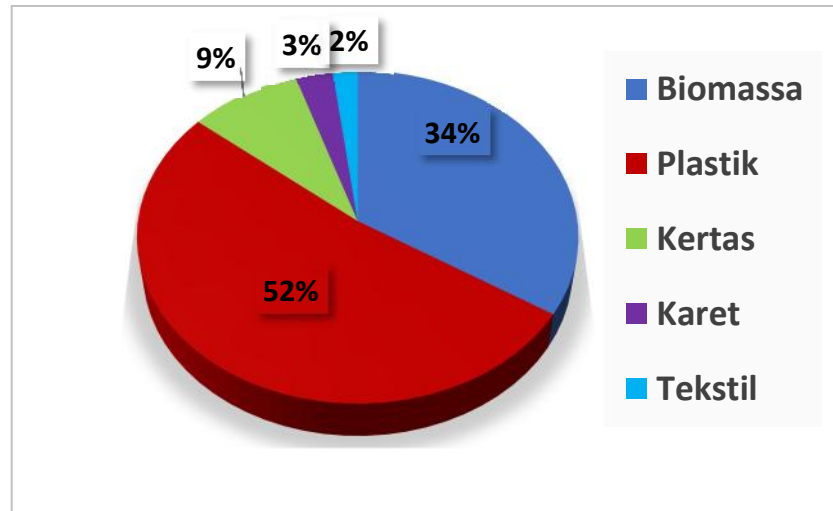
Sampah kota memiliki komposisi yang bermacam-macam didasarkan oleh cuaca, musim, musim, tingkat sosial ekonomi, pendapatan perkapita, kemasan produk dan frekuensi pengumpulan (Amrul, 2014). Hal ini menyebabkan di setiap daerah komposisi sampah berbeda-beda, seperti terlihat pada Tabel 2.1. Pengelompokan sampah kota berdasarkan sumbernya, sumber-sumber sampah kota adalah:

- a. Pemukiman: berupa perumahan atau apartemen. Jenis sampah yang ditimbulkan antara lain sisa makanan, kertas, kardus, plastik, tekstil, kulit, sampah kebun, kayu, kaca, logam, limbah berbahaya, dsb.
- b. Daerah komersial: seperti pertokoan, rumah makan, pasar, perkantoran, hotel, dan lain-lain. Jenis sampah yang ditimbulkan berupa kardus, kertas, plastik, sisa makanan, kayu, kaca, logam, limbah berbahaya, dsb.
- c. Institusi: meliputi sekolah, rumah sakit, penjara, pusat pemerintahan, dan lain-lain. Sampah yang ditimbulkan sama dengan sampah pada daerah komersil.

- d. Konstruksi dan pembongkaran bangunan: seperti pembuatan jalan, jembatan, dan lain-lain. Sampah yang ditimbulkan antara lain kayu, baja, beton, debu, dan lain-lain.
- e. Fasilitas umum: meliputi taman, pantai tempat rekreasi, dan lain-lain. Sampah yang ditimbulkan sama dengan sampah pada daerah konstruksi.
- f. Pengolahan limbah domestik yang meliputi instalasi pengolahan air minum, instalasi pengolahan air buangan, dan insinerator. Jenis sampah yang ditimbulkan antara lain lumpur hasil pengolahan, debu, dsb.
- g. Kawasan industri: jenis sampah yang ditimbulkan sama dengan kawasan pengolahan limbah domestik.
- h. Pertanian: jenis sampah yang dihasilkan antara lain sisa makanan busuk dan sisa pertanian.

Tabel 2.1. Komposisi sampah kota di beberapa kota besar di Indonesia (Amrul, 2014)

| No | Jenis Komponen | Komposisi (%) | | | |
|----|----------------|---------------|----------|---------|---------|
| | | Semarang | Surabaya | Jakarta | Bandung |
| 1 | Organik | 61,95 | 71,85 | 68,12 | 63,52 |
| 2 | Plastik | 13,39 | 12,45 | 11,08 | 4,90 |
| 3 | Kertas | 12,36 | 7,60 | 10,11 | 10,42 |
| 4 | Tekstil | 1,55 | 0,90 | 2,45 | 1,70 |
| 5 | Karet | 0,50 | 0,90 | 0,55 | 4,90 |
| 6 | Logam | 1,80 | 0,54 | 1,90 | 0,95 |
| 7 | Kaca | 1,72 | 1,94 | 1,63 | 1,45 |
| 8 | Lain-lain | 6,83 | 3,82 | 4,12 | 12,16 |



Gambar 2.1. Komposisi sampah kota Bandar Lampung (Indra, 2016)

Sampah dikelompokkan menjadi 10 komponen yakni organik, kaca, kertas, plastik daur ulang, sampah elektronik, logam, plastik bukan daur ulang, tekstil, karet, dan lain-lain (Amrul, 2014). Komposisi sampah terbesar berasal dari biomassa (daun, ranting, dan sisa makanan), yang hampir mencapai 60% (fraksi massa).

Karakteristik sampah kota ditandai oleh nilai kalor serta hasil uji proksimat dan ultimat seperti yang terlihat pada Tabel 2.2. Nilai kalor komponen sampah diuji pada kondisi *air dried basis* (adb) yaitu pada kondisi kering setelah dibiarkan kering beberapa hari di udara. Nilai kalor sampah kota bervariasi antara 2500–1000 kcal/kg. Nilai kalor terbesar dimiliki oleh komponen plastik. Hal ini menunjukkan nilai kalor sampah pada kondisi ekstrim masih cukup tinggi. Namun demikian, nilai kalor tersebut adalah nilai kalor tertinggi (HHV) dan dalam kondisi adb.

Hasil uji proksimat terhadap sampah kota menunjukkan bahwa kandungan komponen sampah didominasi oleh *volatile matter* (VM). Kandungan *volatile matter* atau zat terbang yang tinggi dapat meningkatkan nilai kalor komponen sampah. Kandungan *fixed carbon* (FC) atau karbon padat kurang dari 20%. Kandungan karbon padat dapat meningkatkan nilai kalor bahan bakar. Kandungan FC yang tinggi lebih disukai dibandingkan kandungan VM pada bahan bakar padat. Kandungan air *inherent* yang dimiliki sampah pada kondisi *adb* cukup rendah yaitu sekitar 20%. Kandungan air yang tinggi akan mengurangi nilai kalor. Kadar abu dari sampah rata-rata kurang dari 15%. Semakin kecil kadar abu dari komponen sampah maka akan berkurangnya jumlah abu yang diperoleh dari hasil pembakaran.

Hasil uji ultimat terhadap komponen sampah kota menunjukkan kandungan unsur C sebanding dengan nilai kalor. Ini menunjukkan bahwa unsur C sangat berpengaruh terhadap nilai kalor. Unsur C terdapat dalam *fixed carbon* (FC) dan *volatile matter* (VM). unsur H dan O bersala dari senyawa hidrokarbon dan air yang terkandung dalam komponen. Kandungan nitrogen terbesar terdapat pada sampah organik.

Tabel 2.2. Karakteristik komponen sampah kota yang dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar (Amrul, 2014)

| Komponen Sampah | Nilai kalor (kcal/kg) <i>Adb</i> | Analisis Proksimat | | | | Analisis Ultimat | | | | | |
|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | MC | VM | FC | Abu | C | H | N | S | O | Cl |
| | | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> | % <i>adb</i> |
| Organik | 4262 | 9,29 | 67,59 | 16,96 | 6,16 | 43,32 | 6,25 | 1,64 | 0,25 | 42,37 | 1,09 |
| Plastik | 8288 | 0,88 | 93,26 | 3,68 | 2,19 | 75,95 | 7,01 | 0,09 | 0,19 | 14,58 | 0,06 |
| Tekstil | 4484 | 1,23 | 89,07 | 9,28 | 0,42 | 52,54 | 5,69 | 0,44 | 0,21 | 40,71 | 0,03 |
| Karet | 6079 | 0,78 | 72,56 | 7,73 | 18,94 | 45,72 | 6,67 | 1,45 | 0,39 | 30,80 | 1,45 |
| Lain-lain | 5395 | 5,72 | 79,08 | 14,89 | 0,28 | 42,25 | 5,79 | 0,84 | 0,25 | 43,69 | 0,10 |

2.2. Torefaksi

Torefaksi, atau pirolisis temperatur rendah, adalah *pretreatment* sebuah biomassa mentah untuk mendapatkan bahan bakar yang lebih stabil, memiliki kepadatan energi yang tinggi dan kerapuhan yang lebih tinggi dan *grindability*. Sifat ini dapat mengatasi beberapa kekurangan yang membatasi luas pemanfaatan biomassa mentah sebagai sumber energi terbarukan, seperti kadar air yang tinggi, kerapatan energi yang rendah (yaitu, *low heating value*), resistensi terhadap peluluhan (menjadi sulit dan berserat), tingginya harga transportasi dan umur simpan pendek, selain itu fakta bahwa biomassa mentah akan menyerap kelembaban lagi jika disimpan untuk jangka waktu, karena sifat hidrofilik, dan mungkin membusuk. Sebaliknya, torefaksi biomassa adalah hidrofobik. Keseimbangan penyerapan kelembaban biomassa torefaksi tergantung pada tingkat torefaksi, tapi biasanya sangat rendah (dari 1% sampai 6%). Akibatnya, torefaksi biomassa memiliki *shelf-life* lebih panjang daripada biomassa mentah. Peningkatan kerapuhan atau *grindability* torefaksi biomassa, dibandingkan dengan biomassa mentah, membuatnya cocok untuk penggilingan bersama, pemakanan bersama dan, pembakaran bersama dengan batubara dalam bubuk bahan bakar boiler (Batidzirai dkk., 2013).

Torefaksi adalah proses perlakuan panas pada temperatur 200-300°C dalam tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen, dengan produk akhir bahan bakar padat bernilai kalor setara batubara tingkat sub-bituminous B menurut kualifikasi standard ASTM D 388 (Amrul dkk., 2011). Torefaksi adalah

proses pengolahan secara termokimia untuk bahan baku yang mengandung karbon seperti biomassa. Torefaksi berlangsung pada tekanan atmosfer dengan rentang temperatur 200-350°C. Dengan temperatur akhir torefaksi meningkat akan berakibat gas volatil yang dihasilkan akan bertambah dari hasil dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa. Hemiselulosa akan terdekomposisi terlebih dahulu dan dilanjutkan dengan dekomposisi lignin dan selulosa. Dengan proses torefaksi maka kandungan karbon tetap akan meningkat dan kandungan zat-zat terbang akan menurun sehingga kualitas biomassa akan meningkat. Kemudian, keuntungan lain dari proses torefaksi adalah kandungan air dari produk makin menurun serta sifat makin sulit menyerap air dari udara. Secara umum, kualitas produk torefaksi biomassa adalah densitas energi dan *hydrophobic* meningkat.

Proses torefaksi memiliki manfaat tambahan mengurangi atau menghilangkan bahan mudah menguap yang tidak diinginkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur. Dengan kandungan oksigen lebih rendah maka rasio oksigen terhadap karbon akan menurun sehingga biomassa memiliki karakteristik mendekati batubara. Salah satu parameter penting dalam pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar adalah kemudahan untuk dikesilkan ukurannya (*grindability*). Produk torefaksi akan lebih mudah dikesilkan ukurannya sehingga konsumsi energi untuk mengecilkan ukuran semakin menurun. Pembakaran yang baik untuk bahan bakar adalah kemudahan dalam pembakaran (*reactivity*). Biomassa torefaksi akan lebih mudah terbakar akibat kandungan air yang lebih rendah. Penambahan

produk biomassa torefaksi akan mempercepat proses pembakaran pada pembakaran batubara di tungku pembakaran. Selain pembakaran, produk biomassa torefaksi dapat dimanfaatkan dalam gasifikasi. Pada proses gasifikasi, penggunaan produk biomassa torefaksi akan mengurangi potensi terjadinya penggumpalan dan tar.

Torefaksi dapat dilakukan pada berbagai macam biomassa seperti jerami, kayu, bambu. Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun. (Irawan dkk., 2015).

2.2.1. Mekanisme Torefaksi

Tahapan awal torefaksi adalah pemanasan yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air pada permukaan biomassa (*surface moisture*). Air akan lepas dari ikatan dengan reaksi kimia (*inherent moisture*). Air tersebut dihasilkan dari proses termokondensasi pada temperature 160° C. Reaksi eksotermik akan terjadi pada temperatur 180°-270°C, dan hemiselulosa mulai terdekomposisi. Proses dekomposisi menghancurkan ikatan rantai pada polimer hemiselulosa, gugus hidroksil (-OH) dan beberapa gugus lainnya. Proses dekomposisi ini akan menyebabkan perubahan warna pada biomasa dan lepasnya air, CO₂, asam asetat, fenol, dan *volatile matter* lainnya. Pada temperature diatas 280° C produksi CO₂, asam

asetat, fenol, dan hidrokarbon akan meningkat, keseluruhan proses akan menjadi eksotermik. Pada akhir proses torefaksi akan terbentuk padatan yang memiliki struktur polimer yang lebih pendek dan lebih sederhana dibandingkan sebelum ditorefaksi (Amrul, 2014).

2.3. Karakteristik Bahan Bakar Padat

Penggunaan bahan bakar padat sangat luas mulai dari tungku skala rumah tangga sumber bahan bakar utama boiler pada industri skala besar. Batubara, gambut dan kayu merupakan contoh bahan bakar padat. Batubara merupakan bahan bakar padat yang paling banyak digunakan dalam dunia industri karena memiliki nilai kalor yang tinggi dibandingkan jenis bahan bakar padat yang lainnya. Oleh karena itu karakteristik batubara menjadi acuan dalam bahan bakar padat yang diperoleh dari hasil eksperimen sampah.

Untuk mengetahui komposisi penyusun batubara digunakan dua macam analisis yaitu analisis proksimat dan analisis ultimat. Analisis proksimat untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat seperti kandungan karbon tetap, *volatile matter*, kandungan air dan abu. Analisis ultimat dilakukan untuk mengetahui komponen unsur-unsur kimia yang menyusun suatu bahan bakar padat seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen, dan unsur lainnya. Analisis proksimat dilakukan menurut standar ASTM D3172 sedangkan analisis ultimat dilakukan menurut standar ASTM D3176.

Batubara memiliki sifat tidak homogen terjadi akibat banyaknya unsur penyusun batubara itu sendiri. Berdasarkan analisis proksimat, batubara disusun oleh beberapa komponen:

a. Kandungan air (*moisture content*) MC

Ada dua jenis kandungan air dalam bahan bakar padat, yaitu *surface moisture* dan *inherent moisture*. *Surface moisture* adalah air yang terdapat pada bagian permukaan bahan bakar padat sedangkan *inherent moisture* adalah air yang terkandung dalam pori-pori bahan bakar padat maupun terikat secara kimiawi dalam bahan bakar padat. *Surface moisture* lebih mudah dihilangkan dibandingkan dengan *inherent moisture*. Gabungan dari kedua jenis kandungan air disebut total *moisture*.

b. Zat terbang (*volatile matter*) VM

Zat terbang adalah komponen dalam batubara selain air yang dilepaskan ketika batubara dipanaskan tanpa oksigen (pirolisis). Zat terbang ini merupakan hidrokarbon, baik hidrokarbon rantai panjang, pendek maupun aromatik. Zat terbang menghasilkan kalor dalam proses pembakaran namun tidak sebesar karbon tetap. Bahan bakar dengan komposisi karbon tetap dan *volatile matter* saja biasa disebut sebagai batubara murni (*pure coal*).

c. Karbon padat (*fixed carbon*) FC

Karbon padat adalah karbon yang ditemukan setelah zat terbang dilepaskan. Komponen ini memberikan kalor terbesar dalam suatu bahan bakar padat. Karbon ini berbeda dengan karbon lainnya, karena unsur karbon akan hilang dalam bentuk ikatan hidrokarbon bersama zat terbang ketika menguap.

d. Abu (*ash*)

Abu terdiri dari mineral-mineral yang terkandung dalam bahan bakar padat, baik dalam bentuk unsur maupun oksidanya. Mineral tersebut berupa silika, natrium, magnesium, dan oksidanya.

Ada beberapa metode penyajian karakteristik batubara suatu batubara, hal ini karena batubara memiliki kondisi yang berbeda-beda sehingga membutuhkan suatu acuan kondisi yang sama ketika dibandingkan. Metode tersebut adalah:

a. *As received* (ar)

Metode ini biasanya juga disebut nilai *as-fired* karena mengacu pada pemanfaatannya secara langsung di pembakaran. Kandungan batubara yang ditunjukkan adalah seluruh kandungan batubara.

b. *Air dried basis* (adb)

Metode ini menunjukkan kandungan batubara tanpa adanya kandungan air jenis *surface moisture* di dalamnya.

c. *Dry basis* (db)

Metode ini menunjukkan kandungan batubara tanpa kandungan air baik *surface moisture* maupun *inherent moisture*.

d. *Dry, ash free* (daf)

Metode ini menunjukkan karakteristik batubara tanpa air sama sekali dan abu.

e. *Dry, mineral-matter free* (dmmf)

Metode ini mengasumsikan kandungan batubara hanyalah komponen organik saja tanpa adanya air, abu, dan mineral.

f. *Moist, ash-free* (maf)

Metode ini menunjukkan karakteristik batubara tanpa abu, tapi masih mengandung air sedikit.

g. *Moist, mineral-matter free*

Metode ini menunjukkan karakteristik batubara tanpa abu dan mineral, tapi masih mengandung air.

Selain itu terdapat parameter lain yaitu nilai kalor pembakaran (*calorific value*). Parameter ini menunjukkan besarnya kalor per satuan massa yang dihasilkan oleh bahan bakar padat setelah dibakar. Ada dua macam nilai kalor pembakaran, yaitu *Low Heating Value* (LHV) dan *High Heating Value* (HHV). LHV adalah nilai kalor yang didapatkan pada kondisi air dari

produk pembakaran fasa gas setelah pembakaran, biasanya terdapat pada boiler. Pada HHV kondisi air berada pada kondisi cair sehingga terdapat kalor laten penguapan yang terlepas mengakibatkan nilai HHV lebih besar dari pada LHV.

2.4. Biomassa

Biomassa adalah material biologis yang berasal dari makhluk hidup, baik dari tumbuhan maupun hewan. Namun selama ini yang sering digunakan dalam penelitian torrefaksi adalah biomassa dari tumbuhan. Struktur utama penyusun biomassa adalah material lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Lignoselulosa adalah material berserat yang membentuk dinding sel tumbuh-tumbuhan. Selain lignoselulosa, komponen seperti protein, asam lemak/ester, dan material anorganik lainnya (utamanya terdiri atas N, P, dan K) juga terdapat dalam tumbuhan namun dalam jumlah yang sedikit.

Selulosa terdiri dari polimer glukosa berantai lurus (linier) yang saling berhubungan dengan ikatan β -glikosida. Struktur linier ini memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen baik secara intermolekul maupun intramolekul. Ikatan tersebut kemudian membentuk struktur kristalin yang kokoh dan tidak larut di hampir semua pelarut. Jumlah glukosa yang menyusun selulosa mencapai 10000 unit. Selulosa tidak ditemukan di alam dalam keadaan murni karena selalu berikatan dengan lignin dan

hemiselulosa. Selulosa dapat dihidrolisis sempurna dengan menggunakan 3 enzim yang sinergis, yaitu; endoglucanase, selohidrolase, dan α -glukosidase.

Hemiselulosa merupakan suatu polisakarida heterogen dalam tanaman yang mengisi ruang antara serat selulosa. Hemiselulosa bersifat non-kristalin dan tersusun dari gabungan gula sederhana dengan 5 atau 6 atom karbon, seperti D-xilosa, D-manosa, D-galaktosa, L-arabinosa, asam D-glukoronat dan asam metilglukoronat. Selain itu hemiselulosa memiliki struktur amorf dan terletak di permukaan luar sehingga lebih mudah dihidrolisis dibandingkan dengan selulosa yang memiliki struktur kristalin dan terletak di dalam serat. Selain itu hemiselulosa adalah polimer yang terdiri dari rantai yang lebih pendek. Hemiselulosa hanya memiliki 500–3000 unit gula dibandingkan dengan yang dimiliki selulosa yang berjumlah 7000-15000 glukosa di setiap polimernya. Biasanya hemiselulosa berjumlah 25-35% pada kayu kering. Dekomposisi termal pada hemiselulosa terjadi pada 130°-260°C dimana massa yang paling banyak hilang pada temperature 180°. Hasil dari degradasi hemiselulosa biasanya berupa volatile ringan, tar, dan arang.

Lignin adalah polimer berpori yang memiliki banyak cabang. Lignin mengisi tempat diantara selulosa, hemiselulosa dan komponen pectin dalam dinding sel. Lignin berikatan dengan hemiselulosa secara kovalen dan juga berikatan silang dengan polakirasida lain yang menghasilkan kekuatan pada dinding sel. Lignin terdekomposisi secara termal pada temperature 280°-

500°C dan menghasilkan fenol dari penguraian eter dan putusya ikatan antar karbon (Amrul, 2014).

2.5. Reaktor Torefaksi

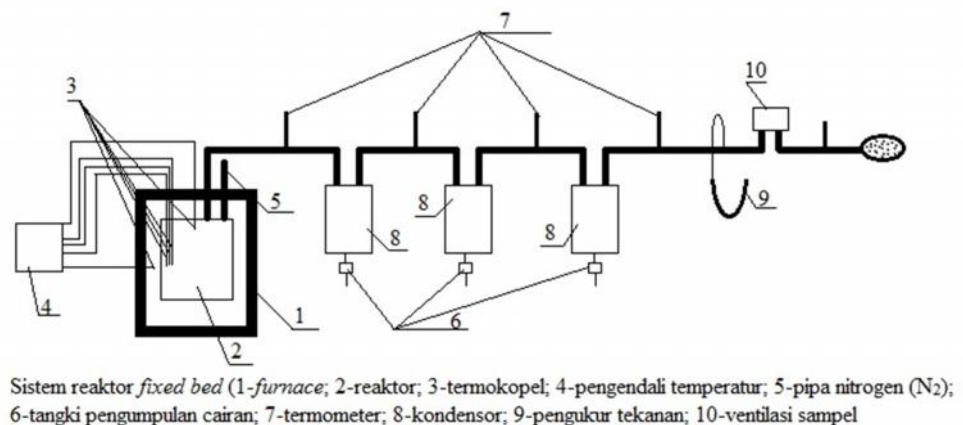
Reaktor adalah satu alat proses tempat terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia maupun nuklir. Dengan terjadinya reaksi inilah suatu bahan berubah ke bentuk bahan lainnya, perubahannya ada yang terjadi secara spontan (dengan sendirinya) atau bisa juga dengan bantuan energi seperti energi panas. Perubahan yang terjadi adalah perubahan kimia sehingga yang terjadi adalah bukan perubahan fase melainkan perubahan bahan, misalnya dari air menjadi uap.

2.5.1. Reaktor Tipe *Fixed Bed*

Reaktor ini merupakan reaktor paling sederhana yang digunakan pada proses torefaksi/pirolisis seperti terlihat pada Gambar 2.2. Reaktor ini mempunyai karakteristik *heating rate* yang rendah sehingga koefisien perpindahan panas yang terjadi rendah, oleh karena itu ketika massa sampel yang diuji lebih besar suhu tidak seragam dalam sampel, dan bahan baku didekomposisi pada temperatur berbeda secara bersamaan.

Reaktor *fixed bed* sering digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang mempengaruhi produk pirolisis. Karena kurang efisiensinya reaktor ini sehingga reaktor ini jarang digunakan

dalam skala besar. reaktor akan dipanaskan setelah material berada dalam fed, dalam satu kali proses reaktor ini hanya dapat menampung 600 g, dan waktu tinggalnya sekitar 55 – 180 menit tergantung temperatur proses. Ketika diteliti hasil dari produk pirolisis divariasikan dengan temperatur akhir. Penelitian menemukan bahwa hasil char menurun dengan meningkatnya temperatur, terutama dalam range temperatur 300°C–550°C, dan hasil cair dari pirolisis meningkat dengan dinaikannya temperatur untuk 550° C, kemudian mulai menurun. Hasil gas stabil meningkat dengan peningkatan temperatur di seluruh pengujian tingkat temperatur (Chen dkk., 2014).



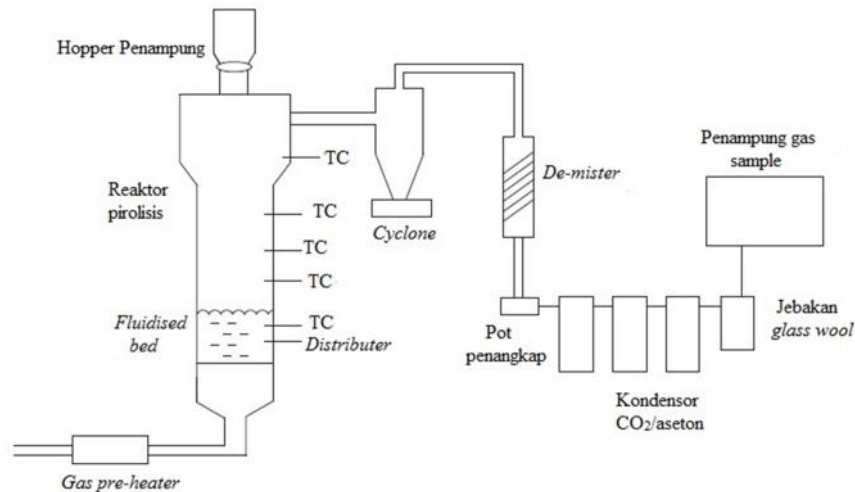
Gambar 2.2. Reaktor tipe *fixed bed* (Chen dkk., 2014).

2.5.2. Reaktor Tipe *Fluidized Bed*

Reaktor *fluidized bed* bercirikan *heating rate* yang tinggi serta pencampuran bahan baku yang baik, oleh Karena itu raktor ini lebih sering digunakan untuk menggambarkan pengaruh temperatur dan

residence time pada produk pirolisis dan torefaksi. Bentuk reaktor *fluidized bed* seperti terlihat pada Gambar 2.3. Biasanya reaktor *fluidized bed* digunakan untuk menyelidiki perilaku pirolisis cepat (*flash pyrolysis*) dan untuk mengeksplorasi *cracking tar* kedua. Meskipun reaktor *fluidized bed* telah banyak digunakan dalam penelitian laboratorium, namun dalam industri tipe ini jarang digunakan. Karena pemisahan material, serta pemanasan dan resirkulasi eksternal yang rumit.

Reaktor ini akan berjalan dengan sistem *batch by batch*, dan *continuous*. Dalam sekali masuk material hanya dapat masuk sekitar 0.8 – 5 g, dan *residencetime* proses sekitar 20 menit. Koefisien perpindahan panas pada sand *fluidized bed* reaktor untuk MSW pirolisis dilaporkan sekitar 112–559 J/m²K. Sekitar 70–80% primary tar bisa terpecah menjadi gas berat molecular rendah. Ketika mempelajari produksi gas dari msw pirolisis pada temperatur tinggi (700 – 850 C) dan ditemukan bahwa dekomposisi biomasa diikuti oleh reaksi tar cracking terjadi di dalam reaktor (Chen dkk., 2014).

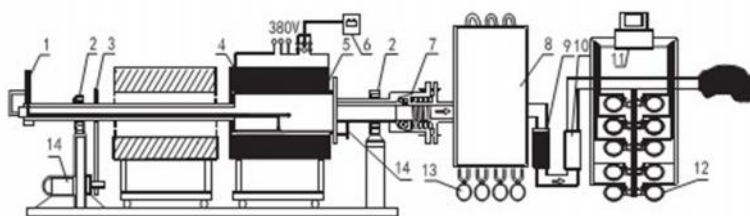


Gambar 2.3. Reaktor tipe *fluidized bed* (Chen dkk., 2014).

2.5.3. Reaktor Tipe *Rotary kiln*

Rotary kiln mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dari pada *fixed bed*. Putaran yang lambat dari *kiln* memungkinkan pencampuran yang baik dari material dalam reaktor. Reaktor ini banyak digunakan dalam pirolisis dan torefaksi dan yang banyak digunakan adalah tipe konvensional, yang berlangsung di bawah HR lambat dengan signifikan produk bagian dari *char*, cair dan gas. Bentuk reaktor *rotary kiln* seperti terlihat pada Gambar 2.4. Dalam beberapa penelitian *heating rate* yang terjadi tidak lebih tinggi dari 100°C/menit dan *residence time* hingga 1 jam, hal ini dikarenakan selama proses hanya dinding luar yang mengangkut panas dari luar untuk partikel.

Permukaan dinding yang kecil mendistribusikan ke unit bahan baku dan ukuran kasar dari partikel hasil dalam *heating rate* yang rendah. Namun, kebanyakan dilaporkan MSW teknologi pirolisis didasarkan pada *pyrolyzers rotary kiln*, karena *rotary kiln* reaktor memiliki banyak keuntungan yang unik lebih dari jenis reaktor lain. Selain itu *rotary kiln* juga mempunyai pencampuran yang baik dari material, pengontrolan waktu tinggal yang fleksibel, dan saluran yang lebih besar untuk aliran limbah memungkinkan dapat mengolah bahan heterogendan dengan demikian, luas pra-pengolahan limbah tidak diperlukan sehingga pemeliharannya juga sederhana. Ada dua jenis proses yang dapat dilakukan dalam proses ini yaitu proses *fast* dan proses *slow* yang bergantung pada temperatur dan waktu proses. Pada proses *fast* reaktor akan dipanaskan terlebih dahulu hingga melebihi dari temperatur yang ditentukan lalu material dimasukkan dalam reaktor dan proses ini berlangsung dengan cepat dengan *residence time* sekitar 7–15 menit. Dan untuk proses *slow*, material akan dipanaskan bersamaan dengan dinding reaktor (Chen dkk., 2014).

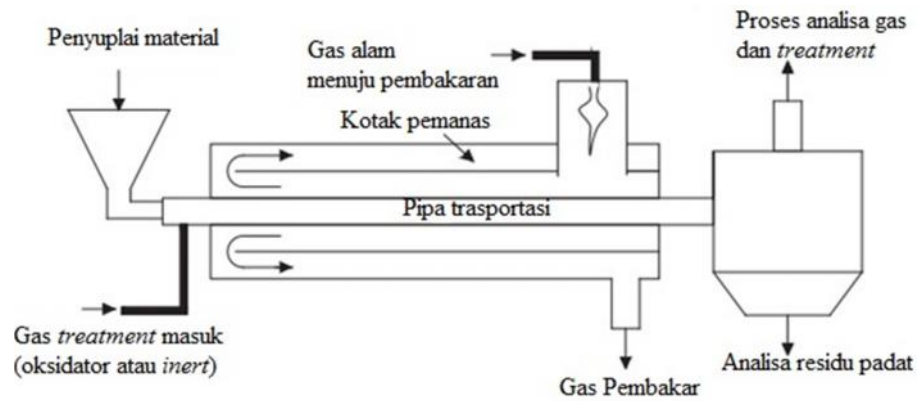


Sistem reaktor *rotary kiln* (1-termometer; 2-bearing; 3-gear transmisi; 4-furnace elektrik; 5-*rotary kiln*; 6-pengendali temperatur; 7-segel; 8-kondensor 2 tahap; 9-penyaring; 10-pengukur aliran; 11-komputer; 12-perangkat pengambil sampel gas; 13-pembuka debit dan pengumpan; 14-motor listrik)

Gambar 2.4. Reaktor tipe *rotary kiln* (Chen dkk., 2014).

2.5.4. Reaktor Tipe *Tubular*

Reaktor jenis *tubular* merupakan jenis reaktor berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut. Reaktor tubular umumnya dipanaskan dengan system panas eksternal, dan dalam beberapa penelitian bahan baku di dalam material bergerak dengan system *screw conveyor*, reaktor bujur sangkar yang material digerakan dengan system *vibro-fluidiser*, atau tabung dengan *inner mixer*. Keuntungan dari reaktor ini meliputi; reaktor berjalan secara kontinyu, reaktor bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas yang lebih besar, dan sintetic gas yang mudah bereformasi. Reaktor tipe ini mudah untuk dirancang jika koefisien perpindahan panas nya diketahui karena sederhana dan *safety*. Ciri khas dari reaktor tubular adalah *screw conveyor reaktor* dengan operasional dan biaya konstruksi yang rendah. Untuk desain ini, kecepatan sekrup dapat bervariasi dari 0,5–25 rpm, dengan demikian *residence time* reaktor dapat diubah. Sistem reaktor ini berguna untuk termal yang baik dan *catalytic cracking* dari limbah plastic. Untuk skala kecil dan menengah, reaktor tubular bisa kompetitif. Suhu operasi tergantung pada pilihan produk (Chen dkk., 2014). Bentuk reaktor tipe *tubular* seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Reaktor Tipe *Tubular* (Chen dkk., 2014).

2.6. Parameter Reaktor Torefaksi

Pada eksperimen torefaksi yang dilakukan oleh Amrul (2014) variasi yang diberikan adalah variasi temperature dan variasi waktu tinggal. Waktu tinggal adalah untuk laju penurunan massa mulai konstan yakni antara 10-40 menit, dan temperature digunakan sebagai penguraian komponen biomasa.

2.6.1. Waktu tinggal (*residence time*)

Waktu tinggal tiap reaktor berbeda tergantung jenis reactor nya. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wang (2005) dengan menggunakan reactor jenis *fixed bed residence time* berkisar antara 55–180 menit, lalu Garcia (1995) melakukan penelitian menggunakan reactor *fluidized bed*, dengan waktu tinggal sekitar 20 menit. Pada Penelitian yang dilakukan oleh Li dkk (1999) melakukan penelitian dengan menggunakan reactor tipe *rotary kiln* dengan waktu tinggal 7–15 menit. Dan pada penelitian yang dilakukan oleh Shang (2014) dengan menggunakan reaktor tipe

tubular, waktu tinggal berkisar antara 30–60 menit. Semua ini bergantung pada temperature yang digunakan (Chen dkk., 2014).

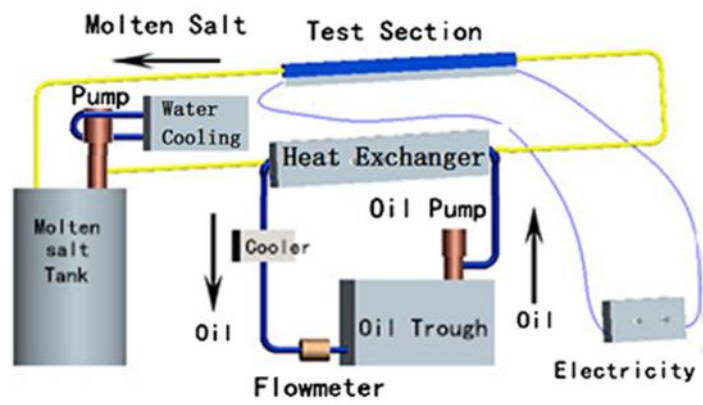
2.6.2. Temperatur

Dalam eksperimen torefaksi yang dilakukan terhadap masing-masing komponen sampah dan perumusan temperature optimal untuk torefaksi sampah campuran, maka diperoleh temperature optimal untuk sampah campuran adalah 285°C (Amrul, 2014).

2.7. *Molten Salt*

Molten salt atau garam cair sering digunakan dalam studi pemanfaatan energi matahari karena kelebihanannya seperti stabilitas termodinamika hingga suhu tinggi, stabilitas radiasi (tidak ada dekomposisi radiolisis), tekanan rendah pada suhu operasi dan berbagai kelarutan, dll. Garam cair dan campurannya banyak digunakan pada penelitian aplikasi energi matahari (Zhao, 2017).

Pada penelitian yang dilakukan oleh chen (2017), molten salt dapat diaplikasikan pada temperatur 200°C-300°C. Pada penelitian tersebut *molten salt* diaplikasikan pada sistem *heat exchanger* dimana *molten salt* dicairkan dan dialirkan pada *heat exchanger* yang digunakan untuk memanaskan oil, seperti terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Aplikasi molten salt (Chen dkk., 2017)

III. METODELOGI PENELITIAN

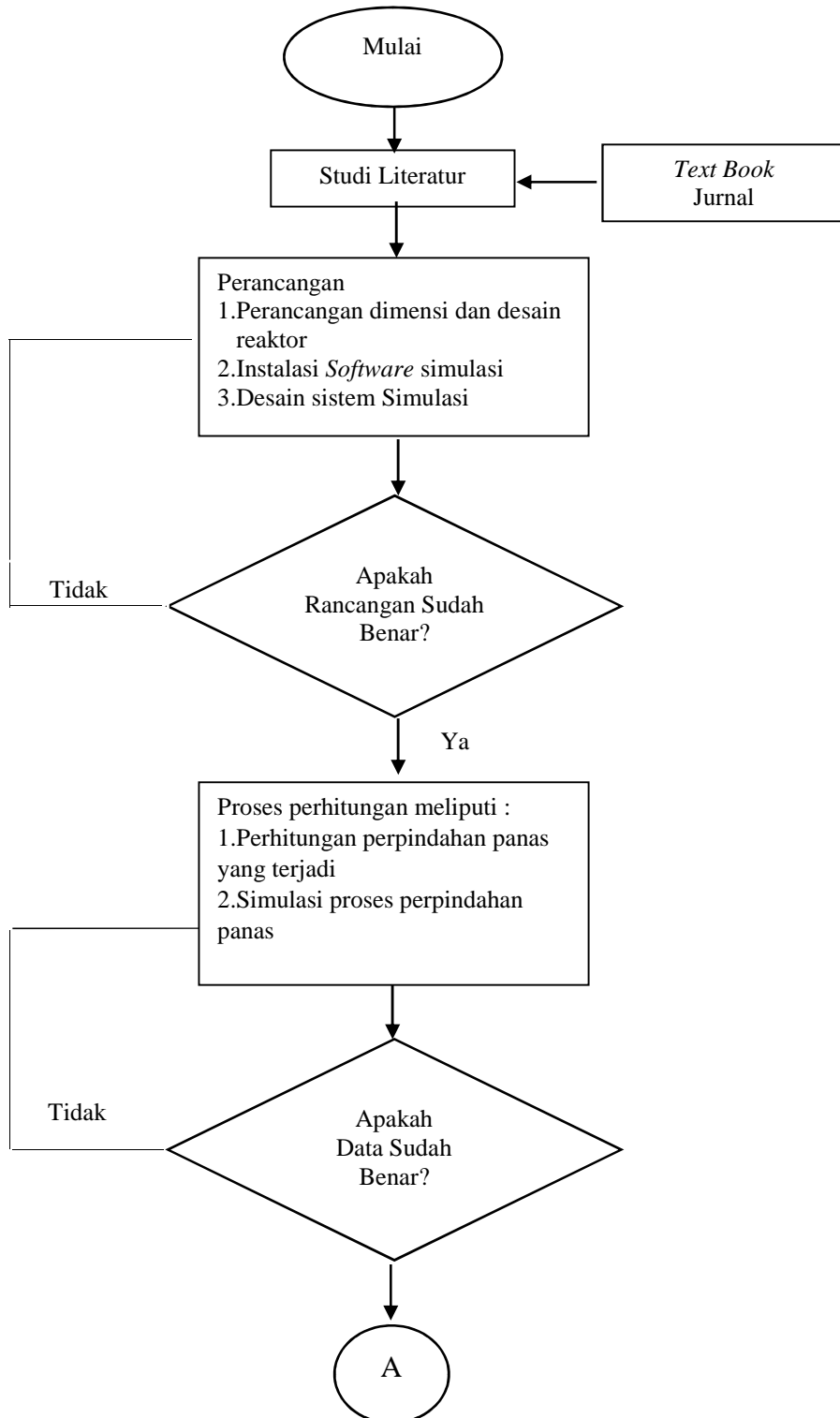
3.1. Tahapan Penelitian

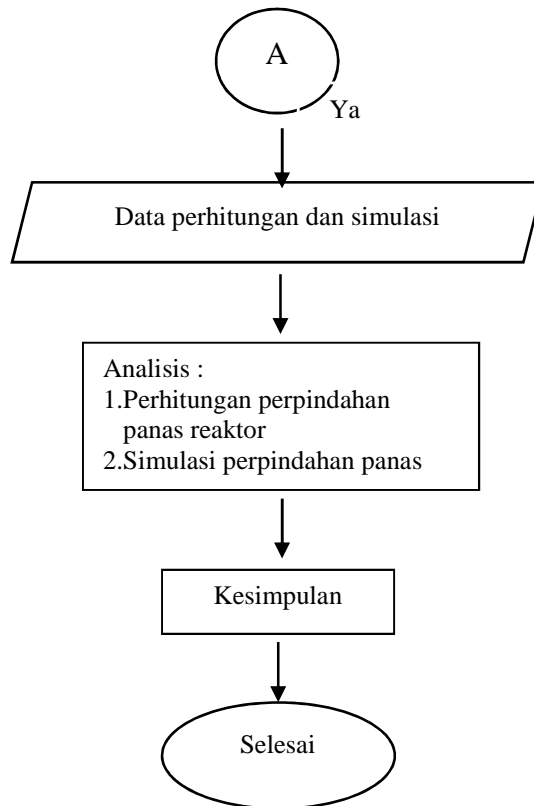
Tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Studi literatur: tahapan pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. Dimulai dengan mempelajari perancangan reaktor, analisis kebutuhan energi, dan sistem pemanas yang digunakan pada reaktor.
- Perancangan reaktor: selanjutnya merancang dimensi reaktor dengan menentukan diameter *screw*, diameter tabung, jarak pitch, dan sistem pemanas yang digunakan reaktor
- Analisa kebutuhan energi reaktor: setelah mendapatkan dimensi reaktor selanjutnya menghitung analisa kebutuhan energi dalam reaktor. Analisa energi ini sebagai acuan dalam melakukan simulasi perpindahan panas reaktor
- Melakukan simulasi: simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Solidworks, dengan menggunakan gambar hasil rancangan. Simulasi digunakan untuk mendapatkan temperatur input yang sesuai.
- Analisa hasil simulasi: setelah mendapatkan hasil simulasi, selanjutnya melakukan analisa hasil simulasi.

- Kesimpulan: Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian dan dituangkan dalam bentuk laporan.

3.2. Alur Tahapan Pelaksanaan





Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.3. Waktu dan Tempat Penelitian

Tempat dan waktu penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Tempat Penelitian

Proses perancangan serta simulasi ini akan dilakukan di Laboratorium Termodinamika di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung

3.3.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan pada bulan Januari hingga bulan April 2017. Dengan jadwal kegiatan tersusun pada tabel berikut:

Tabel 3.1. Jadwal kegiatan Penelitian

| Kegiatan | Januari | | | | Febuari | | | | Maret | | | | April | | | | Mei | | | | Juni | | |
|-------------------------|---------|---|---|---|---------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-----|---|---|---|------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| Studi Literatur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Seminar Proposal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Perancangan Alat | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Simulasi Program | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pembuatan Laporan Akhir | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Seminar Hasil | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

3.4. Alat

Adapun alat pendukung yang digunakan pada penelitian ini adalah program solidworks yang digunakan untuk membuat simulasi perpindahan panas pada reaktor

IV. PERANCANGAN REAKTOR

Ciri khas dari reaktor *tubular* adalah *screw conveyor reaktor* dengan operasional dan biaya konstruksi yang rendah. Untuk itu dalam merancang reaktor tubular *screw conveyor* sama dengan merancang *screw conveyor*. *Screw conveyor* terdiri dari poros yang terpasang *screw* yang berputar dalam trough dan unit penggerak. Pada saat *screw* berputar material akan dimasukan melalui *feeding hopper* ke *screw* yang bergerak maju akibat daya dorong (*thrust*) *screw*. Material yang dipindahkan dimasukkan ke dalam *trough* melalui *hopper*. Bahan akan keluar pada ujung *trough* atau bukaan bawah *trough* (Zainuri, 2009).

4.1. Perancangan Dimensi Reaktor

Reaktor dirancang untuk kapasitas sampah kota sebanyak 5kg/jam, dan massa jenis sampah adalah 230 kg/m^3 . Perancangan dilakukan untuk menentukan dimensi reaktor. Langkah pertama adalah mengasumsikan beberapa parameter awal perancangan. Parameter awal perancangan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Parameter awal perancangan

| No | Data yang ditentukan | Nilai |
|----|--------------------------------------|----------|
| 1 | Kecepatan putaran <i>screw</i> | 0,5 rpm |
| 2 | <i>Loading efficiency</i> | 0.25 |
| 3 | Sudut inklinasi | 0° |
| 4 | Kapasitas <i>pitch</i> | 0,5 D |
| 5 | Waktu tinggal | 30 menit |
| 6 | Jarak antara tabung dan <i>screw</i> | 8 mm |
| 7 | Diameter poros | 5 cm |
| 8 | Temperatur dalam reaktor | 275°C |
| 9 | Kandungan air dalam sampah basah | 30% |

Asumsi ini ditujukan agar menjadi acuan pada perhitungan perancangan dimensi reaktor. Setelah menentukan parameter dalam perancangan, langkah pertama menghitung volume total sampah dalam reaktor. dengan kapasitas reaktor 5kg/jam dan waktu tinggal 30 menit maka massa sampah dalam reaktor sebesar 2,5kg. berikut ini persamaan untuk menghitung volume total sampah dalam reaktor

$$V_s = \frac{m}{\rho}$$

$$V_s = \frac{2,5}{230}$$

$$V_s = 0,010 \text{ m}^3$$

selanjutnya adalah menghitung diameter *screw* menggunakan persamaan berikut ini.

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot Q_r}{60 \cdot \pi \cdot 0.5 \cdot n \cdot \varphi \cdot \rho \cdot c}}$$

Dimana;

Q_r : Kapasitas *screw conveyor* (kg/jam)

n : Kecepatan putaran *screw conveyor* (rpm)

: Massa jenis material bahan baku (kg/m^3)

: *Loading Efficiency*

0.12 sampai 0.15 untuk material abrasif

0.25 sampai 0.3 untuk material sedikit abrasif

0.4 sampai 0.45 untuk material tidak abrasif dengan

Aliran Bebas

c : Faktor koreksi

sudut *screw* horizontal 0° 5° 10° 15° 20°

nilai faktor C 1 0.9 0.8 0.7 0.65

Setelah mendapat diameter screw, lalu menghitung *pitch screw* yaitu $0.5 D_s$. Selanjutnya menghitung diameter tabung dengan memasukan persamaan berikut:

$$D_t = D_s + 0,8$$

Selanjutnya menghitung laju sembur dengan menggunakan persamaan berikut.

$$v = \frac{S \cdot n}{60}$$

Dimana;

: Laju sembur material (m/s)

S : Jarak pitch (m)

n : Kecepatan putaran (rpm)

Setelah mendapatkan laju sembur material selanjutnya adalah menghitung panjang reaktor.

$$L = v \cdot t$$

Dimana;

L : Panjang reaktor (m)

t : Waktu tinggal (detik)

Terakhir memverifikasi perhitungan dimensi reaktor dengan mengasumsikan volume sampah dalam reaktor sebesar 25%.

$$V_t = 25\% \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L$$

$$V_{sampah} = V_{tabung\ reaktor}$$

4.2. Analisa Kebutuhan Energi Reaktor

Setelah mendapatkan dimensi reaktor maka langkah selanjutnya adalah menentukan jenis material yang dipakai pada reaktor. Parameter yang dibutuhkan untuk reaktor adalah material yang mampu megantarkan panas pada reaktor, dapat menahan tekanan gas, serta tahan terhadap korosi. Material *carbon steel AISI 1045* memiliki konduktivitas termal 51,9 W/m.K dan tebal 10 mm.

Langkah pertama adalah menghitung laju aliran massa yang terjadi pada reaktor, berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung laju aliran massa

$$\dot{m} = \rho \cdot Q$$

Dimana;

$$\dot{m} = \text{Laju aliran massa } \left(\frac{\text{kg}}{\text{jam}}\right)$$

$$\rho = \text{Massa jenis } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$$

$$Q = \text{Debit } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{jam}}\right)$$

setelah mendapatkan besar nilai laju aliran massa pada reaktor, selanjutnya menghitung kebutuhan energi sampah. Kandungan air dalam sampah diasumsikan sebesar 30%. Maka persamaan yang digunakan untuk menghitung kebutuhan energi sampah adalah sebagai berikut:

$$Q_s = (\dot{m} \cdot 70\%) \cdot C_{ps} \cdot \Delta T$$

Selanjutnya menghitung kebutuhan energi untuk energi pemanasan kandungan air dalam sampah (Q_{sa}), dan penguapan kandungan air dalam sampah (Q_{la}).

$$Q_{sa} = (\dot{m} \cdot 30\%) \cdot C_{pa} \cdot \Delta T$$

$$Q_{la} = (\dot{m} \cdot 30\%) \cdot (h_{fg} \text{ air @ } 275^\circ\text{C})$$

Setelah mendapatkan kebutuhan energi sampah dan air, maka selanjutnya menghitung Q_{tot} , dengan mengkalkulasi kebutuhan energi sampah, pemanasan air, dan penguapan air. Berikut persamaannya:

$$Q_{tot} = Q_s + Q_{sa} + Q_{la}$$

setelah mendapatkan kebutuhan energi total dari material, selanjutnya menghitung besar temperatur dinding dalam menggunakan persamaan perpindahan panas radiasi.

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_r^4 - T_{dd}^4)$$

$$T_r = \sqrt[4]{(T_{dd}^4) + \frac{Q}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A}}$$

Dimana;

Q_{rad} : Besar energi perpindahan panas radiasi (watt)

ε : Nilai emisivitas

σ : Konstanta Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

A : Luas area radiasi (m^2)

T_r^4 : Temperatur dalam reaktor (K)

T_{dd}^4 : Temperatur dinding dalam reaktor (K)

Selanjutnya menghitung temperatur dinding luar dengan menggunakan persamaan perpindahan panas konduksi pada pipa.

$$Q_{kon} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L \cdot (T_{dl} - T_{dd})}{\ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}$$

$$T_{dl} = T_{dd} + \frac{Q_{kon} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$$

Dimana;

Q_{kon} = Besar energi perpindahan panas konduksi (watt)

| | |
|-----|-------------------------------|
| L | = panjang reaktor (m) |
| K | = Konduktivitas termal (W/mK) |
| Tdl | =Temperatur dinding luar (K) |
| Tdd | =Temperatur dinding dalam (K) |
| r0 | = jari-jari luar reaktor (m) |
| r1 | = jari-jari dalam reaktor (m) |

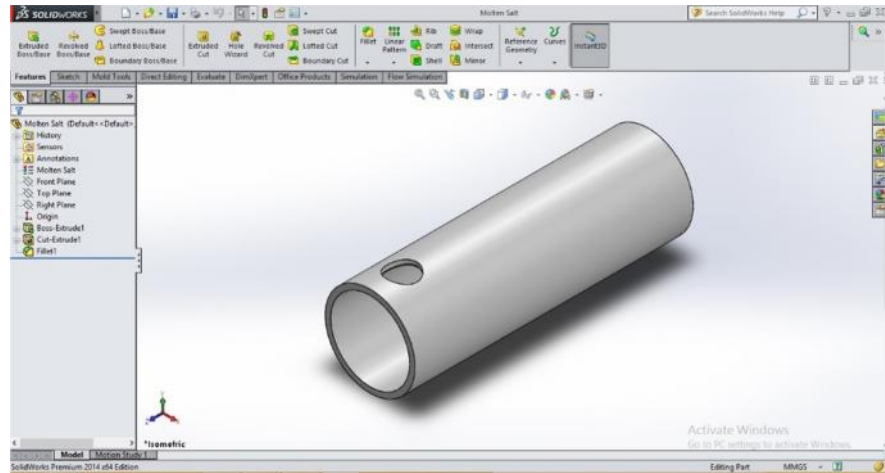
4.3. Simulasi Perpindahan Panas

Metode simulasi perpindahan panas pada penelitian ini adalah:

1. Membuat modelling dari reaktor dengan menggunakan perangkat lunak **Solidworks 2014 Student Version**. Dimensi serta bentuk reaktor torefaksi kontinu tipe *tubular* didapat dari hasil perhitungan serta perancangan reaktor.
2. Melakukan simulasi perpindahan panas reaktor dengan menggunakan perangkat lunak **Solidworks Simulation**. Simulasi perpindahan panas dilakukan untuk mengetahui nilai temperatur yang sesuai dengan temperatur torefaksi yang diinginkan.

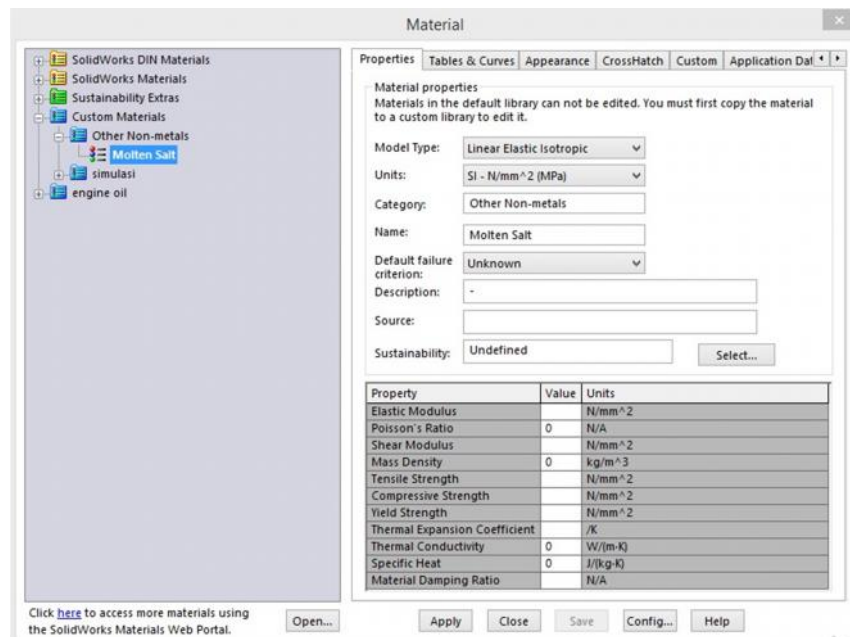
Proses yang dilakukan untuk simulasi perpindahan panas adalah sebagai berikut:

- a. Membuat model 3D yang diasumsikan sebagai *molten salt*



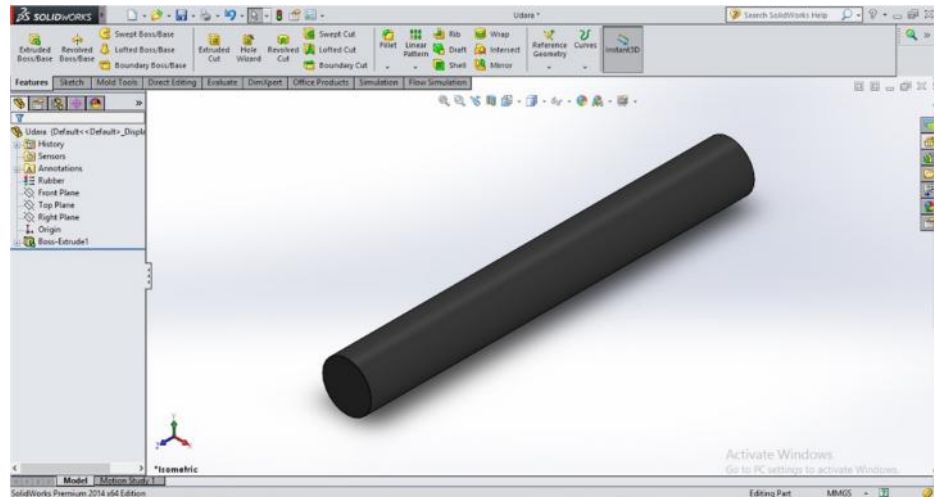
Gambar 4.1. Model 3D molten salt

- b. Meng-input jenis material yang digunakan. Dalam hal ini material molten salt di-input secara manual, dengan parameter *density*, *specific heat*, dan *conductivity thermal*.



Gambar 4.2. Meng-input sifat material molten salt

- c. Membuat model 3D yang diasumsikan sebagai udara, setelah itu meng-input material udara pada model 3D.



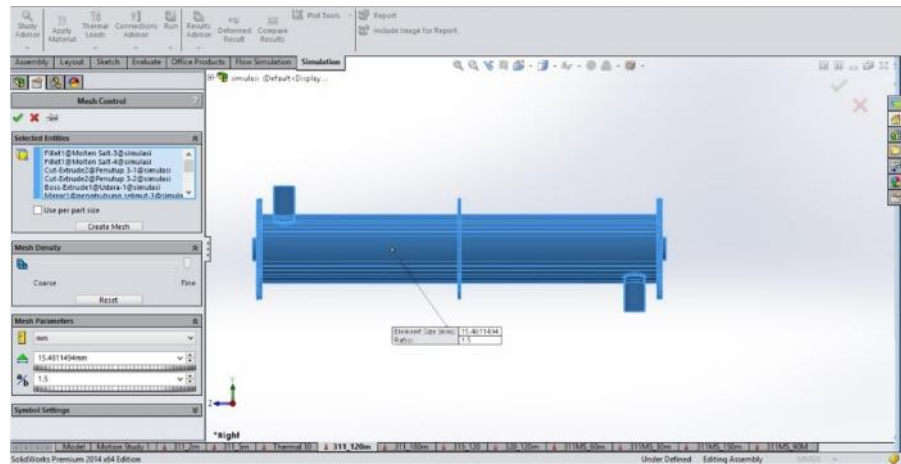
Gambar 4.3. Model 3D udara

- d. Selanjutnya model 3D *molten salt* dan udara di-*assembly* dengan rancangan reaktor.
- e. Selanjutnya memilih simulation -> *new study advisor* -> membuat nama *study* -> memilih tipe *thermal*.
- f. Mengubah tipe simulasi menjadi transient dengan waktu transient 1800s, 3600s, 5400s, dan 7200s dengan *time increment* 60s.



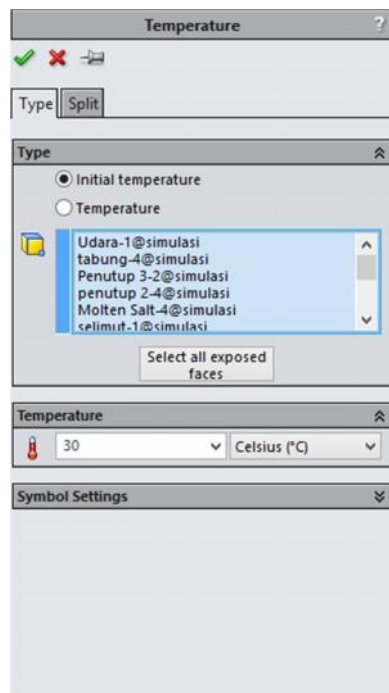
Gambar 4.4. Mengatur tipe simulasi yang digunakan

g. Mengatur *mesh* masing-masing *parts*.



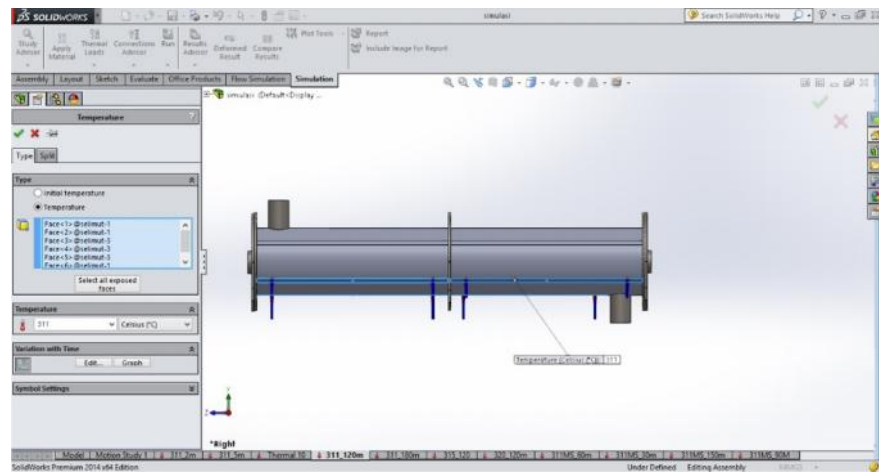
Gambar 4.5. Cara mengatur *mesh*

h. Mengisi temperatur awal semua parts pada temperatur 30°C.



Gambar 4.6. Cara mengisi temperatur awal komponen

- i. Mengatur beban temperatur pada reaktor dengan memilih pada sisi *split line* yang diasumsikan sebagai burner pada reaktor dan beban termal yang digunakan 311°C.



Gambar 4.7. Mengatur beban termal

- j. Menjalankan simulasi dengan memilih *run* pada simulasi.

VI. PENUTUP

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini maka didapatkanlah kesimpulan sebagai berikut;

1. Hasil rancangan ruang reaktor torefaksi tipe tubular memiliki spesifikasi sebagai berikut: diameter screw = 195 mm; diameter tabung reaktor = 8 in; jarak pitch = 100 mm; panjang reaktor = 1600 mm; tebal dinding reaktor = 10 mm.
2. Hasil Simulasi perpindahan panas pada perancangan reaktor torefaksi sampah kontinu tipe *Tubular* dengan menggunakan selimut fluida pemanas (*Heating Fluid Jacket*) menggunakan program perangkat lunak Solidworks untuk temperatur reaktor sebesar 275C maka dibutuhkan temperatur input sebesar 311C

6.2. Saran

Sebaiknya dilakukan simulasi dengan perangkat lunak yang lain sebagai perbandingan hasil simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul. 2014. *Pemanfaatan Sampah Menjadi Bahan Bakar Padat Setara Batubara Melalui Proses Torefaksi*. Disertasi Institut Teknologi Bandung. Bandung
- Amrul. Hardianto, Toto., Suwono, Aryadi., Pasek, Darmawan. 2011. *Balance Energi pada Proses Torefaksi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan Setara Batubara untuk Memperhitungkan Tingkat Kelayakannya*. Prosiding Optimalisasi Peran Teknik Mesin Dalam Meningkatkan Ketahanan Energi Seminar Nasional Teknik Mesin X Universitas Brawijaya. ISBN 978-602-19028-0-6.
- Batidzirai, B., Mignot, A.P.R., Schakel, W.B., Junginger, H.M., Faaij, A.P.C. 2013. *Biomass Torrefaction Technology: Techno-economic Status and Future Prospect*. Energy 62 (2013) 196-214.
- Chen, Xia., Wang, Chao., Wu, Yuting., Liu, Bin., Ma, Chongfang. 2017. *Characteristics of The Mixed Convection Heat Transfer of Molten Salts in Horizontal Square Tubes*. Solar Energy-147 (2017) 248-256.
- Chen, Dezhen., Lijie, Yin., Huan, Wang., Pinjing, He. 2014. *Pyrolysis Technologies for Municipal Solid Waste: A Review*. Waste Management
- Indra M.G., Dyan Susila., Ali Mustofa., Nugroho Agung Pambudi. 2016. *Thermal Catalytic Cracking of Real MSW into Bio-Crude Oil*. Universitas Lampung. Bandar Lampung.

- Irawan, Anton., Riadz, Tubagus., Nurmaliza. 2015. *Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa dan Uji Kemampuan Penyerapan Air*. Reaktor, Vol 15 No. 3, April 2015, Hal. 190-195.
- Naryono, Eko., Soemarno. 2013. *Perancangan Sistem Pemilihan, Pengeringan, dan Pembakaran Sampah Organik Rumah Tangga*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Purba, Victor S. 2007. *Penentuan Total Cadangan Minyak Nasional Indonesia Dengan Metoda Perhitungan Kurva Puncak Hubbert dan Pendekatan Numerkal Terhadap Grafik Produksi Minyak Nasional Indonesia*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Sajima., Hasnurrofiq, Deddy., Sudaryadi. 2012. *Rancang Bangun Screw Feeder Sebagai Perangkat Dukung Peleburan Konsentrat Zirkon*. Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan. Yogyakarta
- Zainuri, Ach Muhib. 2009. *Mesin Pindah Bahan*. Penerbit Andi: Yogyakarta.
- Zhao, Qing-Guo., Hu, Chun-Xu., Liu, Su-Jie., Chen, Xia. 2017. *A Unit-Cell Model Predicting The Viscosity of Binary Molten Salts*. International Journal of Heat and Mass Transfer 107 (2017) 484-488.