

**PROSES PIROLISIS BERTINGKAT BERKATALIS ALAM UNTUK  
MENINGKATKAN KUALITAS BIO-OIL DARI SAMPAH KOTA**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Zaenal Arifin**



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

# PROSES PIROLISIS BERTINGKAT BERKATALIS ALAM UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS BIO-OIL DARI SAMPAH KOTA

**Zaenal Arifin<sup>1</sup>, Indra Mamad Gandidi<sup>2</sup> dan Amrul<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung

## ABSTRAK

Metode pirolisis merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengkonversi sampah menjadi bahan bakar. Namun metode pirolisis yang sering digunakan merupakan metode pirolisis dengan *thermal cracking* tak jarang juga menggunakan *catalytic cracking*. Akan tetapi, metode pirolisis *thermal cracking* dan *catalytic cracking* masih memiliki kekurangan dalam penerapannya, baik dari segi proses, material dan hasil. Metode pirolisis *thermal cracking* maupun *thermal catalytic cracking* yang sering digunakan masih menggunakan material yang homogen selain itu penambahan katalis pada proses *catalytic cracking* masih menggunakan katalis sintesis yang berdampak pada aspek ekonomi dan juga pada proses masih menggunakan *direct catalytic* yang berdampak pada hasil pirolisis, seperti yang dilakukan oleh Mustofa (2016). Hasil pirolisis masih terlihat keruh dan memiliki kualitas yang kurang bagus. Dalam penelitian ini proses pirolisis yang digunakan merupakan metode pirolisis bertingkat dengan material heterogen sampah padat perkotaan, dimana proses pirolisis ini terpisah antara bed material dengan bed katalis dengan proses secara simultan. Dolomit, zeolite, dan kaolin sebagai katalis alam yang digunakan. Temperatur kerja pada pirolisis bertingkat yaitu pada bed material sebesar 500 °C dan pada temperature bed katalis sebesar 200°C, 250°C, dan 300°C. Setelah diamati kuantitas rendemen yang terbaik pada katalis zeolite 49 wt% dan kualitas rendemen pada katalis dolomit 42 wt%, hasil data GC-MS produk yang di dapat pada temperature 250°C A menyerupai fraksi hidrokarbon premium yaitu ikatan C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub> sebesar 84.08%, C<sub>13</sub>-C<sub>20</sub> sebesar 15.48% dan ada sedikit > C<sub>20</sub> sebesar 0.42% dan untuk senyawa hidrokarbonnya temepatur 300 B menyerupai bahan bakar diesel dimana senyawa alifatik 83.18 %, alisiklik 6.8%, aromatic 6.88% dan oksigen 2.56%.

**Kata Kunci :** Pirolisis, Pirolisis Bertingkat, Katalis, GC-MS Kualitas dan Kuantitas Bio-Oil

# **PROSES PIROLISIS BERTINGKAT BERKATALIS ALAM UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS BIO-OIL DARI SAMPAH KOTA**

**Zaenal Arifin<sup>1</sup>, Indra Mamad Gandidi<sup>2</sup> dan Amrul<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Student, Department Of Mechanical Engineering, University Of Lampung

<sup>2</sup>lecturer, Department Of Mechanical Engineering, University Of Lampung

## **Abstract**

Pyrolysis method one of method which is able being used to convert the waste into fuel. However, pyrolysis method which is generally used is pyrolysis method with thermal cracking in the other hand, infrequently others use pyrolysis method with catalytic cracking. However, thermal cracking and catalytic cracking pyrolysis methods have deficiencies in their application, both in terms of processes, materials and outcomes. Thermal cracking and thermal catalytic cracking methods are often used by using homogeneous materials. Beside, Addition of catalysts in the catalytic cracking process still uses synthetic catalysts that impact on the economic aspects and the process still using direct catalytic that affect on pyrolysis results, as done by Mostofa (2016). Pyrolysis results look turbid and a less good quality. In this research, pyrolysis process used is pyrolytic method with heterogeneous material of solid urban waste, where the pyrolysis process is separated between bed material and bed catalyst by simultaneous process. Dolomite, zeolite, and kaolin as natural catalysts are used. The working temperature of the pyrolysis is in the bed material of 500 oC and at the catalyst bed temperature of 200oC, 250oC, and 300oC. After being observed the best rendement quantity on zeolite 49 wt% catalyst and the yield quality at 42 wt% dolomite catalyst, the result of GC-MS data of the product at temperature 250oC A resembles the premium hydrocarbon fraction C5-C12 bond of 84.08%, C13-C20 of 15.48% and there is little > C20 of 0.42% and for the hydrocarbon of temperature 300 B resembles diesel fuels where aliphatic compounds are 83.18%, alicyclic 6.8%, aromatic 6.88% and oxygen 2.56%.

**Keywords:** Pyrolysis, Pyrolysis upgrading, Catalysts, GC-MS, Quality and Quantity of Bio-oil

**PROSES PIROLISIS BERTINGKAT BERKATALIS ALAM UNTUK  
MENINGKATKAN KUALITAS BIO-OIL DARI SAMPAH KOTA**

**Oleh**

**Zaenal Arifin**

**Skripsi**

Sebagai Salah 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 : PROSES PIROLISIS BERTINGKAT BERKATALIS  
ALAM UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS BIO  
OIL DARI SAMPAH KOTA**

**Nama : ZAENAL ARIFIN**

**NPM : 1215021078**

**Jurusan : Teknik Mesin**

**Fakultas : Teknik**

**MENYETUJUI,**

**1. Komisi Pembimbing**

**Indra Mamad G., S.T., M.T.**  
NIP. 197003071999031002

**Dr. Amrul, S.T., M.T.**  
NIP. 197103311999031003

**2. Kepala Jurusan Teknik Mesin**

**Ahmad Su'udi, S.T., M.T.**  
NIP. 197408162000121001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

**Ketua : Indra Mamad Gandidi, S.T., M.T.**

**Anggota Penguji : Dr. Amrul, 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. 196207171987031002**

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 20 Oktober 2017**

**PERNYATAAN PENULIS**

TUGAS AKHIR INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN REKTOR No. 06 TAHUN 2016.

**YANG MEMBUAT PERNYATAAN**



**ZAENAL ARIFIN**  
NPM: 1215021078

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kampung Aji Jaya KNPI Kecamatan Gedung Aji Kabupaten Tulang Bawang pada 12 Januari 1994, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dengan orang tua Bapak Ispriyanto dan Ibu Siti Rohanah. Jenjang pendidikan pertama yang dijalani penulis adalah Taman Kanak-Kanak Darma Wanita Aji Jaya KNPI pada tahun 1999-2000. kemudian melanjutkan ke jenjang Pendidikan Sekolah Dasar Negeri 01 Aji Jaya pada tahun 2000 hingga lulus pada tahun 2006. Selanjutnya penulis duduk di Sekolah Menengah Pertama Negeri 01 Gedung Aji pada tahun 2006 dan lulus tahun 2009, kemudian penulis melanjutkan Sekolah kejuruan di Sekolah Menengah Kejuruan Negeri 01 Gedung Aji dengan jurusan yang di ambil Otomotif dan lulus tahun 2012. Pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (Unila). Semasa kuliah pada tahun 2015, penulis melakukan kerja praktik di PT. Krakatau Steel dengan subjek yang dikaji adalah **“Penyimpangan Dimensional Dan Perbaikan Mesin Roughing Mill Unit Di Pt.Krakatau Steel (Persero) Tbk”**. Selama duduk dibangku kuliah, penulis pernah mendapatkan beasiswa Pemda Tulang bawang pada tahun 2013. Selama berstatus mahasiswa, penulis pernah menjadi asisten Lab Termodinamika tahun 2016. Selama menjadi mahasiswa, penulis juga aktif dalam kegiatan penelitian dosen dan juga aktif di lab dengan membentuk Tim aktif dalam mengikuti perlombaan-perlombaan, seperti PKM, Idocement Award, Kino Youth, Heritage, Pertamina Ide Gila, Inkubator Bisnis CPPBT, dan PPBT. Dari banyaknya perlombaan tersebut penulis hanya beruntung

mendapatkan dana hibah Inkubator bisnis CPPBT, dengan produk “bio-oil dari sampah padat kota untuk pengganti bahan bakar konvensional”. Dari incubator bisnis tersebut peneliti mulai belajar berwirausaha (*enginepreneur*). Adapun usaha yang pernah digeluti yaitu berwirausaha kopi UD. Alam Terbang yang berlokasi di Gadingrejo, Pringsewu Lampung, CV. MAB (Minang Agro Berkahatama) yang berlokasi di Padang, Sumatera Barat. CV. MAB ini merupakan CV yang terbentuk dari dana Inkubator bisnis PPBT. Karena penelitian Skripsi tidak ingin hanya sebatas karya tulis, maka lahirlah CV. INKADAKA ENERGY yang merupakan aplikasi langsung dari hasil penelitian skripsi yang di ajukan ke program incubator bisnis CPPBT. Adapun organisasi yang diikuti adalah Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) dan UKM CREMONA (*Creative, motivative dan innovative*) Fakultas Teknik, tahun 2014-2015 menjabat sebagai anggota Penelitian dan Pengembangan.

*"Kesabaran Itu Dapat Menolong Sagala Pekerjaan "*

*"Tidak Ada Yang Tak Bisa Dikerjakan Selagi Itu Nyata Dan Orang  
Lain Bias Jika Ada Keinginan Untuk Berusaha "*

*"Kesuksesan Hanya Dapat Diraih Oleh Orang-Orang Yang  
Mempunyai Upaya Dan Tekat Serta Usaha Yang Disertai Doa "*

*"Kunci Sebuah Kesuksesan Adalah Bersungguh-Sungguh "*

*"Berjuang, Bersabar, Ikhlas "*

*"Hidup Itu Yakin "*

## SANWACANA

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena berkat limpahan rahmat, hidayah, dan inayah-Nya maka skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Salam dan salawat semoga selalu tercurah pada baginda Rasulullah Muhammad SAW.

Skripsi yang berjudul "**Proses Pirolisis Bertingkat Berkatalis Alam Untuk Meningkatkan Bio-oil Dari Sampah Kota**" ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan kurikulum sarjana strata-1 (S-1) pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penyelesaian Skripsi ini tentu tidaklah lepas dari bantuan, bimbingan, dukungan serta semangat dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
2. Orang tua yang selalu memberikan semangat dan dukungannya baik moril maupun materil.
3. Bapak Prof. Dr. Suharno, M.sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

4. Bapak Ahmad Su'udi, S.T.,M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
5. Bapak Indra Mamad Gandidi, S.T.,M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang selalu bijaksana memberikan bimbingan, nasehat dan pengarahan serta waktunya selama penelitian dan penulisan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Amrul, S.T.,M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membantu dan membimbing dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Dr. Amrizal, S.T.,M.T., selaku Dosen Penguji Skripsi.
8. Bapak Ir. Arinal Hamni, M.T. selaku dosen Pembimbing Akademik yang telah banyak membantu semasa perkuliahan.
9. Adikku tersayang, Nurohmayni Putri. Terima kasih atas do'a, dukungan, bantuan, dan perhatian yang diberikan.
10. Untuk Dwi Winda Sari yang insyaallah selalu menemani dan memberikan dukungan, serta perhatian.
11. Tim kerja Ahmad alfian, Doni Pambudi yang telah bekerja sama dengan baik dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Sahabat-sahabatku Ajito, Bagus, Wahid, Iqbal, dan yang tak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan semangat dan dukungannya.
13. Teman-teman Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan 2012 dan teman-teman mahasiswa lain yang tidak mungkin Penulis sebutkan satu per satu yang telah memberi dukungan dalam pengerjaan skripsi.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna masih banyak kekurangan, baik dari segi isi maupun cara penyampaiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat

mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Amin.

*Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Bandar Lampung, Oktober 2017

Penulis,

**Zaenal Arifin**

## DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	
DAFTAR TABEL.....	
DAFTAR GAMBAR .....	
I. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Tujuan .....	5
C. Batasan Masalah .....	6
D. Sistematika Penulisan .....	7
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Sampah .....	9
B. Biomassa .....	9
C. Teknik Konversi Sampah Menjadi Energi.....	14
D. Jenis Pirolisis.....	18
E. Parameter yang Berpengaruh Pada Proses Pirolisis .....	21
F. Pengujian Karakteristik Minyak Pirolisis .....	24
G. Mekanisme Pirolisis .....	27
H. Pirolisis Bertingkat .....	28
I. Katalis Pirolisis .....	29
J. Karakterisasi Katalis .....	34
K. Kinerja Katalis .....	37
L. Reaksi <i>Cracking</i> .....	40
M. Aluminium Okside .....	42
N. Hubungan Katalis Dengan Energi Aktivasi .....	43

III. METODOLOGI PENELITIAN.....	44
A. Tempat dan Pelaksanaan .....	44
B. Tahapan Penelitian .....	44
C. Alat dan Bahan .....	46
D. Instalasi Pengujian Pirolisis .....	56
E. Metode Pengambilan Data .....	56
F. Alur Pengambilan Data .....	58
G. Variabel Pengujian .....	59
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Pelaksanaan Pengujian .....	61
B. Distribusi Produk .....	65
C. Hasil Uji Bakar.....	83
D. Hasil Uji GC-MS .....	86
E. Perbandingan pirolisis bertingkat dengan Non-Isothermal.....	93
V. SIMPULAN DAN SARAN	
A. Simpulan .....	95
B. Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA .....	97
LAMPIRAN .....	106

## DAFTAR GAMBAR

Tabel	Halaman
Tabel 2.1. Jumlah Produk Dari Reaksi Pirolisis Dan Gasifikasi .....	20
Tabel 3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian .....	44
Tabel 3.2. Variasi Percobaan .....	59
Tabel 4.1. Data Pengujian Pirolisis Bertingkat .....	61

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1. Struktur <i>Selulose</i> .....	10
Gambar 2.2. Struktur lignin.....	11
Gambar 2.3. Diagram skematik pirolisis bertingkat.....	29
Gambar 3.1. Reaktor .....	47
Gambar 3.2. Pemanas .....	47
Gambar 3.3. Kondensor.....	48
Gambar 3.4. Tabung sampel uji .....	48
Gambar 3.5. Kran ¼ inchi .....	49
Gambar 3.6. <i>Thermocouple</i> .....	49
Gambar 3.7. Timbangan Digital.....	49
Gambar 3.8. Sarung Tangan .....	50
Gambar 3.9. Masker .....	50
Gambar 3.10. Gas Nitrogen .....	50
Gambar 3.11. Unit Kataliser .....	51
Gambar 3.12. Sampah Organik .....	52
Gambar 3.13. Sampah Plastik .....	53
Gambar 3.14. Sampah Kertas .....	54

Gambar 3.15. Ban Bekas .....	54
Gambar 3.16. Tekstil .....	55
Gambar 3.17. Katalis .....	56
Gambar 3.18. Unit Piroliser .....	56
Gambar 3.19. Diagram alir proses pirolisis berkatalis .....	56
Gambar 3.19. Diagram alir proses pirolisis berkatalis .....	56
Gambar 3.20. Alur Penambilan Data .....	58
Gambar 4.2 Grafik Rendemen Keseluruhan .....	63
Gambar 4.2 Grafik distribusi produk katalis dolomit .....	67
Gambar 4.3 Produk bio oil pada temperature kataliser 200°C .....	69
Gambar 4.4 Produk bio oil pada temperature kataliser 250 °C .....	71
Gambar 4.5 Produk bio oil pada temperature kataliser 300 °C .....	74
Gambar 4.6 Grafik distribusi produk katalis zeolite .....	75
Gambar 4.7 Produk bio oil pada temperature kataliser 200 °C .....	77
Gambar 4.8 Produk bio oil pada temperature kataliser 250 °C .....	79
Gambar 4.9 Produk bio oil pada temperature kataliser 300 °C .....	79
Gambar 4.10 Grafik distribusi produk katalis kaolin .....	80
Gambar 4.11 Produk bio oil pada temperature kataliser 200 °C .....	81
Gambar 4.12 Produk bio oil pada temperature kataliser 250 °C .....	82
Gambar 4.13 Produk bio oil pada temperature kataliser 300 °C .....	83
Gambar 4.14 Uji Bakar Bio Oil Katalis Dolomit .....	84
Gambar 4.15 Uji Bakar Bio Oil Katalis Zeolit.....	85
Gambar 4.16 Uji Bakar Bio Oil Katalis Kaolin .....	86

Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Fraksi Hidrokarbon Bio-oil .....	87
Gambar 4.18 Grafik Distribusi Hidrokarbon Bahan Bakar Cair .....	91
Gambar 4.19. Grafik Perbandingan Produk Pirolisis .....	93

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Pirolisis merupakan proses degradasi thermal suatu material pada temperatur tinggi tanpa melibatkan oksigen saat bereaksi (Sampath dan babu, 2005). Mekanisme proses pirolisis yaitu material pirolisis dimasukan kedalam reactor pirolisis dengan temperature (400°C-800°C) kemudian gas pirolisis dikondensasi sehingga menghasilkan produk bio-oil tanpa melibatkan oksigen saat bereaksi. Produk yang dihasilkan dari proses pirolisis berupa padat, cair dan gas. Telah banyak penelitian mengenai pirolisis sampah kota untuk produksi bio-oil pengganti bahan bakar konvensional yang di gunakan sekarang ini (M. Saiful Islam, 2010).

Namun material yang digunakan jenis material yang homogen, seperti plastik, biomasa, kertas, dan karet ban bukan dari material sampah yang sebenarnya (Funda Ates, 2013) (Norbert Miskolczi, 2013) (Lopez, 2010) (Agung dan Gandidi, 2012) (Ming Son, 2014). Sedangkan material sampah yang sesungguhnya merupakan material yang heterogen, sehingga sulit untuk memisahkannya. Oleh karena itu, perlunya pengujian sampah heterogen dengan metode pirolisis. Proses pirolisis dengan bahan baku sampah kota sesungguhnya (campuran) menggunakan metode termal pirolisis pengumpanan bahan baku ketika reaktor pirolisis sudah dalam kondisi

temperatur pirolisis (200-600°C) atau biasa disebut pirolisis isothermal membutuhkan energi yang besar dan menghasilkan sekitar 50-65% *non condensable gas* (NCG), 24-35% padatan, dan sedikit *bio-oil* sekitar 11-20%. Karena efek dari temperature yang tinggi material  $C_nH_n$  banyak terkonversi kedalam ikatan rantai pendek ( $C < 5$ ) sehingga banyak syngas yang dihasilkan (Indra Mamad Gandidi dkk, 2015). Selain itu metode termal pirolisis akibat tingginya temperature akan berdampak pada turunya kuantitas cairan disertai dengan tingginya produk gas. Hal ini juga disebabkan waktu tinggal yang lama menyebabkan terjadinya proses *secondary cracking* yang memecah rantai panjang senyawa organik dan hidrokarbon menjadi rantai yang lebih pendek sehingga tidak dapat terkondensasi (Wardana, dkk, 2016). Jika termal pirolisis pada temperature rendah memang banyak menghasilkan *bio-oil* dikisaran, 81-97 wt.%, akan tetapi produk *bio-oil* yang dihasilkan mengental seperti lilin yang biasa di sebut *heavy wax* ( Chika dkk, 2015).

Proses termal pirolisis dengan material MSW pada operasi 400°C waktu 60 menit dan menggunakan katalis kaolin berdasarkan hasil (GC-MS) ditemukan bahwa produksi *bio-oil* meningkat secara substansial dengan penggunaan katalis. Diamati bahwa produksi *bio-oil* adalah 23,6% dengan penggunaan katalis dalam proses, yang tanpa penggunaan katalis hanya 15,2% . Distribusi hidrokarbon minyak yang dihasilkan menunjukkan bahwa bahan bakar bensin dan solar adalah unsur utamanya. Kelompok fungsional yang terdeteksi dalam *bio-oil* oleh analisis GC-MS serupa dengan diesel-48 dimana parafin dan olefin adalah spesies massa utama (I M Gandidi, dkk, 2016).

Termal pirolisis dinilai kurang efektif dan efisien sehingga perlu perlakuan lain. Biasanya pirolisis dilakukan dengan bantuan katalis, karena katalis dapat mempercepat laju reaksi dan meningkatkan energi aktivasi sehingga dapat meminimalkan energy yang digunakan dan dapat meningkatkan kualitas produk *liquid* pirolisis (Nagra, 1985). Adapun perbedaan termal pirolisis dan pirolisis berkatalis dengan menggunakan material LDPE temperature operasi 425°C - 475°C berkatalis HZSM 5 zeolit dan AI MCM-41 degradasi termal tanap katlis diperoleh mass yield 74.7 wt% pada 450°C dengan senyawa olefin dan parafin terbanyak. Sementara dengan katalis HZSM diperoleh mass yield 73.5 wt % pada 425°C dengan senyawa olefin yang dominan dengan range fraksi hidrokarbon (C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub>) sementara AI-MCM-41 Temperatur 450°C mass yield yang diperoleh 54-58 wt% (Syamsiro, 2014).

Pirolisis berkatalis dengan menggunakan material HDPE dan PS dengan temperatur operasi piroliser 450°C dan kataliser 400°C, 450°C, and 500°C berkatalis HY-zeolite peningkatan suhu dan penurunan WHSV telah menghasilkan peningkatan produk gas dan padat sementara produk cair menurun. Produksi minyak maksimum untuk HDPE (70,0wt%) dan PS (88,20%) diperoleh pada suhu pirolisa 450°C dan WHSV C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> dan C<sub>4</sub> + gas (>75 mol%) adalah komponen utama dari produk gas dan cairan untuk HDPE. Dalam kasus PS, gas C<sub>2</sub> dan C<sub>3</sub> (>65 mol%) adalah komponen utama dari produk gas. Kualitas tinggi produk gas dapat digunakan sebagai bahan bakar baik untuk menggerakkan mesin gas atau mesin diesel dual-fuel (Syamsiro dkk, 2013). Penelitian lain dengan menggunakan material PS

(polystyrene) berbentuk pelet 3.5 mm X 2 mm temperatur piroliser 500°C dan *upgrading* 700°C dengan katalis Ni, *styrene monomer* (Aromatik tidak Jenuh) telah menjadi produk utama yang diperoleh, dengan yield-nya 70,5 wt%. Selain itu, dari senyawa cincin tunggal aromatik (10,2 wt%), serta hidrokarbon poliaromatik (7,5 wt%), Namun, hasil dari produk antara (*dimer dan trimer*) dan C<sub>1</sub>- C<sub>4</sub> fraksi lebih rendah dari 2% berat dan senyawa aromatik (I. Barbarias, et al., 2016). Menggunakan material HDPE dengan *two-step thermal dan proses catalytic* pada temperature 500°C dan kataliser 350°C-550°C berkatalis HZSM-5 Zeolite seiring meningkatnya suhu dan space time yield dari olefin meningkat dengan mass yield yang dihasilkan 62.9wt% pada temperatur 550°C (M. Artetxe et al., 2012).

Akan tetapi hampir dari semua penelitian yang telah dilakuakn menggunakan katalis sintetis, sehingga penggunaan katalis sintetis akan berdampak pada aspek biaya produksi apa bila digunakan untuk komersil sampah kota. Selain itu, material yang digunakan juga masih material yang homogen. Adapun pirolisis yang menggunakan material heterogen berkatalis alam merupakan metode pirolisis *direct catalytic*, dimana material dan katalis tercampur. Oleh karena itu, produk yang dihasilkan keruh akibat material katalis ikut terbawa saat terkondensasai, sehingga bio-oil dan katalis yang terbawa perlu dipisahkan, selain itu penggunaan katalis akan boros maka aspek ekonomi akan meningkat (Mustofa, 2016). SeHINGA perlunya penggunaan katalis yang murah dan melimpah di alam seperti dolomit alam, zeolite alam dan kaolin alam. Oleh karena itu, perlu solusi lain untuk mengatasi permasalahan dalam

proses pirolisis yaitu dengan menggunakan metode pirolisis bertingkat berkatalis alam. Dimana pada proses ini bahan baku dan katalis diperlakukan secara terpisah. Proses pirolisis berkatalis nantinya akan menurunkan temperatur dan waktu tinggal operasi yang diyakini dapat meningkatkan reaksi dekomposisi serta meningkatkan kualitas produk bio-oil. Kajian ini dilakukan untuk melihat karakteristik 3 aspek katalis yaitu zeolit, dolomit dan kaolin dan temperatur operasi pirolisis yang cocok digunakan pada proses pirolisis bertingkat berkatalis alam untuk meningkatkan kalitas bio-oil dari sampah kota.

## **B. Tujuan**

Dari latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penelitian ini akan memfokuskan kegiatan dengan tujuan :

1. Untuk menemukan sebuah kondisi operasi pirolisis dan katalis alam yang mempunyai daya konversi yang baik untuk produksi kualitas dan kuantitas bio-oil dari sampah padat perkotaan.
2. Untuk mengetahui pengaruh 3 jenis katalis dalam proses pirolisis bertingkat terutama pada efek temperatur, sifat fisik bio oil dan mass yield.

### C. Batasan Masalah

Kajian pada penelitian ini memfokuskan terhadap proses pirolisis sampah riil kota Bandar Lampung untuk menghasilkan produk *bio-oil*. Beberapa batasan pada kajian ini sebagai berikut :

1. Bahan baku yang digunakan adalah sampah riil kota Bandar Lampung yang berasal dari TPA Bakung yang terdiri dari sampah plastil, organik dan kertas.
2. Proses pengeringan sampah dengan cara penjemuran selama 2 minggu.
3. Komposisi sampah yang digunakan yaitu 60% plastik, 30% biomasa, 5% kertas, 3% karet dan 2% kain.
4. Masa bahan baku yang digunakan sesuai dengan kapasitas alat uji, maksimum 500 gram dengan ukuran partikel antara 0,5 cm – 2 cm.
5. Proses penelitian menggunakan metode pirolisis katalis bertingkat, dengan penggunaan beberapa jenis katalis yaitu, zeolit, dolomit, dan kaolin.
6. Temperatur yang digunakan pada furnace bahan baku yaitu 500°C dan katalizer 200°C, 250°C, dan 300°C.
7. Partikel katalis 20 mm dan volume katalis 0.005 m<sup>3</sup>
8. Alat yang digunakan adalah *two step pyrolysis and upgrading* yang berada di Lab.Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung.

#### **D. Sistematika Penulisan**

Adapun sistematis penulisan dari penelitian ini adalah sbagai berikut :

##### **BAB I : PENDAHULUAN**

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

##### **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini memuat teori mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian.

##### **BAB III : METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini terdiri atas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu tempat penelitian, bahan penelitian, pralatan, dan prosedur pengujian.

##### **BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**

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

##### **BAB V : SIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini berisi hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang ingin di sampaikan dari penelitian ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

## **LAMPIRAN**

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Sampah

Sampah adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia dan atau proses alam yang berbentuk padat (UU No 18 Pengelolaan sampah Tahun 2008). Sampah (*solid waste*) secara umum dapat diartikan sebagai semua buangan yang dihasilkan dari aktivitas manusia atau hewan yang tidak diinginkan atau digunakan lagi, baik berbentuk padat atau setengah padat (Tchobanoglous, 1993).

### B. Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang dapat diubah menjadi energi. Contoh umum dari biomassa termasuk tanaman pangan, tanaman untuk energi (misalnya, *switchgrass* atau padang rumput tanaman keras), sisa tanaman (misalnya, jagung brangkasan), limbah kayu dan produk sampingan (baik residu pabrik dan tradisional non-komersial biomassa di hutan), dan pupuk kandang (Congressional Research Service, *Biomass: Comparison of Definitions in Legislation* Congressional Research).

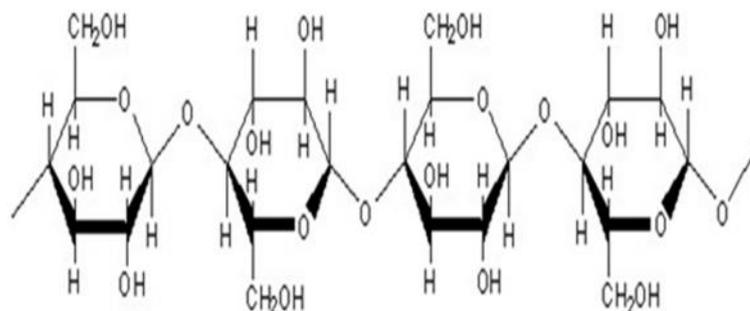
#### 1. Komposisi Biomassa

Ada berbagai jenis biomassa dan komposisinya juga beragam. Menurut Asian (*Biomass Handbook*) beberapa komponen utama adalah selulosa,

hemiselulosa, lignin, kanji, dan protein. Jenis biomassa yang berbeda memiliki komponen yang berbeda, misalnya gandum memiliki kadar pati yang tinggi, sedangkan limbah peternakan memiliki kadar protein yang tinggi. Karena komponen ini memiliki struktur kimia yang berbeda, maka reaktivitasnya juga berbeda. Dari segi penggunaan energi, biomassa berlignoselulosa yang terutama mengandung selulosa dan lignin seperti pohon berada dalam jumlah yang banyak dan mempunyai potensi yang tinggi.

#### a. Selulosa

Polisakarida yang tersusun dari D-glukosa yang terhubung secara seragam oleh ikatan  $\beta$ -glukosida. Rumus molekulnya adalah  $(C_6H_{12}O_6)_n$ . Derajat polimerasinya, ditunjukkan oleh n, dengan nilai kisaran yang lebar mulai dari beberapa ribu hingga puluhan ribu. Hidrolisis total selulosa menghasilkan D-glukosa (sebuah monosakarida), akan tetapi hidrolisis parsial menghasilkan disakarida (selobiosa) dan polisakarida yang memiliki n berurutan dari 3 ke 10. Selulosa memiliki struktur kristal dan memiliki resistensi yang tinggi terhadap asam dan basa.



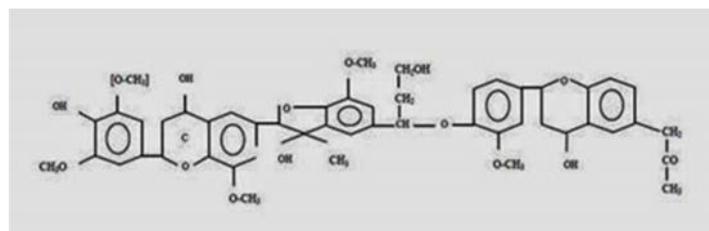
Gambar. 2.1 Menunjukkan struktur selulosa.

## b. Hemiselulosa

Polisakarida dimana unit-unitnya adalah terdiri atas monosakarida dengan 5 karbon seperti D-xilosa, D-arabinosa dan monosakarida karbon-6 seperti D-manosa, D-galaktosa dan Dglukosa. Jumlah monosakarida karbon-5 lebih banyak dibandingkan monosakarida karbon-6 dan rumus molekul rata-ratanya adalah  $(C_5H_8O_4)_n$ . Karena derajat polimerisasi (n) hemiselulosa adalah antara 50 sampai 200, yaitu lebih kecil dari selulosa, maka ia lebih mudah terurai dibandingkan selulosa, dan kebanyakan hemiselulosa dapat larut dalam larutan alkali.

## c. Lignin

Merupakan senyawa dimana unit komponennya, fenilpropana dan turunannya, terikat secara 3 dimensi. Strukturnya kompleks dan sejauh ini belum sepenuhnya dipahami. Gambar 2.2 menunjukkan unit komponennya. Struktur 3 dimensi yang kompleks ini menyebabkan ia sulit untuk diuraikan oleh mikroorganisme dan bahan-bahan kimia. Berdasarkan pengamatan ini, maka dapat disimpulkan bahwa lignin memberikan kekuatan mekanis dan juga perlindungan untuk tumbuhan itu sendiri.



Gambar 2.2 Struktur lignin

#### **d. Pati**

Seperti selulosa, pati merupakan polisakarida dimana unit komponennya adalah Dglukosa, tapi ia dihubungkan oleh ikatan - glikosida. Karena perbedaan dalam struktur ikatan, maka selulosa tidak larut dalam air sedangkan sebagian pati dapat larut dalam air panas (amilosa, dengan bobot molekul antara 10.000 sampai 50.000, mencakup hampir 10% -20% dari pati) dan sebagian lagi tidak dapat larut (amilopektin, dengan bobot molekul antara 50.000 sampai 100.000, mencakup hampir 80% - 90% dari pati). Pati ditemukan di dalam biji, umbi (akar) dan batang, dan mempunyai nilai yang tinggi sebagai makanan.

#### **e. Protein**

Protein merupakan senyawa makromolekul dimana asam amino dipolimerisasi dengan derajat yang tinggi. Sifat-sifatnya berbeda bergantung pada jenis dan rasio komponen asam amino dan derajat polimerisasi itu sendiri. Protein bukan merupakan komponen utama biomassa dan hanya meliputi proporsi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan 3 komponen yang sebelumnya.

## **2. Kandungan Energi Biomassa**

### **1) Indikator kandungan energi biomassa**

Untuk menentukan sistem energi biomassa, kandungan energi setiap jenis bahan baku biomassa harus ditentukan terlebih dahulu. Nilai

kalor seringkali digunakan sebagai indikator kandungan energi yang dimiliki oleh biomassa. Nilai kalor adalah jumlah panas yang dihasilkan saat bahan menjalani pembakaran sempurna atau dikenal sebagai kalor pembakaran. Nilai kalor ditentukan melalui rasio komponen dan jenisnya serta rasio unsur di dalam biomassa itu sendiri (terutama kadar karbon).

## 2) Nilai kalor Tertinggi dan Terendah

Biomassa terdiri atas bahan organik seperti karbon, hidrogen, dan oksigen dan saat dibakar secara sempurna, ia akan menghasilkan air dan karbon dioksida. Air dan uap air yang dihasilkan mengandung kalor laten yang terbebas saat kondensasi. Nilai kalor yang meliputi kalor laten disebut sebagai nilai kalor tinggi/high heating value (HHV), sedangkan untuk nilai kalor dimana kalor laten tidak termasuk dalam sistem tersebut disebut sebagai nilai kalor rendah/low heating value (LHV).

## 3) Kalor Yang Tersedia

Nilai kalor adalah jumlah kalor yang dihasilkan dari pembakaran sempurna per unit bahan dibawah kondisi standar. Biomassa sebenarnya mengandung lebih banyak air dan abu, yang harus dipertimbangkan ketika energi diproduksi. Penilaian hanya berdasarkan nilai kalor rendah adalah tidak cukup sebagai indikator untuk menentukan apakah biomassa dalam kondisi alami akan dapat

mempertahankan pembakaran atau tidak. Energi yang diperlukan untuk meningkatkan udara sekitar, suhu yang diperlukan untuk mempertahankan pembakaran, dan juga energi endotermik abu harus juga diperhitungkan. Jumlah kalor yang diperlukan atau disebut sebagai kalor tersedia dihitung berdasarkan persamaan di bawah:

Kalor tersedia  $Q = Q_0 (1-w) - 1000w - [\text{absorpsi kalor terbang}] - [\text{absorpsi kalor abu}]$  (w: kadar air)

### **C. Teknik Konversi Sampah Menjadi Energi**

Sebagian besar sampah yang dihasilkan akan dibuang ke tanah atau air tanpa melewati perawatan tepat yang tentunya menyebabkan bahaya kesehatan dan penurunan kualitas udara. Masalah yang disebabkan karena kegiatan ini dapat dikurangi dengan mengadopsi ramah lingkungan teknologi limbah untuk energi yang akan menanggulangi serta mengurangi limbah dan juga memproduksi bahan bakar dari sampah. Meskipun batubara dikenal memproduksi sebagai bahan bakar energi, konversi limbah menjadi energi mungkin bukan pengganti batu bara, namun, dapat menghemat deposito fosil dan lingkungan. Teknologi yang diunakan bio-kimia, elektro-kimia dan termo-kimia.

#### **1. Konversi biokimia**

Dalam konversi bio-kimia, molekul biomassa dirubah menjadi molekul yang lebih kecil oleh bakteri maupun enzim. Pada proses *biochemical*

membutuhkan waktu lebih lama jika dibandingkan dengan konversi termokimia. Tapi pada proses konversi bio-kimia tidak memerlukan banyak energi dari luar. Ada tiga alur proses pada konversi bio-kimia, yaitu (Basu, 2010):

a. Penguraian (*Disgestion*)

Produk utama dari pada penguraian berupa metana dan karbondioksida selain residu padat. Proses bio-kimia ini menggunakan bantuan bakteri yang digunakan untuk mengurai zat-zat yang terkandung didalam biomassa untuk menghasilkan metana maupun karbondioksida. Penguraian terbagi menjadi atas dua proses, yaitu :

1) Penguraian Anaerobik

Penguraian anaerobik (*anaerobic digestion*) adalah proses dimana produk biomassa diproses dan dipecah menjadi biogas oleh bakteri dengan tanpa kehadiran oksigen. Biogas ini terdiri dari unsur-unsur seperti metana dan karbon dioksida yang dapat digunakan untuk memproduksi listrik. Agar penguraian anaerobik terjadi, produk harus bebas oksigen dan harus berada pada kondisi tertentu seperti tingkat suhu, kelembaban dan pH yang sesuai. Temperatur yang cocok untuk proses ini adalah antara 30-40°C dan 60-80°C.

2) Penguraian Aerobik

Penguraian aerobik (*aerobic digestion*) adalah proses dimana produk biomassa diproses dan dipecah menjadi bio-gas oleh

bakteri dengan kehadiran oksigen mutlak. Agar penguraian aerobik terjadi, untuk menghasilkan produk maka didalam tabung penguraian harus ada oksigen dan harus berada pada kondisi tertentu seperti tingkat suhu, kelembaban dan pH yang sesuai sekitar 6,5-8,5. Suhu yang cocok untuk proses ini harus lebih tinggi daripada proses anaerob.

### 3) Fermentasi

Dalam ilmu biologi, fermentasi diartikan proses konversi gula menjadi asam atau alkohol dengan bantuan bakteri atau ragi. Bakteri membantu gula menjadi asam dan sedangkan ragi digunakan untuk produksi alkohol. Fermentasi berlangsung dengan tanpa kehadiran oksigen (anaerob).

## **2. Konversi Elektrokimia**

Konversi elektrokimia ini mengacu pada sel bahan bakar mikroba (MFC). Sistem ini dikembangkan untuk energi perangkap dari limbah, di mana mesin redoks sel mikroba amobil secara katalitik dimanfaatkan, untuk transfer percepatan elektron untuk menghasilkan listrik dan hidrogen gas.

## **3. Konversi Termokimia**

Proses ini memerlukan dekomposisi termal dari bahan organik non-biodegradable untuk menghasilkan energi atau bahan bakar. Konversi ini meliputi pembakaran, Insinerasi, Pirolisis dan Gasifikasi. Produk dapat

digunakan murni sebagai energi panas atau kimia menghasilkan berbagai produk akhir (Agrawal, 2014).

a. Pembakaran

Pembakaran adalah proses kimia dengan kehadiran banyak oksigen (Air Fuel Ratio > 1) yang menghasilkan panas yang besar dan merupakan fenomena reaksi dapat berkelanjutan secara spontan melalui panas yang dihasilkan dari reaksi tersebut (Knoef, 2005).

b. Gasifikasi

Produksi gas pembangkit (gas produser) yang disebut gasifikasi, adalah pembakaran parsial bahan bakar padat (biomassa) dan berlangsung pada suhu sekitar 10000 °C. Reaktor ini disebut gasifier. Produk pembakaran dari pembakaran sempurna biomassa umumnya mengandung nitrogen, uap air, karbon dioksida dan surplus oksigen. Namun dalam gasifikasi di mana ada surplus bahan bakar padat (pembakaran tidak sempurna) produk pembakaran adalah gas mudah terbakar seperti Karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan Metana dan produk nonuseful seperti tar dan debu (Rajvanshi, 2014).

c. Pirolisis

Dalam proses pirolisis, biomassa padat dipanaskan dalam sebuah reaktor pada temperatur operasi dengan tanpa kehadiran oksigen. Hasil produk pirolisis sangat bersih sehingga merupakan alternatif energi fosil yang perlu adanya pengembangan lebih lanjut. Produk yang

dihasilkan melalui proses pirolisis adalah padatan, minyak, dan gas. Padatan mempunyai struktur seperti grafit. Padatan tersusun atas karbon murni pada temperatur tinggi. Struktur ini bisa juga ditemukan pada membran *fuel cell*. Minyak yang dihasilkan pada proses pirolisis dapat dibandingkan dengan minyak tanah dan minyak ini merupakan sumber dari bahan kimia yang berharga misalnya alkohol, asam organik, *eter*, *kethone*, *aliphatik* dan hidrokarbon aromatik. Dan gas yang dihasilkan berupa COX, NOX, H<sub>2</sub> dan Alkana (Aydinli, B.& Caglar, A. 2010).

#### **D. Jenis Pirolisi**

Ada beberapa jenis utama dari reaksi *pyrolytic*, yang dibedakan oleh suhu dan pengolahan atau waktu tinggal biomassa.

##### *1. Slow Pyrolysis*

Pirolisis lambat dari biomasa dilakukan pada laju pemanasan kurang dari 100K/menit (Evans, R. 2004). Mekanisme reaksi yang terjadi dan produk yang dihasilkan sangat berbeda dengan pirolisis *fast* dan *flash*. Banyak produk yang berharga yang dihasilkan selama pirolisis lambat. Produk utama yang dihasilkan selama pirolisis lambat adalah padatan dan minyak. Padatan dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam aplikasi pembakaran. Bersama dengan minyak dan padatan, pada temperatur yang lebih tinggi maka akan didapatkan gas sebagai hasil dari pemecahan kedua. Karena besarnya cakupan produk banyak keuntungan yang didapatkan dari pirolisis lambat. Efek dari temperatur, laju pemanasan

dan waktu tinggal adalah unsur penting pada pirolisis lambat (Encinar J M et al, 2009) telah meneliti tentang *Jerusalem artichoke pyrolysis Energetic evaluation*. Mereka meneliti tentang pengaruh dari temperatur (400oC–800oC), ukuran dari partikel (0,63–2,00 mm), laju nitrogen (75–300 mL min<sup>-1</sup>), dan massa awal yang digunakan (2,5–10 g). Peningkatan temperatur menyebabkan penurunan untuk hasil padatan dan minyak sedangkan hasil gas meningkat. Penurunan hasil minyak disebabkan karena reaksi minyak sekunder ketika temperatur semakin meningkat. Inilah juga yang menyebabkan hasil gas meningkat disebabkan juga karena reaksi minyak sekunder dari minyak. Dengan peningkatan temperatur mempengaruhi juga peningkatan jumlah karbon dan *ash* sedangkan jumlah volatil menurun. Ketika temperatur meningkat kandungan gas seperti H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub> juga meningkat dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai hasil maksimum ini semakin sedikit. Ketika laju pemanasan meningkat banyaknya gas seperti CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dan lainnya meningkat. Itu menunjukkan bahwa laju pemanasan yang lebih tinggi akan melepaskan gas hidrokarbon. Begitu juga produk minyak meningkat seiring dengan kenaikan laju pemanasan. Temperatur memiliki efek signifikan terhadap hasil produk.

Pada temperatur yang lebih tinggi maka hasil produk akan semakin banyak dan sedikit padatan. Dengan adanya kenaikan temperatur maka akan ada kenaikan energi yang pada akhirnya akan memungkinkan terjadinya reaksi minyak sekunder diluar partikel sehingga akan terjadi

pemisahan minyak menjadi gas dan padatan yang selanjutnya akan menurunkan kadar minyak yang terkandung sehingga menyebabkan penurunan minyak pirolisis dan kenaikan padatan serta gas (Morf, 2001).

Tabel 2.1. Jumlah produk dari reaksi pirolisis dan gasifikasi (Evans, R. 2004)

Kondisi	Produk		
	Minyak	Padatan	Gas
Pirolisis cepat (laju pemanasan >100K/min)	75%	12%	13%
Pirolisis lambat (laju pemanasan <100K/min)	30%	45%	35%
Gasifikasi	5%	10%	85%

## 2. *Flash Pyrolysis*

Kondisi operasi *flash pyrolysis* berada pada temperatur operasi yang tinggi yaitu > 600°C dan laju pemanasan yang tinggi (1000°C/menit). *Flash pyrolysis* ditujukan untuk mendapatkan hasil maksimal pada bahan bakar gas karena pada proses ini, semua komposisi biomassa akan menguap dan produk yang dihasilkan lebih ke gas yang tidak bisa terkondensasi.

### 3. *Fast Pyrolysis*

*Fast pyrolysis* merupakan proses pirolisis pada suhu 425-600°C dengan laju pemanasan yang cepat ( 300-500°C/menit) dimana produk utama adalah *liquid* dominan dan gas.

### 4. Terofaksi

Terofaksi merupakan proses pirolisis pada temperatur 200-300°C dengan laju pemanasan yang lambat (5-7°C/menit) dimana produk utama yang dihasilkan adalah padatan yang kaya akan karbon.

## **E. Parameter yang Berpengaruh Pada Proses Pirolisis**

Parameter utama yang mempengaruhi pirolisis adalah sebagai berikut yaitu :

### 1. Kadar Air

Energi dari luar yang seharusnya digunakan untuk proses pirolisis digunakan sebagian untuk proses pengeringan kadar air dalam maerial. Akibatnya, pada bahan dengan kadar air yang lebih tinggi akan diperoleh padatan yang lebih banyak atau dengan kata lain proses dekomposisi pada bahan dengan kadar air yang tinggi membutuhkan energi yang lebih besar (Chaurasia & Babu. 2004).

### 2. Ukuran Partikel

Efek dari ukuran partikel pada proses pirolisis dari biomasa telah diteliti oleh Chaurasia dan Babu (2004). Hasil dari padatan akan meningkat

sedangkan hasil dari volatil dan gas akan menurun ketika ukuran partikel meningkat. Fenomena ini adalah konsekuensi dari penurunan temperatur pada setiap posisi radial dengan adanya peningkatan pada ukuran partikel. Konsentrasi dari volatil dan gas meningkat sampai dengan nilai tertentu dan kemudian menurun sesuai dengan kenaikan ukuran partikel. Kenaikan signifikan terhadap waktu pirolisis diteliti sebagai peningkatan ukuran partikelnya. Seiring dengan kenaikan ukuran partikel maka waktu yang dibutuhkan untuk proses pirolisis pada temperatur pirolisis tertentu juga akan meningkat.

### 3. Laju Pemanasan

Ketika laju pemanasan dinaikkan maka padatan akan menurun. Produk gas yang dihasilkan pada temperatur antara 200°C dan 400°C adalah CO dan CO<sub>2</sub> sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi konsentrasi yang rendah dari gas hidrokarbon juga diamati. Ketika laju pemanasan meningkat banyaknya gas seperti CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> dan lainnya meningkat. Itu menunjukkan bahwa laju pemanasan yang lebih tinggi akan melepaskan gas hidrokarbon. Begitu juga minyak meningkat seiring dengan kenaikan laju pemanasan (Besler & William, 1996).

### 4. Temperatur

Temperatur memiliki efek penting terhadap hasil produk. Pada temperatur yang lebih tinggi maka hasil gas akan semakin banyak, hasil minyak akan meningkat sampai batas tertentu kemudian menurun, sedangkan hasil

padatan cenderung rendah. Semakin tinggi temperatur nilai kalor untuk hasil gas akan meningkat, untuk hasil padatan cenderung konstan, sedangkan untuk hasil minyak akan semakin menurun. (Encinar, J.M., et al, 2009).

#### 5. Bahan

Aydinli B & Caglar A (2010) telah meneliti tentang kulit kemiri dengan plastik. Dengan peningkatan jumlah plastik didapatkan hasil minyak yang lebih banyak, padatan yang lebih sedikit, dan hasil gas yang cenderung sama.

#### 6. Komposisi Bahan Uji

Dengan penambahan material plastik didalam proses pirolisis menghasilkan suatu peningkatan kandungan hidrogen di dalam hasil minyaknya dibandingkan pada proses pirolisis biomasa tanpa plastik. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi yang berbeda dari bahan yang diperlukan untuk proses pirolisis menghasilkan hasil kandungan komposisi yang berbeda untuk minyaknya (Bhattacharya, P., 2009).

#### 7. Laju Nitrogen

Peningkatan dari laju nitrogen menyebabkan penurunan jumlah minyak dan peningkatan jumlah gas, sedangkan hasil padatan sedikit menurun. (Encinar, J. M. et al. 2009).

#### 8. Waktu Tinggal Padatan

Waktu tinggal padatan mempengaruhi jumlah hasil dari pirolisis karena semakin lama bahan didalam reaktor maka padatan akan semakin terdekomposisi menjadi minyak dan gas. (Encinar, J. M. et al. 2009).

#### 9. Waktu tinggal Volatil

Semakin lama volatil tinggal didalam reaktor maka rantai karbon dari volatil itu akan semakin pendek dan semakin sulit terkondensasi sehingga minyak yang dihasilkan semakin sedikit karena semakin sulit terkondensasi (Encinar, J. M. et al. 2009).

#### 10. Tipe pirolisis

Tipe pirolisis mempengaruhi hasil yang diperoleh dari proses pirolisis. Pirolisis cepat menghasilkan lebih banyak hasil minyak dari pada hasil padatan dan gasnya. Pirolisis lambat menghasilkan hasil minyak, gas, dan padatan yang hampir seimbang (Evans, R., 2004).

### **F. Pengujian Karakteristik Minyak Pirolisis**

#### **1. Viskositas**

Viskositas juga bisa diartikan kemampuan suatu zat untuk mengalir pada suatu media tertentu. Salah satu cara untuk mengukur besarnya nilai viskositas zat cair adalah dengan menggunakan *viskosimeter oswald*. Cara pengukuran dengan cara *viskosimeter oswald* adalah dengan cara

membandingkan dua jenis fluida yaitu *aquadest* dengan zat cair lainnya, masing masing dengan kekentalan  $a$  dan  $x$ , keduanya memiliki volume yang sama dan mengalir melalui pipa yang ukurannya sama. Karena kedua zat alir memiliki volume yang sama tetapi kekentalannya berbeda, maka debit keduanya juga berbeda, misalkan  $Qa$  dan  $Qx$ . Dengan demikian waktu yang diperlukan untuk mengalirkan *aquadest* dan zat cair tersebut dengan volume yang sama juga berbeda, misalkan  $ta$  dan  $tx$ .

$$\eta_x = \frac{tx \cdot \rho_x}{\eta_a} \dots \dots \dots (2.1)$$

Pada penelitian ini viskositas diukur hanya pada kondisi kamar.

Dimana :

$a$  = kekentalan air

$x$  = kekentalan zat cair

$ta$  = waktu alir air

$tx$  = waktu alir zat cair

$a$  = massa jenis air

$x$  = massa jenis zat cair

## 2. Massa jenis

Massa jenis atau densitas adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda. Banyak hubungan antara massa jenis dengan sifat-sifat penting bahan bakar minyak, yaitu:

- a. Untuk pembakaran pada volume tetap;

Nilai kalor atas, Btu/lb = 22 320 – [3 780 x (massa jenis)<sup>2</sup>]

b. Untuk pembakaran pada tekanan tetap;

Nilai kalor bawah, Btu/lb = 19 960 – [3 780 x (massa jenis)<sup>2</sup>] + (1 362 x massa jenis)

c. Persen hidrogen, % = 26 – (15 x massa jenis)

### 3. Nilai kalor

Nilai kalor rendah (LHV, *Lower Heating Value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dalam proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. Pada temperatur ini air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas hasil pembakaran dibuat 25°C maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *High Heating Value*). Pada temperatur ini air akan berada dalam kondisi fasa cair (Bailis, et al, 2007).

Nilai kalor merupakan jumlah energi panas yang terkandung dalam produk hasil pirolisis. Besarnya dari nilai kalor ini sangat bergantung pada kandungan unsur yang ada dalam padatan hasil pirolisis. Nilai kalor padatan dapat dihitung menggunakan persamaan empiris yang dihasilkan oleh Sheng dan Azvedo yaitu (Kricka, 2010).

$$HV = 145C + 610 \left( H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 40S + 10 N \dots\dots(2.2)$$

## G. Mekanisme Pirolisis

Mekanisme biomassa pirolisis tidak bisa dihindari untuk rekayasa proses pirolisis cepat terus menerus layak. Lebih banyak pekerjaan di daerah ini berpusat pada pirolisis cepat karena produk yang terbentuk lebih dekat di alam dengan bahan bakar fosil yang sedang digunakan. Untuk pemahaman mekanisme pirolisis, studi kinetik dilakukan pada pirolisis selulosa. Namun, hasil yang diperoleh tampak konsisten dengan yang diperoleh dalam proses yang melibatkan kayu dan bentuk lain dari biomassa.

Biomassa secara langsung dan tampak terpengaruh hasil proses pirolisis. Misalnya, warna perubahan biomassa dari putih menjadi coklat sampai hitam. Ukuran dan berat berkurang sementara fleksibilitas dan kekuatan mekanik yang hilang. Pada suhu sekitar 350°C, penurunan berat bahan mencapai sekitar 80% dan biomassa yang tersisa diubah ke char. Pemanasan berkepanjangan atau paparan suhu sekitar 600°C mengurangi fraksi char sekitar 9% dari berat biomassa asli. Reaksi pirolisis primer yang baik dehidrasi atau fragmentasi reaksi. Setelah itu, beberapa produk yang akan diproduksi.

### a. Dehidrasi

Dehidrasi, yang dominan pada suhu rendah, adalah utama dari dua reaksi selama pirolisis lambat. Reaksi-reaksi ini berlangsung di bawah 300°C

dan mengakibatkan pengurangan berat molekul biomassa, evolusi air, CO, CO<sub>2</sub> dan, char.

b. Fragmentasi

Fragmentasi mendominasi pada suhu di atas 300°C. Ini melibatkan depolimerisasi biomassa untuk anhydro-glukosa senyawa dan volatil mudah terbakar ringan lainnya. Karena rentang temperatur yang terlibat, fragmentasi adalah kepentingan yang lebih besar dalam proses flash dan pirolisis cepat.

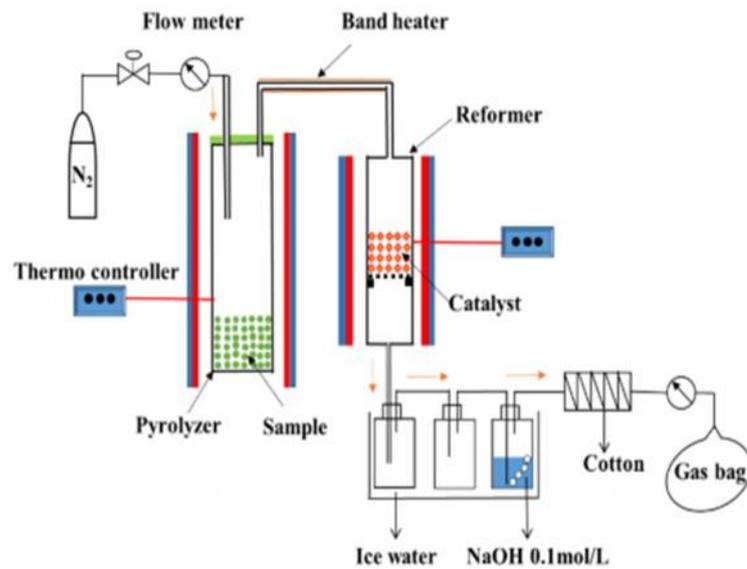
c. Pembentukan Produk

Biomassa adalah kompleks dan heterogen, dan informasi yang diketahui tentang hal itu sering terbatas pada spesimen yang digunakan, stabil akhir-produk dan bagaimana beberapa produk ini tergantung pada perawatan pirolitik. Produk akhir dapat dibagi menjadi tiga kategori produk yaitu volatile berat molekul di bawah 105, seperti CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Acetol, furfural dan aldehida tak jenuh ter berat molekul yang lebih tinggi dan karakter.

## **H. Pirolisis Bertingkat**

Pirolisis bertingkat merupakan proses pirolisis yang terjadi secara bergantian dengan dua kali perengkahan yaitu perengkahan secara thermal dan berkatalis. Dua tahapan gabungan pirolisis dan proses reformasi katalis, pada

tahapan pertama terjadi proses perengkahan di reactor *piroliser* dan selanjutnya gas hasil piroliser di alirkan melewati katalis. Pada katalis inilah terjadi perengkahan kedua yang sering disebut *catalytic cracking*. pirolisis yang telah dilakukan menggunakan limbah elektrik dan elektronik (WEEE) menggunakan katalis zeolite memiliki kekurangan seperti banyaknya kotoran dan kokas di produksi pada katalis akan dengan mudah menonaktifkan sisi aktif katalis, yang jika digunakan secara komersil akan meningkatkan jumlah penggunaan katalis dan biaya operasional (Wu, H. 2015).



Gambar 2.3 Diagram Skematik Pirolisis Bertingkat

## I. Katalis Pirolisis

Katalis merupakan suatu senyawa yang dapat meningkatkan laju reaksi tetapi tidak dikonsumsi oleh reaksi. Katalis digunakan secara luas baik di alam, laboratorium dan industri. (Shriver, D. & Atkins, P., 1999 ). Katalis dalam proses pirolisis merupakan material pendukung yang ditambahkan ke dalam

proses pirolisis dan memainkan peranan penting dalam reaksi dan secara luas telah digunakan dalam proses pirolisis limbah. Secara umum katalis digunakan untuk meningkatkan laju dekomposisi atau laju reaksi dan meningkatkan energi aktivasi, meningkatkan hasil dan kualitas produk serta meningkatkan efisiensi termal tanpa mengkonsumsi atau merubah dirinya selama proses reaksi berlangsung. Namun, aspek yang lebih penting adalah daya selektivitas bentuk yang ditunjukkan oleh beberapa katalis berpori, memungkinkan proses pirolisis diarahkan pada produk hidrokarbon yang diinginkan (J. Aguado., et al, 2007)

Kekuatan asam dan tekstur dari sebuah katalis padat merupakan parameter kunci dalam memutus rantai hidrokarbon panjang menjadi rantai pendek meskipun faktor lain seperti stabilitas termal, kemampuan terhadap penghambat dan biaya perlu dipertimbangkan. Karakter asam pada padatan katalis tersebut terutama berasal dari ketidak seimbangan muatan yang dihasilkan karena penggabungan aluminium ke dalam kerangka silika. Porositas, karakteristik area permukaan, ukuran partikel menentukan daya akses molekul polimer ke tempat asam internal katalis. Dengan demikian, katalis dengan kadar keasaman yang tinggi menunjukkan pori-pori yang lebih besar atau permukaan eksternal yang luas (Serrano D.P., et al, 2004). Dengan demikian, rasio Si/Al sangat menentukan tingkat keasaman dalam pori katalis padat dan memberikan pengaruh yang berbeda terhadap produk hasil pirolisis. Rasio Si/Al yang rendah akan memberikan tingkat keasaman yang tinggi dan memberikan hasil yang signifikan pada produk pirolisis (J.L.

Wang., et al, 2011). Hasil yang sama juga didapat oleh N. Borsodi., et al, 2011. Penggunaan katalis -Zeolit dan  $\text{MoO}_3$  akan menurunkan produk BO dan meningkatkan produk syngas (Norbert Miskolczi., et al, 2013).

Karenanya penggunaan katalis alam yang mengandung silica dan alumina sangat layak dipertimbangkan namun perlu dilakukan proses modifikasi struktur dengan teknik aktivasi terhadap katalis baik secara fisik, kimia maupun termal agar kemampuan rengkah meningkat. Katalis yang berada pada fase yang sama (liquid) dengan reaktan disebut sebagai katalis homogen. Sedangkan katalis yang berada pada fase yang berbeda dengan reaktannya (dapat berupa padatan, cairan yang tidak dapat bercampur ataupun gas) disebut sebagai katalis heterogen (Helwani, Z. 2009).

### **1. Katalis Homogen**

Katalis homogen terdiri atas dua jenis yaitu katalis asam homogen dan katalis basa homogen. Katalis yang umum digunakan dalam reaksi transesterifikasi yaitu KOH dan NaOH. Penggunaan katalis ini menimbulkan masalah pada proses pemisahan produk reaksi sehingga menghasilkan limbah pencucian dalam jumlah yang besar. Di samping itu, katalis basa bekerja dengan baik pada batas asam lemak bebas (ALB)  $< 0,5\%$ . Jika bahan baku mengandung ALB tinggi, akan terjadi reaksi antara katalis dengan asam lemak bebas membentuk sabun. (Shu, 2010). Katalis asam homogen yang digunakan dalam reaksi transesterifikasi misalnya  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HCl, dan  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Akan tetapi penggunaan katalis ini

memerlukan waktu reaksi yang lama, menyebabkan korosi pada reaktor yang digunakan, rasio molar alkohol dengan minyak harus besar serta memerlukan suhu yang tinggi (Helwani, 2009).

## 2. Katalis Heterogen

Katalis heterogen terdiri atas dua jenis yaitu katalis heterogen yang bersifat asam dan katalis heterogen yang bersifat basa. Beberapa katalis heterogen telah disintesis baik yang bersifat asam maupun basa. Katalis basa heterogen yang paling umum digunakan adalah senyawa oksida logam seperti logam alkali, alkali tanah sebagai katalis transesterifikasi minyak nabati. Oksida logam alkali tanah (MgO, CaO, SrO, dan BaO) dikenal sebagai oksida logam tunggal (*single metal oxides*) (Endalew, A., 2011).

Veljkovic (2009) telah menggunakan CaO pada reaksi transesterifikasi minyak bunga matahari dengan yield 98%. Katalis basa heterogen juga dapat berupa pencampuran atau pendopingan oksida logam untuk meningkatkan kebasaannya seperti logam Na, Li, dan K yang didoping pada CaO, MgO dan BaO pada reaksi transesterifikasi minyak lobak dengan yield 96,7% (D'Cruz, 2007) dan oksida campuran antara Na, Li, dan La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untuk transesterifikasi minyak kacang tanah menghasilkan metil ester asam lemak dengan yield > 99% (Singh dan Fernando, 2009). Selain katalis basa heterogen, katalis asam heterogen juga telah banyak digunakan untuk mengkatalisis reaksi transesterifikasi.

Drelinkiewicz, A (2014) telah mensintesis asam polianilin sulfonat sebagai katalis transesterifikasi dan esterifikasi menghasilkan biodiesel yang menunjukkan kereaktifan dan kestabilan katalis yang tinggi (Drelinkiewicz, A.,2014).Garcia, C (2008) telah berhasil menggunakan zirkonium sulfat sebagai katalis transesterifikasi minyak kacang kedelai dengan metanol dan etanol dengan yield 98,6% (metanolisis) dan 92% (etanolisis). Katalis senyawa karbon dengan basis sulfonat menjadi katalis yang paling diminati saat ini karena memiliki gugus  $-SO_3H$  dengan kerangka karbon yang stabil sehingga mudah dipisahkan dari sistem reaksi (Kang, S., 2013).

Katalis heterogen memiliki keuntungan dibandingkan dengan katalis homogen yaitu mudah dipisahkan dari produk reaksi, lebih tahan terhadap asam lemak bebas yang terkandung di dalam bahan baku tanpa melalui reaksi saponifikasi sehingga memungkinkan untuk melakukan reaksi transesterifikasi dan esterifikasi sekaligus dengan bahan baku yang mengandung kadar asam lemak bebas yang tinggi, baik bahan baku yang berasal dari hewan maupun yang berasal dari tumbuhan. (Drelinkiewicz, A., 2014).

### **3. Katalis Enzim**

Reaksi transesterifikasi secara enzimatis mencegah terbentuknya sabun, reaksi terjadi pada pH netral, suhu reaksi yang lebih rendah sehingga lebih bersifat ekonomis. Beberapa metode secara enzimatis bertujuan

untuk memecah ikatan kovalen, ikatan silang (cross linking) dan enkapsulasi mikro. Lipase merupakan enzim yang paling banyak digunakan pada reaksi transesterifikasi, karena harganya lebih murah dibandingkan dengan enzim yang lain dan mampu mengkatalisis baik reaksi hidrolisis maupun transesterifikasi trigliserida dalam kondisi biasa untuk menghasilkan biodiesel (Semwal, S., 2010).

Macario (2009) telah melakukan enkapsulasi enzim lipase (*Rhizomucor miehe* lipase). Enzim tersebut dienkapsulasi di dalam fase micellar dari surfaktan yang mengandung silika. Biokatalis yang dienkapsulasi telah digunakan untuk reaksi *transesterifikasitriolein* dengan metanol dalam kondisi bebas pelarut. Metil ester asam lemak yang dihasilkan dengan yield 77% dengan waktu reaksi selama 96 jam dan suhu 40°C (Macario, 2009). Penggunaan katalis enzim dalam reaksi transesterifikasi memiliki permasalahan yaitu selain harga enzim yang mahal juga adanya asam lemak bebas pada bahan baku yang bereaksi dengan alkohol rantai pendek (seperti metanol dan etanol) menyebabkan enzim terdenaturasi. Gliserol sebagai salah satu produk reaksi, memberi efek negatif pada enzim yang digunakan (Lou, 2008).

## **J. Karakterisasi Katalis**

Secara garis besar, teknik karakterisasi katalis dapat dibagi menjadi beberapa macam berdasarkan sifat-sifat yang akan diteliti, antara lain sifat-sifat

partikelnya, meliputi luas permukaan (surface area), porositas atau distribusi ukuran pori, penentuan keasaman, serta penentuan rasio Si/Al.

**a. Luas Permukaan (*Surface Area*)**

Kemampuan suatu padatan sebagai katalis merupakan sifat yang penting dalam pori dan luas permukaan yang merujuk pada struktur pori partikel. Secara umum meliputi luas permukaan, distribusi ukuran pori, dan bentuk pori. Dari beberapa sifat zeolit sebagai katalis dalam bentuk padat, luas permukaan yang dimiliki merupakan parameter yang paling penting kaitannya dengan permukaan katalis di dalam katalis heterogen. Luas permukaan total merupakan kriteria krusial untuk katalis padat karena sangat menentukan jumlah situs aktif di dalam katalis kaitannya dengan aktifitas katalis.

**b. Distribusi Ukuran Pori (*pore size distribution*)**

Merupakan parameter penting didalam karakterisasi katalis. Sifat-sifat pori dalam katalis pada kenyataannya sangat mengendalikan fenomena perpindahandan berhubungan sekali dengan selektifitas didalam reaksi katalitik. Sifat-sifat pori seperti volume pori dan distribusi ukuran pori selanjutnya menjadi parameter penting terutama untuk katalis yang bersifat selektif terhadap bentuk dan ukuran pori (*shape selective catalysis*). Metode penjerapan gas biasanya digunakan untuk mengkarakterisasi material berpori yang berukuran mesopori (diameter 2-50 nm) dan mikro pori (diameter < 2 nm).

**c. Keasaman Sampel (Katalis)**

Keasaman merupakan salah satu karakter penting dalam suatu padatan yang digunakan sebagai katalis heterogen. Pada teori asam basa Bronstead, asam adalah zat yang memiliki kecenderungan untuk melepaskan proton ( $H^+$ ), sehingga keasaman suatu padatan didefinisikan sebagai kemampuan suatu padatan untuk memberikan proton. Teori Lewis menyatakan bahwa asam suatu zat padatan didefinisikan sebagai kemampuan suatu padatan untuk menerima pasangan elektron. Perhitungan pusat asam pada permukaan padatan berkenaan dengan teori asam Bronstead dan Lewis diatas, yaitu jumlah gugusan asam Bronstead (proton) dan asam Lewis (orbital kosong yang mampu menerima pasangan elektron) yang terdapat pada permukaan padatan. Penentuan keasaman total suatu padatan dapat dilakukan dengan caragravi metri, yaitu penimbangan berdasarkan selisih berat antara berat padatan yang telah mengadsorpsi basa dengan berat padatan sebelum mengadsorpsi basa, sehingga dapat dihitung jumlah asamnya (Setyawan, 2001).

**d. Rasio Si/Al**

Rasio Si/Al zeolit merupakan salah satu penentu sifat dan struktur zeolit, keasaman, stabilitas termal, maupun aktivitas dalam reaksi katalitik. Dengan kenaikan rasio Si/Al memberikan beberapa pengaruh diantaranya:

1. Meningkatkan stabilitas zeolit pada temperatur tinggi dan suasana asam.
2. Menimbulkan perubahan medan elektrostatis pada zeolit yang mengakibatkan perubahan interaksi dengan molekul lain.
3. Meningkatkan kekuatan asam dari situs asam Bronstead
4. Menurunkan konsentrasi kation karena konsentrasi kation merupakan fungsi kandungan Al dalam zeolit. Rasio Si/Al dapat diukur dengan menggunakan metode SSA (Spektroskopi Serapan Atom).

## **K. Kinerja Katalis**

Kinerja dari suatu katalis memiliki daerah temperatur operasi antara  $20^{\circ}\text{C}$  hingga  $500^{\circ}\text{C}$ . Jika diberikan temperatur kurang dari temperatur batas bawah  $20^{\circ}\text{C}$  maka reaksi katalitik akan berjalan sangat lambat dan lebih mahal (tidak ekonomis) karena membutuhkan energi untuk meningkatkan probabilitas terjadinya tumbukan. Sebaliknya jika temperatur di atas  $500^{\circ}\text{C}$  maka selektivitas produk reaksi relatif sangat sulit dicapai, kecuali jika produk yang dihasilkan sangat stabil (Satterfield, 1980). Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan suatu katalis adalah aktivitas, selektivitas, waktu pakai katalis, kemampuan untuk dapat diregenerasi.

### **a. Aktivitas**

Aktivitas katalis adalah kemampuan katalis atau senyawa kimia untuk mengkatalisis reaksi kimia guna mencapai keadaan setimbang. Aktivitas

katalis biasanya dinyatakan dalam persentase konversi atau jumlah produk yang dihasilkan dari (jumlah) reaktan digunakan dalam waktu reaksi tertentu. Aktivitas katalis sangat bergantung pada sifat kimia katalis, disamping luas permukaan dan distribusi pori katalis.

**b. Selektivitas katalis**

Kemampuan suatu katalis untuk menyokong satu atau beberapa macam produk yang dikehendaki dari keseluruhan macam produk yang mungkin dapat terjadi. Kualitas katalis menentukan selektivitasnya terhadap produk yang diinginkan. Selektivitas katalis sangat bergantung pada tekanan, temperatur reaksi, komposisi reaktan, luas permukaan dan distribusi ukuran pori serta macam reaksi. Penggunaan katalis mungkin hanya diperlukan aktivitasnya saja atau mungkin selektivitasnya saja atau keduanya. Aktivitas katalis biasanya akan menurun dengan meningkatnya temperatur, dan peningkatan temperatur juga akan berakibat memperpendek waktu pakai (*lifetime*) katalis. Jika secara termodinamika produk sangat bervariasi maka peningkatan temperatur sistem dapat menyebabkan meningkat atau menurunnya selektivitas katalis, bergantung pada keseluruhan kinetik dan produk yang diinginkan. Dengan demikian selektivitas dapat dikontrol melalui kondisi temperatur sistem.

**c. Waktu Pakai**

Aktivitas suatu katalis sangat berkaitan erat dengan kondisi waktu pakai

katalis yang meliputi temperatur, tekanan, macam reaktan (*feed*) yang digunakan dan frekuensi penggunaan katalis. Waktu pakai katalis dapat dijelaskan sebagai kemampuan katalis untuk dapat digunakan dalam waktu proses yang sama dalam satu *batch*. Beberapa penyebab penurunan kemampuan waktu pakai katalis adalah sebagai berikut:

### **1. Terjadinya Peracunan Katalis (*poisoning*)**

Peracunan katalis terjadi karena terdapat beberapa unsur tertentu dalam senyawa yang diumpankan kedalam reaktor teradsorpsi dengan mudah secara kimia kepermukaan katalis sehingga menutupi situs aktif katalis dalam melakukan fungsinya.

### **2. Terjadinya pengotoran (*fouling*)**

Pada permukaan katalis Pengotoran pada permukaan katalis terjadi karena adanya sejumlah besar material (pengotor) yang mengendap dan teradsorpsi secara fisik maupun kimia pada permukaan katalis sehingga akan mengurangi luas permukaan katalis. Keadaan ini terjadi karena adanya reaksi-reaksi samping yang menghasilkan pengotor (*foulant*), seperti terjadinya pengendapan senyawa-senyawa karbon yang terbentuk selama proses perengkahan (*cracking*).

### **3. Terjadinya Penggumpalan (*Sintering*)**

Penggumpalan pada sistem katalis logam pengemban diakibatkan karena terjadinya kerusakan struktur pengemban yang disebabkan

temperatur operasi yang terlalutinggi. Penggumpalan tersebut akan mengurangi luas permukaan kontak, dengan demikian aktivitas katalis menurun.

## **L. Reaksi *Cracking***

Reaksi *cracking* adalah proses pemutusan senyawa hidrokarbon dengan berat molekul tinggi menjadi senyawa dengan berat molekul lebih rendah melalui pemutusan ikatan rantai karbon (C–C). *Cracking* dalam proses pengolahan minyak bumi merupakan proses yang penting dalam produksi *gasoline*. Reaksi *cracking* dibedakan menjadi 2 yaitu *thermal cracking* dan *catalytic cracking*.

### **1. *Thermal cracking***

*Thermal cracking* atau pirolisis adalah reaksi pemutusan ikatan senyawa hidrokarbon karena pengaruh termal (suhu tinggi). Mekanisme reaksi *thermal cracking* melalui pembentukan radikal bebas dalam membentuk produk akhir. Secara kimiawi pirolisis sangat sulit dikarakterisasi karena jenis reaksi yang terjadi dan jenis produk reaksi yang mungkin diperoleh dari reaksi yang terjadi. Pada perengkahan termal metil ester melalui mekanisme radikal bebas terjadi pemutusan ikatan rantai hidrokarbon yang menghasilkan molekul-molekul hidrokarbon lebih rendah (*Schwab et. al, 1988 dalam Ma, 199*).

## 2. *Catalytic Cracking*

Reaksi *catalytic cracking* adalah reaksi perengkahan (*cracking*) menggunakan material katalis (katalis heterogen) sebagai material yang mampu mempercepat laju reaksi untuk mencapai kesetimbang dan dalam menghasilkan produk akhir reaksi melalui mekanisme pembentukan ion karbonium. Pada prinsipnya perengkahan katalitik merupakan perengkahan termal yang dihadirkan suatu katalis ke dalam reaksinya. Karbokation akan sangat mudah terbentuk apabila reaksi berlangsung pada suhu tinggi.

## 3. *Hydrocracking*

*Hydrocracking* merupakan proses reaksi pemutusan ikatan rantai karbon fraksi tinggi menjadi ikatan rantai karbon fraksi rendah dengan menggunakan hidrogen sebagai umpan (*feed*) tambahan. Pada prakteknya reaksi *hydrocracking* dapat menggunakan katalis maupun tanpa katalis dalam reaksinya. Penggunaan hidrogen dapat diperuntukkan untuk proses deoksigenasi dalam prosesnya. Katalis yang banyak digunakan dalam *hydrocracking* adalah zeolit dengan pori besar (meso-pori) yang diimpregnasikan logam aktif seperti Pt, Pd, Ni, Co-Mo, Ni-Mo. Biasanya proses dilangsungkan pada temperatur 270-450<sup>0</sup>C. Katalis logam-pengemban memberikan keuntungan seperti luas permukaan yang besar dan stabil terhadap pemanasan serta bernilai ekonomi tinggi. Salah satu pengemban yang banyak digunakan adalah zeolit. Zeolit sebagai katalis hidrogenasi mempunyai keasaman tinggi

yang dapat ditingkatkan dengan modifikasi dan pengembangan logam-logam transisi yang memiliki orbital d terisi sebagian, seperti nikel.

Hidro rengkah dengan sistem *flow* sering digunakan untuk proses termal dan katalitik. Umpam dan katalis ditempatkan secara terpisah pada reaktor kemudian bersama-sama dipanaskan serta gas dialirkan dengan kecepatan tertentu dimana gas sebagai pembawa umpam dan uap yang dihasilkan diembunkan dengan alat pendingin. Gas yang sering digunakan dalam proses perengkahan ini antara lain Hidrogen dan Nitrogen. Perengkahan dengan adanya gas H<sub>2</sub> disebut hidro rengkah (*hydrocracking*). Fungsi utama yang lain dari hidrogen dalam reaksi *hydrocracking* adalah untuk mencegah deaktivasi katalis melalui hidrogenasi prekursor pembentukan kokas.

#### **M. Aluminium Oksida**

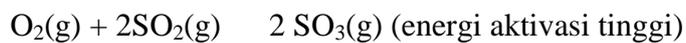
Aluminium oxide (alumina) adalah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen, dengan rumus kimia Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Alumina banyak digunakan untuk penyangga katalis pada industri katalis, seperti yang digunakan dalam hidrodessulfurisasi karena alumina cenderung multifase yang sering disebut corundum. Secara umum alumina ditemukan dalam tiga fasa, yang dikenal sebagai  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan alumina. Ketiga fasa di atas diketahui memiliki sifat-sifat yang berbeda, sehingga memiliki aplikasi yang khas (unik). Beta alumina ( $\beta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) memiliki sifat tahan api yang sangat baik sehingga dapat

digunakan dalam berbagai aplikasi keramik seperti pembuatan tungku furnace. Gamma alumina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) banyak digunakan sebagai material katalis, contohnya dalam penyulingan minyak bumi (Knozinger and Ratnasamy, 1978) Alfa alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) banyak digunakan sebagai salah satu bahan refraktori dari kelompok oksida, karena bahan tersebut mempunyai sifat fisik, mekanik dan termal yang sangat baik .

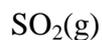
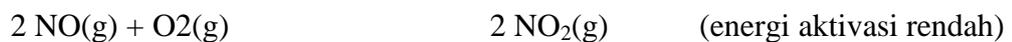
#### N. Hubungan antara Katalis dengan Energi Aktivasi

Dalam suatu reaksi, peran katalis adalah untuk menurunkan energi aktivasi dengan jalan mengubah mekanisme reaksi, yaitu dengan jalan menambah tahap-tahap reaksi. Katalis ikut serta dalam suatu tahap reaksi, akan tetapi pada akhir reaksi katalis terbentuk kembali (James E. Brady, 1990).

Contoh :



Setelah ditambahkan gas NO yang bertindak sebagai katalis, tahap-tahap reaksi menjadi :




---

Ni(s)



Dengan adanya katalis ini, energi aktivasi menjadi lebih rendah, sehingga persentase partikel yang mempunyai energi lebih besar dari energi aktivasi.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Pengambilan data penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika Teknik Mesin Universitas Lampung. Adapun untuk pengambilan sampel sampah padat perkotaan (*Municipal Solid Waste*) yang akan digunakan dalam pengujian berasal dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bakung yang ada di Bandar Lampung. Adapun waktu pelaksanaan penelitian ini dimulai tanggal Maret 2017 sampai dengan Agustus 2017.

#### B. Tahapan Penelitian

Berikut merupakan jadwal tahapan kegiatan penelitian yang tersusun dibawah ini :

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan	Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1 Studi Literatur	■	■	■	■												
2 Pengolahan				■	■	■	■									
3 Persiapan Alat					■	■	■	■								
4 Pengujian									■	■	■	■				
5 Analisis Data													■	■	■	■

## 1. Studi Literatur

Pada penelitian ini dilakukan studi literatur mengenai material biomassa (sampah padat perkotaan), teknologi konversi biomassa, metode pirolisis, dan katalis pada proses *catalytic cracking*.

## 2. Pengolahan Sampel Uji

Sampel uji untuk bahan penelitian diambil dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bakung yang berlokasi di kecamatan Teluk Betung Barat Kota Bandar Lampung. Kemudian sampel uji dipisahkan dan dihitung kadar airnya, katalis tidak tercampur dengan sampel uji melainkan terpisah menggunakan reaktor sendiri. Partikel katalis sebesar biji jagung

## 3. Persiapan Alat

Persiapan alat pirolisis dan instalasinya.

## 4. Pengujian

Pengujian dilakukan berdasarkan proses pengujian dengan variasi jenis katalis dan rasio perbandingan takaran sampah dengan katalis.

## 5. Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengujian pirolisis digunakan sebagai dasar untuk analisis laju reaksi dan analisis jumlah produk. Analisis Laboratorium akan digunakan sebagai dasar untuk mengetahui karakteristik *bio-oil* hasil pirolisis berkatalis alam sampah padat perkotaan.

## 6. Penulisan Laporan

Penulisan Laporan adalah tahap akhir dari penelitian ini.

### C. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut :

#### 1. Alat

Alat-alat yang digunakan dalam proses pirolisis adalah sebagai berikut:

##### a. Reaktor

Reaktor digunakan sebagai tempat terjadinya proses pirolisis. Reaktor terdiri dari sebuah tabung, tutup tabung, *thermocouple* dan pipa *output*. Tabung reaktor berfungsi sebagai tempat penampungan material uji yang akan dipirolisis. Tutup tabung berfungsi sebagai tutup yang memungkinkan tidak terjadinya pertukaran udara didalam tabung. *Thermocouple* berfungsi sebagai pembaca temperature di dalam tabung pirolisis selama proses berlangsung. Pipa *output* berfungsi sebagai saluran keluar uap hasil pirolisis yang akan menuju kondensor. Adapun material yang digunakan yaitu baja stainlis stell berdiameter dalam 16 cm dengan tebal 3 mm dan mampu menampung kapasitas sampah campuran  $\pm 0,5$  Kg.



Gambar 3.1 Reaktor

b. Pemanas (*Heater*)

Pemanas berfungsi sebagai sumber panas untuk memanaskan reaktor. Transfer energi pada pemanas terjadi dalam tahapan pembangkitan energi panas oleh element pemanas yang energinya disuplai dari energi listrik dengan daya 6000 Watt. Pemanas yang dibuat dapat mensuplai kapasitas pemanasan mencapai 1000 °C.



Gambar 3.2 Pemanas

c. Kondensor

Kondensor merupakan bagian dari alat pirolisis yang terdiri dari pipa tembaga, bak penampung air dan air. Kondensor berfungsi sebagai alat perubah fasa (separator) pada proses pirolisis dengan cara merubah fasa

uap hasil pirolisis dalam reaktor menjadi fasa cair dan fasa untuk zat-zat yang tidak dapat terkondensasi.



Gambar 3.3 Kondensor

d. Tabung Sampel Uji

Tabung sampel uji digunakan sebagai wadah produk pirolisis dan untuk mengetahui jumlah produk yang dihasilkan.



Gambar 3.4 Tabung sampel uji

e. Kran ¼ Inchi

Katup digunakan sebagai katup pemisah antara pipa keluaran uap pada tabung reaktor dengan kondensor, sehingga pada saat temperatur kondensasi belum mencapai temperatur yang diinginkan uap di dalam tabung reaktor tidak keluar.



Gambar 3.5 Kran  $\frac{1}{4}$  inchi

f. *Thermocouple*

Dalam pengambilan data, *thermocouple* ini digunakan untuk mengukur temperatur masuk dan temperatur keluaran pada kondensor serta mengukur temperatur akhir pada air pendingin.



Gambar 3.6 *Thermocouple*

g. Timbangan Digital

Timbangan pada penelitian ini digunakan untuk mengukur berat dari bahan sampah yang digunakan untuk proses pirolisis, mengukur rasio katalis, serta untuk menimbang *bio-oil* hasil kondensasi.



Gambar 3.7 Timbangan digital

h. Sarung Tangan

Sarung tangan digunakan untuk peralatan keamanan operator saat melakukan pengambilan data.



Gambar 3.8 Sarung tangan

i. Masker

Masker digunakan untuk keamanan operator dari gas-gas berbahaya hasil pirolisis.



Gambar 3.9 Masker

j. Gas Nitrogen ( $N_2$ )

Gas nitrogen digunakan untuk menghilangkan kandungan  $O_2$  yang berada di dalam reaktor



Gambar 3.10 Gas nitrogen ( $N_2$ )

k. Unit Katalizer

Unit katalizer digunakan untuk tempat katalis dan sekaligus proses degradasi material sampah oleh katalis.



Gambar 3.11 Unit Katalizer

2. Bahan

Adapun bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampah kota Bandar Lampung yang berada di tempat pembuangan akhir sampah (TPA) Bakung, Teluk Betung Barat. Bahan baku yang dijadikan sampel diambil dari satu truk sampah kota Dinas Kebersihan dan pertamanan (DISBERTAM) Kota Bandar Lampung. Sampah tersebut tersusun dari berbagai jenis sampah baik itu sampah organik maupun anorganik. ; Sampah kemudian di pisah sesuai jenisnya, pada kesempatan ini sampah disortir sesuai 5 bidang kategori yaitu sampah, sampah karet, sampah tekstil, sampah kertas, dan sampah plastik. Untuk lebih jelas tentang bahan–bahan yang digunakan dapat dilihat deskripsi sebagai berikut :

a. Sampah Organik

Sampah organik yang dimaksudkan dalam kategori ini yaitu berupa sayuran, daun, sisa makanan dan sampah daun-daunan maupun ranting.

Sampah seperti ini sering dijumpai di pasar tradisional, rumah tangga maupun lingkungan sekitar. Sedangkan kayu dan ranting juga dapat ditemukan di lingkungan sekitar. Sampah ini merupakan limbah biomassa yang banyak mengandung energi dalam ikatan kimia. Limbah ini tentunya sangat baik dimanfaatkan karena banyak peneliti yang melakukan riset mengenai sampah jenis ini. Selain itu ketersediannya yang berlimpah juga menjadi alasan untuk dimanfaatkan menjadi bahan bakar alternatif. Sehingga dapat memberikan dampak positif dalam penanganan sampah.



Gambar 3.12 Sampah organik

#### b. Sampah Plastik

Plastik merupakan bahan yang banyak digunakan untuk keperluan sehari-hari. Ketika plastik sudah tidak digunakan lagi, maka akan dibuang oleh penggunanya. Plastik sendiri terdiri dari berbagai jenis yaitu *Low Density Poly Ethylene (LDPE)*, *Poly Propylene (PP)*, *High Density Poly Ethylene (HDPE)*, *Poly Vinyl Chloride (PVC)*, *Poly Ethylene Terephthalate (PET)*, *Polyethylene (PE)*, *Polystyrene (PS)*, *Acrylonitrile*

Butadiene styrene (ABS) dan Styrofoam. Dalam tumpukan sampah berbagai jenis plastik tersebut dapat dengan mudah kita jumpai.

Akan tetapi ada beberapa jenis plastik yang diambil oleh para pemulung seperti *Poly Propylene* (PP), *Poly Vinyl Chloride* (PVC), dan *Poly Ethylene Terephthalate* (PET), sehingga tidak semua jenis plastik yang ada bisa dijumpai di tempat pembuangan akhir (TPA) bakung, hanya 2 jenis plastik yang mendominasi yaitu plastik jenis Low Density Polyethylene (LDPE) dan High Density Polyethylene (HDPE) dikarenakan plastik jenis ini tidak dipungut oleh pemulung. Dari plastik yang tersisa di TPA ini tersimpan kandungan C dan H yang bisa dikonversikan menjadi bahan bakar. Berbagai jenis plastik ini akan dicampur sesuai dengan kondisi *real* sampah, untuk melihat pengaruh produk *bio-oil*.



Gambar 3.13 Sampah plastik

#### c. Kertas

Kertas merupakan suatu bahan tipis yang dihasilkan dari kompresi serat yang berasal dari pulp. Serat yang digunakan adalah serat alami dan mengandung selulosa dan hemiselulosa. Kandungan tersebut didapat dari

kayu terdiri dari 50% selulosa, 30% lignin dan bahan bersifat adhesif di lamella tengah, 20% karbohidrat berupa xylan, resin dan tannin. Kertas biasanya digunakan sebagai alat media tulis dan pembungkus. Sedangkan setelah penggunaannya, kertas hanya dibuang oleh konsumen. Kertas masih mengandung selulosa dan hemiselulosa yang dapat dikonversikan menjadi energi lain sehingga limbah kertas masih dapat dimanfaatkan.



Gambar 3.14 Sampah kertas

d. Karet

Sampah karet merupakan salah satu jenis sampah yang masuk dalam kategori Polistyrene (PS). Sampah jenis ini biasanya banyak dijumpai dalam bentuk ban bekas. Karet ban ini diproduksi dari hidrokarbon minyak bumi yang diturunkan, sehingga sampah jenis ini juga potensial apabila dikonversikan menjadi bahan bakar cair.



Gambar 3.15 Ban bekas

e. Tekstil

Tekstil adalah material fleksibel yang terbuat dari tenunan benang. Tekstil dibentuk dengan cara penyulaman, penjahitan, pengikatan, dan cara *pressing*. Istilah tekstil dalam pemakaiannya sehari-hari sering disamakan dengan istilah kain. Tekstil/kain digunakan untuk keperluan sandang oleh manusia. tekstil terbuat dari serat alam yang tersusun oleh selulosa, hemiselulosa sehingga bisa dikonversikan kedalam bahan bakar.



Gambar 3.16 Tekstil

f. Katalis

Katalis digunakan sebagai bahan zat aditif pada *catalytic cracking* dengan tujuan untuk mempercepat laju reaksi, meningkatkan kuantitas *bio-oil*, dan memperbaiki fraksi *bio-oil*. Katalis yang digunakan yaitu katalis alam yang berjumlah 3 jenis, yaitu kaolin atau yang sering dikenal tanah liat yang berasal dari daerah Ambara, Pringsewu, Lampung dan zeolit alam lampung yang berasal dari daerah penambangan di Sidomulyo, Lampung Selatan dan Dolomit. Sebelum digunakan, katalis ini diaktivasi secara termal pada temperatur 500°C.

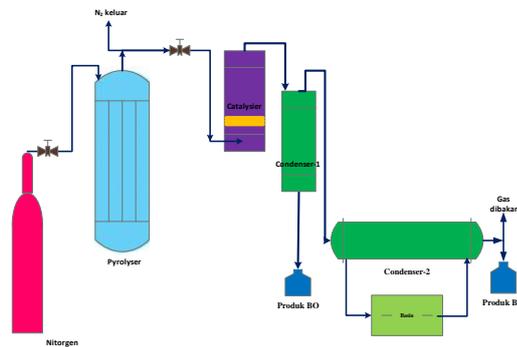


- Keterangan :
1. Zeolit
  2. Kaolin
  3. Dolomit

Gambar 3.17 Katalis

#### D. Instalasi pengujian pirolisis berkatalis alam

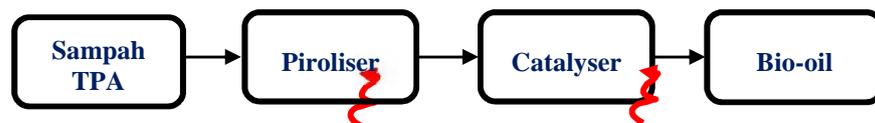
Adapun instalasi pengujian pirolisis adalah sebagai berikut:



Gambar 3.18 Unit Pirolisis

#### E. Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data dengan menggunakan metode two step pyrolysis. Dimana melakukan dua kali *cracking*, yaitu *Thermal Cracking* dan *Catalytic Cracking*.

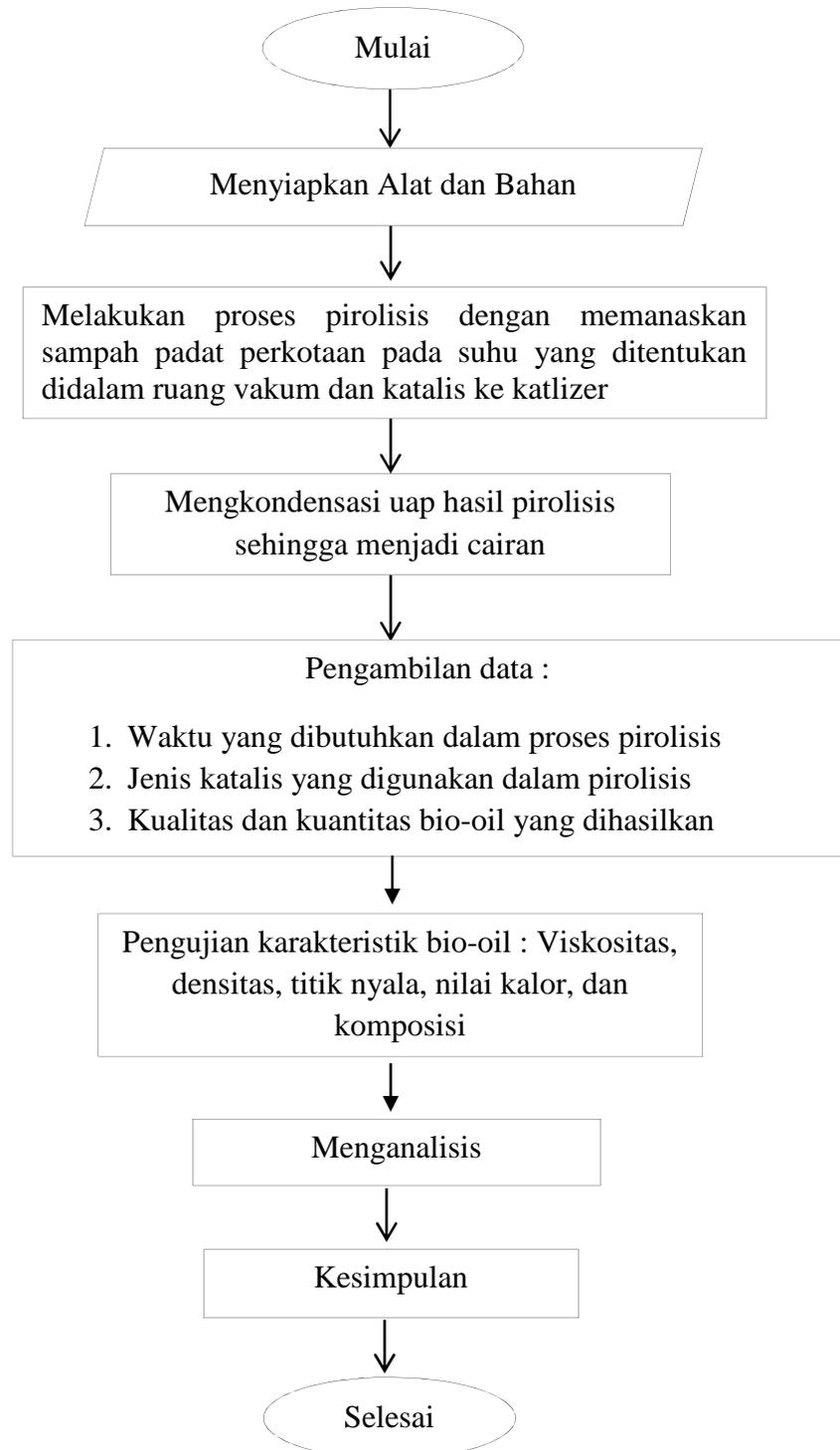


Gambar 3.19 Diagram alir proses pirolisis berkatalis

Adapun tahapan pengujian yang dilakukan adalah:

1. Menyiapkan *unit pyrolyzer* dan bahan
2. Menimbang sampel sampah yang digunakan dengan berat total 500 g.
3. Menutup tabung pengumpanan dengan rapat.
4. Memasukkan katalis ke katalizer dengan ukuran partikel 20 mm dengan volume katalis  $0.005 \text{ m}^3$  lalu menutup tabung katalizer dengan rapat.
5. Setelah semua tertutup rapat, menginjeksikan gas  $\text{N}_2$  ke dalam reaktor dengan cara memasukkan gas  $\text{N}_2$  melalui kran *inlet* tujuannya untuk mengikat dan mendorong keluar  $\text{O}_2$  yang masih terkandung didalam reaktor melalui kran *outlet*.
6. Menghidupkan *heater* reaktor bahan baku dan mengatur temperatur yang ditentukan sesuai data tiap pengujian yaitu temperatur  $500^\circ\text{C}$ .
7. Menghidupkan furnace katalizer dan mengatur temperatur yang ditentukan yaitu  $200^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$ , dan  $300^\circ\text{C}$ .
8. Mencatat hasil *bio-oil* yang dihasilkan dari proses pirolisis.

## F. Alur Pengambilan Data



Gambar 3.20 Alur pengambilan data

## G. Variabel Pengujian

Variabel pengujian merupakan variasi sampel pengujian yang akan dilaksanakan dengan beberapa variabel tetap dan variabel berubah. Untuk bisa mendapatkan karakteristik pirolisis terbaik proses pirolisis katalis bertingkat.

Tabel 3.2 Variasi Percobaan penelitian

Massa Sampel (gr)	Temperatur Thermal Cracking (°C), (s)	Katalis	Temperatur upgrading (°C)	Produk (gr)				
				Padat	Cair			Gas
					Produk atas (Pa)	Produk bawah (Pb)	Produk cair total	
500	500 °C, 60 menit	Dolomit						
		Zeolit						
Kaolin								

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### A. Simpulan

Dari pengujian yang telah dilakukan terhadap sampah kota Bandar Lampung dengan menggunakan metode pirolisis bertingkat at *upgrading*, didapat beberapa kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan. Kesimpulan dapat dilihat sebagai berikut :

1. Temperatur terbaik proses pirolisis bertingkat dari ketiga jenis katalis untuk mendapatkan Kualitas produk bio-oil terjadi pada Temperatur 300°C.
2. Kualitas produk bio-oil yang dihasilkan dari proses pirolisis bertingkat yaitu menggunakan katalis dolomit pada temperature 250 dengan mass yield 42 wt%
3. Kuantitas produk bio-oil yang dihasilkan dari proses pirolisis bertingkat yaitu menggunakan katalis zeolit Pada Temperatur 200°C sebesar 49 wt%.
4. Proses pirolisis bertingkat pada temperatur 200 °C dari ketiga jenis katalis masih memiliki ikatan karbon panjang, hal itu dibuktikan dengan melihat secara visual bio oil yang di dapat memiliki viskositas yang tinggi atau masih mengental yang disebut juga *heavy oil*.

## B. Saran

Dalam melakukan penelitian didapat beberapa kekurangan yang perlu dilakukan agar mendapatkan produk bio-oil yang lebih baik. Saran yang dapat diberikan sebagai berikut :

1. Perlunya penambahan filter atau *spiner* untuk mendapatkan bio oil yang lebih bersih dan jernih.
2. Disarankan untuk meningkatkan temperature kataliser guna mendapatkan fraksi hidrokarbon yang lebih baik..
3. Perlunya pengujian untuk pembakaran internal sebagai pembuktian kelayakan bio oil ntuk pengganti premium.
4. Perlu dilakukan beberapa pengujian laboratorium untuk melengkapi parameter-parameter bahan bakar cair, yaitu meliputi pengujian nilai kalor, *sulfur content*, *octane number*, *cetane number*, dan *pour point*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aguado, J., Serrano, D.P., San Miguel, G., Castro, M.C., Madrid, S., 2007. *Feedstock recycling of polyethylene in a two-step thermo-catalytic reaction system. J. of analytical and applied pyrolysis*, 79, 415-423.
- Agrawal, 2104. *An Investigation On The Pyrolysis Of Municipal Solid Waste*. School Of Applied Sciences College Of Science, Engineering And Health Rmit University Rajvanshi, 2014).
- Agung P., Gandidi, I. M. 2012, “*Emission Factor of Single Pellet Cake Seed Jatropha Curcas in a Fix Bed Reactor*” *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*
- ATSDR. 1997. *Toxicological Profile for Phenol. Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. [www.atsdr.cdc.gov/ toxprofiles/tp115-c1.pdf](http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp115-c1.pdf). [ 11 Juni 2004].
- Alexandra, Le Courtois. 2012. *Municipal Solid Waste: Turning A Problem Into Resource. Waste: The Challenges Facing Developing Countries. Urban Specialist. World Bank, Wwww.Proparco.Fr*
- Aydinli, B. & Caglar, A., 2010, “*The Comparison Of Hazelnut Shell Co-Pyrolysis With Polyethylene Oxide And Previous Ultra-High Molecular Weight Polyethylene*” *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*. 87, 263–268.
- Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification And Pyrolysis: Practical Design And Theory. Academic Press. Elsevier.*

- Besler, S., Williams, T.P., 1996, "*The Influence Of Temperature And Heating*", *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*. 89, 333–339.
- Bhattacharya, P., Steele, P. H., Hassan, E. B. M., Mitchell, B., Ingram, L., & Pittman, C. U., 2009, "*Wood / Plastic Co-Pyrolysis In An Auger Reactor: Chemical And Physical Analysis Of The Products*" *Fuel*. 88, 1251–1260.
- Buku Outlook Energi Indonesia 2014.
- Bsn. 2008."Sni:Pengolahan Sampah Di Pemukiman". Bsn
- Buekens, A.G., Huang, H., 1998. *Catalytic plastic cracking for recovery of gasoline range hydrocarbon from municipal plastic wastes. Resources, conservation and recycling*, 23, 163-181.
- Cao, Q., K.C. Xie, W.R. Bao dan S.G. Shen. 2004. *Pyrolytic Behavior of WasteCorn Cob*. *Journal of Bioresource Technology* 94: 83-89.
- Chaurasia, A.S., & Babu, B.V.,2004,"*Influence Of Product Yield, Density, Heating Conditions And Conversion On Pyrolysis Of Biomass*" *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*. 87 , 305–308.
- Drelienkiewics, D., Kalembe-Jaje, Z., Lalik, E., Kosydar, R. 2014. *Organosulfonic Acids Doped Polyaniline-Based Solid Acid Catalysts for The Formation of Bio-esters in Transesterification and Esterification Reactions. Fuel*116: 760-771.
- D'Cruz, 2007. *Synthesis of Biodiesel From Canola Oil Using Heterogenous Base Catalyst. JAm Oil Chem Soc*;84:937-943.
- Dinas Kebersihan Pemerintah Provinsi Dki Jakarta (Pasal 1 Perda Prov Dki Jakarta No. 5 Tahun 1988.

- Encinar, J. M., Gonzalez, J. F., Martinez, G., & Roman, S., 2009, “*Jerusalem Artichoke Pyrolysis: Energetic Evaluation*” *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*. 85, 294–300.
- Endalew, A. 2011. *Inorganic Heterogenous Catalyst for Biodiesel Production From Vegetable Oils. Biomass And Bioenergy*;35:3787-3809.
- Evans, R., 2004, “*Options For Renewable Hydrogen Technologies*”, *Energy & Agricultural Carbon Utilization*.86,304–309. Bailis, R., Ogle, D., Maccarty, N., & Stil, D., 2007, “*The Water Boiling Test (Wbt)*” *Wbt Version*. 3.0.
- Funda Ates., et al, 2013, “*Comparision of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part I: Product yields, gas and pyrolysis oil properties*”, *Bioresource Technology*, V. 133, P. 443–454.
- Garcia, C.M. 2008. “*Transesterification of Soybean Oil Catalyzed by Sulfated Zirconia*”. *Bioresour. Technol.* 99, 6608-6613.
- Helwani, Z., Othman, M. R., Aziz, N., Kim, J. and Fernando, W. J. N., *Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: A review. Appl. Catal. A*. v. 363, 1-10 (2009).
- Heriwibowo, N. 2009. *Kajian Pengolahan Minyak Limbah Cair Pabrik Minyak Kelapa Sawit (PMKS) Menjadi Biodiesel Melalui Reaks Transesterifikasi Dua Tahap Dengan Metanol Menggunakan Katalis BF<sub>3</sub> dan NaOH*. Skripsi Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu.
- Hudson et,al, 2002, *Buehler Dialog : Alumina, Method Number 10.12.*, Buehler Ltd., USA. Knozinger, H., Ratnasamy, and Catal, P. 1978. *Pulse Electric Current Sintering and Strength of Sintered Alu-mina Using -Alumina*

Powders Prepared by the Sol-Gel Method. *Journal of Science Engineering*.  
Vol. 17, pp. 31.

- I. Barbarias, et al., 2016. *Pyrolysis and in-line catalytic steam reforming of polystyrene through a two-step reaction system*, *J. Anal. Appl. Pyrol.*,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2016.10.006>.
- I. M Gandidi, dkk, 2016. *Co-cracking of real MSW into bio-oil over natural kaolin*.  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Lampung  
University, Jalan S. Brojonegoro No. 1, Bandarlampung, Indonesia. Mechanical  
Engineering Educations, Universitas Negeri SebelasMaret, Jalan Ir. Sutami 36 A  
Surakarta 57126, Indonesia.
- J. Aguado., et al, 2007, “European trend in the feedstock recycling of plastic  
wastes”,”, *Global NEST Journal*, Vol 9, No 1, pp 12-19, 2007.
- J. G. Speight, *The Chemistry and Technology of Petroleum*, 2nd ed., Marcel  
Dekker Inc., New York. 1991.
- J.L. Wang., et al, *Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastic Waste to Fuel with  
Nickel-loaded Silica-alumina Catalysts*, *Energy Sources, Part A: Recovery,  
Utilization, and Environmental Effects*, 2011.
- Kang, S. 2013. *Recent Advances in Carbon-Based Sulfonated Catalyst :  
Preparation and Application. International Review of Chemical  
Engineering*. Vol 5, N.2; 133-144.
- Khairunnisa. 2011. Hubungan Karakteristik Ibu Rumah Tangga Dengan  
Pengolahan Sampah Domestic Dalam Mewujudkan Medan Green Andclean  
(Mdgc) Di Lingkungan I Kelurahan Pulo Brayon Darat Ii Kecamatan Medan  
Timur Kota Medan Tahun 2011. Skripsi. Universitas Sumatera Utara.  
Medan.

- Knoef, H. Ed., 2005, "*Handbook Biomass Gasification*", Btg Biomass Technology Group.
- Kricka, T., Et Al, 2010, "*Higher Heating Values Estimation Of Horticultural Biomass From Their Proximate And Ultimate Analyses Data*", Journal Of Food, Agriculture & Environment, V.8, P. 767-771.
- Large Amounts of Free Fatty Acids Using a Carbon Based Solid Acid Catalyst. Appl Energy;87:2589-2596.*
- Lou, W. 2008. Efficient Production of Biodiesel From High Free Fatty Acid Containing Waste Oils Using Various Carbohydrate-Derived Solid Acid Catalysts. *Bioresource Technology;99:8752-8758.*
- M. Artetxe et al., 2012. Light olefins from HDPE cracking in a two-step thermal and catalytic process, Chem. Eng. J. University of the Basque Country UPV-EHU, Department of Chemical Engineering, P.O. Box 644, E48080 Bilbao, Spain <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.105>.
- M. Saiful Islam., et al, 2010,"*Production of Bio-Oil from Municipal Solid Waste*", *Bangladesh J. Sci. In, V. 45, P. 91-94.*
- M. Syah, 2011. Reaksi Pirolisis Minyak Jarak Pagar Menjadi Minyak Bio Setara solar Komersial Menggunakan Katalis NIO/  $-Al_2O_3$  dan NIMo/  $Al_2O_3$ . FT UI, 2011.
- Macario, A. 2009. Increasing Stability and Productivity of Lipase Enzyme by Encapsulation in A Porous Organic-Inorganic System. *Microporous Mesoporous Mater.118, 334-340.*

- Miskolczi N., Bartha L., DeAik, G., JAver B., 2004. *Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbon. Polymer degradation and stability*, 48, 357-366.
- Muhammad,C., Jude A.O., and Paul T. Williams, 2015. *Thermal Degradation of Real-World Waste Plastics and Simulated Mixed Plastics in a Two-Stage Pyrolysis-Catalysis Reactor for Fuel Production*.Energy Research Institute, Faculty of Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, U.K.DOI:10.1021/ef502749h Energy Fuels 2015, 29, 2601-2609.
- NAGRA, "Nuclear Waste Manag. In Switzerland: Feasibility Studies and Safety Analyses", Project Report NGB 8509, (1985).
- Nasikin, M. dan Susanto, B. H, 2010. Katalis heterogen. Jakarta: UI press: 12-52
- Mulyadi,E.,2004, Termal Dekomposisi Sampah Plastik , Jurnal Rekayasa Perencanaan, ISSN 1829-913x, Vol-1.
- Murtadho Dan Gumbira, 1988. Pengertian Sampah, Dalam [Http://Www.Damandiri.Or.Id/File/Indrapermanaipbbab2.Pdf](http://www.damandiri.or.id/file/Indrapermanaipbbab2.pdf). N. Borsodi., et al, 2011, "Hydrocarbon fraction obtained from recycling of waste materials", Hungarian Journal of Industrial Chemistry, Veszprem, V. 39, P. 51-56.
- Nasikin, M. dan Susanto, B. H. (2010) Katalis Heterogen. Jakarta:UI Press: 12-52.
- Nimbkar Agricultural Research Institute, Phaltan-415523, Maharashtra, India.
- Norbert Miskolczi., et al, 2013, "*Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part II: Contaminants, char and pyrolysis oil properties*", *Bioresource Technology*, V. 144, P. 370-379.
- Ogi, T. In "Biomass Handbook",Japan Institute Of Ed.,Ohm-Sha, 2002, Pp.16-19.

- Pasek, Ari D, Dkk. 2007. Laporan Akhir Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Dengan Bahan Bakar Sampah Di Kota Bandung. Lembaga Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat. Institut Teknologi Bandung.
- Rafael Luque., et al, 2011, Handbook of biofuels production: Processes and technologies, Woodhead Publishing Series in Energy: Number 15.
- Sadeghbeigi, dkk, 2000. *Fluid catalytic cracking handbook, second edition*. USA: Butterworth-Heinemann.
- Samolda, dkk, 2000. Catalyst Evaluation for Catalytic Biomass Pyrolysis. ACS Publication, *energy&fuels* 14(6).
- Semwal, S. 2011. Review Biodiesel Production Using Heterogenous Catalysts. *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd. All rights reserved; 102: 2151-2161.
- Satterfield, dkk, 1991. *Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice, 2<sup>nd</sup> ed*. USA: McGraw-Hill, Inc.
- Seo, Y.H. Lee K.H. and Shin, D.Y., 2003. *Investigation of catalytic degradation of high-density polyethylene by hydrocarbon group type analysis, Journal of Analytical and Applied pyrolysis*, 70:383-398.
- Serrano D.P., et al, 2004, "Feedstock recycling of agriculture plastic film wastes by catalytic cracking", *Applied Catalysis B: Environmental*, V. 49, P. 257-265.
- Shu, Q. 2010. *Synthesis of Biodiesel From Waste Vegetable Oil With Veljkovic, V.B. 2009. Kinetics of Sunflower Oil Methanolysis Catalyzed by Calcium Oxide. Fuel* 88: 554-562.
- Shriver, D. & Atkins, P. 1999. *Inorganic Chemistry*. Third Edition. New York. Oxford University Press.

- Singh, AK., Fernando SD. 2009. *Preparation and Reaction Kinetics Studies of Na-based Mixed Metal Oxide for Transesterification. Energy Fuels*; 23: 5160-5164.
- Soekarman, 1983. *Pemanfaatan Tinja Dan Sampah Dki Jakarta Untuk Menunjang Pembangunan Nasional*. Cv. Era Swasta. Jakarta.
- Syamsiro, dkk, 2013. *Co-Production of Liquid and Gaseous Fuels from Polyethylene and Polystyrene in a Continuous Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming System. Energy and Environment Research*; Vol. 3, No. 2; 2013 ISSN 1927-0569 E-ISSN 1927-0577.
- Syamsiro. M, Harwin S., Tinton N., Putri N., Shuo C., Zainal A., Kunio Y., 2014. *Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors*. Selection and peer-review under responsibility of the Scientifi Committee of Indonesia EBTKE Conex 2013. doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.212.
- Udiharto, M. 1992. *Aktivitas mikrobial dalam degradasi minyak bumi. Proceedings Diskusi Ilmiah VII Hasil Penelitian Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi (PPPTMGB)*. Lembaga Minyak dan Gas (LEMIGAS), Jakarta, 13-14 Juni 1992.
- Wardana, Dkk, 2016. "Pirolisis Lambat Campuran Cangkang Sawit Dan Plastik Dengan Katalis Zeolit Alam". *Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Bantul, Yogyakarta*.
- Williams, P.T., Bagri, R., 2004. *Hydrocarbon gases and oils from the recycling of polystyrene waste by catalytic pyrolysis. International journal of energy research*, 28, 31-44.

Wu, H., Shen, Y., Dachao M., Qi An., Harada, N., Yoshikawa, K., 2015. *Fuel Oil Production from Two-Stage Pyrolysis-Catalytic Reforming of Brominated High Impact Polystyrene Using Zeolite and Iron Oxide Loaded Zeolite Catalysts. Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan. Journal of Ecology, 2015, 5, 136-146.*

Yolanda, Ade R., 2014. Gasifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit : Studi Penurunan Kandungan Tar pada Gas Hasil Gasifikasi Suhu Rendah dengan Katalis Alkali. Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas. Padang. 2014.