

**RANCANG BANGUN DAN PENGUJIAN REAKTOR
PIROLISIS SAMPAH BAN TIPE *ROTARY KILN* UNTUK
PRODUKSI BAHAN BAKAR MINYAK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Sutan Dwicahyo
No. Mahasiswa : 12525001
NIRM : 2012030221

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2016

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**RANCANG BANGUN DAN PENGUJIAN REAKTOR
PIROLISIS SAMPAH BAN TIPE *ROTARY KILN* UNTUK
PRODUKSI BAHAN BAKAR MINYAK**

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Sutan Dwicahyo

No. Mahasiswa : 12525001

NIRM : 2012030221

Yogyakarta, 8 Juni 2016

Pembimbing I,



Dr. Eng. Mochamad Syamsiro

Pembimbing II,



Muhammad Ridlwan S.T., M.T.

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

RANCANG BANGUN DAN PENGUJIAN REAKTOR PIROLISIS SAMPAH BAN TIPE *ROTARY KILN* UNTUK PRODUKSI BAHAN BAKAR MINYAK

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Sutan Dwicahyo

No. Mahasiswa : 12525001

NIRM : 2012030221

Tim Penguji

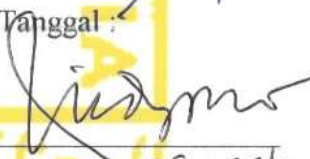
Dr. Eng. Mochamad Syamsiro

Ketua


Tanggal :

Dr. Eng Risdiyono S.T., M. Eng.

Anggota I


Tanggal : 28/6/2016

Purtojo S.T., M. Sc.

Anggota II


Tanggal : 28/6/16

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin




Dr. Eng. Risdiyono S.T., M. Eng.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Laporan Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada keluarga saya tercinta, tersayang dan terkasih yang tiada henti selalu memberikan doa serta dorongan positif untuk masa depan saya

HALAMAN MOTTO

"I am prepared for the worst, but hope for the best"

-Benjamin Disraeli-

"Fall seven times and stand up eight"

-Japanese Proverb-

"Creativity is just connecting things"

-Steve Jobs-

"Stay hungry, stay foolish"

-Steve Jobs-

"Ketika seseorang menghina kamu, itu adalah sebuah pujian bahwa selama ini mereka menghabiskan banyak waktu untuk memikirkan kamu, bahkan ketika kamu tidak memikirkan mereka"

-BJ Habibie-

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirabbil'alamin penulis ucapkan karena telah terselesaikannya penulisan laporan tugas akhir ini. Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan karunia-Nya. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW dan umatnya.

Penyusunan laporan tugas akhir ini tak lepas dari bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Risdiyono S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Eng Mochamad Syamsiro, selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah banyak membantu, memberikan arahan dan saran yang membangun sehingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini.
3. Bapak Muhammad Ridlwan S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan semangat, kritik dan saran selama penyusunan laporan tugas akhir ini.
4. Bapak Agung Nugroho Adi S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan saran selama penulis menjalani kuliah di Teknik Mesin FTI UII.
5. Papa dan Mama yang selalu mendoakan dan memberikan *support* yang tidak ternilai dengan materi dan tidak tergantikan.
6. Segenap keluarga besar yang memberikan dukungan dan doa untuk kelancaran dan kemudahan.
7. Mas Adi dan Mas Fariz, selaku laboran Laboratorium Proses Produksi dan laboran Laboratorium Mekatronika atas bantuan serta kesabarannya selama penulis melakukan percobaan di laboratorium tersebut.
8. Yuliani Sulistiawati, selaku rekan tugas akhir yang membantu selama melakukan percobaan.
9. PT. Sarana Andalan Enggal, yang telah memberikan saran dan kritik terhadap desain alat yang dirancang penulis.

10. Sahabat seperjuangan (Donny Suryawan, Nur Amin, Yuni Arianta, Yudi Shakuntala, dan Nur Rohman) semoga apa yang kita inginkan tercapai sesuai yang dicita-citakan.
11. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2012.
12. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis mendoakan semoga Allah SWT memberikan balasan dan limpahan kebaikan di dunia dan akhirat atas apa yang telah mereka berikan. Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi orang lain dikemudian hari.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 8 Juni 2016

Muhammad Sutan Dwicahyo

ABSTRAK

Pada penelitian ini, telah dilakukan rancang bangun reaktor pirolisis sampah ban tipe rotary kiln untuk memproduksi bahan bakar minyak skala laboratorium. Reaktor dirancang dengan diameter 260 mm dengan panjang 400 mm berkapasitas 20 L yang dilengkapi poros berdiameter 32 mm. Reaktor tersebut dilengkapi dengan lifter dengan panjang 28 mm. Reaktor tersebut digunakan untuk memproduksi minyak dari sampah ban kendaraan bermotor dengan ukuran sekitar 1 mm x 1 mm x 10 mm sebanyak 500 gram yang dipanaskan pada temperatur sekitar 300°C. Percobaan tersebut dilakukan pada 2 kondisi yaitu tanpa dan menggunakan lifter dengan tiap kondisi mempunyai variasi kecepatan putaran 5 rpm, 10 rpm, dan 15 rpm. Hasil pengujian pengaruh kecepatan putaran pada reaktor tersebut menunjukkan bahwa pada kecepatan putaran 5, 10, dan 15 rpm, pergerakan bed melintang pada mode slipping. Hasil minyak terbanyak didapat pada 15 rpm karena mencapai temperatur gas keluar tertinggi, yaitu 115°C. Hasil pengujian pengaruh lifter pada reaktor tersebut menunjukkan bahwa pemasangan lifter dinilai kurang efektif karena hasil minyak yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan tanpa menggunakan lifter. Hasil karakteristik minyak pirolisis yang dihasilkan menunjukkan nilai viskositas dan densitas yang beragam disebabkan karena kecepatan pemanasan yang tidak dapat diatur. Hasil minyak yang dihasilkan pada kondisi 5 rpm dengan lifter dan 10 rpm tanpa lifter telah sesuai dengan standar mutu yang ditetapkan ESDM. Minyak pirolisis dengan nilai kalor 7750,753 Kal/gram lebih rendah dari standar Dirjen EBTKE. Nilai kalor yang rendah tersebut disebabkan karena oksidasi yang menimbulkan senyawa H₂O. Minyak tersebut apabila digunakan sebagai bahan campuran bahan bakar diesel (solar), dinilai dapat memperburuk konsumsi bahan bakar, kinerja dan emisi mesin diesel serta delay pengapian yang lebih lama.

Kata kunci: desain, pirolisis, reaktor, rotary kiln, sampah ban

ABSTRACT

In this study, designing waste tire pyrolysis reactor type rotary kiln for producing fuel oil on the laboratory scale has been conducted. The reactor is designed with a diameter of 260 mm, a length of 400mm by the capacity of 20 L, equipped with shaft by diameter of 32 mm. Inside the reactor, it can be equipped with a lifter with a length of 28 mm. The reactor is used for producing oil from motor vehicle waste tires with a size for about 1 mm x 1 mm x 10 mm up to 500 grams, which is heated at a temperature for about 300°C. The experiments were carried out on two conditions, the first is without using a lifter and the other by using the lifter, and also by varying the rotational speed 5 rpm, 10 rpm and 15 rpm. The results on the influence of the rotation speed of the reactor showed that the rotation speed of 5, 10, and 15 rpm, the movement of the bed transverse on the slipping mode, while at 15 rpm produces more oil because it reaches the highest output gas temperature is 115°C. The results on the effect of the reactor installation lifter considered less effective as a result of the oil produced less than without using a lifter. The results of the characteristics of pyrolysis oil produced to demonstrate the value of viscosity and density are varied due to the speed of heating that cannot be regulated. The oil is produced under the conditions of 5 rpm and 10 rpm without lifter in accordance with defined quality standards ESDM. The heating value of pyrolytic oil is 7750, 753 Cal/grams, it is lower than quality standards EBTKE of biodiesel fuel. It is caused by oxidation in the reactor which creat H₂O compounds. If it is used for fueling the diesel engine, it can cause fuel wasteful, low horse power, high emission and longer ignition delay.

Keywords: design, pyrolysis, reactor, rotary kiln, waste tire

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iii
Halaman Persembahan	iv
Halaman Motto	v
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vi
Abstrak	viii
<i>Abstract</i>	ix
Daftar Isi	x
Daftar Tabel.....	xii
Daftar Gambar	xiii
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	2
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
Bab 2 Tinjauan Pustaka	4
2.1 Kajian Pustaka	4
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Pirolisis	6
2.2.2 <i>Rotary Kiln</i>	9
2.2.3 <i>Burner</i>	17
2.2.4 Sistem Pemindah Daya.....	18
Bab 3 Metode Penelitian	19
3.1 Identifikasi Masalah.....	19
3.2 Alur Penelitian	19
3.3 Peralatan dan Bahan.....	20
3.3.1 Peralatan	20

3.3.2	Bahan	20
3.4	Perancangan	21
3.5	Pengujian Alat.....	21
3.5.1	Pengujian Variasi Kecepatan Putaran dan <i>Lifter</i>	21
3.5.2	Pengujian Densitas	22
3.5.3	Pengujian Viskositas	23
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	25
4.1	Hasil Perancangan.....	25
4.1.1	Hasil Desain.....	25
4.1.2	Hasil Pembuatan Alat	27
4.2	Hasil Pengujian	34
4.2.1	Hasil Pengujian Pengaruh Kecepatan Putaran.....	34
4.2.2	Hasil Pengujian Pengaruh Pemasangan <i>Lifter</i>	36
4.2.3	Hasil Pengujian Karakteristik Produk Minyak	37
4.3	Analisis dan Pembahasan.....	38
4.3.1	Analisis Pengaruh Kecepatan Putaran	39
4.3.2	Analisis Pengaruh Pemasangan <i>Lifter</i>	42
4.3.3	Analisis Karakteristik Produk Minyak	45
4.4	<i>Proposed System</i> untuk Pirolisis Sampah Ban	47
Bab 5	Penutup.....	50
5.1	Kesimpulan	50
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya	51
Daftar Pustaka		52
Lampiran.....		56

DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Jenis-jenis <i>Rotary Kiln</i> (Boateng, 2008)	10
Tabel 4-1 Persentase perubahan temperatur di setiap percobaan	37
Tabel 4-2 Hasil Pirolisis pada temperatur 300°C (Laresgoiti et al, 2003).....	39
Tabel 4-3 Tabel bilangan Froude (<i>Fr</i>) (Rudgers, 1980).....	40
Tabel 4-4 Manfaat pemasangan <i>lifter</i> (Boateng, A.A., 2008)	44
Tabel 4-5 Nilai kalor bahan bakar di Indonesia	46
Tabel 4-6 Kombinasi dari data hasil pengujian dengan data penelitian lain	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Diagram alir proses pirolisis	6
Gambar 2-2 <i>Rotary Kiln</i> tipe silinder (Boateng, 2008)	10
Gambar 2-3 Bentuk <i>Dam</i> (Kiri) dan <i>Lifter</i> (Kanan) pada <i>Rotary Kiln</i> (Boateng, 2008).....	11
Gambar 2-4 <i>Wet kiln</i> untuk material setengah basah (Boateng, 2008)	11
Gambar 2-5 <i>Rotary kiln</i> yang dilengkapi <i>Preheater</i> (Boateng, 2008)	12
Gambar 2-6 <i>Cooler dan dryer</i> terpasang pada <i>rotary kiln</i> (Boateng, 2008)	13
Gambar 2-7 <i>Rotar kiln</i> dengan pembakaran tidak langsung (Boateng, 2008)	14
Gambar 2-8 Jalur perpindahan kalor. 1. Konduksi Internal 2. Konduksi antar partikel 3. Radiasi antar partikel 4. Konveksi interpartikel	14
Gambar 2-9 Pergerakan <i>bed</i> melintang (Boateng, 2008)	17
Gambar 2-10 <i>Steam burner</i>	17
Gambar 3-1 Diagram Alur Penelitian.....	19
Gambar 3-2 Piknometer.....	23
Gambar 3-3 Viskometer Ostwald	24
Gambar 4-1 Rancangan pertama <i>rotary kiln reactor</i> skala laboratorium.....	25
Gambar 4-2 Rancangan kedua <i>rotary kiln reactor</i> skala laboratorium	26
Gambar 4-3 Lubang <i>output</i> gas pirolisis (dilingkari warna merah)	26
Gambar 4-4 <i>Mild steel</i> tipe AISI 1018	27
Gambar 4-5 Motor DC <i>power window</i>	28
Gambar 4-6 Pemindah daya reaktor tipe <i>rotary kiln</i>	29
Gambar 4-7 Kompor semawar	30
Gambar 4-8 Termokopel tipe K.....	30
Gambar 4-9 Kondensor	31
Gambar 4-10 Skema kondensor yang digunakan	32
Gambar 4-11 <i>Quick coupler</i> kompresor angin	33
Gambar 4-12 Rangkaian <i>quick coupler</i>	33
Gambar 4-13 Minyak hasil pengujian	34
Gambar 4-14 Grafik hasil pengujian pada kondisi <i>lifter</i> terpasang pada temperatur 300°C	35

Gambar 4-15 Grafik hasil pengujian pada kondisi tanpa <i>lifter</i> pada temperatur 300°C	35
Gambar 4-16 Grafik temperatur pengujian tanpa <i>lifter</i>	36
Gambar 4-17 Grafik temperatur pengujian dengan pemasangan <i>lifter</i>	36
Gambar 4-18 Grafik hasil pengujian densitas pada temperatur 30°C	37
Gambar 4-19 Grafik hasil pengujian viskositas pada temperatur 30°C	38
Gambar 4-20 Diagram <i>mass balance</i> pada kecepatan putaran 8,2 rpm (L), 13,8 rpm (H), 15,1 rpm (M) (Acevedo et al, 2014).....	40
Gambar 4-21 Diagram perilaku <i>bed</i> (Henein, 1980).....	42
Gambar 4-22 Pengujian <i>loading</i> pada <i>lifter</i> tipe L (Karali et al, 2015).....	43
Gambar 4-23 <i>Proposed Pyrolysis System</i> ban bekas skala 30 kg/jam	47

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya alat transportasi di Indonesia, berdasarkan data dari Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (Gaikindo), penjualan mobil pada tahun 2015 mencapai 1.013.291 unit. Menurut ketua umum Gaikindo, Jongkie D. Sugiarto memprediksi pasar otomotif domestik akan mengalami peningkatan sebesar 5 persen di tahun 2016, yaitu antara 1.050.000 hingga 1.100.000 unit (www.gaikindo.or.id, 2016).

Hal ini berpengaruh terhadap semakin meningkatnya sampah ban yang ada di Indonesia. Jumlah peningkatan timbunan sampah ban di Indonesia telah mencapai 175.000 ton/hari atau setara dengan 64 juta ton/tahun. Berdasarkan studi yang dilakukan di 12 kota tahun 2012, pengelolaan sampah di Indonesia sekitar 69% hanya ditimbun di tempat pembuangan akhir (TPA), 10 % dikubur, 7% didaur ulang, 55% dibakar dan 7% tidak dikelola (menlh, 2015).

Sementara itu, penggunaan energi di Indonesia masih didominasi oleh bahan bakar fosil yang cepat atau lambat akan habis dan secara bertahap digantikan dengan energi baru dan terbarukan. Ketersediaan cadangan bahan bakar fosil masih menjadi tolok ukur bagi ketahanan energi. Menurut Jero Wacik, minyak bumi masih akan mendominasi bauran energi primer dunia hingga tahun 2050. Namun ketersediaan sumber energi berbahan fosil tidak mampu menyaingi pertumbuhan konsumsi energi yang rata-rata 7% setahun. Bukan tidak mungkin energi menjadi bahan yang langka dan mewah dikemudian hari (ESDM mag Edisi 9, 2012).

Para peneliti memanfaatkan lebih dari 200 bahan dalam satu komposisi ban untuk menggabungkan komponen ban yang masing-masing memiliki peran tersendiri. Sekitar 60% karet yang digunakan dalam pembuatan ban adalah karet sintetis. Karet sintetis diproduksi dari hidrokarbon minyak bumi yang diturunkan. Selain itu bahan yang digunakan yaitu karbon hitam yang berfungsi untuk meningkatkan ketahanan aus ban (Michelin, 2016).

Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia suatu material pada temperatur tinggi tanpa adanya oksigen. Proses tersebut merupakan salah satu solusi dan cara yang efektif untuk menangani sampah ban tanpa menyebabkan polusi. Saat ini sudah banyak jenis reaktor sampah ban yang digunakan, beberapa diantaranya yaitu *fixed bed*, *moving screw bed*, *rotary kiln*, *fluidized bed*, dan tipe vakum (Williams, 2013).

Di laboratorium teknik kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia terdapat sebuah reaktor pirolisis tipe *fixed batch* skala laboratorium yang digunakan untuk penelitian dengan berbagai macam bahan baku. Reaktor tersebut terbuat dari material *stainless steel* dengan pemanas elektrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka rumusan masalah yang muncul yaitu bagaimana merancang dan membuat mekanisme reaktor pirolisis tipe *rotary kiln* skala laboratorium yang dapat mengkonversi sampah ban menjadi bahan bakar minyak.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini bertujuan agar ruang lingkup pembahasan menjadi jelas dan tidak meluas ke hal-hal yang tidak berkaitan. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Desain dan perancangan dilakukan dengan menggunakan *software Solidworks 2013*.
2. Sampah yang digunakan adalah sampah ban luar kendaraan.
3. Tidak membahas proses dan reaksi kimia yang terjadi.
4. Tidak membahas pemrograman mikrokontroler.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan pada perancangan adalah :

1. Merancang dan membuat reaktor pirolisis tipe *rotary kiln* skala laboratorium yang memproduksi bahan bakar minyak dari sampah ban.
2. Mengetahui kinerja reaktor pirolisis tipe *rotary kiln* berdasarkan variasi putaran per menitnya.
3. Mengetahui kinerja reaktor pirolisis tipe *rotary kiln* berdasarkan desain *lifter*.
4. Mengetahui karakteristik minyak hasil pirolisis akibat variasi kecepatan putaran dan pemasangan *lifter*.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Hasil penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi bagi pengembangan bidang manufaktur khususnya di bidang pembuatan alat-alat konversi energi.
2. Meningkatkan nilai tambah dari sampah ban.
3. Menjadi salah satu solusi untuk penyelesaian permasalahan sampah ban yang semakin hari semakin bertambah.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah dalam memahami penulisan penelitian ini, maka disusun sistematika penulisan. Pokok-pokok permasalahan dalam penulisan ini dibagi menjadi lima bab. Bab I berisi tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian dan perancangan, manfaat penelitian dan perancangan, dan sistematika penulisan. Bab II berisikan penjelasan mengenai teori-teori yang digunakan dalam penelitian dan perancangan. Bab III merupakan langkah-langkah dan metode yang digunakan untuk melakukan penelitian dan perancangan. Bab IV merupakan data dan pembahasan dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Sedangkan kesimpulan dan saran akan diuraikan pada bab V.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian tentang perancangan reaktor pirolisis sebelumnya pernah dilakukan, yaitu oleh Edi Gunawan pada tahun 2010 dengan judul “Rancang Bangun Unit Pirolisis untuk Pembuatan Bio-Oil dari Minyak Jelantah Skala Laboratorium”. Penelitian tersebut berisi tentang perancangan unit pirolisis untuk pembuatan bio-oil dari minyak jelantah dan mendapatkan hasil bio-oil terbaik pada suhu 400°C (Gunawan, 2010).

M. Rofiqul Islam dkk, melakukan eksperimen pada sampah ban sepeda motor untuk menentukan efek dari temperatur, ukuran sampel, dan waktu tinggal uap yang terlihat pada hasil produk pirolisis serta komposisinya. Ban sepeda motor yang digunakan sebagai sampel penelitian ini adalah produk dari India dengan merek MRF yang diambil dari penampungan sampah milik *Rajshasi City Corporation*. Sampel tersebut dibuat dengan 4 ukuran berbeda. Percobaan tersebut menggunakan reaktor tipe *fixed-bed fire-tube heating reactor* yang dilengkapi dengan suplai gas nitrogen, *gravity type feeder*, dan 2 kondensor. Gas nitrogen disuplai bertujuan untuk menjaga kelembaban atmosfer pada reaktor dan juga menggantikan serta mendorong gas pirolisis ke kondensor. Hasil terbaik adalah 49% minyak dimana hasil tersebut didapatkan pada temperatur 475°C dengan ukuran bahan baku 4 cm³ dengan waktu tinggal uap 5 detik dibantu dengan tekanan gas nitrogen. Karakteristik minyak hasil pirolisis diuji dengan menggunakan teknik kromatografi dan spektrografi. Dari hasil pengujian dengan teknik tersebut minyak hasil pirolisis pada percobaan tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar minyak dan bahan baku kimia dengan nilai kalor 42 MJ/kg dan rumus empiris CH_{1.27} O_{0.025} N_{0.006} (Islam et al, 2008).

Nikos Antoniou dan Anastasia Zabaniotou melakukan penelitian tentang pentingnya konsep lanjutan dari pirolisis sampah ban dengan energi dan produksi material berpori. Penelitian tersebut mengenai pentingnya pirolisis untuk mengelola sampah ban. Optimasi kondisi pirolisis sampah ban bertujuan untuk

meningkatkan nilai produk, permintaan investigasi lebih lanjut, karakterisasi produk yang lebih luas dan standarisasi. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan reaktor tipe *batch rotary kiln*. Pembahasan dilakukan pada efek temperatur, kecepatan pemanasan, dan ukuran partikel sampah ban terhadap hasil pirolisis tersebut. Hasil pirolisis beserta kandungannya sebagai fokus penelitian, namun perhatian khusus diberikan kepada minyak (kandungan sebagai bahan bakar alternatif) dan residu yang dihasilkan. Hasil yang memuaskan didapatkan pada temperatur 550°C, dengan kecepatan pemanasan 20°C/menit, pada tekanan atmosfer dan ukuran partikel 15-20 mm menghasilkan minyak 51,8%, gas 12,1% dan residu 35,5%. Nilai kalor gas dan minyak masing-masing adalah 23,8 MJ/m³ dan 40,8 MJ/m³. Fraksi residu aktif dengan KOH dengan perbandingan masa 4:1 menghasilkan material berpori dengan luas permukaan BET (*Brunauer-Emmett-Teller Theory*) 402 m²/g (Antoniou dan Zabaniotou, 2015).

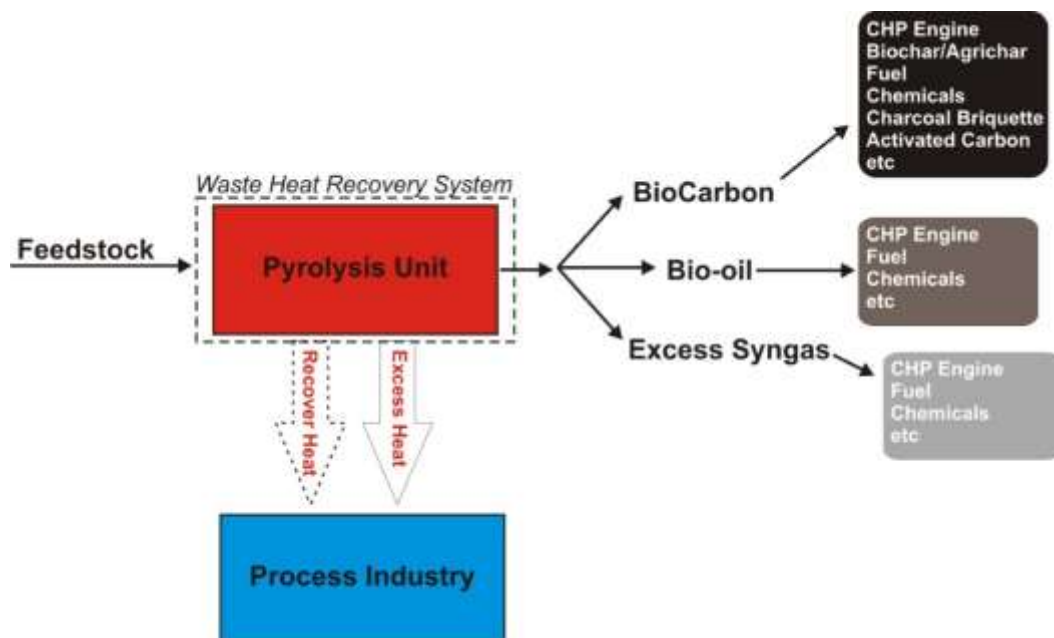
Mohamed A. Karali et al, melakukan penelitian analisa *rotary drum* yang dilengkapi *lifter* untuk menilai pemuatan optimal. *Rotary drum* yang dipasang dengan *lifter* memberikan efek yang kuat terhadap kemampuan pemuatan alat tersebut secara menyeluruh. Karena hal tersebut, menilai desain untuk kebutuhan tersebut adalah persoalan yang sangat penting. Penelitian tersebut menggunakan *batch rotary drum* dengan diameter 0,5 meter dan panjang 0.15 meter yang dilengkapi dengan *lifter* siku. Perbedaan pemuatan optimal diuji dengan dengan proses analisa gambar yang direkam mulai dari pemuatan rendah hingga pemuatan penuh. Obyek dari penelitian tersebut adalah perbedaan kepadatan material (aliran bebas), variasi kecepatan putaran (1-5 rpm), pemasangan jumlah *lifter* yang berbeda (12 dan 18), dan rasio panjang radial dari *lifter* (rasio 0,375-0,75). Perbandingan dihasilkan antara hasil percobaan dengan desain yang tersedia di literatur. Berdasarkan hasil percobaan, pemasangan jumlah *lifter* lebih memberikan pengaruh besar daripada pengaruh dari kecepatan putaran ataupun ukuran material (Karali et al, 2015).

Mengacu dari penelitian tersebut, maka penulis melakukan penelitian tentang merancang dan membangun alat konversi sampah ban menjadi bahan bakar minyak menggunakan reaktor tipe *rotary kiln*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia suatu material pada temperatur tinggi tanpa adanya oksigen. Proses pirolisis dimulai pada temperatur sekitar 230°C, ketika komponen yang tidak stabil secara termal, dan kandungan-kandungan pada sampah akan pecah dan menguap bersamaan dengan komponen lainnya. Produk cair yang menguap mengandung tar dan *polyaromatic hydrocarbon*. Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , dan CH_4), *tar* (*pyrolitic oil*), dan arang seperti yang dicontohkan pada Gambar 2-1. Parameter yang berpengaruh pada kecepatan reaksi pirolisis mempunyai hubungan yang sangat kompleks, sehingga model matematis persamaan kecepatan reaksi pirolisis yang diformulasikan oleh setiap peneliti selalu menunjukkan rumusan empiris yang berbeda (Trianna dan Rochimoellah, 2002).



Gambar 2-1 Diagram alir proses pirolisis

(http://1.bp.blogspot.com/HnKaPrNsvlg/T3z0tIqNqoI/AAAAAAAAAZc/rkkAJHlxoXs/s1600/pyro+waste+heat+recovery_en.jpg)

Dari hasil penelitian, limbah ban sangat memungkinkan menghasilkan bahan bakar minyak terutama menggunakan proses pirolisis. Proses tersebut merupakan cara yang ramah lingkungan dan efisien untuk mendapatkan manfaat dari sampah ban. Pirolisis sampah ban merupakan degradasi termal dalam ketiadaan oksigen kemudian menghasilkan bahan bakar gas, minyak dan residu (*char*). Gas hasil pirolisis tersebut dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi pemanas reaktor pirolisis. Minyak hasil pirolisis tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar atau sebagai bahan tambah bahan bakar fosil yang sudah ada. Selain itu residu padat mengandung karbon hitam dengan *grade* rendah yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan daur ulang pembuatan ban atau dikonversi menjadi karbon aktif.

Parameter utama yang mempengaruhi pirolisis adalah sebagai berikut yaitu:

1. Kadar air

Kadar air berpengaruh pada proses pirolisis. Energi dari luar yang seharusnya untuk proses pirolisis digunakan sebagian untuk proses pengeringan kadar air dalam bahan. 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 dan Babu, 2005).

2. Ukuran partikel

Efek dari ukuran partikel pada proses pirolisis dari biomasa telah diteliti oleh Chaurasia dan Babu. 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 (Chaurasia dan Babu, 2005).

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 CO₂ sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi konsentrasi yang rendah dari gas hidrokarbon juga diamati. Ketika laju pemanasan meningkat banyaknya gas seperti CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ 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 dan 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 et al, 2009). Pada material ban bekas temperatur proses pirolisis yang dibutuhkan mulai dari 300-700°C (Williams et al, 1990).

5. Bahan

Paul T. Williams telah mengulas tentang pirolisis sampah ban. Ulasan tersebut menyebutkan bahwa minyak sampah ban memiliki karakteristik seperti bahan bakar yang telah lolos pengujian pembakaran dan mesin. Produk yang dihasilkan dari pirolisis sampah ban sebagian besar adalah H₂, C₁-C₄ hidrokarbon, CO₂, CO dan H₂S (Williams, 2013).

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, 2009).

7. Laju nitrogen

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

8. Waktu tinggal bahan baku

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

10. Tipe pirolisis

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

2.2.2 *Rotary Kiln*

Rotary kiln adalah alat penukar panas dimana energi dari fase gas panas diekstraksi oleh bahan baku material. Selama di dalam *rotary kiln*, bahan baku akan mengalami berbagai macam proses pertukaran panas. Tipikal dari *rotary kiln* panjang adalah pengeringan, pemanasan, dan reaksi kimia yang mencakup berbagai suhu. Walaupun *rotary kiln* yang dipanaskan secara eksternal digunakan untuk pekerjaan khusus, *rotary kiln* paling memungkinkan digunakan untuk kontak langsung antara gas pembakaran dan bahan baku. Konfigurasi yang paling umum digunakan adalah aliran arus bolak balik dimana aliran bahan baku berlawanan arah dengan aliran gas pembakaran (Boateng, 2008).

1. Desain *Rotary Kiln*

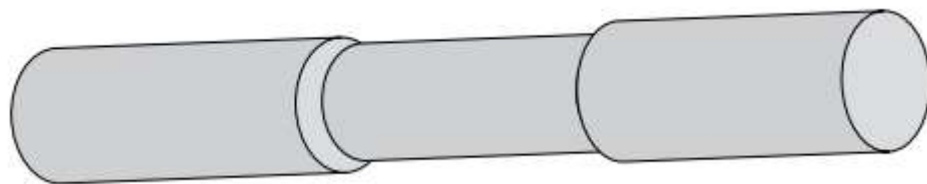
Desain dan operasi dari *rotary kiln* telah mengalami evolusi sistematis sejak zaman Mesir kuno. Perbaikan termasuk mengurangi tenaga kerja, peningkatan produktivitas, pencampuran, perpindahan panas, dan kualitas produk. *Rotary kiln* pengolahan mineral dapat diklasifikasikan sebagai vertikal, horizontal, atau gabungan keduanya seperti pada Tabel 2-1 (Boateng, 2008).

Beberapa desain *rotary kiln* telah berevolusi, masing-masing memiliki keunggulan dan fungsi yang berbeda-beda. *Rotary kiln* tersebut memiliki bentuk

yang bermacam-macam namun mayoritas berbentuk tegak lurus, silinder seperti pada Gambar 2-2, desain berbentuk halter mempunyai keuntungan dengan memanfaatkan ukuran drum yang bermacam-macam disesuaikan dengan proses dan aplikasinya (Boateng, 2008).

Tabel 2-1 Jenis-jenis Rotary Kiln (Boateng, 2008)

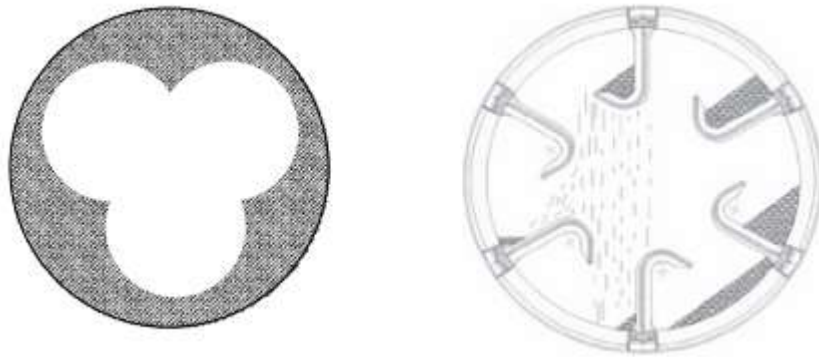
<i>Rotary Kiln Vertikal</i>	<i>Rotary Kiln Horizontal</i>	<i>Rotary Kiln Gabungan</i>
<i>Rotary kiln</i> dengan tipe poros tradisional	<i>Rotary kiln</i> konvensional panjang basah atau kering	<i>Kiln</i> bertipe <i>fluidized-bed</i>
Pembakaran tidak langsung	Pembakaran langsung atau tidak langsung	<i>Flash calciner</i>
Kapasitas besar, bahan baku campuran, <i>burner</i> berada ditengah	Berkapasitas kecil dengan pemanasan eksternal	Tungku berputar dengan jeruji berjalan atau <i>calcimatic kiln</i>
Aliran parallel jenis regeneratif	Modern dengan recuperators seperti jenis pendingin, <i>kiln preheater</i> dan internal	Tipe cincin horizontal, kiln berjeruji atau lainnya
Berbentuk cincin	Berbentuk silinder	Berbentuk silinder, kotak atau yang lainnya



Gambar 2-2 Rotary Kiln tipe silinder (Boateng, 2008)

Rotary kiln yang dibakar secara langsung dilapisi dengan bahan tahan api karena alasan tertentu, tetapi pada umumnya memiliki tujuan utama yaitu untuk melindungi lapisan dalam dan luar dalam aplikasi suhu tinggi, kerusakan termal dan untuk menghemat energi. *Kiln* juga dapat dilengkapi dengan

dam(bendungan) untuk meningkatkan waktu tinggal bahan atau membantu mengangkat dan mengaduk agar bahan mengalir secara aksial dan dalam beberapa kasus untuk meningkatkan pencampuran partikel. Selain itu penghematan energi dapat dilakukan dengan cara menggunakan *lifter* yang disesuaikan dengan aplikasinya seperti pada Gambar 2-3 (Boateng, 2008).



Gambar 2-3 Bentuk *Dam* (Kiri) dan *Lifter* (Kanan) pada *Rotary Kiln* (Boateng, 2008)

Rotary kiln yang terdahulu memiliki efisiensi termal yang rendah dan kebutuhan efisiensi bahan bakar pemanas, maka banyak desain yang bertujuan untuk memaksimalkan pencampuran dan pemindahan panas. Maka dari itu, *rotary kiln* sering dilengkapi pemanasan mula dimana energi panas dari gas buang dikembalikan untuk memanaskan bahan baku sebelum dimasukan kedalam *rotary kiln*. Pendingin yang pada umumnya digunakan untuk mendinginkan produk, panas yang diserap oleh pendingin tersebut dimanfaatkan untuk memulihkan energi dengan cara untuk memanaskan udara pembakaran atau dimanfaatkan untuk memanfaatkan energi lainnya. Saat ini *rotary kiln* dibedakan sebagai berikut:

a. *Wet Kiln* (*Kiln Basah*)



Gambar 2-4 *Wet kiln* untuk material setengah basah (Boateng, 2008)

Wet kiln pada Gambar 2-4 biasanya digunakan untuk material lumpur. *Kiln* tersebut pada umumnya memiliki panjang 150-180 meter. Pada bagian belakangnya dilengkapi dengan rantai yang berfungsi sebagai *flywheel* panas dengan pemulih panas yang memanfaatkan gas buang untuk membantu pengeringan. Rantai tersebut juga digunakan untuk membantu memecah bongkahan material yang ukurannya terlalu besar selama fase transisi dari lumpur menjadi padatan pada proses pengeringan. *Kiln* jenis tersebut dapat dijumpai di industri kertas atau di beberapa produk makanan (Boateng, 2008).

b. *Long Dry kiln* (Kiln Pengering Panjang)

Kiln tersebut memiliki dimensi yang lebih pendek daripada *wet kiln* yang panjangnya hanya 90-120 meter. *Kiln* tersebut dapat melakukan proses pengeringan, pemanasan, dan kalkinasi hanya dengan menggunakan satu penampung. Namun *kiln* tersebut hanya dapat bekerja maksimal untuk material yang besar. Desain yang lebih pendek tersebut lebih cocok untuk bahan yang berwujud seperti padatan granular daripada lumpur. *Kiln* jenis ini dapat ditemui di industri kapur atau batu-batu beragregat ringan yang dihancurkan terlebih dahulu hingga ukuran 1,3-5 cm sebelum masuk ke *kiln* (Boateng, 2008).

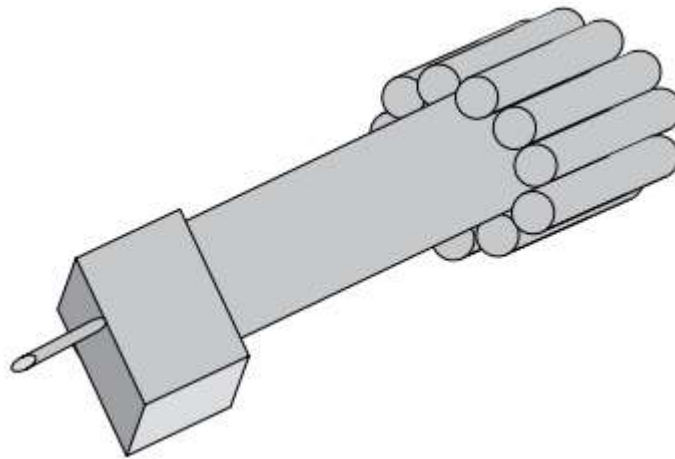
c. *Short Dry Kiln*



Gambar 2-5 *Rotary kiln* yang dilengkapi *Preheater* (Boateng, 2008)

Kiln pada Gambar 2-5 biasanya dilengkapi dengan *preheater* eksternal atau *precalciner* dimana bahan material dikeringkan, dipanaskan atau bahkan sebagian dikalkinasi sebelum memasuki reaktor utama (*kiln*). Hal tersebut menyebabkan beban termal pada *kiln* berkurang. Oleh karena itu *kiln* yang dilengkapi dengan *preheater* atau *precalciner* memiliki dimensi yang cenderung pendek, yaitu 15-75 meter tergantung proses yang dibutuhkan (Boateng, 2008).

d. *Cooler and Dryer*



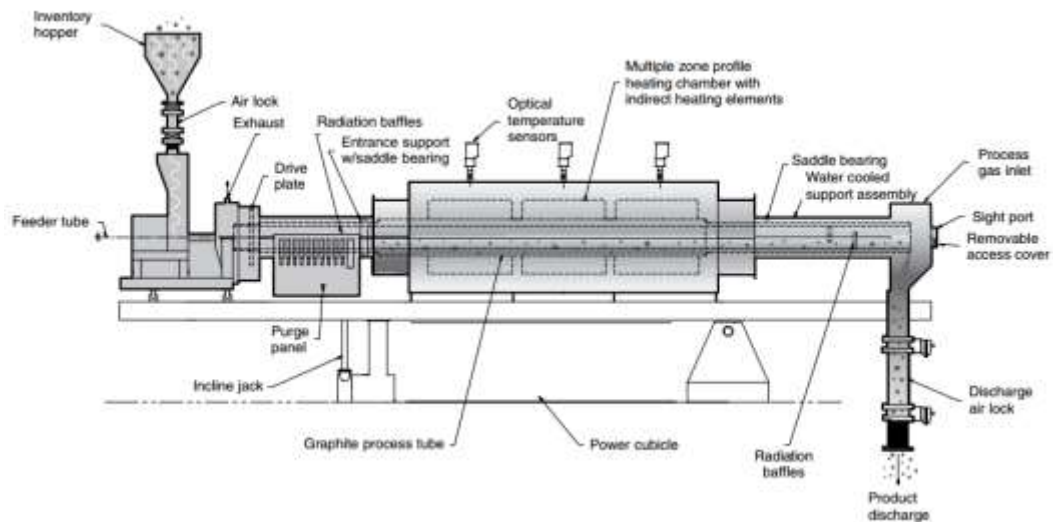
Gambar 2-6 Cooler dan dryer terpasang pada rotary kiln (Boateng, 2008)

Seperti pada Gambar 2-6, beberapa pendingin dan pengering berbentuk bisa dalam bentuk kontaktor seperti *rotary kiln* itu sendiri. *Rotary cooler* dapat segaris atau terpasang pada *rotary kiln*. Namun pendinginan yang terpasang pada *kiln* memberikan beban berlebih, sehingga perlu diperhitungkan dalam pembuatan desain. Hal tersebut juga menyulitkan dalam hal perawatan mesin. *Cooler and dryer* tersebut biasanya dilengkapi dengan bendungan atau *lifter* untuk mengaduk material dan memperlebar kontak panas sehingga memberikan keuntungan kontak panas yang lebih baik (Boateng, 2008).

e. *Indirect Fired Kiln (Kiln dengan pemanas tak langsung)*

Kiln pada Gambar 2-7 merupakan jenis *kiln* yang dipanaskan secara eksternal. *Kiln* tersebut dirancang untuk aplikasi yang tidak mengijinkan adanya kontak langsung antara material atau gas yang ada didalam *kiln* dengan sumber panas. Pada kasus tersebut, *kiln* dipanaskan dari luar. *Kiln* tipe ini memiliki efisiensi panas yang rendah. Selain itu biasanya alat tersebut memiliki ukuran

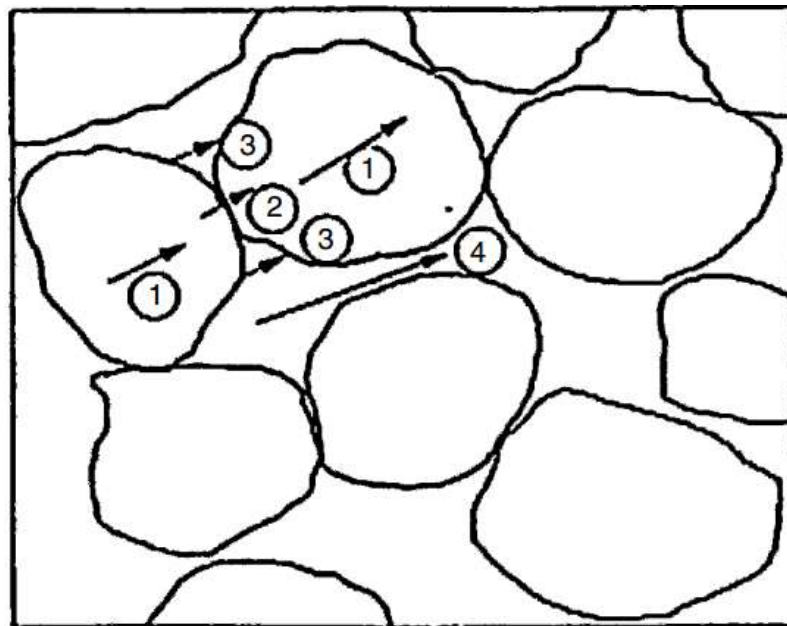
diameter yang kecil, yaitu hingga 1,3 meter dan digunakan pada aplikasi kalkinasi material khusus. *Kiln* jenis ini dilengkapi dengan fitur pengontrol temperatur ganda yang dapat dipanaskan dengan pemanas listrik atau gas secara terpisah (Boateng, 2008).



Gambar 2-7 Rotar kiln dengan pembakaran tidak langsung (Boateng, 2008)

2. Penjelasan Dasar Operasi *Rotary Kiln*

a. Fenomena Bahan Baku Didalam *Rotary Kiln (Bed)*



Gambar 2-8 Jalur perpindahan kalor. 1. Konduksi Internal 2. Konduksi antar partikel 3. Radiasi antar partikel 4. Konveksi interpartikel

Seperti pada Gambar 2-8, perpindahan panas terjadi secara konduksi dan radiasi dari satu partikel ke partikel lain, serta secara konveksi dari gas ke partikel. Namun, pergerakan partikel tersebut membebani komponen adveksi (gerakan massa udara secara horizontal yg mengakibatkan perubahan unsur fisik udara) untuk transportasi energi yang memiliki potensi untuk mendominasi perpindahan panas. Oleh karena itu kunci dari *rotary kiln* adalah gerak melintang penampang, yang menetapkan aliran aksial dalam gerak dan tergantung pada kecepatan rotasi, volume *kiln* ditempati oleh material, dan sifat-sifat reologi dari partikulat bahan (Boateng, 2008).

Reaktor berbentuk silinder dan diisi sebagian dari volume *kiln*, umumnya memiliki dua mekanisme dispersi, yaitu mempunyai arah aksial yang ditandai oleh koefisien pencampuran aksial, dan yang lainnya di arah melintang yang sering dikaitkan dengan koefisien pencampuran radial. Komponen pencampuran aksial dikaitkan dengan mekanisme yang menghasilkan suatu konveksi keseluruhan, dan menyebabkan sebagian besar materi untuk bergerak dari inlet dari drum silinder ke outlet dengan kecepatan rata-rata sama dengan kecepatan aliran plug. Komponen pencampuran radial melibatkan mekanisme di skala yang lebih kecil yang menyebabkan kendala lokal pada partikel individu dan menghasilkan komponen kecepatan baik dalam arah aksial dan arah melintang. Kedua koefisien yaitu pencampuran aksial dan melintang cenderung meningkat dengan peningkatan kecepatan rotasi kiln. Untuk rotasi putaran rendah mengharapkan penyebaran di distribusi waktu tinggal karena pengaruh dari kondisi kecepatan (Wes et al., 1976). Efek dari ukuran drum, reologi partikel, dan drum yang fitur internal menjadi pertimbangan utama perancangan (Boateng, 2008).

b. Fitur geometris dan Efek Transportasi mereka

Fitur kunci geometris adalah ukuran drum, yaitu adalah aspek rasio antara diameter silinder dan panjang *kiln* (L / D) dan juga kemiringan. Fitur penting lainnya yaitu pada bagian internal, seperti bendungan penyempitan dan *lifter*, dampak bahwa waktu tinggal. Hubungan empiris yang dikembangkan oleh US

Geological Survey di awal 1950-an yang berkaitan dengan waktu tinggal dan geometri kiln telah menjadi andalan desain bahkan hingga saat ini (Perry, 1984).

$$\tau = \frac{0.23L}{sN^{0.9}D} \pm 0.6 \frac{BLG}{F}$$

dimana s adalah kemiringan (ft / ft), N adalah kecepatan rotasi *kiln* di putaran per menit (rpm), L dan D adalah panjang *kiln* masing-masing dan diameter (ft), G adalah kecepatan gas *freeboard* didefinisikan di sini dalam satuan (lb /hr/ ft²), dan F adalah bahan baku atau kecepatan pengisian bahan lb-kering/hr/ft² kaki persegi. B adalah konstan tergantung pada material dan didefinisikan sebagai $B = sd_p^{-0.5}$ di mana d_p adalah ukuran partikel (Boateng, A.A., 2008).

c. Gerakan *bed* melintang

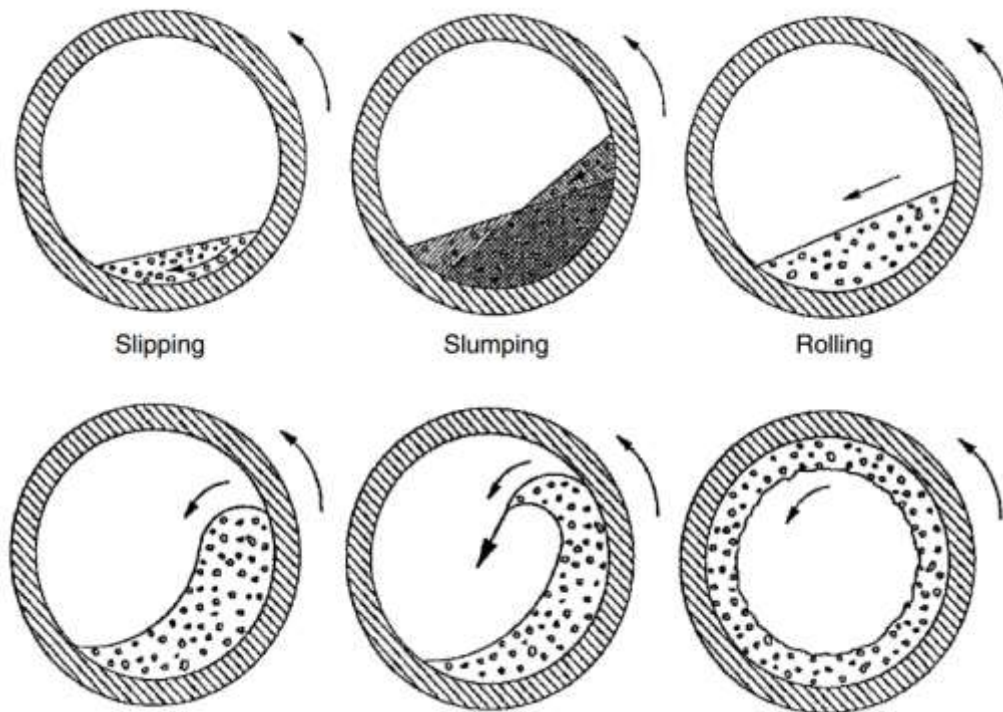
Tergantung pada tingkat rotasi kiln, seperti pada Gambar 2-9 gerakan *bed* melintang di penampang dapat dicirikan sebagai *centrifuging*, yang terjadi pada kecepatan kritis dan tinggi. Hal tersebut adalah kondisi yang ekstrim di mana semua bahan baku seperti menempel pada dinding *kiln* pada saat berputar. *Cascading* juga terjadi pada kecepatan rotasi yang relatif tinggi. Kejadian tersebut adalah suatu kondisi di mana ketinggian tepi (*shear wedge*) terkemuka bubuk naik di atas permukaan *bed* dan partikel bergulung di *freeboard*. Kedua kondisi tersebut merupakan hal yang jarang diinginkan *rotary kiln* sebagai kontaktor, namun kondisi tersebut dimanfaatkan untuk pengeringan makanan.

Pada kecepatan rotasi rendah yang kemudian bergerak ke tingkat kecepatan yang lebih tinggi, *bed* akan tergelincir, di mana sebagian besar *bed* mengalami *slipping* melawan gerakan dinding reaktor. Sementara untuk *slumping* adalah kondisi dimana segmen dari bahan baku di *shear wedge* menjadi tidak stabil dan bermuara ke bawah lereng. *Rolling* adalah kondisi debit stabil ke permukaan tidur. Pada kondisi *slumping*, terjadi variasi sudut dinamis mengikuti putaran sementara dalam kondisi *rolling* sudut tetap konstan. Telah ditetapkan (Rutgers, 1965) bahwa kesamaan dinamis dari perilaku *rotary drum*, dan karenanya jenis gerak *bed* melintang yang terjadi selama pengolahan bubuk,

tergantung pada jumlah Froude rotasi (Fr). Jumlah tersebut dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Fr = \omega^2 R / g$$

Dimana, ω adalah kecepatan putaran, R merupakan jari-jari reaktor, dan g adalah percepatan gravitasi (Boateng, 2008).



Gambar 2-9 Pergerakan *bed* melintang (Boateng, 2008)

2.2.3 *Burner*



Gambar 2-10 *Steam burner*

Istilah “*burner*” menggambarkan serangkaian peralatan untuk pembakar yang dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar yang disesuaikan kepada suatu kondisi sehingga mendapatkan pembakaran yang sempurna. *Burner* atau pemanas bekerja dengan cara menghisap bahan bakar dan udara pendukung pembakaran yang kemudian tercampur didalam suatu tempat pembangkit panas (Riello, 2001). Gambar 2-10 merupakan salah satu contoh *burner* yang digunakan pada reaktor tipe *rotary kiln* skala industri.

2.2.4 Sistem Pemindah Daya

Transmisi atau bisa disebut juga pemindah daya pada umumnya adalah suatu mekanisme yang digunakan untuk memindahkan gerakan dan daya elemen mesin satu ke elemen mesin yang lainnya (Stolk, 1986).

Diketahui rumus perbandingan pemindah daya (rasio):

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

Dimana;

i : rasio

n_1 : putaran penggerak (rpm)

n_2 : putaran yang digerakan (rpm)

D_1 : diameter penggerak (mm)

D_2 : diameter yang digerakan (mm)

z_1 : jumlah gigi penggerak

z_2 : jumlah gigi digerakan

BAB 3

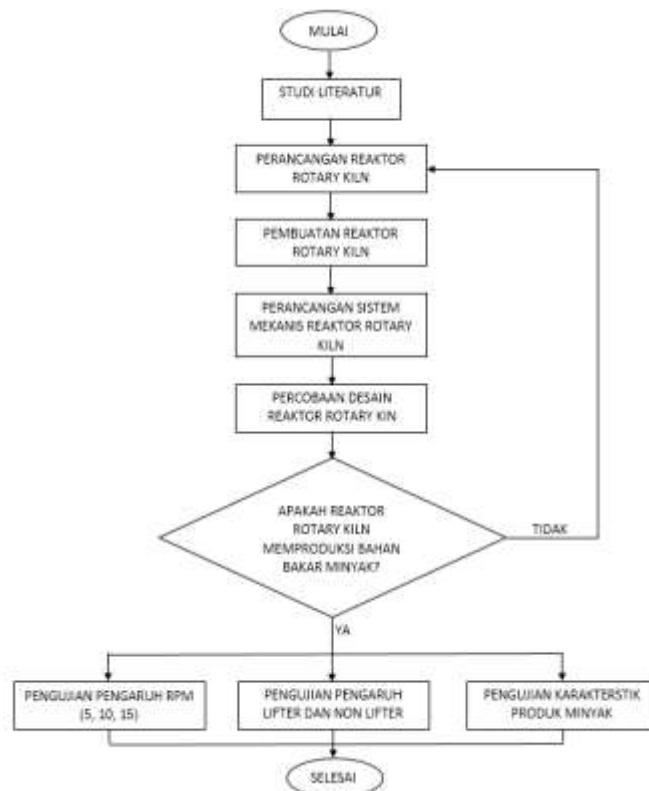
METODE PENELITIAN

3.1 Identifikasi Masalah

Reaktor *rotary kiln* dirancang agar mampu memberikan pemanasan yang merata dan mempercepat proses pirolisis. Maka dari itu reaktor tersebut dapat berputar dengan kecepatan yang konstan. Selain itu untuk memberikan pemanasan yang merata, bahan baku dalam hal ini adalah sampah ban perlu diaduk sehingga diperlukan mekanisme pengaduk didalamnya. Reaktor tersebut selain berputar, juga harus dapat mengalirkan gas hasil pirolisis ke perangkat pendingin yang tidak ikut berputar. Reaktor tersebut harus dapat bekerja diatas 230°C agar proses pirolisis dapat terjadi.

3.2 Alur Penelitian

Untuk mempermudah penelitian, penulis membuat diagram alur penelitian seperti pada Gambar 3-1 dibawah ini:



Gambar 3-1 Diagram Alur Penelitian

3.3 Peralatan dan Bahan

Pada penelitian ini terdapat peralatan dan bahan yang digunakan, yaitu:

3.3.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam rancang bangun reaktor tipe *rotary kiln* ini menggunakan peralatan lunak dan keras.

1. *Software Solidworks 2013*
2. Viskometer Oswald
3. Tabung Elenmenyer
4. Piknometer
5. Timbangan digital
6. *Stopwatch*
7. Kondensor
8. *Non-Contact Infrared Temperature Gun*
9. Pompa air

3.3.2 Bahan

Bahan yang digunakan untuk pembuatan perancangan reaktor *rotary kiln* ini adalah sebagai berikut:

1. Plat besi dengan ketebalan 2mm
2. Plat besi dengan ketebalan 5mm
3. Besi silinder pejal berdiameter 32mm
4. Plat strip dengan lebar 30mm
5. Plat siku dengan lebar 30mm
6. Motor DC
7. *Microcontroller*
8. *Bearing assy*
9. *Thermocouple type K*
10. Kompor semawar
11. Tabung LPG

3.4 Perancangan

Pada bagian ini dijelaskan tentang perancangan yang meliputi pembuatan desain dan pembuatan reaktor *rotary kiln*. Pembuatan dibagi menjadi 3 bagian. Bagian-bagian tersebut diantaranya adalah:

1. Rangkaian Reaktor tipe *Rotary Kiln*
2. Rangkaian Rangka
3. Rangkaian Sistem Pemindah Daya
4. Rangkaian Pengatur Kecepatan Putaran

Hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan Reaktor tipe *Rotary Kiln* yaitu bahwa tidak diperbolehkan adanya kebocoran, karena produk yang dihasilkan dari pirolisis sampah ban berupa gas yang dapat terbakar. Sehingga pembuatan reaktor tersebut diuji dengan udara bertekanan sekitar 120 Psi. Bahan yang digunakan adalah plat besi karbon rendah dengan kandungan Karbon(C) 0,05-0,07%.

Spesifikasi kecepatan putaran dari motor DC *power window* yang digunakan adalah 80 *revolution per minutes* (rpm), maka dari itu diperlukan transmisi untuk mereduksi putaran motor tersebut. Selain itu putaran reaktor dibuat agar dapat diatur kecepatan putarannya menggunakan *microcontroller*.

3.5 Pengujian Alat

Pada bagian ini akan dijelaskan langkah-langkah pengujian reaktor dengan variasi putaran kecepatan dan perangkat bagian dalam yaitu tanpa dan dengan pemasangan *lifter*, viskositas, dan densitas.

3.5.1 Pengujian Variasi Kecepatan Putaran dan *Lifter*

Berikut adalah prosedur pengujian variasi kecepatan putaran dan perangkat bagian dalam (*lifter*):

1. Merangkai reaktor, kondensor dan rangkaian mikrokontroler pengatur kecepatan putaran *rotary kiln*.
2. Memasukan limbah ban sebagai bahan baku kedalam tabung *rotary kiln reactor* kemudian tutup rapat reaktor tersebut, bila perlu diberi *sealer*.

3. Menyalakan *rotary kiln* agar berputar dengan menekan tombol pada mikrokontroler sesuai pengaturan kecepatan putaran yang akan diuji. Dalam pengujian tersebut terdapat 3 variasi kecepatan putaran yaitu 5, 10, dan 15 rpm.
4. Menyalakan kompor semawar untuk memanaskan reaktor tersebut dan menjaga temperatur reaktor pada temperatur 300°C dengan bantuan *infrared temperature gun*.
5. Mencatat temperatur yang tercantum pada *infrared temperature gun* dan *thermocouple* setiap 15 menit.
6. Indikator berlangsungnya proses pirolisis adalah keluarnya asap dari cerobong kondensor. Apabila asap sudah tidak keluar, proses pirolisis telah selesai.
7. Mengeluarkan residu dari reaktor tersebut.

Untuk melakukan pengujian dengan *lifter*, memasang perangkat tersebut sebelum melakukan pengujian. Berhati-hati pada saat pemasangan ataupun pelepasan *lifter* apabila kegiatan tersebut dilakukan setelah pengujian pirolisis. Melakukan langkah 2 sampai 7 untuk pengujian menggunakan *lifter*.

3.5.2 Pengujian Densitas

Berikut adalah prosedur pengujian densitas dengan piknometer dengan kapasitas 25 ml seperti pada Gambar 3-2, yang dilakukan di Laboratorium Operasi Teknik Kimia UII.

1. Membersihkan dan mengeringkan piknometer.
2. Mengkalibrasi timbangan *digital* yang akan digunakan dengan cara meletakkan piknometer kosong beserta tutupnya keatas timbangan *digital*, kemudian timbangan tersebut di-nol-kan.
3. Mengisi piknometer dengan minyak pirolisis hingga penuh kemudian memasang tutup piknometer kemudian membersihkan tumpahan akibat pemasangan tutup tersebut.
4. Meletakkan piknometer yang berisi minyak keatas timbangan *digital*.
5. Mencatat hasil timbangan tersebut.

Setelah dilakukan penimbangan, nilai densitas dapat diperoleh dengan menggunakan rumus berikut:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

(Farrington, 1978)

Dimana ρ adalah densitas (gr/ml), sementara volume sesuai dengan kapasitas piknometer, yaitu 25ml.



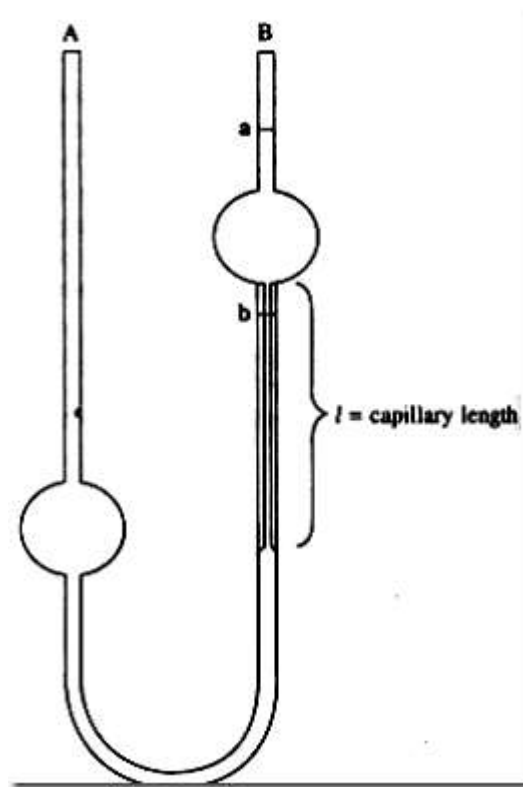
Gambar 3-2 Piknometer

(https://ecs12.tokopedia.net/newimg/product-1/2015/3/17/10220938/10220938_f9633b56-cc4f-11e4-898d-66f74908a8c2.jpg)

3.5.3 Pengujian Viskositas

Berikut adalah prosedur pengujian viskositas dengan viskometer ostwald seperti pada Gambar 3-3 yang dilakukan di Laboratorium Operasi Teknik Kimia UII.

1. Membersihkan viskometer dengan alkohol.
2. Mengisi viskometer dengan minyak pirolisis melalui lubang A hingga minyak menyentuh saluran kapiler.
3. Memasang alat vakum pada lubang B untuk menghisap minyak hingga menyentuh batas atas (a).
4. Melepas alat vakum agar minyak turun hingga batas bawah (b).



Gambar 3-3 Viskometer Ostwald
<https://indahprmtha.files.wordpress.com/2014/10/1.png>

5. Menghitung waktu (t) yang dibutuhkan minyak dimulai dari batas atas (a) hingga batas bawah (b) dengan *stopwatch* kemudian mencatat waktu (t) tersebut.

Setelah pengujian dilakukan maka waktu (t) digunakan untuk menghitung viskositas minyak tersebut. Berikut adalah rumus yang digunakan:

$$\eta_x = \frac{t_x \cdot \rho_x}{t_a \cdot \rho_a} \cdot \eta_a$$

(Farrington, 1978)

Dimana:

- η_x : viskositas minyak (milipoise)
- η_a : viskositas air (milipoise)
- t_x : waktu alir minyak (s)
- t_a : waktu alir air (s)
- ρ_x : densitas minyak (gr/ml)
- ρ_a : densitas air (gr/ml)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan

4.1.1 Hasil Desain

Perancangan pertama, reaktor didesain seperti *rotary kiln* pada umumnya seperti pada Gambar 4-1. Reaktor tersebut dilengkapi 4 *roller* penopang di bagian bawahnya. Reaktor tersebut juga dilengkapi 1 set *bearing unit* sebagai titik putar poros yang terletak di antara roda gigi dan reaktor.



Gambar 4-1 Rancangan pertama *rotary kiln reactor* skala laboratorium

Desain reaktor pada Gambar 4-1 memiliki kekurangan dan kelebihan pada saat dioperasikan. Kelebihan dari desain tersebut adalah dapat dibuka secara penuh untuk memasukan dan mengeluarkan bahan baku dalam hal ini ialah sampah ban. Namun desain tersebut memiliki beberapa kelemahan yaitu apabila mengeluarkan dan memasukan bahan baku harus melepas rangkaian sistem pendingin yang berada didepan reaktor tersebut. Selain itu reaktor tersebut akan menerima temperatur yang cukup tinggi, yaitu 250°C hingga 350°C dimana temperatur tersebut dapat menyebabkan perubahan bentuk silinder reaktor tersebut. Apabila hal tersebut terjadi, dapat menimbulkan getaran yang tinggi. Getaran tersebut timbul karena lubang output reaktor tersebut mengalami *runout*

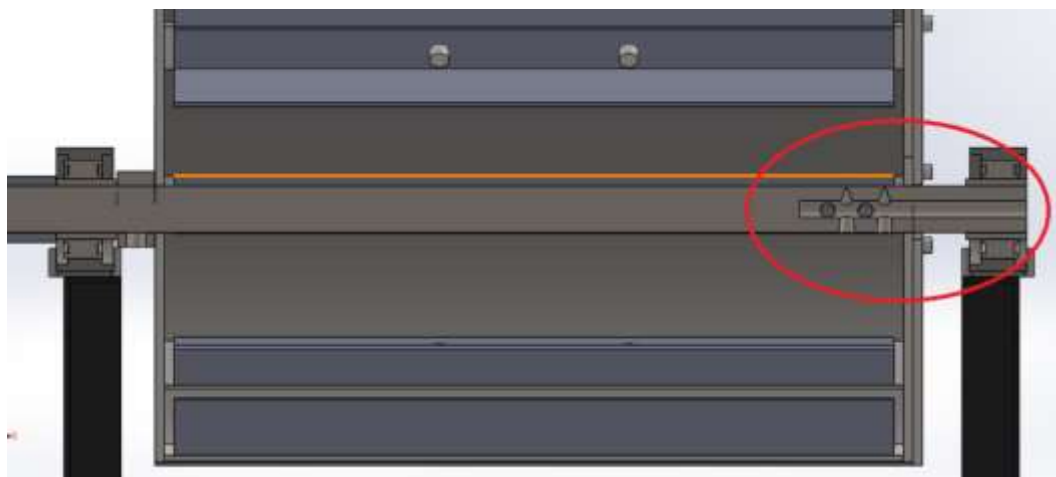
akibat ketidaksilindrisan reaktor, sementara sistem pendingin yang terhubung langsung tidak bergerak bersamaan dengan reaktor.

Dari kekurangan yang ditimbulkan dari rancangan pada Gambar 4-1, desain reaktor dimodifikasi seperti pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2 Rancangan kedua *rotary kiln reactor* skala laboratorium

Pada desain tersebut reaktor dilengkapi dengan poros yang ditopang dengan 2 set *bearing unit* seperti pada Gambar 4-3. Poros tersebut selain sebagai penopang berat reaktor, juga dilengkapi dengan lubang-lubang saluran *output* gas pirolisis. Penggunaan poros tersebut dapat meminimalisir getaran yang timbul karena lubang *output* tidak terpengaruh oleh *run out* reaktor yang dipanaskan. Alasan penggunaan poros tersebut juga untuk mengantisipasi ketidakbulatan reaktor akibat proses permesinan saat pembuatan dan juga akibat pemuaian panas yang dapat mengubah bentuk reaktor tersebut.



Gambar 4-3 Lubang *output* gas pirolisis (dilingkari warna merah)

Saluran gas keluar didesain pada poros reaktor tersebut. Poros dilubangi secara horizontal sedalam 120 mm dengan diameter 12 mm. Poros tersebut kemudian dilubangi secara vertikal hingga tembus dengan diameter 8 mm sebanyak 4 lubang secara menyilang dengan jarak antar sumbu lubang 20 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-3.

4.1.2 Hasil Pembuatan Alat

a. Perancangan *Rotary Kiln Reactor*

Reaktor adalah sebagai tempat terjadinya proses *thermal pyrolysis*. Bahan baku yang dimasukan adalah ban bekas, selain itu reaktor akan dipanaskan pada temperatur 250-500°C. Reaktor juga dirancang berbentuk tabung dengan ukuran diameter 260 mm dengan panjang 400 mm. Reaktor tersebut dapat dilengkapi dengan *lifter* dengan ukuran panjang lengan 28 mm.



Gambar 4-4 *Mild steel* tipe AISI 1018

(http://www.primeproducts.co.in/ip_themes/ip_boldness/images/mild_steel_angle_bars.jpg)

Langkah awal yaitu menentukan bahan material yang digunakan untuk pembuatan reaktor tersebut. Bahan material seperti pada Gambar 4-4 yang dipilih

adalah AISI 1018 *Mild/Low Carbon Steel*. Bahan tersebut memiliki titik lebur di temperatur 1535°C dan *yield strength* pada 370 MPa. (azom.com, 2016)

Langkah selanjutnya yaitu pembuatan reaktor yang dilakukan di PT. Sarana Andalan Enggal meliputi pengerolan, pengeboran, pengelasan dan perakitan reaktor.

b. Perancangan Sistem Penggerak Reaktor

Reaktor memerlukan penggerak yang memiliki kecepatan putaran rendah yaitu 5-15 *rpm* namun memiliki torsi yang cukup besar untuk memutar beban 24 kg. Untuk mengatasi hal tersebut maka digunakan motor *12V DC motor power window* seperti pada Gambar 4-5 yang memiliki kecepatan putaran tanpa beban (*no load speed*) 80 rpm dan torsi 30 Kg.cm. (klinikrobot.com, 2015)



Gambar 4-5 Motor DC power window

Untuk mereduksi putaran motor tersebut, maka sistem dilengkapi dengan pemindah daya. Sistem pemindah daya reaktor tersebut digerakan menggunakan roda gigi dan rantai sebagai penghubung antar roda giginya seperti pada Gambar 4-6. Berikut adalah perhitungan rasio transmisi tersebut.

Roda gigi atas (z_2) berjumlah 48 gigi, sementara roda gigi bawah (z_1) berjumlah 10 gigi. Sehingga perhitungan rasionya adalah:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{48}{10}$$

$$i = 4,8$$



Gambar 4-6 Pemindah daya reaktor tipe rotary kiln

Dari hasil rasio tersebut maka kecepatan putaran reaktor (n_2) yang didapatkan adalah:

$$i = \frac{n_1}{n_2}$$

$$4,8 = \frac{80}{n_2}$$

$$n_2 = 16,67 \text{ rpm}$$

Dari kecepatan putaran reaktor tersebut yang telah direduksi, agar dapat memiliki 3 ragam kecepatan putaran, yaitu 5, 10, 15 rpm maka diperlukan sebuah sistem untuk mengatur kecepatan tersebut. Pengatur kecepatan tersebut menggunakan mikrokontroler. Mikrokontroler tersebut diprogram menggunakan program *pulse width modulation* (PWM) untuk mendapatkan keberagaman kecepatan putaran. Nilai PWM untuk kecepatan putaran 5 rpm adalah 125, sementara untuk 10 rpm adalah 175, dan untuk 15 rpm adalah 225.

c. *Burner*

Proses pirolisis memerlukan pemanasan dari luar dan tidak kontak langsung dengan bahan baku. Pada penelitian tersebut diperlukan *burner* yang dapat memberikan sumber panas hingga 500°C. *Burner* yang digunakan adalah kompor semawar bertekanan tinggi yang menggunakan bahan bakar *liquefied petroleum gas* (LPG) ukuran kecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-7.



Gambar 4-7 Kompor semawar

(https://lobstermyfriend.files.wordpress.com/2015/05/5005034_gasburnertianliong.png)

Hasil pengukuran dengan menggunakan pistol termometer, alat pemanas tersebut dapat menghasilkan panas hingga 500°C.

d. Pembaca Temperatur



Gambar 4-8 Termokopel tipe K

(<http://g01.a.alicdn.com/>)

Rotary kiln reactor tersebut akan dipanaskan dari luar dengan temperatur 250°C hingga 500°C. Oleh karena itu pembaca temperatur yang dipilih adalah termokopel tipe K yang ditunjukkan pada Gambar 4-8. Termokopel jenis tersebut memiliki kapasitas pengukuran dari -270°C hingga 1370°C. (Pyromation, 2016)

e. Kondensor

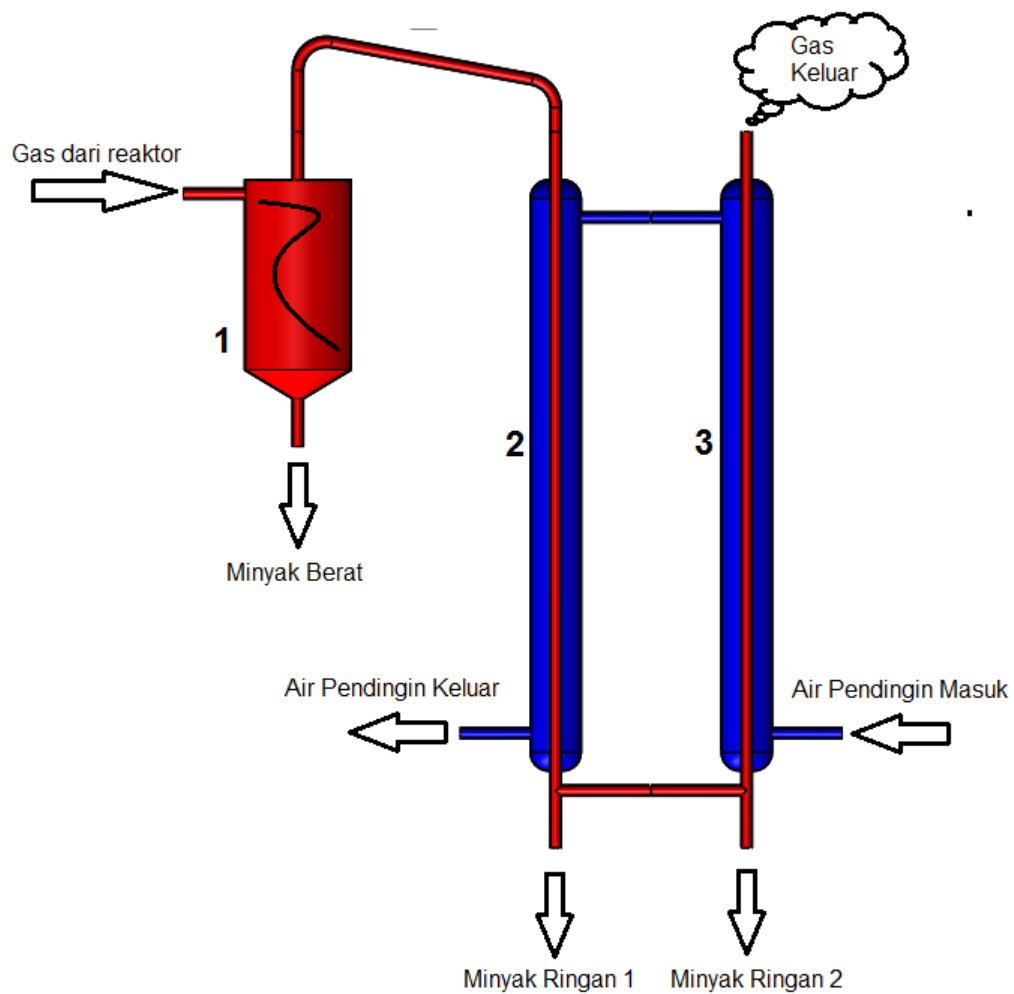


Gambar 4-9 Kondensor

Untuk mengubah gas pirolisis menjadi cair (minyak) maka diperlukan kondensor. Kondensor yang digunakan dari laboratorium teknik kimia FTI UII. Kondensor pada Gambar 4-9 tersebut mempunyai 3 kondensor dan 1 saluran gas. Kondensor minyak nomor 1 hingga 3 dilengkapi saluran minyak keluar yang secara berturut-turut mengubah minyak dari gas fraksi berat ke fraksi yang lebih ringan.

Seperti pada Gambar 4-10, bagian berwarna merah merupakan saluran dan ruangan gas pirolisis, sementara warna biru untuk air pendingin. Gas pirolisis dari reaktor masuk kedalam tabung kondensor nomor 1. Tabung tersebut didesain agar gas yang masuk berputar mengelilingi dinding tabung tersebut untuk memindahkan panas sehingga gas fraksi berat berubah menjadi cair. Fraksi gas yang lebih ringan menuju ke tabung kondensor nomor 2 dan 3 dimana pendinginan dibantu oleh air agar fraksi gas yang lebih ringan dapat berubah menjadi cair. Air pendingin masuk melalui saluran air di tabung kondensor

nomor 3 kemudian keluar melalui saluran air di tabung kondensor nomor 2. Hal tersebut bertujuan agar pendinginan pada tabung kondensor nomor 3 lebih baik dan menghasilkan fraksi minyak yang paling ringan. Gas yang tidak dapat diubah menjadi cair keluar melalui cerobong pada tabung kondensor nomor 3 dimana cerobong tersebut juga sebagai indikator proses pirolisis. Apabila gas keluar melalui cerobong tersebut, proses pirolisis sedang berlangsung, namun apabila gas tidak keluar berarti proses pirolisis telah selesai.



Gambar 4-10 Skema kondensor yang digunakan

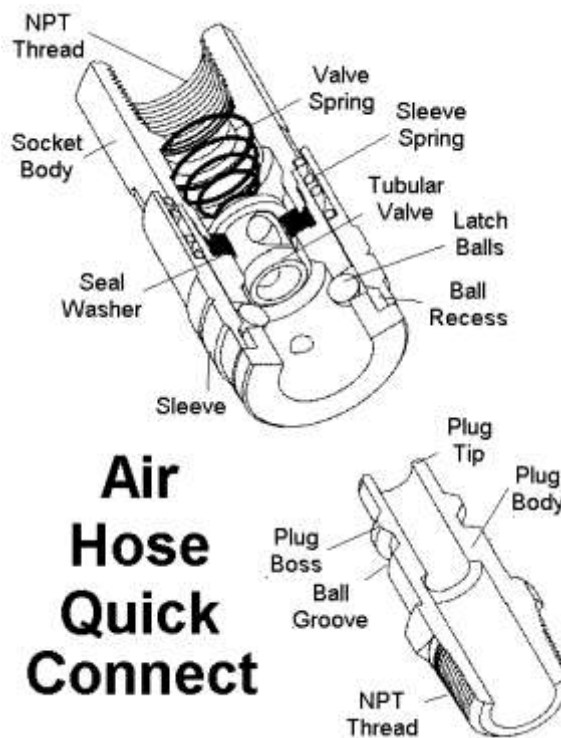
f. *Rotary connector*

Untuk mengatasi masalah akibat *rotary kiln* yang berputar sedangkan kondensor diam, diperlukan sebuah mekanisme yang dapat menghubungkan 2 keadaan tersebut.



Gambar 4-11 *Quick coupler* kompresor angin

Quick coupler seperti pada Gambar 4-11 digunakan sebagai komponen yang dapat mengatasi masalah tersebut.



Gambar 4-12 Rangkaian *quick coupler*

(http://www.homemetalshopclub.org/news/aug03/connector_cut_away.gif)

Seperti pada Gambar 4-12, *Plug body* dihubungkan kedalam *quick coupler* sehingga *plug tip* mendorong *tubular valve* sehingga saluran terbuka. *Latch ball* pada gambar tersebut masuk kedalam *ball grove* sehingga kedua komponen tersebut terkunci. *Latch ball* juga dapat sebagai *bearing* agar *quick coupler* dapat berputar.

4.2 Hasil Pengujian

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil pengujian yang meliputi pengaruh kecepatan putaran 5, 10, dan 15 *rpm*, pengaruh pemasangan *lifter*, dan karakteristik dari setiap pengujian. Pengujian tersebut memiliki parameter tetap yaitu:

1. Temperatur pemanasan rata-rata 300°C
2. Bahan baku yang digunakan yaitu ban luar kendaraan yang telah dicacah dengan ukuran sekitar 1 mm x 1 mm x 10 mm.
3. Bahan baku yang digunakan sebanyak 500 gram. Hal tersebut dikarenakan untuk mempersingkat waktu pengujian yang dibutuhkan.



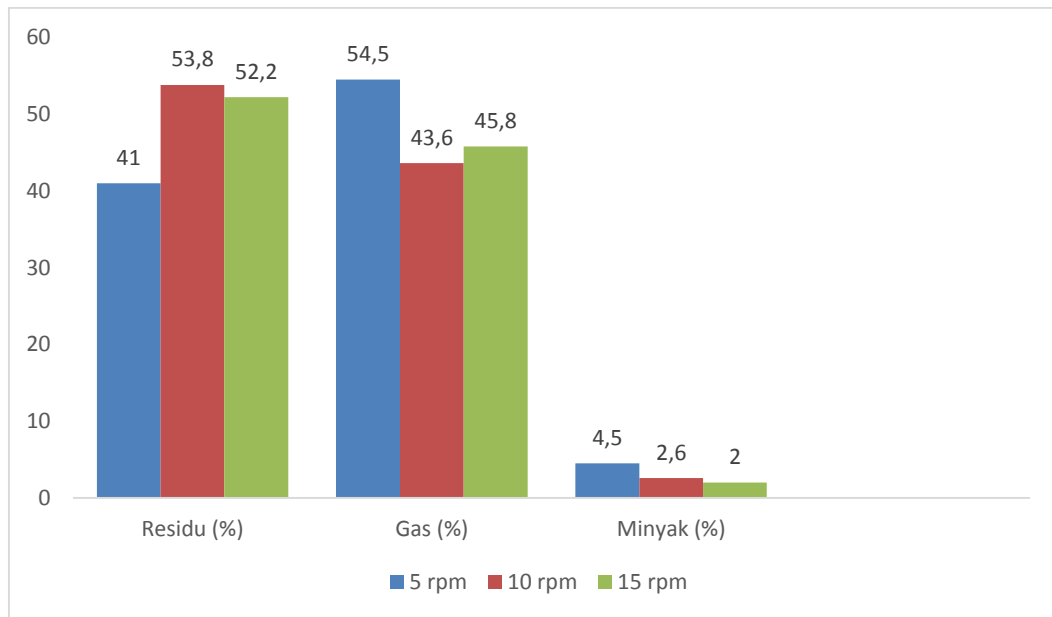
Gambar 4-13 Minyak hasil pengujian

Hasil pengujian pada Gambar 4-13 kemudian dikomparasikan dengan hasil pengujian dengan parameter yang sama.

4.2.1 Hasil Pengujian Pengaruh Kecepatan Putaran

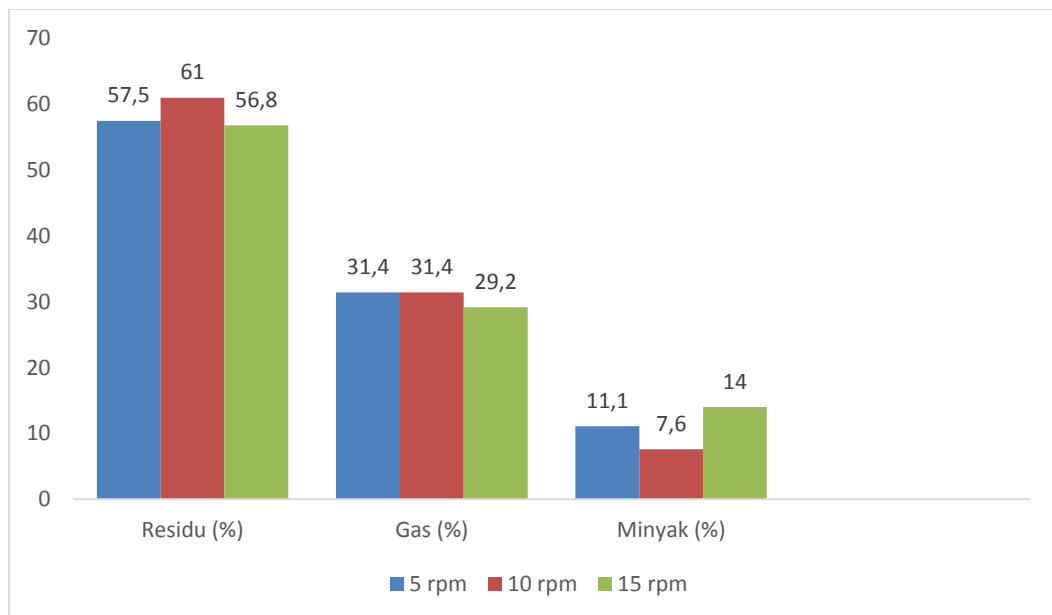
Proses pengujian tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh kecepatan putaran terhadap produktivitas minyak pirolisis sampah ban. Pengujian dilakukan dengan 3 variasi kecepatan, diantaranya yaitu 5 *rpm*, 10 *rpm*, dan 15 *rpm* pada kondisi pemanasan secara konstan di temperatur 300°C. Pengujian tersebut juga dilakukan pada 2 kondisi yaitu dengan dan tanpa pemasangan *lifter*.

Pada Gambar 4-14 merupakan data yang diperoleh dari pengujian pengaruh kecepatan putaran pada kondisi *lifter* terpasang.



Gambar 4-14 Grafik hasil pengujian pada kondisi *lifter* terpasang pada temperatur 300°C

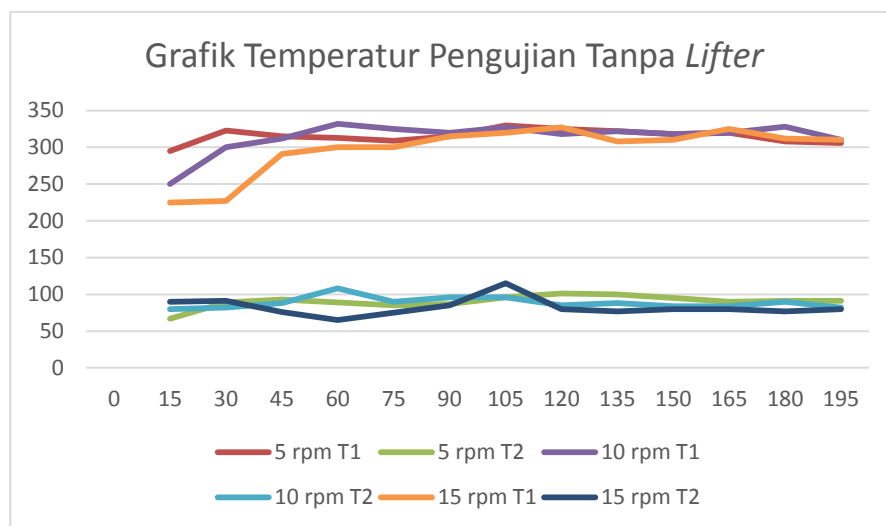
Pada Gambar 4-15 merupakan hasil yang diperoleh dari pengujian pengaruh kecepatan putaran pada kondisi tanpa menggunakan *lifter*.



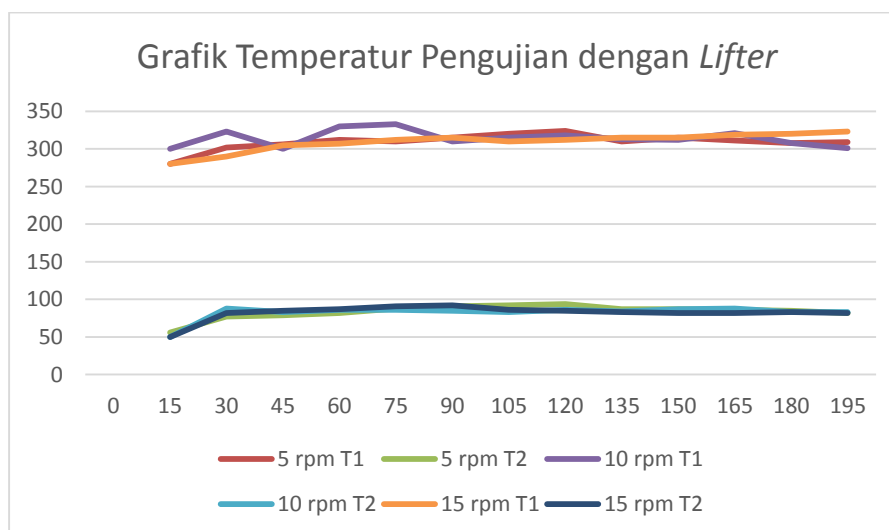
Gambar 4-15 Grafik hasil pengujian pada kondisi tanpa *lifter* pada temperatur 300°C

4.2.2 Hasil Pengujian Pengaruh Pemasangan *Lifter*

Hasil pengujian pengaruh pemasangan *lifter* tersebut dilakukan dengan cara mengukur temperatur gas keluar. Pada pengujian tersebut, reaktor dipanaskan hingga 300°C kemudian diukur temperatur gas keluar dengan termokopel tipe K. hasil tersebut di konversi kedalam bentuk persentase yang kemudian dibandingkan dengan referensi yang sudah ada. Pada Gambar 4-16 dan Gambar 4-17 adalah hasil pengujian tersebut dimana T1 adalah temperatur reaktor dan T2 adalah temperatur gas keluar.



Gambar 4-16 Grafik temperatur pengujian tanpa *lifter*



Gambar 4-17 Grafik temperatur pengujian dengan pemasangan *lifter*

Data pada kedua grafik tersebut dikonversikan kedalam persentase. Berikut pada Tabel 4-1 merupakan hasil perhitungan persentase tersebut.

Tabel 4-1 Persentase perubahan temperatur di setiap percobaan

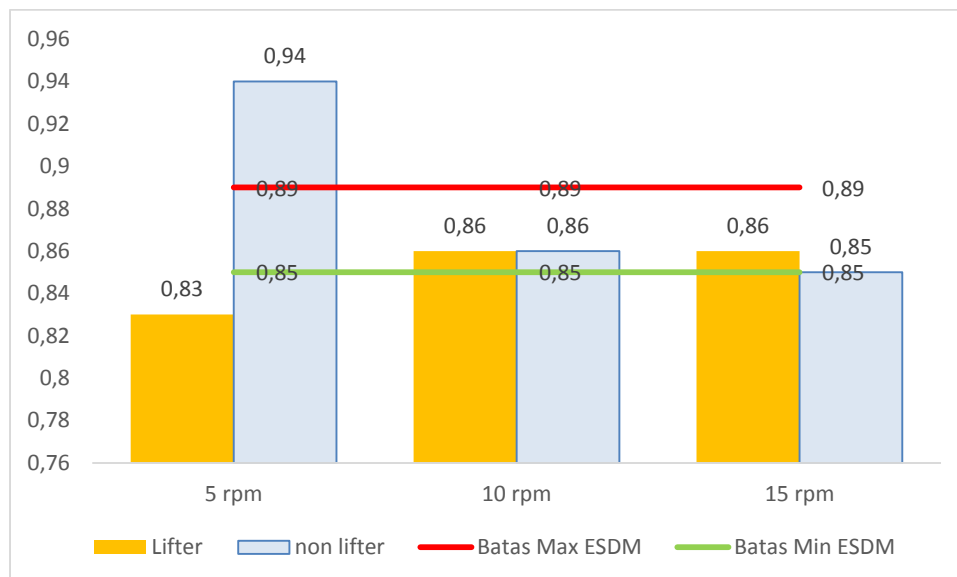
Data Temperatur Pengujian Kondisi Tanpa Lifter								
5 Rpm			10 Rpm			15 Rpm		
Reaktor	Gas keluar	Persentase Perubahan	Reaktor	Gas keluar	Persentase Perubahan	Reaktor	Gas keluar	Persentase Perubahan
315.31	90.31	71.36	291.85	88.69	69.61	297.69	82.38	72.33
Data Temperatur Pengujian Kondisi Lifter Terpasang								
309.38	83.54	73.00	314.15	82.46	73.75	309.46	82.31	73.40

4.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Produk Minyak

Pengujian karakteristik tersebut meliputi:

a. Densitas

Densitas atau lebih sering dikenal sebagai massa jenis adalah pengukuran massa setiap satuan *volume* benda. Berikut grafik hasil pengujian densitas ditunjukkan pada Gambar 4-18 Grafik hasil pengujian densitas pada temperatur 30°C.

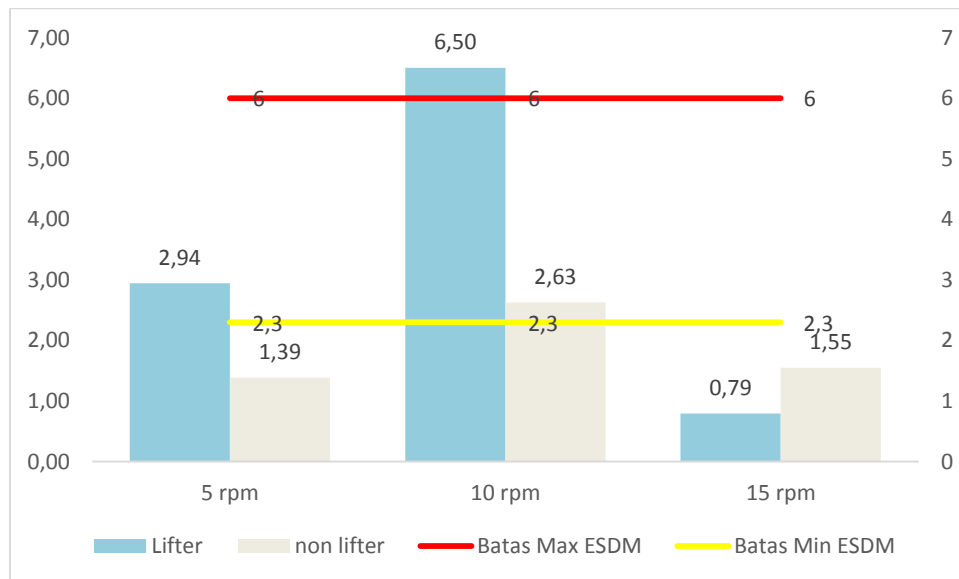


Gambar 4-18 Grafik hasil pengujian densitas pada temperatur 30°C

b. Viskositas

Viskositas merupakan ukuran dari kekentalan fluida yang menyatakan besar-kecilnya gesekan di dalam suatu fluida. Pada umumnya semakin besar

viskositas suatu fluida, maka semakin sulit suatu fluida mengalir dan semakin sulit benda pada bergerak di dalam fluida tersebut. Didalam zat cair, viskositas timbul sebagai akibat tumbukan antara molekul gas. Hasil pengujian viskositas ditunjukkan pada Gambar 4-19.



Gambar 4-19 Grafik hasil pengujian viskositas pada temperatur 30°C

c. Nilai Kalor

Nilai kalor (HV) adalah jumlah energy yang dlepaskan ketika suatu bahan bakar dibakar secara sempurna dalam suatu proses aliran tunak (steady) dan produk dikembalikan lagi ke keadaan reaktan. Pengujian nilai kalor dilakukan di Pusat Antar Universitas, Universitas Gajah Mada. Hasil pengujian tersebut menunjukan bahwa HV pada temperatur 300°C adalah:

Highest Heaing Value (HHV): 7790,3679 Kal/gram

Lowest Heating Value (LHV): 7711,1380 Kal/gram

4.3 Analisis dan Pembahasan

Menurut Gambar 4-15, reaktor tipe *rotary kiln* tanpa menggunakan *lifter* pada kecepatan putaran 15 rpm menghasilkan minyak terbanyak, yaitu 14%, dengan residu 52,2% dan gas terbuang 45,8%. Sementara hasil minyak terbanyak kedua didapat pada kecepatan putaran 5 rpm, sementara hasil terendah diperoleh pada kecepatan putaran 10 rpm.

Menurut Tabel 4-2, penelitian yang telah dilakukan oleh M.F Laresgoiti menyatakan bahwa volume minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis pada kondisi temperatur 300°C, disuplai gas nitrogen, dengan menggunakan reaktor tipe *fixed batch* adalah sebagai berikut:

Tabel 4-2 Hasil Pirolisis pada temperatur 300°C (Laresgoiti et al, 2003)

No.	Jenis Fraksi	Volume (%)
1	Residu	87,6 ± 7,8
2	Minyak	4,8 ± 3,9
3	Gas	7,6 ± 3,9

Hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4-2 jika dibandingkan dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4-15 dapat dikatakan bahwa hasil minyak pirolisis sampah ban yang dihasilkan dari reaktor *rotary kiln* lebih baik dibandingkan dengan reaktor tipe *fixed batch*. Kuantitas minyak pirolisis terbaik dari reaktor tipe *rotary kiln* yaitu didapat pada kondisi 15 rpm tanpa menggunakan *lifter* yaitu 14 %, sementara penelitian yang dilakukan oleh Laresgiti et al hanya sekitar 4,8 ± 3,9 %.

Hasil tersebut dapat dicapai karena reaktor tipe *rotary kiln* memindahkan panas dari *burner* ke bahan baku lebih baik karena diaduk sehingga panas dapat diterima oleh tiap-tiap potongan bahan baku. Fenomena tersebut menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konduksi, konveksi maupun radiasi (Boateng, 2008).

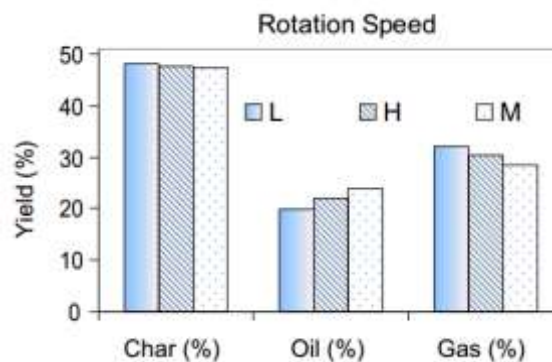
4.3.1 Analisis Pengaruh Kecepatan Putaran

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4-14. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran maka semakin rendah produk minyak yang dihasilkan, selain itu hasil residu tertinggi didapatkan pada kecepatan 10 rpm dan gas yang terbangun tertinggi didapatkan pada kecepatan 5 rpm.

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4-15. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran maka gas yang terbangun semakin rendah. Produktivitas tertinggi untuk hasil produk minyak terjadi pada kecepatan

15 rpm. Residu tertinggi dari hasil pengujian tersebut diperoleh pada kecepatan 10 rpm.

Pengujian sebelumnya telah dilakukan oleh Acevedo, B. dan Barriocanal, C. pada 3 variasi kecepatan putaran, yaitu 8,2 rpm (*Low*), 13,8 rpm (*Medium*), 15,1 rpm (*High*) pada kondisi temperatur akhir 850°C, suplai gas nitrogen 400 mL/menit dan kecepatan pemanasan 5°C/menit. Berikut adalah grafik dari pengujian tersebut:



Gambar 4-20 Diagram mass balance pada kecepatan putaran 8,2 rpm (L), 13,8 rpm (H), 15,1 rpm (M) (Acevedo et al, 2014)

Hasil pengujian pada Gambar 4-20 menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan putaran maka minyak (*oil*) yang dihasilkan lebih banyak, selain itu residu (*char*) dan gas yang terbuang semakin rendah (Acevedo et al, 2014).

Tabel 4-3 Tabel bilangan Froude (*Fr*) (Rudgers, 1980)

Mode	$Fr = \omega^2 R / g$
Slipping	$Fr < 1,0 \times 10^{-5}$
Slumping	$1,0 \times 10^{-5} < Fr < 0,3 \times 10^{-3}$
Rolling	$0,5 \times 10^{-3} < Fr < 0,2 \times 10^{-1}$
Cascading	$0,4 \times 10^{-1} < Fr < 0,8 \times 10^{-1}$
Cataracting	$0,9 \times 10^{-1} < Fr < 1$
Centrifuging	$Fr > 1,0$

Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan putaran berpengaruh terhadap pergerakan *bed* melintang. Pada Gambar 4-15 kondisi 5 rpm dan 10 rpm, gerakan *bed* pada mode *slumping*, sementara pada kondisi 15 rpm

mengalami mode pergerakan *rolling*. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan membandingkan Tabel 4-3 dan perhitungan bilangan Froude (Fr) berikut:

Diketahui:

$$D = 26 \text{ cm}, \text{ maka } R = 0,13 \text{ m}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\omega_1 = 5 \text{ rpm} = 0,52 \text{ r/s}$$

$$\omega_2 = 10 \text{ rpm} = 1,05 \text{ r/s}$$

$$\omega_3 = 15 \text{ rpm} = 1,57 \text{ r/s}$$

Ditanya:

$$Fr_1, Fr_2, Fr_3$$

Jawab:

$$Fr = \omega^2 R / g$$

$$Fr_1 = \left(\frac{1}{12} \text{ r/s} \right)^2 \times \frac{0,13 \text{ m}}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,359 \times 10^{-2}$$

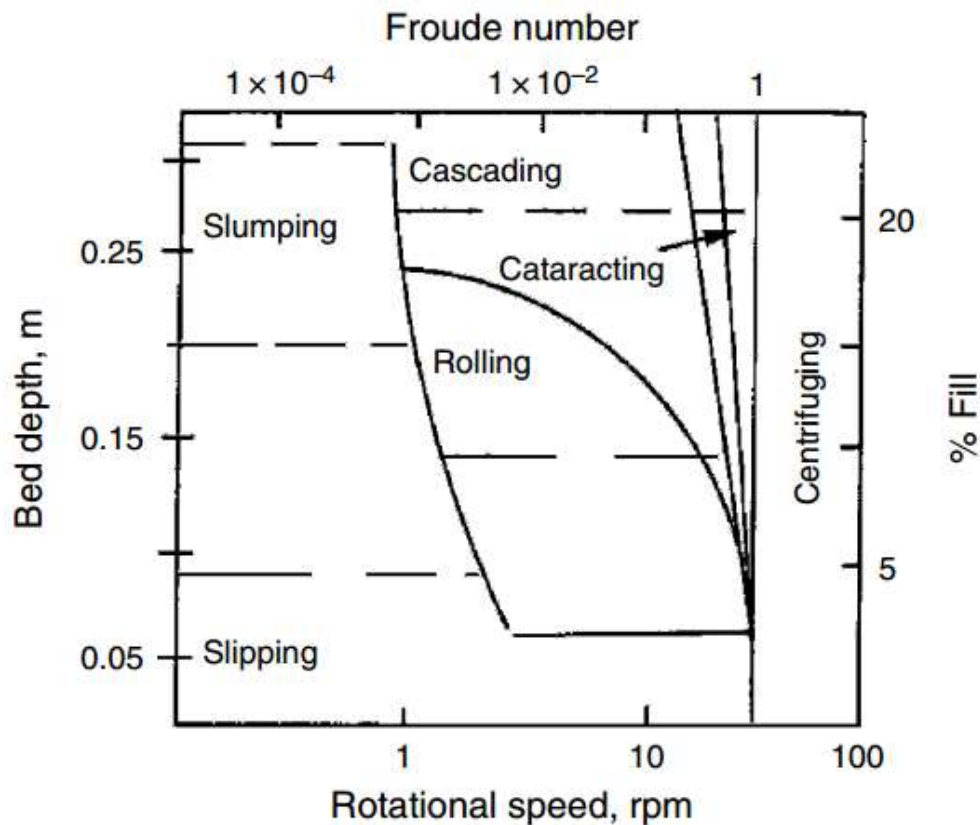
$$Fr_2 = \left(\frac{1}{6} \text{ r/s} \right)^2 \times \frac{0,13 \text{ m}}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,146 \times 10^{-1}$$

$$Fr_3 = \left(\frac{1}{4} \text{ r/s} \right)^2 \times \frac{0,13 \text{ mm}}{9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,327 \times 10^{-1}$$

Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Komossa et al kecepatan perpindahan panas tertinggi pada *rotary drum* yang dipanaskan secara tidak langsung terjadi pada mode *rolling* (Komossa et al, 2015). Mode *rolling* juga merupakan pergerakan yang diharapkan karena memberikan pencampuran yang lebih maksimal (Boateng, 2008). Menurut perhitungan diatas, mode *rolling* terjadi pada kecepatan putaran 5 dan 10 rpm sementara pada 15 rpm pergerakan *bed* melintang pada mode *cascading*. Namun ternyata pergerakan *bed* tidak hanya ditentukan oleh bilangan Froude, tetapi juga dipengaruhi oleh kedalaman *bed*, persentase pengisian reaktor dan kecepatan putaran (Henein, 1980).

Persentase isi reaktor pada pengujian yang telah dilakukan adalah 2%, sedangkan kedalaman *bed* sekitar 14 mm. Berdasarkan data hasil perhitungan bilangan Froude, kecepatan putaran, kedalaman *bed*, dan persentase pengisian

reaktor pengujian pengaruh kecepatan putaran, jika dibandingkan dengan diagram pada Gambar 4-21, maka pergerakan *bed* melintang pada pengujian kecepatan putaran 5, 10, dan 15 rpm berada pada mode *slipping*. Hal yang menyebabkan jumlah minyak terbanyak terjadi pada kecepatan putaran 15 rpm adalah karena temperatur gas keluar yang tinggi hingga 115°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-16. Hal tersebut juga terjadi pada kecepatan putaran 5 rpm.



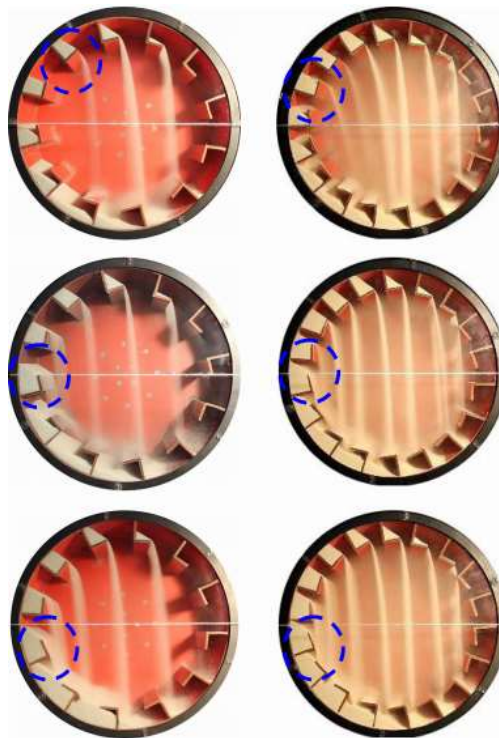
Gambar 4-21 Diagram perilaku *bed* (Henein, 1980)

4.3.2 Analisis Pengaruh Pemasangan *Lifter*

Lifter pada *rotary kiln* berfungsi untuk membantu material mengalir secara aksial dan di beberapa kasus untuk meningkatkan pencampuran partikel dengan cara perluasan permukaan. Namun hasil yang berbeda didapatkan pada pengujian tersebut. Pada Gambar 4-14 dan Gambar 4-15 jika dibandingkan, maka hasil terbaik ditunjukkan pada kondisi tanpa menggunakan *lifter*. Selain itu

hasil pengujian pada Gambar 4-14 menunjukkan produktivitas yang menurun apabila kecepatan putaran ditingkatkan dari 5 rpm, 10 rpm, hingga 15 rpm.

Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Karali et al, ukuran *lifter* mempengaruhi volume bahan baku yang diangkat searah dengan putaran. *Lifter* yang digunakan adalah tipe *rectangular* seperti pada dengan 2 rasio panjang *lifter* (0,375 dan 0,75) dan jumlah 2 variasi jumlah *lifter* (12 dan 18) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-22 (Karali et al, 2015). Pada pengujian yang dilakukan pada reaktor tipe *rotary kiln* tersebut hanya menggunakan 500 gram sampah ban bekas atau hanya sekitar 2,5% dari kapasitas yang dapat ditampung oleh reaktor tersebut. Bahan baku tersebut hanya memiliki tinggi (H) sekitar 14 mm, sedangkan tinggi *lifter* adalah 28 mm. dapat diasumsikan bahwa bahan baku terangkat bersama oleh *lifter* karena tinggi bahan baku lebih rendah dari panjang *lifter* kemudian bahan baku jatuh secara perlahan seiring dengan kemiringan *lifter* yang diakibatkan kecepatan rotasi. Bahan baku yang jatuh tersebut kemudian langsung diangkat kembali dengan *lifter* yang lainnya sehingga waktu tinggal semakin sedikit untuk menerima panas dari *burner* dibawah reaktor tersebut. Waktu tinggal bahan baku semakin sedikit seiring dengan peningkatan kecepatan putaran sesuai dengan pengujian yang dilakukan.



Gambar 4-22 Pengujian *loading* pada *lifter* tipe L (Karali et al, 2015)

Grafik pada Gambar 4-14 menunjukkan bahwa pada 5 rpm dan 10 rpm terjadi peningkatan residu dan penurunan gas yang terbang akibat dari peningkatan kecepatan putaran (Wen Zhong Chen et al, 2009). Hal tersebut padat terjadi karena peningkatan kecepatan putaran memperendah waktu tinggal bahan baku dengan pemanas yang berada di bagian bawah. Tetapi pada kecepatan putaran 15 rpm persentase residu menurun sementara gas yang terbang meningkat, hal tersebut dapat dikarenakan sebagian bahan baku mengalami pergerakan *bed mode sentrifuging*. Akibat dari mode tersebut, bahan baku mengalami peningkatan waktu tinggal karena sebagian bahan baku ikut berputar bersama reaktor dan mendapatkan panas secara terus menerus.

Tabel Tabel 4-4 dibawah ini menampilkan manfaat dari penggunaan *lifter* terkait penghematan energi pada beberapa aplikasi dan proses. Desain tersebut ditujukan untuk memaksimalkan pencampuran dan perpindahan panas.

Tabel 4-4 Manfaat pemasangan *lifter* (Boateng, A.A., 2008)

	Sebelum dipasang <i>Lifter</i>	Stelah dipasang <i>Lifter</i>	Percent Change
12 x 250 ft LWA kiln ditambahkan <i>lifter</i> 3 baris dan 3 penampung			
Hasil produk (STPD)	650	970	47
Konsumsi kalor spesifik (MBU/ton)	2,6-2,8	2	-35
Temperatur gas keluar (°F)	1200	730	39
Kecepatan putaran (rpm)	1,6	2,7	70
11 x 175 ft LWA Kiln ditambahkan <i>lifter</i> 3 baris + 1 penampung			
Kapasitas (TPD)	550	625	14
Konsumsi kalor spesifik (MBU/ton)	2,53	2,24	-12
Temperatur gas keluar (F)	1050	850	19
Kecepatan putaran (rpm)	1,75	2,3	31

Kondensor yang digunakan pada pengujian tersebut sebelumnya digunakan untuk reaktor tipe *batch*. Hasil pengujian yang ditunjukkan Tabel 4-1 memberikan penurunan temperatur gas yang signifikan dibandingkan dengan Tabel 4-4. Hal tersebut dapat terjadi karena penggunaan *lifter* dan saluran keluar gas yang dibuat di poros tersebut. Hal tersebut menyebabkan panas dari gas keluar berpindah ke poros terlebih dahulu sebelum keluar. Oleh karena itu hasil produk minyak hanya keluar dari keran nomor 1, sementara keran nomor 2 hanya mengembun dan keran nomor 3 kosong.

4.3.3 Analisis Karakteristik Produk Minyak

Minyak yang dihasilkan dari pirolisis sampah ban sebagian besar berwarna coklat pekat menyerupai warna minyak pelumas. Tren densitas dari minyak yang dihasilkan pada kondisi *lifter* terpasang adalah naik sesuai dengan meningkatnya kecepatan putaran reaktor. Tren berbeda terjadi pada kondisi tanpa pemasangan *lifter* yaitu cenderung turun apabila kecepatan putaran ditingkatkan. Namun secara keseluruhan densitas minyak tersebut hampir sama kecuali pada kondisi 5 rpm tanpa menggunakan *lifter* terlalu tinggi, sementara pada kondisi 5 rpm menggunakan *lifter* terlalu rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-18. Hasil pengujian viskositas minyak pada Gambar 4-19 menunjukkan tren yang sama antara tanpa maupun dengan memasang *lifter* yaitu hasil yang ditunjukkan pada kondisi 10 rpm meningkat secara signifikan, yaitu 2,63 mm²/s dan 6,5 mm²/s. Nilai densitas dan viskositas yang tinggi mengindikasikan bahwa adanya senyawa berat dalam jumlah besar akibat peningkatan kecepatan pemanasan (Alkhatib et al, 2015). sementara pada percobaan yang dilakukan menggunakan sistem *burner* yang tidak dapat diatur kecepatan pemanasan, akibatnya menimbulkan nilai viskositas dan densitas yang beragam.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia telah menetapkan standar mutu bahan bakar yang dipasarkan di dalam negeri. Standar mutu bahan bakar biodiesel sebagai bahan bakar lain telah ditetapkan oleh ESDM yaitu, densitas 0,850 g/ml sampai 0,890 g/ml dan viskositas 2,3 mm²/s sampai 6,0 mm²/s pada temperatur 40°C (ESDM, 2006). ESDM juga menetapkan standar mutu bahan bakar solar 48, yaitu densitas 0,815 g/ml sampai 0,860 g/ml dan

viskositas 2,0 mm²/s hingga 4,8 mm²/s (ESDM, 2013a). Selain itu bahan bakar jenis bensin 88 yang telah ditetapkan memiliki densitas 0,715 g/ml sampai 0,770 g/ml (ESDM, 2013b). Dari hasil perbandingan antara spesifikasi dengan hasil pengujian karakteristik hasil minyak sampah ban tersebut, pada kondisi 10 rpm non *lifter* dan 5 rpm dengan *lifter* telah memenuhi standar mutu bahan bakar solar. Pada kondisi 10 rpm dengan *lifter* melebihi batas atas standar mutu bahan bakar biodiesel, sementara pada kondisi lainnya berada diantara standar mutu bensin dan solar.

Tabel 4-5 Nilai kalor bahan bakar di Indonesia

Jenis Bahan Bakar	Nilai Kalor (Kalori/gram)
Biodiesel (Dirjen EBTKE, 2013)	8836,67
Solar (Syafriuddin et al, 2012)	10935,30
Premium (Agrariksa et al, 2013)	11414,16

Rata-rata nilai kalor (HV) yang dihasilkan dari reaktor sampah ban tersebut adalah 7750,753 Kal/gram. Pengujian yang telah dilakukan Wei-Cheng Wang et al menyatakan bahwa nilai kalor bahan bakar diesel adalah 43,8 MJ/kg (10428,57 Kal/gram) yang kemudian dicampur dengan minyak pirolisis sebanyak 10 hingga 20 persen yang memiliki nilai kalor sekitar 42 MJ/kg (10000 Kal/gram). Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan konsumsi bahan bakar dengan variasi kecepatan putaran. Hasil pengujian tersebut menyatakan bahwa pencampuran bahan bakar diesel dengan minyak pirolisis menimbulkan konsumsi bahan bakar yang lebih boros, penurunan tenaga mesin, meningkatkan emisi SO₂ pada kecepatan putaran mesin yang sama. Selain itu akibat dari viskositas yang tinggi menyebabkan penyemprotan bahan bakar didalam ruang bakar buruk, sehingga menyebabkan *delay* pengapian yang lebih lama (Wang et al, 2016). Minyak pirolisis dengan nilai kalor 7750,753 Kal/gram lebih rendah dari standar yang disyaratkan oleh Dirjen Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi (EBTKE) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4-5. Nilai kalor yang rendah tersebut disebabkan karena produk gas diantara temperatur 200°C dan 400°C adalah CO dan CO₂ (Besler et al, 1996). Minyak tersebut apabila digunakan sebagai bahan campuran bahan bakar diesel (solar), dinilai dapat memperburuk

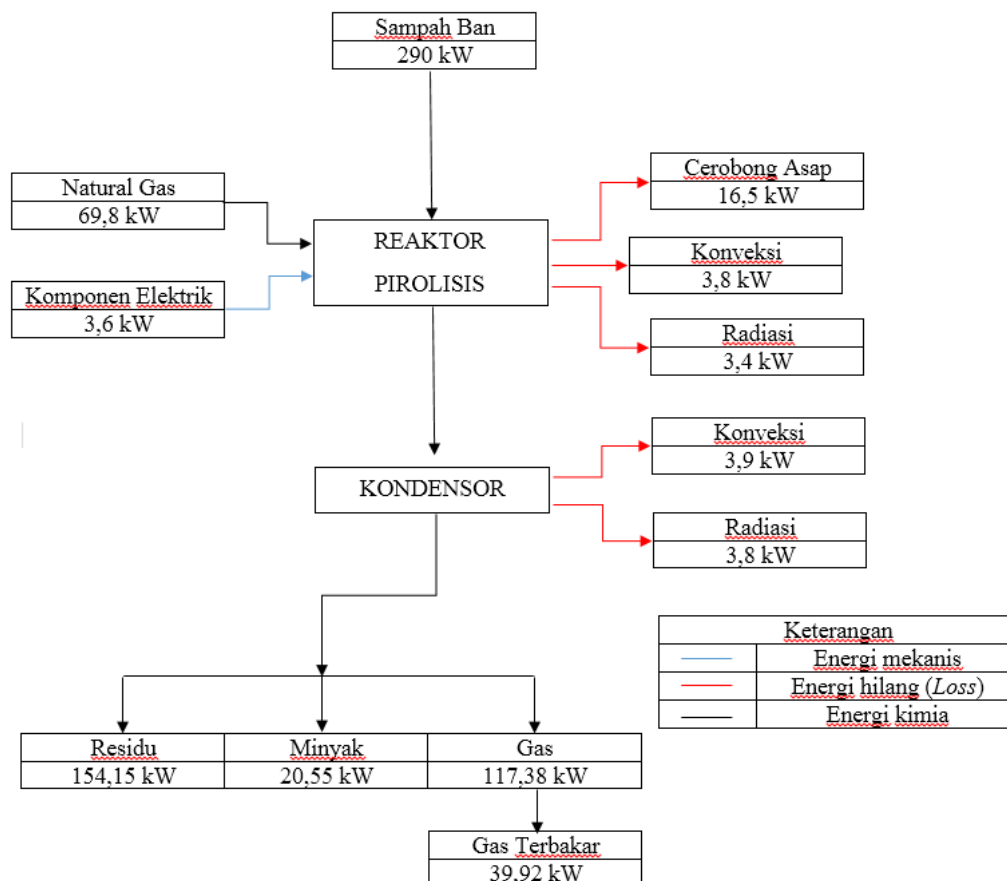
konsumsi bahan bakar, kinerja dan emisi mesin diesel serta *delay* pengapian yang lebih lama.

4.4 Proposed System untuk Pirolisis Sampah Ban

Proposed system dibuat dengan cara mengkombinasikan data dari pengujian dengan data dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya seperti pada Tabel 4-6.

Tabel 4-6 Kombinasi dari data hasil pengujian dengan data penelitian lain

Jenis Fraksi	Nilai Kalor (kal/gr)	Massa (%)
Bahan baku sampah ban	8311,84 (Honus et al 2014)	100
Residu	7242,86 (Honus et al, 2014)	61
Minyak	7750,73	7,6
Gas	10714,28 (Frigo et al, 2014)	31,4



Gambar 4-23 Proposed Pyrolysis System ban bekas skala 30 kg/jam

Data pengujian yang dikombinasikan adalah data dari 10 rpm tanpa *lifter*. Data tersebut digunakan karena mendekati spesifikasi bahan bakar yang beredar di pasaran. Data tersebut digunakan untuk membuat *proposed system* untuk alat skala 30 kg/jam seperti pada bagan yang ditunjukkan pada Gambar 4-23.

Dari data tersebut dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$Q = m \cdot HV$$

Dimana Q adalah energi yang diserap atau dilepas (kalori), m adalah massa yang dalam *proposed system* tersebut adalah 30 kg, dan HV adalah nilai kalor (kal/gr). Hasil dari Q kemudian dikonversikan ke dalam kilowatt (kW).

Dari kombinasi data tersebut, maka *energy balance* sistem tersebut adalah sebagai berikut:

$$Q_{input} = Q_{output}$$

$$Q_{bb} + Q_{ng} + Q_{ec} = Q_r + Q_m + Q_g + Q_{rr} + Q_{kr} + Q_{ca} + Q_{rk} + Q_{kk} + Q_{gt}$$

Dimana;

Q_{bb} : Energi bahan baku	Q_{kr} : Energi yang hilang melalui konveksi pada reaktor
Q_{gn} : Energi natural gas	Q_{ca} : Energi yang hilang melalui cerobong asap
Q_{ec} : Energi komponen elektrik	Q_{rk} : Energi yang hilang melalui radiasi kondensor
Q_r : Energi residu	Q_{kk} : Energi yang hilang melalui konveksi kondensor
Q_m : Energi minyak	Q_{gt} : Energi gas terbakar
Q_g : Energi gas	
Q_{rr} : Energi hilang melalui radiasi pada reaktor	

Maka,

$$69,8 + 290 + 3,6 = 154,15 + 20,55 + 117,38 + 3,4 + 3,8 + 16,5 + 3,8 + 3,9 + 39,92$$

Sementara, untuk menghitung energi panas yang terbuang adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\sum Q_{terbuang}}{Q_{natural\ gas}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{3,4 \text{ kW} + 16,5 \text{ kW} + 3,8 \text{ kW} + 3,8 \text{ kW} + 3,9 \text{ kW}}{69,8 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$\eta = 44,9 \%$$

Dari perhitungan tersebut maka, energi panas yang terbuang dari *burner* adalah 44,9%.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian tersebut, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perancangan reaktor pirolisis sampah ban tipe *rotary kiln* skala laboratorium berkapasitas 20 L dilengkapi dengan poros mampu melakukan proses pirolisis terhadap sampah ban.
2. Pergerakan *bed* melintang yang dialami oleh bahan baku sampah ban sebanyak 500 gram pada kondisi 5, 10 dan 15 rpm tanpa menggunakan *lifter* mengalami mode *slipping*. Pada kecepatan putaran 15 rpm menghasilkan minyak paling banyak karena temperatur gas keluar mencapai 115°C. Perbedaan persentase hasil minyak tersebut disebabkan karena tingginya temperatur gas keluar.
3. Reaktor tipe *rotary kiln* dengan ukuran diameter 260 mm dilengkapi dengan *lifter* berukuran panjang 28 mm yang diisi dengan 500 gram sampah ban dinilai kurang efektif karena hasil produk minyak yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan dengan tanpa menggunakan *lifter* baik pada kecepatan 5, 10 maupun 15 rpm. Hal tersebut dapat terjadi karena waktu tinggal bahan baku untuk mendapatkan panas semakin sedikit.
4. Nilai densitas dan viskositas yang beragam disebabkan karena sistem *burner* menggunakan kompor semawar yang tidak dapat diatur kecepatan pemanasannya. Hasil produk minyak yang memenuhi standar mutu ESDM adalah pada kondisi 5 rpm dengan *lifter* dan 10 rpm non *lifter*. Minyak pirolisis dengan nilai kalor 7750,753 Kal/gram lebih rendah dari standar Dirjen EBTKE. Nilai kalor yang rendah tersebut disebabkan karena produk gas diantara temperatur 200°C dan 400°C adalah CO dan CO₂. (Besler et al, 1996) Minyak tersebut apabila digunakan sebagai bahan campuran bahan bakar diesel (solar), dinilai dapat memperburuk

konsumsi bahan bakar, kinerja dan emisi mesin diesel serta *delay* pengapian yang lebih lama.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

Setelah dilakukan penelitian maka saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan terkait pengaruh dimensi *lifter* pada reaktor tersebut.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan bahan baku berbeda dengan memanfaatkan alat tersebut.
3. Perlu dilakukan penelitian terkait desain yang dapat memperbaiki kinerja dari alat tersebut.
4. Reaktor pirolisis tipe *rotary kiln* skala industri bekerja dibawah kecepatan putaran 5 rpm, maka dari itu penelitian dapat dilakukan terkait pengaruh kecepatan putaran dibawah 5 rpm.

DAFTAR PUSTAKA

- Acevedo, B. dan C. Barriocanal. (2015). *The Influence of The Pyrolysis Conditions in a Rotary Oven on The Characteristics of The Products. Fuel Processing Technology*. 131, 109-116.
- Agrariksa, Fintas A., Bambang Susilo, dan Wahyu Agung Nugroho. (2013). *Uji Performasi Motor Bakar Bensin (On Chasis) Menggunakan Campuran Premium dan Etanol*. 1, 194-203.
- Alkhatib, Radwan, Khaled Loubar, Sary Awad, Eskandar Mounif, Mohand Tazeroud. (2015). *Effect of Heating Power on The Scrap Tyres Pyrolysis Derived Oil. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 116, 10-17.
- Antoniou, Nikos dan Anastasia Zabaniotou. (2015). *Experimental Proof of Concept for a Sustainable End of Life Tyres Pyrolysis with Energy and Porous Materials Productions. Journal of Cleaner Production*. 101, 323-336.
- Arisworo, Djoko, Yusa, dan Nana Sutresna. (2006). *Ilmu Pengetahuan Alam*. Grafindo.
- 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.
- Besler, S., Williams, T.P. (1996). *The influence of Temperature and Heating, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 89, 333–339.
- Bhattacharya, P. dkk. (2009). *Wood / Plastic co-Pyrolysis in an Auger Reactor: Chemical and Physical Analysis of The Products. Fuel*. 88, 1251–1260.
- Boateng, A.A. (2008). *Rotary Kilns*. Elsevier Inc.
- Chaurasia, A.S., dan 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.
- Chen, Wen Zhong, Chun Hua Wang, Tie Liu, Chun You Zuo, Yuan Hang Tian, Tian Tian Gao. (2009). *Residence Time and Mass Flow Rate of Particles in Carbon Rotary Kiln. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 48, 955-960.

- Encinar, J. M. dkk. (2009). *Jerusalem Artichoke Pyrolysis: Energetic Evaluation. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 85, 294–300.
- Evans, R. (2004). *Options for Renewable Hydrogen Technologies. Energy and Agricultural Carbon Utilization*. 86, 304–309.
- Farrington, Robert. (1978). *Fisika Kimia Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Frigo, Stefano, Maurizia Seggani, Monica Puccini, Sandra Vitolo. (2014). *Liquid Fuel Production from Waste Tyre Pyrolysis and Its Utilisation in a Diesel Engine. Fuel*. 116, 399-408.
- Gunawan, Edi. (2010). *Rancang Bangun Unit Pirolisis Untuk Pembuatan Bio-Oil dari Minyak Jelantah Skala Laboratorium*. Terbit 30 April 2010.
- Honus, Stanislav, Veronika Sassmanova, Jaroslav Frantik, Przemyslaw Bukowski, dan Dagmar Juchelkova. (2014). *Energy Balance Sheet of a Semi Operational Thermic System. Chemical and Process Engineering*. 35, 317-329.
- [http://www.michelin.co.id/Campaigns/michelin-total-performance / Customized Section / understand_technology.html](http://www.michelin.co.id/Campaigns/michelin-total-performance/CustomizedSection/understand_technology.html). Diakses pada 3 Mei 2016.
- <http://www.menlh.go.id/rangkaian-hlh-2015-dialog-penanganan-sampah-plastik/>. Diakses pada 3 Mei 2016.
- <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6115>. AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel. Diakses pada 15 April 2016.
- [http://1.bp.blogspot.com/-HnKaPrNsvlg/T3z0tIqNqoI/AAAAAAAAAZc/rkkAJHlxoXs/ s1600/ pyro+waste+heat+recovery_en.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-HnKaPrNsvlg/T3z0tIqNqoI/AAAAAAAAAZc/rkkAJHlxoXs/s1600/pyro+waste+heat+recovery_en.jpg). Diakses pada 3 Mei 2016.
- [http://www.primeproducts.co.in/ip_themes/ip_boldness/images/mild_steel_angle _bars.jpg](http://www.primeproducts.co.in/ip_themes/ip_boldness/images/mild_steel_angle_bar.jpg). Diakses pada 3 Mei 2016
- [http://g01.a.alicdn.com/kf/HTB1DUiVHVXXXXcaXpXXq6xXFXXXC/Diamete r-5mm-x-100mm-K-Type-Grounded-Thermocouple-Probe-for- Temperature-Controller-Discount-50-Wire-Long.jpg](http://g01.a.alicdn.com/kf/HTB1DUiVHVXXXXcaXpXXq6xXFXXXC/Diameter-5mm-x-100mm-K-Type-Grounded-Thermocouple-Probe-for-Temperature-Controller-Discount-50-Wire-Long.jpg). Diakses pada 3 Mei 2016.
- http://www.homemetalshopclub.org/news/aug03/connector_cut_away.gif. Diakses pada 19 Mei 2016.

- <http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4122-konversi-minyak-tanah-ke-lpg-lebih-murah-lebih-bersih.html> (Diakses pada 25 Juni 2016).
- <http://www.gaikindo.or.id/gaikindo-pasar-mobil-domestik-2016-berpeluang-naik-5/> (Diakses pada 25 Juni 2016)
- Islam, M. Rofiqul, H. Haniu, dan M. Rofiqul Alam. (2008). *Liquid Fuels and Chemicals from Pyrolysis of motorcycle tyre waste: Product Yields, Compositions, and Related Properties. Fuel.* 87, 3112-3122.
- Karali, Mohamed A., Koteswara Rao Sunkara, F. Herz, E. Specht. (2015). *Experimental Analysis of a Flighted Rotary Drum to Assess The Optimum Loding. Chemical Engineering Science.* 138, 772-779.
- Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi, No. 13483K/24/DJM/2006, Tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Nabati (Biofuel) Jenis Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Lain Yang Dipasarkan Di Dalam Negeri.
- Komossa, H., S. Wirtz, V. Scherer, F. Herz, E. Specht. (2015). *Heat Transfer in Indirect Heated Rotary Drums Filled with Monodisperse Spheres: Comparison of Experiments with DEM Simulations. Powder Technology.* 286, 722-731.
- Laresgoiti, M.F., B.M. Caballero, I. de Marco, A. Torres, M.A Cabrero, M.J. Chomon. (2004). *Characterization of The Liquid Products Obtained in Tyre Pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyolysis.* 71, 917-934.
- Majalah ESDM Mag edisi 9. (2012). Jakarta
- Pyromation Inc. *Type K Thermocouple Datasheet.*
- Riello S.p.A., (2001). *Forced Draught Burner Handbook. First Edition.* Legnago, Italy.
- Riza, Bina Restutita dan Imam Paryanto. (2015). *Seminar: Spesifikasi Mutu B-20 di Indonesia dan Perbandingannya dengan Spesifikasi Biodiesel, Minyak Solar dan Standard Internasional.* Balai Rekayasa Disain dan Sistem Teknologi-BPPT.
- Stolk, Jac. (1986). *Elemen Mesin.* Jakarta Pusat: Erlangga.
- Suhartini. (2010). *Modul Perkuliahan III Produksi (Teori, Fungsi dan Efisiensi).* Universitas Brawijaya, Malang.

- Syafriuddin dan Rio Hanesya. (2012). *Perbandingan Penggunaan Energi Alternatif Bahan Bakar Serabut (Fiber) dan Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Bahan Bakar Batu Bara dan Solar Pada Pembangkit Listrik*. ISSN: 1979-911X.
- Trianna, N.W, dan Mulyadi, E. (2006). *Mekanisme Reaksi Dekomposisi Gambut. Jurnal Penelitian Kimia dan Teknologi*, ISSN 0216-163X, Vol-1, USB, Solo.
- Wang, Wei-Cheng, Chi-Jeng Bai, Chi-Tung Lin, Samay Prakash. (2016). *Alternative Fuel Produced from Thermal Pyrolysis of Waste Tyres and Its Use in a DI Diesel Engine. Applied Thermal Engineering*. 93, 330-338.
- Wibowo, Adityo Suryo A. (2011). *Studi Sifat Minyak Pirolisis Campuran Sampah Biomasa dan Sampah Plastik Polypropylene*. Skripsi. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Williams, Paul T. (2013). *Pyrolysis of Waste Tyres: A Review. Waste management*. 33, 1714-1728.

LAMPIRAN

- A. Data Hasil Pengujian
- B. Data Temperatur Reaktor Selama Pengujian
- C. Data Hasil Pengujian Nilai Kalor
- D. Desain Reaktor Pirolisis Tipe *Rotary Kiln*
- E. Program Mikrokontroler

A. Data Hasil Pengujian

PERCOBAAN REAKTOR DENGAN LIFTER									
NO	RPM	TEMPERATUR	AHAN BAKU (Gram)	RESIDU (Gram)	GAS (Gram)	MINYAK (Gram)	RESIDU	GAS TERBUANG	MINYAK
1	5	300	500	205.0	272.7	22.3	41.0	54.5	4.5
2	10	300	500	268.8	218.2	13.0	53.8	43.6	2.6
3	15	300	500	260.8	229.1	10.1	52.2	45.8	2.0
PERCOBAAN REAKTOR TANPA LIFTER									
NO	RPM	TEMPERATUR	AHAN BAKU (Gram)	RESIDU (Gram)	GAS (Gram)	MINYAK (Gram)	RESIDU	GAS TERBUANG	MINYAK
1	5	300	500	287.4	157.2	55.4	57.5	31.4	11.1
2	10	300	500	305.1	156.8	38.1	61.0	31.4	7.6
3	15	300	500	284.2	145.9	69.9	56.8	29.2	14.0
PERCOBAAN DENSITAS DAN VISKOSITAS REAKTOR DENGAN LIFTER									
NO	RPM	time (s)	mass (gr)	volume (mL)	density (gr/mL)	viscosity	Densitas (gr/mL)		
1	5	13.27	20.80	25.00	0.83	2.94	5 RPM Lifter		0.83
2	10	28.36	21.50	25.00	0.86	6.50	10 RPM Lifter		0.86
3	15	3.48	21.40	25.00	0.86	0.79	15 RPM Lifter		0.86
							5 RPM Non Lifter		0.94
							10 RPM Non Lifter		0.86
							15 RPM Non Lifter		0.85
PERCOBAAN DENSITAS DAN VISKOSITAS REAKTOR TANPA LIFTER									
NO	RPM	time (s)	mass (gr)	volume (mL)	density (gr/mL)	viscosity			
1	5	5.56	23.40	25.00	0.94	1.39			
2	10	11.47	21.50	25.00	0.86	2.63			
3	15	6.85	21.20	25.00	0.85	1.55			

B. Data Temperatur Reaktor Selama Pengujian

DATA TEMPERATUR SELAMA PERCOBAAN BERLANGSUNG TANPA LIFTER

5 RPM			10 RPM			15 RPM		
WAKTU	T1	T2	WAKTU	T1	T2	WAKTU	T1	T2
18:15			14:30			9:00		
18:30	295	67	14:45	250	80	9:15	225	90
18:45	323	89	15:00	300	82	9:30	227	91
19:00	315	93	15:15	312	88	9:45	291	76
19:15	313	89	15:30	332	108	10:00	300	65
19:30	309	85	15:45	325	90	10:15	300	75
19:45	315	87	16:00	320	96	10:30	315	85
20:00	330	96	16:15	327	96	10:45	320	115
20:15	325	101	16:30	318	85	11:00	327	80
20:30	322	100	16:45	322	88	11:15	308	77
20:45	318	95	17:00	318	84	11:30	310	80
21:00	320	90	17:15	32	84	11:45	325	80
21:15	308	91	17:30	328	90	12:00	312	77
21:30	306	91	17:45	310	82	12:15	310	80
Rata2	315.31	90.31		291.85	88.69		297.69	82.38

DATA TEMPERATUR SELAMA PERCOBAAN BERLANGSUNG DENGAN LIFTER

5 RPM			10 RPM			15 RPM		
WAKTU	T1	T2	WAKTU	T1	T2	WAKTU	T1	T2
13:15			11:30			11:45		
13:30	280	56	11:45	300	50	12:00	280	50
13:45	302	77	12:00	323	88	12:15	290	82
14:00	306	79	12:15	300	83	12:30	305	85
14:15	312	82	12:30	330	86	12:45	307	87
14:30	310	88	12:45	333	86	13:00	312	91
14:45	315	91	13:00	310	85	13:15	315	92
15:00	320	92	13:15	315	83	13:30	310	86
15:15	324	94	13:30	318	86	13:45	312	85
15:30	310	87	13:45	313	84	14:00	315	83
15:45	315	87	14:00	312	87	14:15	315	82
16:00	311	86	14:15	321	88	14:30	319	82
16:15	308	85	14:30	308	83	14:45	320	83
16:30	309	82	14:45	301	83	15:00	323	82
Rata2	309.38	83.54		314.15	82.46		309.46	82.31

C. Data Hasil Pengujian Nilai Kalor


UNIVERSITAS GADJAH MADA
PUSAT STUDI PANGAN DAN GIZI

LAPORAN HASIL UJI
(Analysys Certificate)
No.PSPG/165/VI/2016

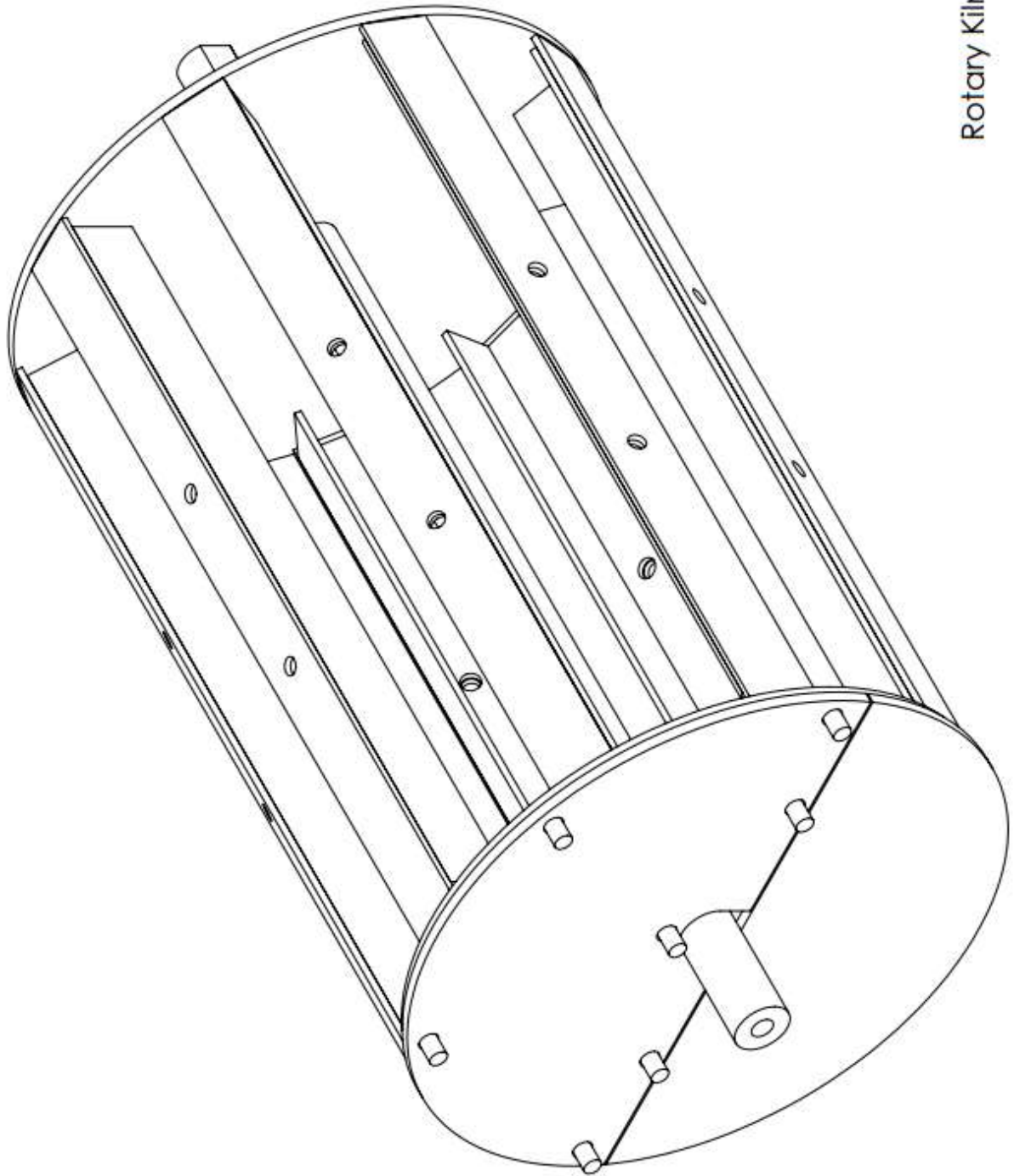
Nomor Pengujian : PS/045/VI/016
(Analysis Report Number)
Nama Pelanggan : Muh Sutan Dwicahyo
(Name of client)
Alamat Pelanggan :
(Address of client)
No. Telepon Pelanggan :
(Phone No. of client)
Contoh Uji : Cairan
(Type of sample)
Tanggal Penerimaan Contoh Uji : 23 Mei 2016
Tanggal Pengujian : 24 Mei 2016
(Date of analysis)
Metode Uji :
(Analysis Method)
Hasil Uji : Kalori
(Analysis Result)..

No.	Kode sampel	Hasil Analisa Nilai Kalori (kalori/gram)	
		1	2
1.	Minyak Hasil Pirolisis Suhu 300°C Ban Bekas	7711,1380	7790,3679


Yogyakarta, 1 Juni 2016
Publik servis,
Sriyono

Gedung PAU Universitas Gadjah Mada
Jl. Teknika Utara, Berek, Yogyakarta 55281
Telp. (0274) 6492282, 589242 Fax. (0274) 589242
E-mail: cfn@ugm.ac.id; Website: www.cfn.ugm.ac.id

D. Desain Reaktor Pirolisis Tipe *Rotary Kiln*



Rotary Kiln Reactor

E. Program Mikrokontroler

```
int pm4 = 9;
int pm3 = 6;
int pot1 = A7;
int pwm = 0;

void setup(){
  pinMode(A7,INPUT);
  pinMode(pm3,OUTPUT);
  pinMode(pm4,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop(){
  int pot1 = analogRead(A7);
  Serial.println(pot1);
  delay(500);
  // pwm = map(pot1, 0, 1023, 0, 255);
  // analogWrite(pm3,pwm);
  // digitalWrite(pm4,LOW);
  if(pot1 == 0)
  {
    analogWrite(pm3,0);
    digitalWrite(pm4,LOW);
  }

  if(pot1 == 144)
  {
    analogWrite(pm3,225);
    digitalWrite(pm4,LOW);
  }

  if(pot1 == 331)
  {
    analogWrite(pm3,175);
    digitalWrite(pm4,LOW);
  }

  if(pot1 == 505)
  {
    analogWrite(pm3,125);
    digitalWrite(pm4,LOW);
  }

}
```