



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PROSES PEMBUATAN *BIOOIL* DARI LIMBAH KELAPA  
SAWIT (TANDAN, CANGKANG, DAN SERAT)  
UNTUK BAHAN BAKAR ALTERNATIF  
DENGAN METODE *FAST PYROLYSIS***

**SKRIPSI**

**ALIEN OLIFITRIA NINGRUM  
0706269571**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PROSES PEMBUATAN *BIOOIL* DARI LIMBAH KELAPA  
SAWIT (TANDAN, CANGKANG, DAN SERAT)  
UNTUK BAHAN BAKAR ALTERNATIF  
DENGAN METODE *FAST PYROLYSIS***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana**

**ALIEN OLIFITRIA NINGRUM  
0706269571**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM SARJANA  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Alien Olifitria Ningrum**

**NPM : 0706269571**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 29 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Alien Olifitria Ningrum

NPM : 0706269571

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Proses Pembuatan *Biooil* dari Limbah Kelapa Sawit (Tandan, Cangkang, dan Serat) untuk Bahan Bakar Alternatif dengan Metode *Fast Pyrolysis*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA

Penguji I : Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc, PhD

Penguji II : Ir. Dijan Supramono, M.Sc

Penguji III : Ir. Setiadi, M.Eng

Ditetapkan di : Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Tanggal : 28 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Mama, papa, kak citra, yuan dan seluruh keluarga yang selalu memberikan dorongan semangat, cinta, doa yang sangat berarti;
- (3) Ferdiano Finanda yang tidak pernah bosan selalu *men-support* dan mendoakan walaupun dari jarak yang amat jauh;
- (4) Kang Jajat, Mang Ijal, Mas Eko, Mas Taufik, Mas Sri, dan semua staff DTK yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir;
- (5) Dhinda, Eliana, Indriani, Aditya yang selalu setia menemani selama empat tahun ini;
- (6) Rahma Muthia, Suci Ayunda, Adit, Sukma Pamungkas, dan semua teman-teman angkatan 2007 yang selalu membantu dan memberi semangat dalam perjuangan menyelesaikan skripsi;
- (7) Semua pihak-pihak yang tidak disebutkan, yang sangat membantu selama penelitian.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 28 Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Alien Olifitria Ningrum  
NPM : 0706269571  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Proses Pembuatan *Biooil* dari Limbah Kelapa Sawit (Tandan, Cangkang, dan Serat) untuk Bahan Bakar Alternatif dengan Metode *Fast Pyrolysis***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan



(Alien Olifitria Ningrum)

## ABSTRAK

Nama : Alien Olifitria Ningrum  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Proses Pembuatan *Biooil* dari Limbah Kelapa Sawit (Tandan, Cangkang, dan Serat) untuk Bahan Bakar Alternatif dengan Metode *Fast Pyrolysis*

Kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan dapat diproses menjadi *biooil* yang nantinya dapat dijadikan bahan bakar alternatif pada kendaraan bermotor. Kelapa sawit sebagai umpan dicacah hingga diameter 0,1-2 mm, selanjutnya umpan diproses menggunakan metode *fast pyrolysis*, dan yang terakhir dilakukan pengujian pada produk cair. Penelitian ini menggunakan variasi bahan baku kelapa sawit (cangkang, tandan, dan serat) dengan kondisi suhu operasi 450, 550, dan 650°C. Faktor utama yang mempengaruhi jumlah *biooil* adalah komposisi biopolimer umpan. Jumlah kandungan biopolimer dari masing-masing umpan adalah : cangkang 94,2%; tandan 90%; dan serat 80%. Sesuai dengan banyaknya kandungan biopolimer, hasil dari eksperimen didapat bahwa umpan cangkang menghasilkan *biooil* dengan jumlah terbesar (62% pada suhu optimum 550°C) disusul oleh tandan (58% pada suhu optimum 550°C) dan serat (38% pada suhu optimum 650°C)

**Kata kunci:** *biooil*, *fast pyrolysis*, kelapa sawit

## ABSTRACT

Name : Alien Olifitria Ningrum  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Processing Biooil from Palm Oil Waste (Empty Fruit Bunch, Shell, and Fiber) for Alternative Fuel by Fast Pyrolysis Method

Palm oil waster as a source renewable energy can be processed into *biooil* that can later be used as alternative diesel fuels. Palm oil waste is crushed up to diameter 0,1-2 mm, then feed from palm oil waste is processed using fast pyrolysis method to produced *biooil*, and latter liquid product is carried out for tests. This study uses variation of raw material palm oil waste (EFB, shell, and fiber) with operating temperature conditions of 450, 550, and 650°C. Biopolimer content is the main factor that can influence the quantity of liquid product. Quantity of biopolimer content from each feedstock are: shell 94,2%; EFB 90%; and fiber 80%. In accordance with the quantity of biopolimer content, the results from experiments showed that shell produces biooil with largest number (62% at the optimum temperature of 550°C), followed by EFB (58% at the optimum temperature of 550°C), and fiber (38% at the optimum temperature of 650°C)

**Key words:** biooil; fast pyrolysis; palm oil

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Kelapa Sawit .....	6
2.2 Biomasa dan Persebaran Biomasa di Indonesia.....	11
2.3 Komposisi Biomasa .....	13
2.3.1 Kandungan Biopolimer Umpan Kelapa Sawit .....	13
2.3.2 Kandungan <i>Proximate</i> Umpan Kelapa Sawit.....	14
2.3.2 Kandungan <i>Ultimate</i> Umpan Kelapa Sawit .....	14
2.4 <i>Fast Pyrolysis</i> .....	15
2.5 Mekanisme Proses <i>Fast Pyrolysis</i> .....	18
2.5.1 Mekanisme Reaksi Pirolisis Selulosa.....	19
2.5.2 Mekanisme Reaksi Pirolisis Hemiselulosa.....	21
2.5.3 Mekanisme Reaksi Pirolisis Lignin.....	22
2.6 <i>Biooil</i> .....	22

<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>24</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	24
3.2 Variabel Penelitian .....	25
3.3 Skema Peralatan .....	26
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	26
3.5 Prosedur Penelitian.....	27
3.5.1 Persiapan Awal Biomasa.....	27
3.5.2 Proses Persiapan <i>Fast Pyrolysis</i> .....	28
3.5.3 Pembuatan <i>Biooil</i> .....	29
3.5.4 Kondensasi Uap.....	30
3.6 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data .....	31
3.7 Cara Penafsiran dan Penyimpulan Hasil Penelitian .....	32
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>33</b>
4.1 Hasil Analisis Umpan <i>Fast Pyrolysis</i> .....	33
4.2 Hasil Analisis Pengaruh Variabel Penelitian terhadap Produk Pirolisis....	35
4.2.1 Hasil Analisis Pengaruh Jenis Kelapa Sawit terhadap Produk Pirolisis	35
4.2.2 Pengaruh Suhu terhadap Produk Pirolisis .....	40
4.3 Analisis Produk Cair Pirolisis .....	43
4.3.1 Identifikasi Komponen Produk Cair dengan Metode GC-MS. ....	44
4.3.2 Uji Pembakaran .....	50
4.3.3 Analisis Densitas Produk Cair.....	50
4.3.4 Analisis Viskositas Produk Cair.....	53
4.4 Perbandingan Karakteristik Produk Cair Pirolisis dengan Minyak Diesel	54
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>56</b>
DAFTAR PUSTAKA .....	57
LAMPIRAN.....	60

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Urutan taksonomi tumbuhan kelapa sawit .....	6
Gambar 2. 2	Peta persebaran luas lahan dan produksi kelapa sawit di Indonesia	7
Gambar 2. 3	Proyeksi Produksi CPO Indonesia hingga Tahun 2020 .....	7
Gambar 2. 4	Estimasi jumlah limbah kelapa sawit terhadap produksi CPO.....	8
Gambar 2. 5	Peta persebaran potensi biomasa di Indonesia .....	11
Gambar 2. 6	Perengkahan struktur umpan pada <i>pyrolysis</i> .....	17
Gambar 2. 7	Proses pirolisis untuk menghasilkan <i>biooil</i> .....	18
Gambar 2. 8	Reaksi degradasi selulosa .....	19
Gambar 2. 9	Mekanisme reaksi dehidrasi selulosa .....	19
Gambar 2.10	Mekanisme perengkahan selulosa menjadi selulosa aktif .....	20
Gambar 2. 11	Mekanisme reaksi detail perengkahan selulosa.....	21
Gambar 2. 12	Reaksi degradasi lignin.....	22
Gambar 3. 1	Diagram alir penelitian .....	24
Gambar 3. 2	Skema peralatan proses <i>fast pyrolysis</i> .....	26
Gambar 3. 3	Skema kromatografi gas .....	32
Gambar 4. 1	Perlakuan awal umpan kelapa sawit.....	34
Gambar 4. 2	Pengaruh variasi umpan terhadap persentase produk pirolisis pada suhu 450°C.....	36
Gambar 4. 3	Pengaruh variasi umpan terhadap persentase produk pirolisis pada suhu 550°C.....	36
Gambar 4. 4	Pengaruh variasi umpan terhadap persentase produk pirolisis pada suhu 650°C.....	37
Gambar 4. 5	Pengaruh suhu terhadap persentase produk cair pirolisis.....	38
Gambar 4. 6	Pengaruh suhu terhadap jumlah <i>char</i> .....	39
Gambar 4. 7	Pengaruh suhu operasi terhadap persentasi produk pirolisis.....	40
Gambar 4. 8	Pengaruh suhu operasi terhadap produk pirolisis pada umpan : (a) cangkang, (b) tandan, (c) serat .....	41
Gambar 4. 9	Produk cair hasil pirolisis, (a) umpan serat; (b) umpan tandan; (c) umpan cangkang .....	43
Gambar 4. 10	Padatan pada proses pirolisis (a) umpan sebelum pirolisis (b) setelah pirolisis .....	43
Gambar 4. 11	Identifikasi senyawa produk cair dengan metode GC-MS pada temperatur 550°C dari umpan; (a) tandan; (b) cangkang ; (c) serat. ....	45
Gambar 4. 12	<i>Biooil</i> di dalam alat ukur densitas piknometer .....	51
Gambar 4. 13	Densitas produk cair dari tiap temperatur dan jenis umpan .....	51
Gambar 4. 14	Viskositas produk cair pada variasi suhu dan jenis umpan. ....	53

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Ketersediaan lahan produksi kelapa sawit .....	9
Tabel 2. 2 Kegunaan dari Bagian Kelapa Sawit.....	10
Tabel 2. 3 Klasifikasi sumber daya biomasa .....	12
Tabel 2. 4 Kandungan komponen kelapa sawit.....	13
Tabel 2. 5 Kandungan <i>proximate</i> kelapa sawit .....	14
Tabel 2. 6 Kandungan ultimate biomasa kelapa sawit .....	15
Tabel 2. 7 Jenis pirolisis dan karakteristiknya .....	16
Tabel 2. 8 Persentase produk dari jenis pirolisis .....	16
Tabel 2. 9 Karakteristik <i>Biooil</i> .....	23
Tabel 2.10 Karakteristik minyak diesel.....	23
Tabel 4. 1 Karakterisasi GC-MS produk cair pirolisis pada umpan tandan temperatur 550 °C.....	46
Tabel 4. 5 Karakterisasi GC-MS produk cair pirolisis pada umpan cangkang temperatur 550 °C.....	47
Tabel 4. 6 Karakterisasi GC-MS produk cair pirolisis pada umpan serat temperatur 550 °C.....	48
Tabel 4. 4 Hasil pengukuran pH <i>biooil</i> .....	49
Tabel 4. 5 Perbandingan karakteristik minyak diesel dengan produk cair hasil pirolisis .....	54

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan Densitas dan Massa.....	60
Lampiran 2	Data Hasil Produk .....	62
Lampiran 3	Gambar Peralatan .....	63
Lampiran 4	Hasil GC-MS Produk Cair .....	64



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, isu global yang sedang menjadi pembahasan serius adalah menipisnya cadangan minyak bumi dan batu bara. Ketergantungan terhadap bahan bakar bersumber energi tak terbarukan harus dihindari karena cepat atau lambat sumber energi tersebut akan habis. Sebagai gambaran, produksi minyak bumi Indonesia kini sekitar satu juta barel per hari, sedangkan kebutuhannya mencapai 1,3 juta barel sehingga kekurangan 300.000 barel harus dipenuhi dengan mengimpor (Pramudono, 2007). Tidak hanya di Indonesia, Malaysia juga mengalami peningkatan kebutuhan energi tiap tahunnya. Untuk tahun 2030 diperhitungkan kebutuhan akan energi di Malaysia mencapai hampir 100 Mtoe (*Million tonne of oil equivalent*) (Anonim, 2006). Dengan kata lain, kita harus mencari sumber energi lain yang dapat diperbarui untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Di sisi lain, Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki berbagai sumber daya alam melimpah. Sumber daya alam yang melimpah itu dapat dimanfaatkan sebagai potensi sumber energi sehingga dapat menjawab dari permasalahan yang kita hadapi. Indonesia sebenarnya memiliki potensi energi terbarukan sebesar 311.232 MW, tetapi kurang lebih hanya 22% yang dimanfaatkan (Mahajoeno, 2005). Potensi energi terbarukan yang besar dan belum banyak dimanfaatkan adalah energi dari biomasa. Potensi energi biomasa di Indonesia sebesar 50.000 MW. Namun, hanya 320 MW yang sudah dimanfaatkan atau hanya 0,64% dari seluruh potensi yang ada (Anonim, 2006). Maka dari itu, dalam rangka menjamin keamanan pasokan energi dalam negeri, pemerintah mengeluarkan Peraturan Presiden RI tentang Kebijakan Energi Nasional No. 5 Tahun 2006. Dalam Perpres tersebut antara lain disebutkan bahwa penyediaan biofuel pada tahun 2025 minimal 5% dari kebutuhan energi nasional.

Salah satu potensi yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan biomasa adalah kelapa sawit. Indonesia merupakan penghasil perkebunan kelapa sawit terbesar kedua di dunia setelah Malaysia (Prasetyani dan Miranti, 2009). Kelapa sawit (*Elaeis quineensis* Jaco) dari famili *Arecaceae* merupakan salah satu sumber minyak nabati, dan merupakan primadona bagi komoditi perkebunan. Potensi kelapa sawit di Indonesia cukup besar, data tahun 1999 menunjukkan bahwa potensi kelapa sawit berdasarkan luas perkebunannya mencapai 3.174.726 hektar dengan total produksi minyak mencapai 6.217.425 ton (Dirjen Perkebunan, 1999).

Seiring dengan besarnya industri perkebunan kelapa sawit di Indonesia, akan timbul masalah berupa penanganan dari limbah kelapa sawit (batang, daun, pelepah, sabut, tandan, dan cangkang). Dari satu hektar perkebunan kelapa sawit menghasilkan limbah sebesar 50-70 ton (Salathong, 2007). Sedangkan dalam pembuatan satu ton pembuatan CPO (*Crude Palm Oil*) dapat menghasilkan limbah berupa tandan kosong sebesar 1,16 ton; serat 0,53 ton; cangkang 0,3 ton; abu 0,02 ton (Hayashi, 2007). Bisa dibayangkan betapa besarnya limbah yang dapat dihasilkan. Salah satu alternatif dalam menanggulangi permasalahan limbah adalah dengan memroses limbah kelapa sawit tersebut menjadi produk sumber energi biomasa. Sumber energi biomasa yang dimaksud adalah pembuatan biodiesel dari limbah kelapa sawit.

Kelapa sawit dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan *biooil*. *Biooil* merupakan campuran hidrokarbon C5-C14 yang dapat diolah lagi untuk dijadikan biodiesel sebagai energi alternatif pengganti solar. Selain dijadikan solar, hasil *biooil* juga dapat dijadikan bahan baku industri petrokimia. Sebagai suatu acuan untuk menghasilkan *biooil*, kita dapat memperhatikan jumlah selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang terkandung dalam kelapa sawit. Ketiga kandungan tersebut berpengaruh pada jumlah *biooil* yang akan dihasilkan nantinya.

Dalam penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan *fixed bed reactor* didapatkan *biooil* maksimum sebesar 42,28% (Sukiran, 2008). Penelitian ini menggunakan bahan baku tandan kosong kelapa sawit dengan proses *fast pyrolysis* pada temperatur optimum 500°C dengan ukuran partikel biomasa 91-106  $\mu\text{m}$ . Namun, ini belum cukup untuk menyimpulkan

bahwa tandan kosong kelapa sawitlah yang paling baik dalam menghasilkan *biooil* maksimal. Masih ada potensi dari bagian-bagian kelapa sawit (seperti batang, daun, pelepah, dan cangkang) lain yang dapat menghasilkan *biooil* yang lebih menjanjikan. Untuk itu, diperlukan suatu penelitian lain untuk mengetahui potensi lain yang dimiliki dari limbah kelapa sawit.

Teknologi proses terbaru yang digunakan untuk pembuatan *biooil* dari limbah kelapa sawit adalah *fast pyrolysis*. *Fast pyrolysis* merupakan proses pembakaran dengan temperatur tinggi (antara 450-600°C) tanpa adanya kehadiran oksigen/udara (Brem, 2006). Dibutuhkan laju pemanasan yang tinggi, temperatur tinggi, dan waktu tinggal yang sedikit untuk menghasilkan *biooil* yang maksimal (Uzun *et.al.* 2007). Semakin banyak kandungan selulosa yang dimiliki maka semakin banyak *biooil* yang dihasilkan.

Produk cair yang diperoleh dari *fast pyrolysis* bagian-bagian kelapa sawit ini kemudian akan dianalisis kandungan fisika, kimia, dan gugus fungsinya apakah produk cair atau *biooil* ini mempunyai karakteristik sebagai bahan bakar alternatif pengganti diesel/solar atau sebagai bahan baku petrokimia. Sehingga nantinya dapat diambil kesimpulan bagian dari kelapa sawit yang mana yang paling memiliki potensi dan kualitas terbaik untuk menghasilkan *biooil*. Efek selanjutnya adalah dari kesimpulan tersebut maka dapat ditemukan suatu energi alternatif pengganti minyak diesel sehingga dapat membantu menyelesaikan masalah mengenai krisis energi dan meningkatkan daya saing bangsa.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan dari permasalahan utama sehingga penelitian diharapkan mampu menjawab permasalahan yang telah dirumuskan antara lain :

1. Bagaimanakah karakteristik kandungan kimia dan fisika dari *biooil* tiap bagian kelapa sawit yang diujikan?
2. Bagaimana perbandingan *yield* produk *biooil* dari tiap bagian kelapa sawit yang diujikan?
3. Dengan mengidentifikasi kandungannya dengan karakteristik bahan bakar, bagaimana menentukan bagian kelapa sawit untuk penggunaan produk *biooil* sebagai bahan bakar alternatif?

### 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan permasalahan dalam penelitian ini adalah penggunaan batang, tandan kosong, daun, pelepah, dan cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku utama biomasa untuk produksi *biooil*. Penggunaan bahan baku ini didasarkan pada potensi kelapa sawit untuk dijadikan salah satu bahan baku *biooil*. Metode yang digunakan adalah *fast pyrolysis* dengan menggunakan kondisi temperatur operasi 450, 550, dan 650°C. Sehingga pada akhirnya diperoleh kesimpulan yang lengkap mengenai potensi bahan baku tersebut untuk dijadikan produk *biooil* dengan parameter kualitas dan kuantitas.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah melakukan komparasi terhadap hasil *yield biooil* dari limbah kelapa sawit yang diujikan dengan menggunakan metode *fast pyrolysis*. Produk tersebut nantinya akan dikarakterisasi sifat fisika dan kimianya seperti analisis berat jenis, viskositas, pH, uji bakar, dan kandungan gugus fungsi dari produk yang diperoleh untuk dibandingkan dengan karakteristik bahan bakar alternatif pengganti minyak diesel atau bahan baku industri petrokimia.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan penulisan ini diharapkan Indonesia dapat mengembangkan sumber energi alternatif baru berbasis biomasa, khususnya limbah kelapa sawit, dalam mengurangi kebutuhan minyak bumi. Sehingga, dapat mengurangi tingkat limbah industri kelapa sawit dan bahkan menjadikan limbah tersebut menjadi produk yang bermanfaat dan berkualitas.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut.

### 1. BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini membahas permasalahan dan pentingnya penelitian ini dilakukan. Terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

### 2. BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas dasar teori yang penelitian, yaitu bahasan tentang biomasa, biomasa kelapa sawit, proses *fast pyrolysis* (disertai tentang parameter yang mempengaruhi proses dan mekanismenya), dan *biooil*.

### 3. BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang diagram alir penelitian, skema peralatan, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian, serta metode yang digunakan untuk menganalisis produk *biooil*.

### 4. BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan dari penelitian yang berupa uraian dan hasil analisis umpan pirolisis, hasil analisis pengaruh variabel penelitian, hasil analisis produk cair pirolisis, hasil analisis produk gas, dan perbandingan karakteristik produk cair dengan minyak diesel.

### 5. BAB 5 KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan atas penelitian yang telah dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

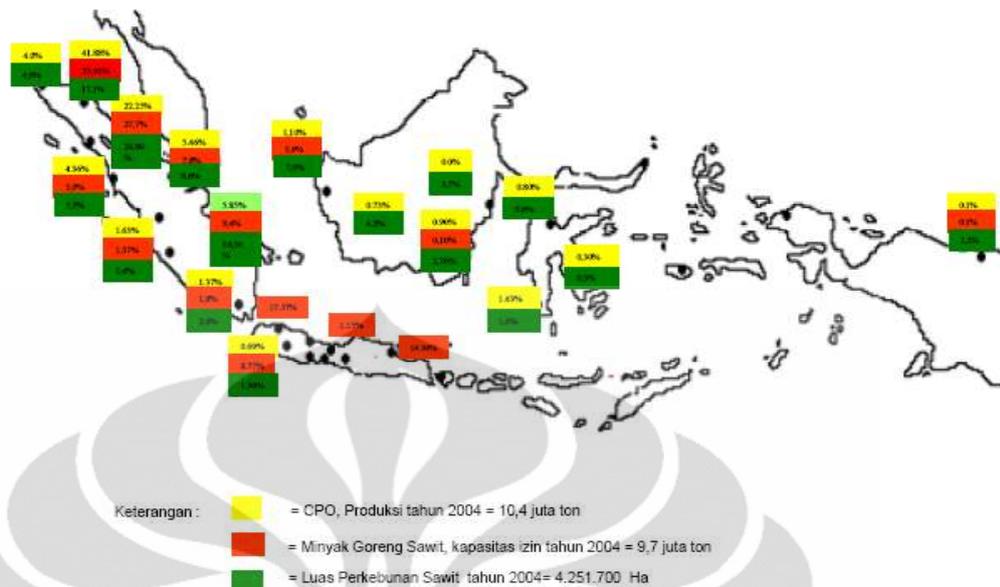
#### 2.1 Kelapa Sawit

Pohon kelapa sawit terdiri dari dua spesies *Arecaceae* atau famili *palma* yang digunakan untuk pertanian komersil dalam pengeluaran minyak kelapa sawit. Kelapa sawit termasuk tumbuhan pohon. Tingginya dapat mencapai 24 meter. Bunga dan buahnya berupa tandan, serta bercabang banyak. Daging dan kulit buahnya mengandung minyak. Minyaknya itu digunakan sebagai bahan minyak goreng, sabun, dan lilin. Ampasnya dimanfaatkan untuk makanan ternak, khususnya sebagai salah satu bahan pembuatan makanan ayam. Tempurungnya digunakan sebagai bahan bakar dan arang. Berikut Gambar 2.1 adalah urutan taksonomi dari kelapa sawit:



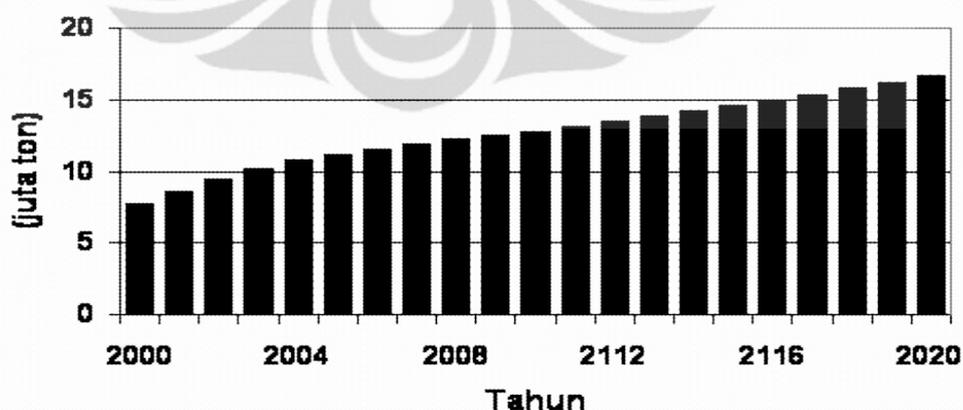
**Gambar 2. 1** Urutan taksonomi tumbuhan kelapa sawit

Di Indonesia, kelapa sawit berkembang dengan pesat dan perkebunannya yang banyak tersebar di berbagai wilayah. Wilayah yang paling besar dalam produksi kelapa sawit ada di Pulau Sumatera. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.2 mengenai peta persebaran perkebunan dan luas lahan produksi kelapa sawit di Indonesia.



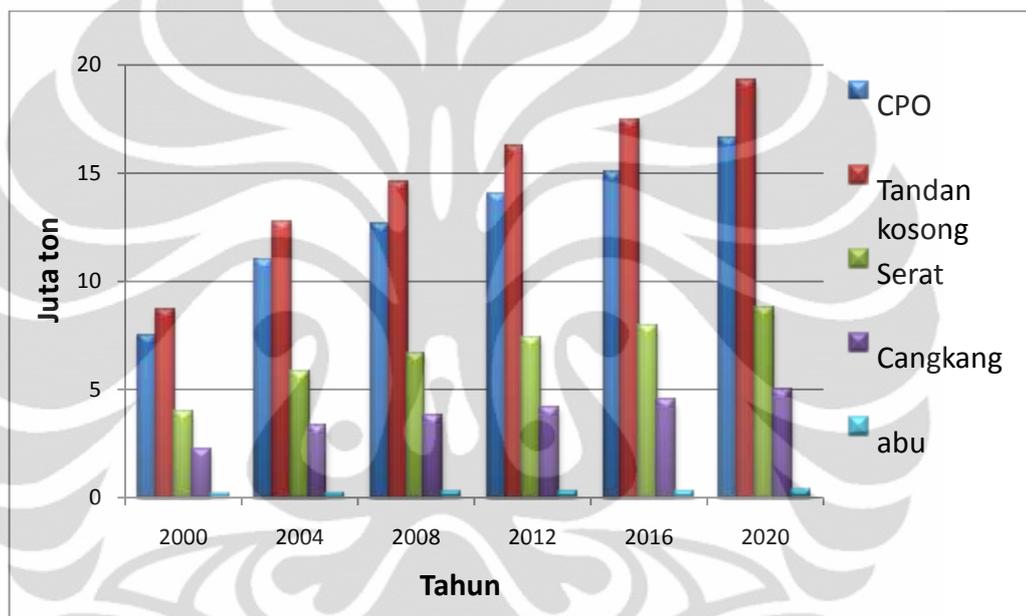
**Gambar 2. 2** Peta persebaran luas lahan dan produksi kelapa sawit di Indonesia (Pusat data dan informasi Departemen Perindustrian)

Berkembangnya perkebunan kelapa sawit di Indonesia dikarenakan kelapa sawit memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap devisa negara. Pada 2003, total devisa yang dihasilkan industri ini mencapai US\$ 2,6 miliar atau 4,3% dari total ekspor Indonesia seluruhnya yang mencapai US\$ 61 miliar (Statistik Ekonomi dan Keuangan Indonesia, 2004). Dari jumlah ketersediaan lahan, Indonesia memiliki potensi untuk menjadi negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia (Pusat Data dan Informasi Departemen Perindustrian, 2008)



**Gambar 2. 3** Proyeksi Produksi CPO Indonesia hingga Tahun 2020 (Dirjen Perkebunan, 2009)

Berdasarkan Gambar 2.3, produksi CPO meningkat dengan laju 9,4% per tahun. Sampai dengan tahun 2010 produksi CPO diperkirakan meningkat dengan laju 5-6% per tahun, sedang untuk periode 2010 – 2020 pertumbuhan produksi berkisar antara 2%-4% (Mahajoeno, 2009). Sehingga jumlah limbah CPO pun meningkat. Dalam satu ton pembuatan CPO (*Crude Palm Oil*) dapat menghasilkan limbah berupa tandan kosong sebesar 1,16 ton; serat 0,53 ton; cangkang 0,3 ton; abu 0,02 ton (Hayashi K., 2007). Sehingga dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah peningkatan jumlah limbah hingga tahun 2020



**Gambar 2. 4** Estimasi jumlah limbah kelapa sawit terhadap produksi CPO

Dapat dilihat dari Gambar 2.4, tandan kosong kelapa sawit merupakan limbah terbesar yang dihasilkan dari pembuatan CPO disusul dengan serat dan cangkang.

Persebaran ketersediaan lahan kelapa sawit terdiri dari dua macam, yaitu berupa lahan yang sudah digunakan dan lahan yang tersedia namun belum digunakan.

**Tabel 2. 1** Ketersediaan lahan produksi kelapa sawit (Departemen Perindustrian)

No.	Nama Daerah	Luas Lahan
1.	Bangka Belitung	Lahan yang sudah digunakan: 107.070 Ha
2.	Bengkulu	Lahan yang sudah digunakan: 180.693 Ha
3.	Irian Jaya Barat	Lahan yang sudah digunakan: 30.171 Ha Sisa lahan tersedia: 150.000 Ha
4.	Jambi	Lahan yang sudah digunakan: 274.265 Ha Sisa lahan tersedia: 114.000 Ha
5.	Jawa Barat	Lahan yang sudah digunakan: 7.115 Ha
6.	Kalimantan Barat	Lahan yang sudah digunakan: 373.162 Ha Sisa lahan tersedia: 58.720 Ha
7.	Kalimantan Selatan	Lahan yang sudah digunakan: 160.753 Ha Sisa lahan tersedia: 216.474 Ha
8.	Kalimantan Tengah	Lahan yang sudah digunakan: 343.303 Ha Sisa lahan tersedia: 497.427 Ha
9.	Kalimantan Timur	Lahan yang sudah digunakan: 171.581 Ha Sisa lahan tersedia: 652.135 Ha
10.	Kepulauan Riau	Lahan yang sudah digunakan: 5.590 Ha
11.	Maluku Utara	Lahan yang tersedia: 100.000 Ha
12.	Nanggroe Aceh Darussalam	Lahan yang sudah digunakan: 227.590 Ha
13.	Papua	Lahan yang sudah digunakan: 89.827 Ha Sisa lahan tersedia: 1.935.000 Ha
14.	Riau	Lahan yang sudah digunakan: 1.307.880 Ha Sisa lahan tersedia: 30.000 Ha
15.	Sulawesi Barat	Lahan yang sudah digunakan: 9.568 Ha Sisa lahan tersedia: 45.000 Ha
16.	Sulawesi Selatan	Lahan yang sudah digunakan: 11.894 Ha Sisa lahan tersedia: 120.298 Ha
17.	Sulawesi Tenggara	Lahan yang sudah digunakan: 74.000 Ha
18.	Sumatera Barat	Lahan yang sudah digunakan: 280.099 Ha Sisa lahan tersedia: 14.500 Ha
19.	Sumatera Selatan	Lahan yang sudah digunakan: 386.403 Ha Sisa lahan tersedia: 144.500 Ha
20.	Sumatera Utara	Lahan yang sudah digunakan: 229.512 Ha Sisa lahan tersedia: 40.000 Ha

Pohon kelapa sawit berbentuk silinder dengan diameter sekitar 20–75 cm. Tingginya bertambah sekitar 45 - 100 cm per tahun. Buah terkumpul di dalam tandan, dalam satu tandan terdapat sekitar 1.600 buah. Tanaman normal akan

menghasilkan 20–22 tandan per tahun. Jumlah tandan buah pada tanaman tua sekitar 12–14 tandan per tahun. Berat setiap tandan sekitar 25–35 kg.

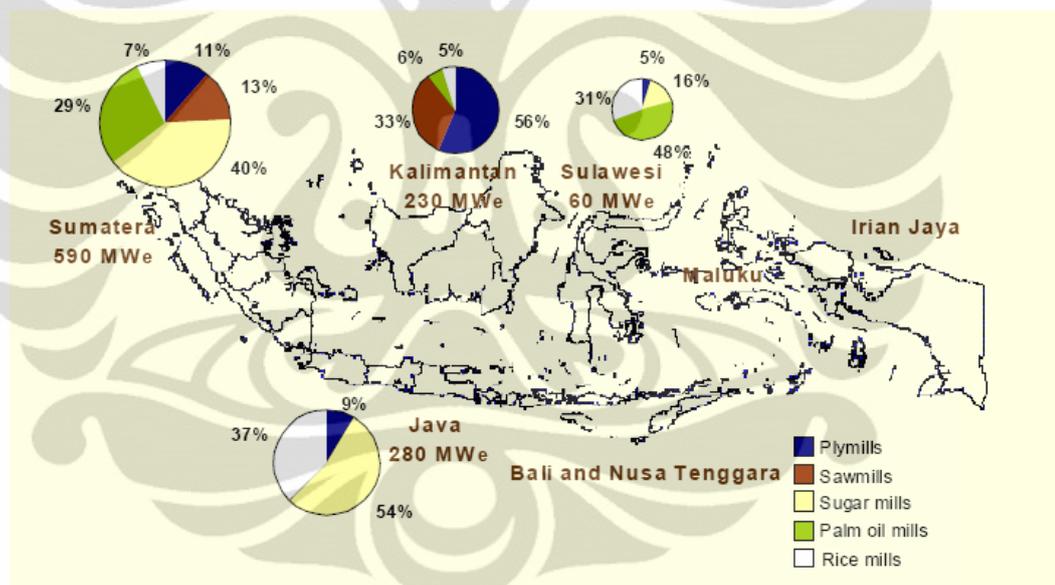
Biji kelapa sawit tersusun dari endokarp (tempurung) yang merupakan lapisan keras dan berwarna hitam, dan endosperm (kernel) yang berwarna putih. Kernel akan menghasilkan minyak inti atau *palm kernel oil*. Kelapa sawit memiliki banyak kegunaan dari bagian-bagiannya. Batangnya dapat digunakan sebagai material konstruksi, daunnya dapat digunakan sebagai *pulp*, namun kegunaan utama kelapa sawit terletak pada buahnya. Kegunaan lain dari kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut ini:

**Tabel 2. 2** Kegunaan dari Bagian Kelapa Sawit (LIPI, 2009)

<b>Bagian</b>	<b>Sub Bagian</b>	<b>Kegunaan</b>
<b>Daun</b>	-	<i>Pulp</i> , kerajinan, tokoferol, nutrien organik, isoenzim.
<b>Tangkai Bunga</b>	-	Nira, gula merah, anggur sawit, vitamin B kompleks, cuka kelapa.
<b>Bunga</b>	-	Estragol
<b>Akar</b>	-	Tambang/tali
<b>Batang dan Pelepah</b>	-	Arang, <i>pulp</i> , pasta pati, lignin, silose, silitol, bahan kerajinan, kayu kelapa sawit.
<b>Buah</b>	Daging buah	Minyak kelapa sawit, lumpur kelapa sawit.
	Inti/biji	Tepung, testa, bungkil, minyak inti sawit.
	Cangkang	Arang, tepung temperung
	Serat	Pangan, non pangan
	Tandan kosong	Pakan domba, pelet karbon, selulosa, biogas, alkohol, metan, <i>pulp</i> , lignin. Bungkil, asetop, metan.
	Limbah padat	<i>Gashio</i> .

## 2.2 Biomasa dan Persebaran Biomasa di Indonesia

Di alam ini, semua biomasa pada akhirnya akan membusuk menjadi molekul dasarnya dengan adanya pelepasan panas. Pelepasan energi dari konversi biomasa menjadi energi yang berguna akan menyerupai proses alam, tetapi dengan laju yang lebih cepat. Pemanfaatan energi ini adalah mendaur ulang karbon dan tidak menambahkan karbon dioksida ke lingkungan, hal ini berbeda dengan bahan bakar fosil. Dari ke semua sumber energi yang terbarukan, biomasa sangatlah unik dalam keefektifannya menyimpan energi matahari. Lebih lanjut lagi, biomasa merupakan satu-satunya sumber karbon yang dapat diperbaharui, dan juga mampu diproses menjadi bahan bakar gas, cair, dan padat yang baik. Indonesia memiliki potensi biomasa yang sangat besar yang tersebar di berbagai wilayah. Persebaran tersebut dapat terlihat pada Gambar 2.5 di bawah ini:



**Gambar 2. 5** Peta persebaran potensi biomasa di Indonesia (Budiono, 2009)

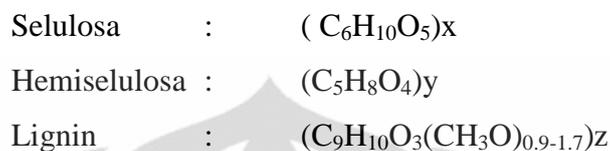
Biomasa tersebut dapat diperoleh dari berbagai sumber. Sumber tersebut dapat diklasifikasikan menurut sektor *supplier*, seperti terlihat pada Tabel 2.4 berikut.

**Tabel 2. 3** Klasifikasi sumber daya biomasa (Eubia, 2009)

<b>Sektor supplier</b>	<b>Tipe</b>	<b>Contoh</b>
<b>Hutan</b>	Hutan khusus penghasil bahan baku biomass	Penanaman pohon yang memiliki waktu rotasi cenderung singkat (contoh: <i>willow</i> , <i>poplar</i> , <i>eucalyptus</i> )
	Hasil hutan	Balok kayu dan ranting
<b>Pertanian</b>	Lignoselulosic kering	Tanaman <i>Herbaceous</i> (contoh: <i>miscanthus</i> , <i>reed canarygrass</i> , <i>giant reed</i> )
	Minyak, gula dan starch energy crops	Minyak untuk metilester (contoh: <i>rape seed</i> , bunga matahari)
		Gula untuk etanol (contoh: <i>sugar cane</i> , <i>sweet sorghum</i> )
		<i>Starch crops</i> untuk etanol (contoh: jagung, gandum)
	Residu pertanian	Jerami, ranting-daun dari <i>vineyards</i> dan pohon buah
Zat sisa makhluk hidup	Kotoran hewan, basah dan kering	
<b>Industri</b>	Sisa industry	Sampah kayu industri, sawdust dari sawmills
		Sampah dari industri kertas
<b>Sampah</b>	Lignocellulosic kering	Sampah dari taman dan kebun (contoh: rumput, daun, ranting)
	Sampah yang telah terkontaminasi	Limbah kayu yang telah rusak
		Fraksi organik dari limbah padat dari perkotaan
		<i>Biodegradable landfilled waste</i> , <i>landfill gas</i>
	Lumpur saluran air	

### 2.3 Komposisi Biomasa

Biomasa merupakan produk reaksi fotosintetik dari karbon dioksida dengan air, yang terdiri atas karbon, oksigen, dan hidrogen, yang terdapat dalam bentuk polimerik makroskopik kompleks. Bentuk-bentuknya adalah:



Komposisi senyawa-senyawa pokok di atas bervariasi untuk tiap spesies tanaman. Biasanya, biomasa mengandung 40-60% berat selulosa, 20-40% berat hemiselulosa, dan 10-25% berat lignin pada tiap basis kering. Pada kasus degradasi termal, ketiga komponen ini yang paling mudah terdegradasi adalah hemiselulosa, kemudian selulosa dan yang paling sulit adalah lignin.

Kelapa sawit memiliki komposisi selulosa 59,7%, hemiselulosa 22,1%, dan lignin 18,1% (N. Abdullah-H. Gerhauser-A.V. Bridgwater, 2007). Kandungan tersebut yang akan mempengaruhi jumlah biooil yang dihasilkan dari proses *fast pyrolysis*. Untuk mengetahui karakteristik umpan lebih lengkap, berikut diberikan jumlah kandungan biopolimer, *proximate*, dan *ultimate* dari umpan yang digunakan.

#### 2.3.1 Kandungan Biopolimer Umpan Kelapa Sawit

Kandungan biopolimer dilakukan untuk mengetahui kandungan dan persentase dari komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada umpan. Kandungan biopolimer komponen umpan ditampilkan dalam Tabel 2.4 berikut ini:

**Tabel 2. 4** Kandungan komponen kelapa sawit (Danish, 2006)

Limbah Kelapa Sawit	Rasio Limbah (%)	Jumlah Limbah (juta ton/tahun)	Kandungan (%)			
			Selulosa	Hemiselulosa	Lignin	Jumlah
Tandan kosong	27	12,9	39,0	22,0	29,0	90,0
Serat	15	6,7	21,0	16,0	43,0	80,0
Cangkang	9	3,5	20,8	22,7	50,7	94,2

Biomasa merupakan produk reaksi fotosintetik dari karbon dioksida dengan air, yang terdiri atas karbon, oksigen, dan hidrogen, yang terdapat dalam bentuk polimerik makroskopik kompleks. Selulosa dapat membentuk turunan alkohol seperti ester, eter, dll. Proses pirolisis lignin dihasilkan senyawa kimia aromatis yang berupa fenol, terutama kresol. Dapat dilihat dari Tabel 2.4 di atas, tiap kandungan kelapa sawit memiliki senyawa selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang cukup besar yakni di atas 20%. Sehingga ketiga biomasa tersebut jika dipanaskan dapat dengan mudah terdegradasi menjadi senyawa-senyawa berupa alkohol dan aromatik yang terkandung dalam *biooil*.

### 2.3.2 Kandungan *Proximate* Umpan Kelapa Sawit

Kandungan *proximate* dalam kelapa sawit merupakan jumlah kandungan air, abu, karbon padat, nilai kalor, dan *volatile matter* pada umpan. Jumlah kandungannya ditampilkan dalam Tabel 2.5 berikut ini:

Tabel 2. 5 Kandungan *proximate* kelapa sawit (Yang et al, 2006)

Limbah Kelapa Sawit	Proximate Analysis (%)			
	Moisture content	Volatile matters	Ash	Fixed carbon
Tandan kosong	8,8	79,7	3,0	8,7
Serat	6,7	75,6	5,3	12,4
Cangkang	5,7	73,7	2,2	18,4

Dari data di atas dapat dilihat bahwa umpan memiliki kandungan *volatile matter* yang tinggi (di atas 70%). Nilai ini yang diharapkan dapat mengalami penguraian dan kondensasi sehingga didapatkan konversi yang tinggi.

### 2.3.2 Kandungan *Ultimate* Umpan Kelapa Sawit

Komponen karbon, nitrogen, hidrogen, belerang, dan oksigen pada umpan termasuk ke dalam kandungan *ultimate*. Data dari kandungan *ultimate* ditampilkan dalam Tabel 2.6 berikut ini:

**Tabel 2. 6** Kandungan ultimate biomasa kelapa sawit (Yang et al, 2006)

Limbah Kelapa Sawit	Komposisi (%)				
	C	H	O	S	N
Tandan kosong	48,8	7,3	40,2	0,7	0,2
Serat	50,2	7,1	36,3	0,6	0,42
Cangkang	53,8	7,2	36,3	0,5	0,6

Untuk analisis *ultimate*, dapat kita lihat bahwa kandungan oksigen umpan biomasa masih cukup besar dengan persentase mencapai 36 %. Hal ini dapat menyebabkan kontribusi terbentuknya senyawa oksigenat pada produk cair akan semakin besar yang dapat menurunkan nilai kalor dari produk itu sendiri. Dari data di atas, dapat juga dilihat bahwa kandungan nitrogen dan belerang pada umpan sangat kecil. Hal ini merupakan salah satu keutamaan dari biomasa dibandingkan dengan batubara. Pada biomasa, kandungan nitrogen dan sulfur berada di bawah 1%, sedangkan kandungan nitrogen dan sulfur pada batubara bernilai sampai 3% (ASTM, 1981, *op cit* Wood *et al.*, 1983). Nilai ini akan mengakibatkan jumlah emisi SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> pada biomasa memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan batubara.

#### 2.4 *Fast Pyrolysis*

Pirolisis merupakan suatu proses pembakaran biomasa tanpa melibatkan oksigen pada temperatur tinggi (temperatur antara 450°C-600°C). Produk yang dihasilkan dari pirolisis adalah minyak, arang dan gas sintetik. Sekarang ini *pyrolysis* sangat menjanjikan dalam konversi teknologi *thermo-chemical* untuk memproduksi produk berupa cairan (Bridgwater and Bridge, 1991). Pirolisis dapat dibagi dalam beberapa jenis metode berdasarkan produk utama yang dihasilkan, yang dapat dilihat pada Tabel 2.7 berikut.

**Tabel 2. 7** Jenis pirolisis dan karakteristiknya (Bridgwater, 2009)

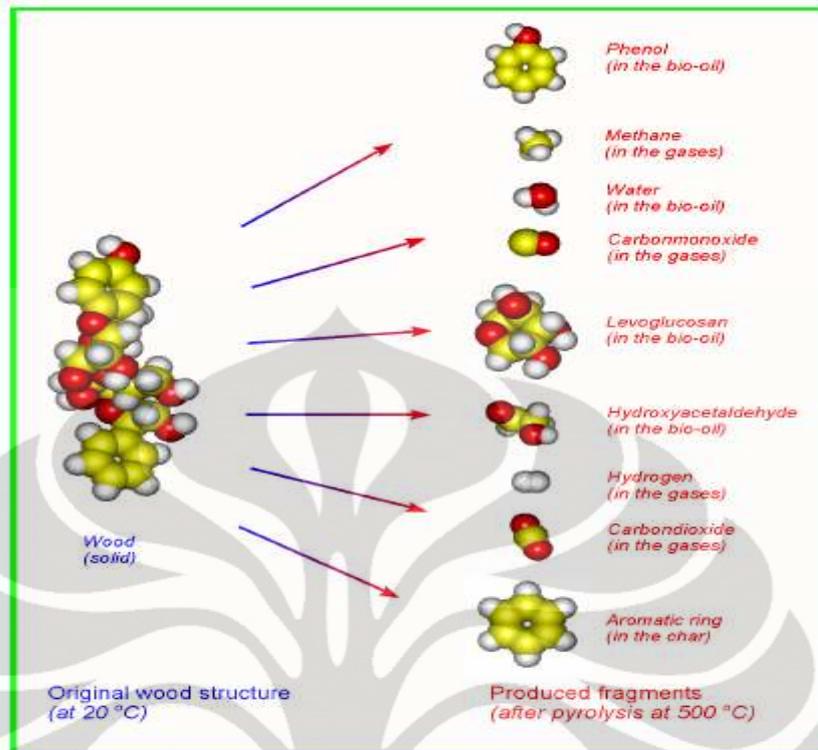
Jenis Pirolisis	Waktu Tinggal	Laju Pemanasan	Suhu (°C)	Produk
Karbonisasi	Harian	Sangat lambat	400	Arang
Konvensional	5-30 menit	Lambat	600	Minyak, gas, arang
Pirolisis cepat	0,5-5 detik	Sangat cepat	450-600	<i>Biooil</i>
Cairan-flash	< 1 detik	Cepat	< 650	<i>Biooil</i>
Gas-flash	< 1 detik	Cepat	< 650	Zat kimia, gas
Ultra pirolisis	< 0,5 detik	Sangat cepat	1000	Zat kimia, gas
Vakum pirolisis	2-30 detik	Medium	400	<i>Biooil</i>
Hidro pirolisis	< 10 detik	Cepat	< 500	<i>Biooil</i>
<i>Methano pyrolysis</i>	< 10 detik	Cepat	> 700	Zat kimia

Pirolisis dapat juga dibedakan berdasarkan persentase produk yang dihasilkan, yang ditunjukkan pada Tabel 2.8 berikut :

**Tabel 2. 8** Persentase produk dari jenis pirolisis (Stefan Kzernick, 2002)

Jenis Pirolisis	Produk		
	Liquid (%)	Char (%)	Gas (%)
<i>Fast pyrolysis</i>	75	12	13
Karbonisasi	30	35	35
Gasifikasi	5	10	85

Prinsip dasar dari proses *fast pyrolysis* ini adalah degradasi ikatan kimia pada umpan yang terjadi akibat pemanasan yang cepat (dengan temperatur tinggi) tanpa kehadiran oksigen. Struktur asli dari umpan akan mengalami perengkahan sehingga terbentuk beberapa fragmen yang terdapat pada fasa cair, gas, atau padat. Perengkahan struktur tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6 dibawah ini:



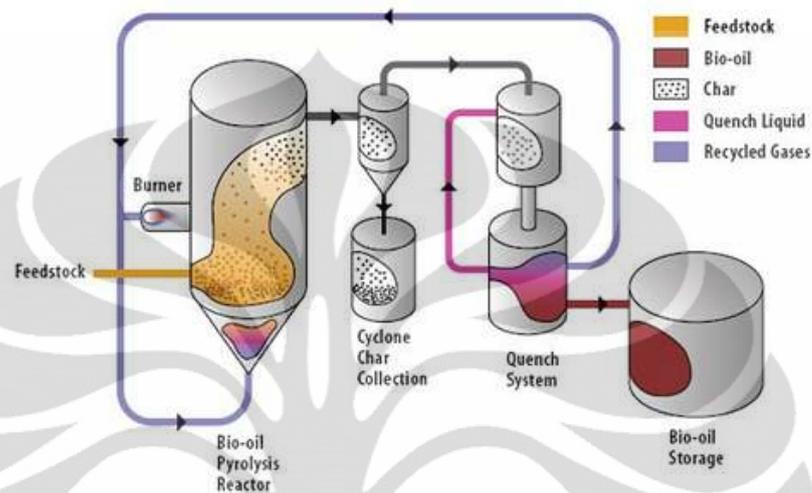
**Gambar 2. 6** Perengkahan struktur umpan pada *pyrolysis* (Wolter Prins, 2009)

Dari hasil perengkahan struktur umpan tersebut, maka dihasilkan senyawa-senyawa tertentu pada *biooil* (fenol, air, levoglucosan, hidroksiasetaldehida), gas (metana, hidrogen, karbonmonoksida), dan arang (cincin aromatik dan lain-lain).

Parameter-parameter yang mempengaruhi produk *fast pyrolysis* adalah temperatur, laju alir gas inert, dan ukuran partikel umpan masuk (AV Bridgwater, 1999). Selain itu, komposisi kandungan kimia penyusun biomasa (seperti kandungan lignin, selulosa, kandungan air, dan kandungan abu) juga akan menghasilkan produk yang bervariasi. Misalnya, jika biomasa mengandung banyak lignin, maka produk yang dihasilkan mengandung banyak unsur fenol. Apabila mengandung banyak selulosa maka akan semakin tinggi kemungkinan dihasilkannya *biooil*. Kandungan air umpan biomasa akan mempengaruhi nilai kalor dari *biooil* dimana semakin tinggi kandungan airnya maka akan semakin rendah nilai kalor yang dihasilkan. Sementara itu apabila semakin tinggi kandungan abunya maka akan produksi arang akan tinggi pula.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya berdasarkan Tabel 2.8, *fast pyrolysis* merupakan salah satu teknologi yang dipakai untuk mendapatkan *biooil*. *Fast pyrolysis* ini akan menghasilkan *biooil* hingga 80% (Kzernick, 2002).

## 2.5 Mekanisme Proses *Fast Pyrolysis*



**Gambar 2.7** Proses pirolisis untuk menghasilkan *biooil* (Dyna Motive Energy System Cooperation, 2005)

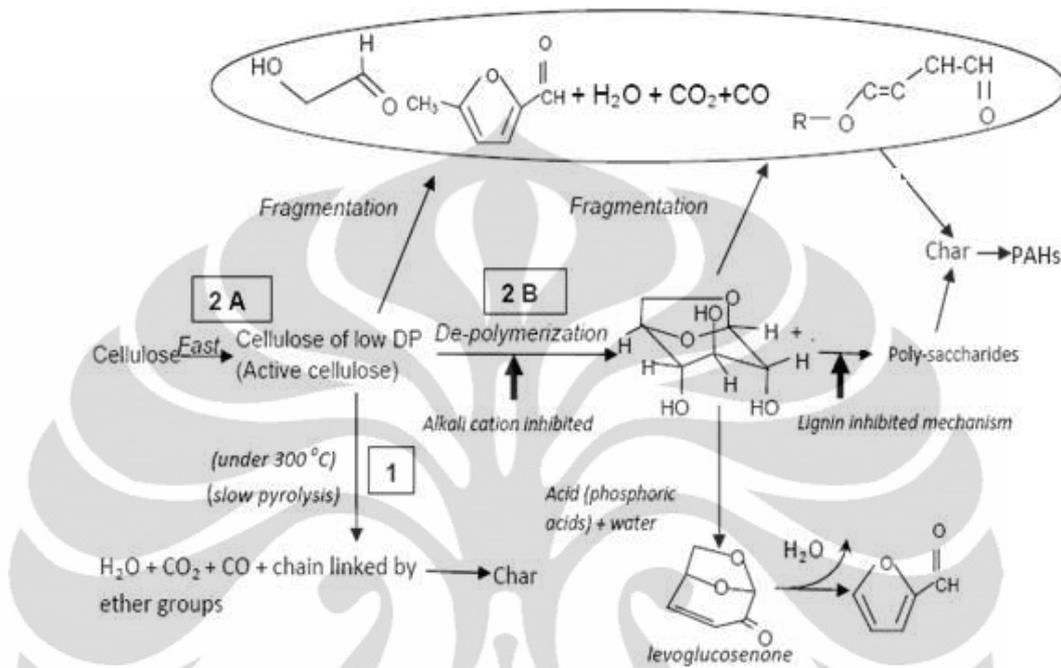
Berdasarkan Gambar 2.7 diatas, proses pirolisis biomasa secara ringkas dimulai dengan memotongnya sesuai dengan ukuran yang diinginkan kemudian direndam dan dikeringkan. Penggunaan sistem *cyclone* dan kondenser dapat digunakan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. *Cyclone* digunakan untuk proses pengumpulan produk berupa arang dan kondenser digunakan pada proses kondensasi uap untuk menghasilkan produk cair. Pendinginan yang cepat juga akan mempengaruhi kuantitas produk cair yang diperoleh.

Untuk kondisi operasi proses pirolisis, pada temperatur dibawah  $300^{\circ}\text{C}$ , maka reaksi yang dominan adalah dehidrasi. Disini akan banyak dihasilkan gas  $\text{CO}_2$ , air, dan  $\text{CO}$ . Produk utama yang dihasilkan adalah arang. Pada temperatur diatas  $400^{\circ}\text{C}$ , terjadi depolimerisasi yang menghasilkan *levoglucosan*. Pemanasan yang tinggi mengakibatkan reaksi dehidrasi sangat kecil terjadi sehingga hasil utamanya adalah berupa cair.

Mekanisme reaksi pada proses pirolisis ini berbeda pada setiap komponennya untuk menghasilkan produk yang beragam. Berikut akan dijelaskan mekanisme reaksi untuk selulosa, hemiselulosa, dan lignin.

### 2.5.1 Mekanisme Reaksi Pirolisis Selulosa

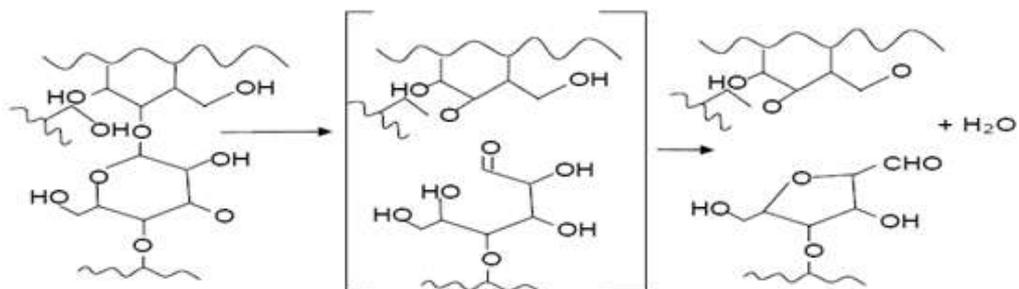
Mekanisme reaksi pirolisis yang terjadi untuk molekul selulosa dapat ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut



Gambar 2. 8 Reaksi degradasi selulosa (Manuel Garcia-Perez, 2008)

#### ▪ Reaksi 1

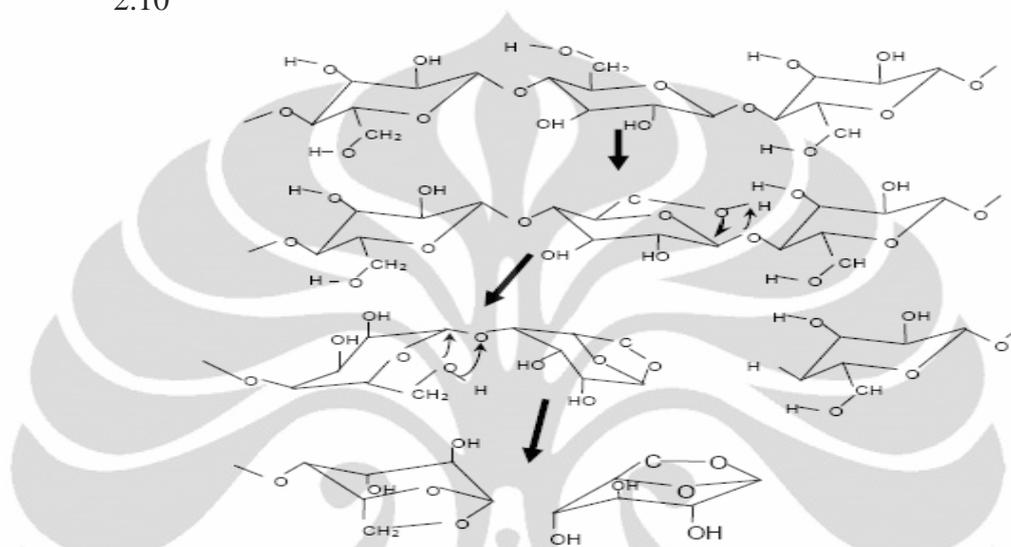
Akibat pemanasan awal maka akan terjadi reaksi dehidrasi sehingga terbentuk senyawa radikal bebas, penghilangan air, senyawa karbonil, karboksil, dan hidroperoksida. Kemudian akan terjadi reaksi antara  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , dan  $\text{CO}$  menjadi arang. Reaksi dehidrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut:



Gambar 2. 9 Mekanisme reaksi dehidrasi selulosa (Manuel Garcia-Perez, 2008)

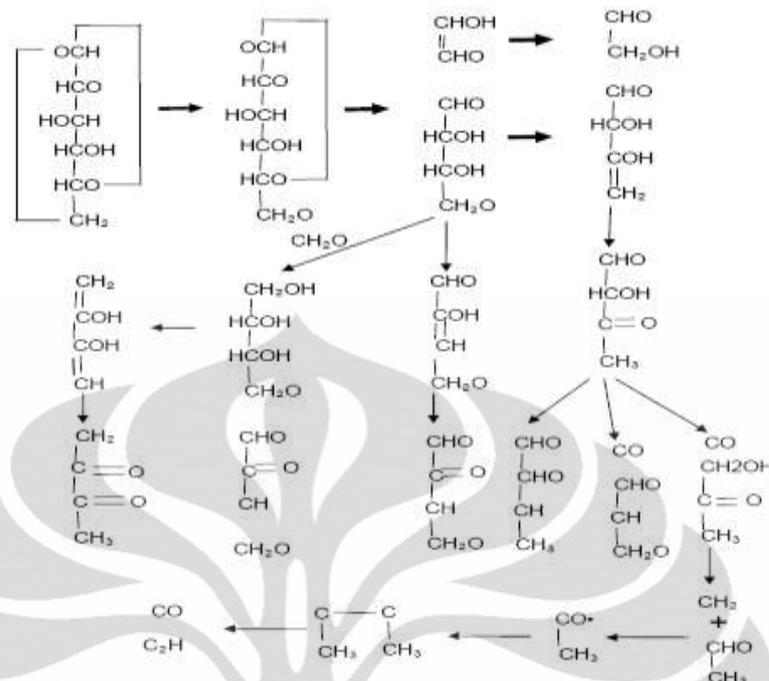
### ▪ Reaksi 2 (depolimerisasi)

Reaksi ini diawali dengan terbentuknya selulosa aktif yang juga disebut sebagai reaksi *broido-shafizadeh*. Kemudian akan terjadi dekomposisi termal dimana selulosa aktif tersebut akan membentuk *levoglucosan* melalui proses depolimerisasi. Reaksi pembentukan selulosa aktif dapat dilihat pada Gambar 2.10



**Gambar 2. 10** Mekanisme perengkahan selulosa menjadi selulosa aktif  
(Manuel Garcia-Perez,2008)

Selanjutnya akan terjadi reaksi perengkahan dari ikatan selulosa sehingga nantinya akan dihasilkan senyawa karboksil dan senyawa oksigenat. Selulosa juga akan menghasilkan senyawa *levoglucosan* yang akan mengalami dehidrasi dan dekarbonilasi sehingga dihasilkan senyawa C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> dan C<sub>4</sub>. Melalui reaksi ini akan terbentuk juga hidroksi-asetaldehid. Reaksi perengkahan selulosa tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.11



**Gambar 2. 11** Mekanisme reaksi detail perengkahan selulosa (Manuel Garcia-Perez, 2008)

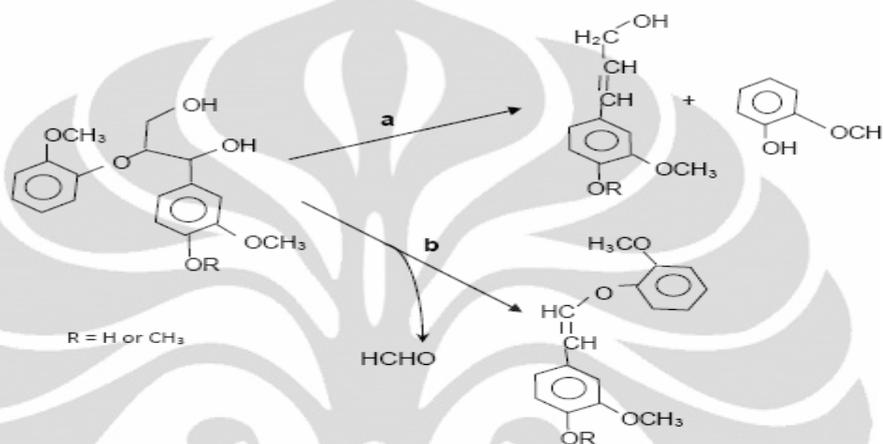
### 2.5.2 Mekanisme Reaksi Pirolisis Hemiselulosa

Hemiselulosa merupakan senyawa polisakarida kompleks yang berikatan dengan selulosa pada dinding sel. Hemiselulosa pada umumnya terdiri dari 50-200 unit monomer dan beberapa residu glukosa sederhana. Komponen utama dari hemiselulosa adalah *xylan* dalam bentuk struktur kimia 4-metil-3-asetil-glukoronoxylan. Persentase xilan terdapat pada *softwoods* dan *hardwoods* diatas 10% dan 30% dalam keadaan kayu kering. Pada hemiselulosa, *xylan* merupakan senyawa yang paling tidak stabil karena mudah sekali mengalami reaksi hidrolisis dan dehidrasi. Hemiselulosa akan mulai terdegradasi pada reaksi tersebut pada temperatur sekitar 250°C.

Degradasi dari *xylan* akan menghasilkan delapan senyawa produk, yaitu air, metanol, asam formiat, asam asetat, asam propianat, hidroksi-1-propanon, hidroksi-1-butanon, dan 2-furfuraldehid. Pada proses pirolisis biomasa, air akan terbentuk dari dehidrasi, asam asetat terbentuk dari eliminasi pada gugus asetil, furfural terbentuk dari dehidrasi unit xilose, asam formiat terbentuk dari gugus karboksil asam uronic, dan metanol terbentuk dari gugus metoksil asam uronic.

### 2.5.3 Mekanisme Reaksi Pirolisis Lignin

Pada umumnya, mekanisme degradasi pada lignin terjadi dalam bentuk reaksi dehidrasi (pada temperatur sekitar 250°C), depolimerisasi, dan kondensasi/karbonisasi. Degradasi termal pada lignin ini akan menghasilkan senyawa monomeric fenol, asam formiat, formaldehid, metanol, karbondioksida, dan air. Reaksi depolimerisasi lignin dapat dilihat di Gambar 2.12



Gambar 2. 12 Reaksi degradasi lignin(Manuel Garcia-Perez, 2008)

Pada reaksi (a) terjadi degradasi ikatan C-O menjadi senyawa alkohol atau guaiacol. Sementara itu pada reaksi (b) terjadi eliminasi ikatan karbon menjadi fenol eter. Kehadiran lignin pada suatu pirolisis biomasa akan mengarah untuk menghasilkan produk arang.

Setelah mengalami proses pirolisis maka akan terbentuk fasa cair dengan mengalami proses kondensasi pada sistem kondensernya. Produk berupa cair ini terdiri dari air dengan campuran asetaldehid, propion aldehyd, butiraldehyd, acrolein, crotonaldehyd, furan, aseton, butanedion, dan metanol.

## 2.6 Biooil

*Biooil* merupakan produk utama yang diinginkan pada proses *fast pyrolysis*. *Biooil* tersusun atas campuran uap organik seperti asam, alkohol, aldehyd, eter, ester, keton, furan, fenol, asetaldehyd, butanedion, metanol, dan hidrokarbon. *Biooil* berwarna gelap dengan penampilan yang mirip seperti kopi dan beraroma asap (Ensyn Group INC, 2001). Untuk penyusun kimia dan properti fisika dan kimia dari *biooil* dapat dilihat pada Tabel 2.9 berikut

**Tabel 2. 9** Karakteristik *Biooil* (Aston University, 2009)

<b>Penampilan/rupa</b>	<i>Biooil</i> biasanya cairan biru tua. Berdasarkan bahan baku dan tipe <i>fast pyrolysis</i> yang dipakai, warna yang ditampilkan bisa menjadi hitam sampai coklat kemerah-merahan atau hijau tua.
<b>Bau</b>	Cairan memiliki bau khusus, berbau asap tajam yang dapat mengiritasi mata jika terbuka terhadap udara luar untuk waktu yang lama
<b>Kandungan air</b>	Cairan mengandung kandungan air yang berbeda, yang berbentuk campuran fasa tunggal yang stabil. Biasanya kandungannya sebesar 15-30% berat, tergantung dari cara memproduksi cairan.
<b>Densitas</b>	Densitas dari cairan sangat tinggi yaitu 1,2 kg/L dibandingkan dengan bahan bakar cair ringan yang sekitar 0,85 kg/L
<b>Viskositas</b>	Viskositas dari <i>biooil</i> bervariasi dari yang terendah yaitu 40 cp hingga yang tertinggi, 100 cp. Viskositas berguna pada beberapa aplikasi bahan bakar.
<b>Pengaruh waktu</b>	Perubahan waktu menyebabkan meningkatnya viskositas, menurunnya volatilitas, dan deposisi serta fasa separasi getah dapat terjadi.

Cairan *biooil* terbentuk dari pendinginan yang cepat produk intermediet dari degradasi cepat selulosa, hemiselulosa, dan lignin. *Biooil* ini berguna sebagai bahan bakar atau bahan kimia dalam industri kimia. Dalam penelitian ini, *biooil* yang dihasilkan akan dibandingkan dengan karakteristik dari minyak diesel. Untuk karakteristik minyak diesel dapat dilihat pada Tabel 2.10 berikut.

**Tabel 2. 10** Karakteristik minyak diesel

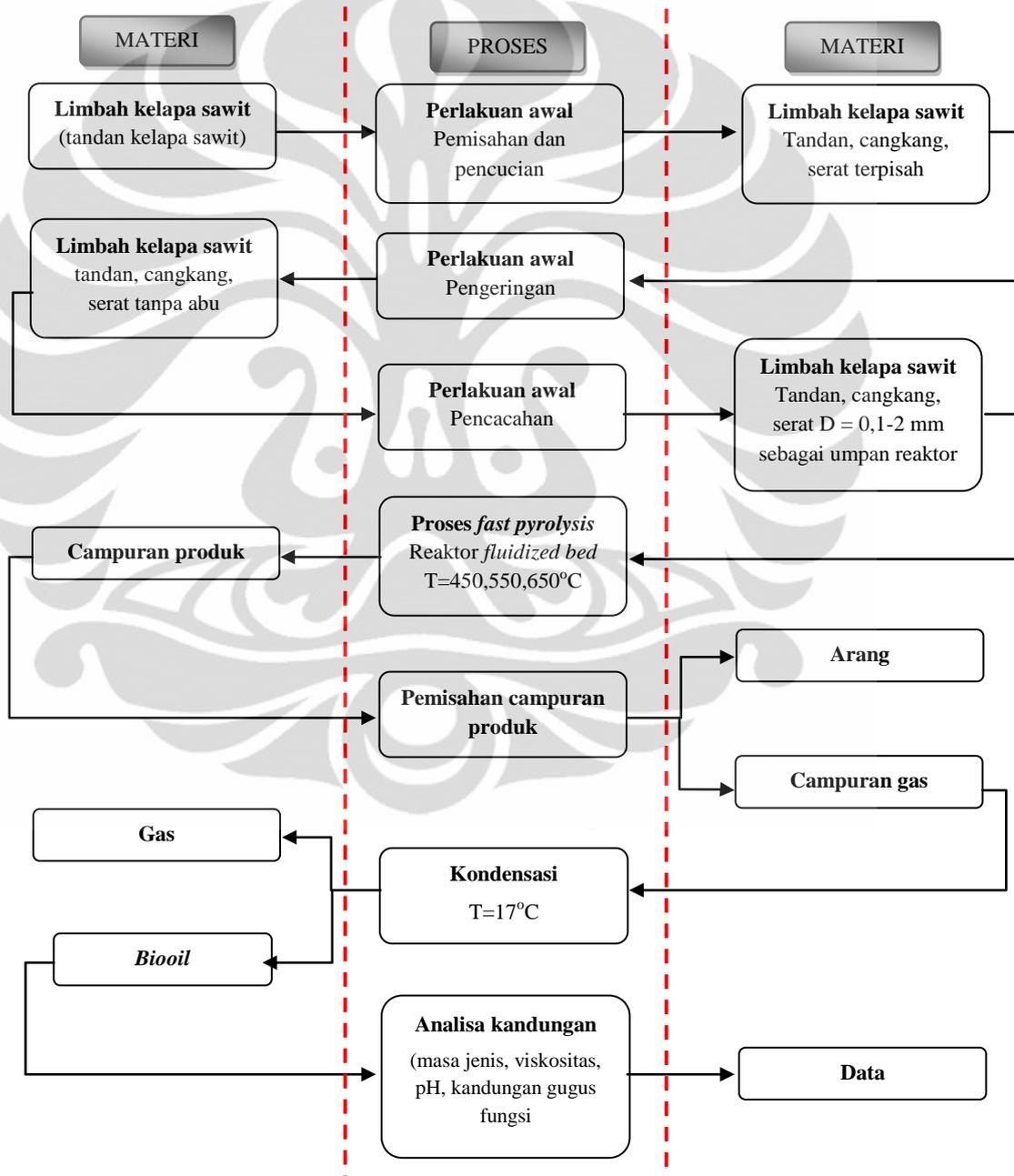
<b>Karakteristik</b>	<b>Diesel</b>
Nilai kalor	42,3 mJ/kg
Viskositas	4 cst
Kandungan abu	< 0,01 % berat
Ph	5
Densitas	0,85 g/mL
Kandungan sulfur	0,15-0,5 % berat

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan dari produksi *biooil* dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

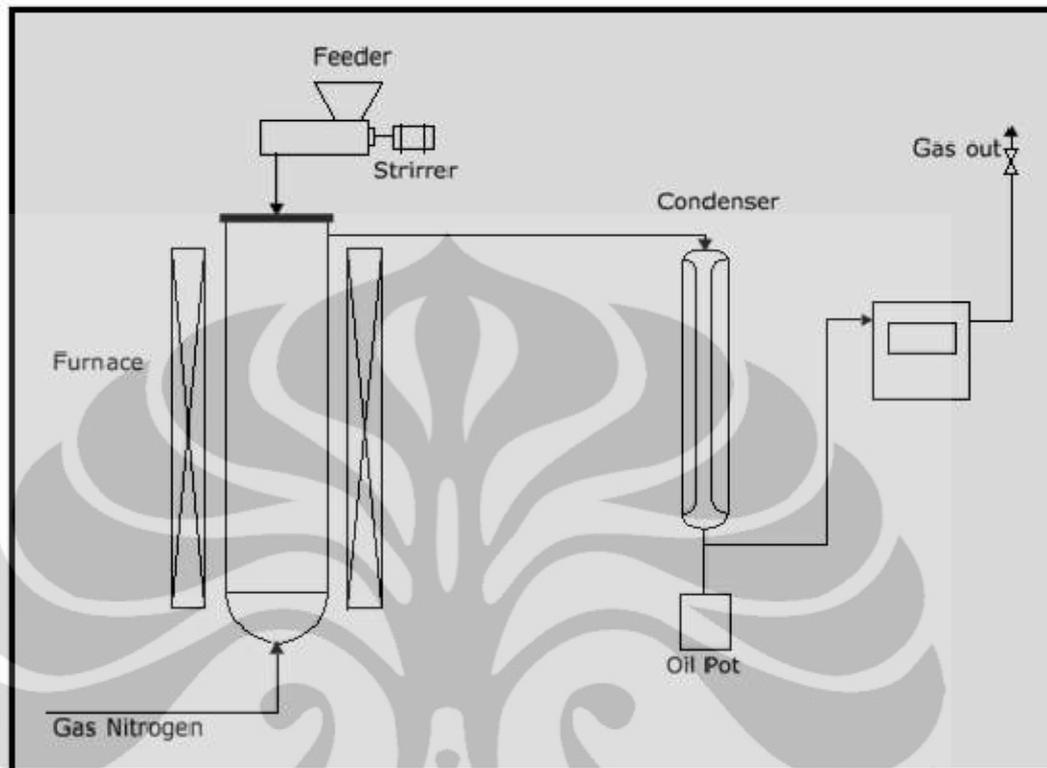
Berdasarkan diagram alir Gambar 3.1 di atas, penelitian akan dibagi dalam beberapa tahap, dimana tahap pra-penelitian adalah melakukan studi literatur mengenai hal-hal yang berhubungan dengan proses konversi biomasa kelapa sawit dengan metode *fast pyrolysis*. Kemudian akan dilakukan tahap inti penelitian yang terdiri dari perlakuan awal, proses *fast pyrolysis*, dan analisis produk. Tahap perlakuan awal terdiri dari pencacahan untuk mendapatkan diameter partikel 0,1-2 mm, perendaman untuk menghilangkan kandungan abu, dan pengeringan umpan. Tahap *fast pyrolysis* terdiri dari proses pirolisis di dalam reaktor, pemisahan arang melalui *cyclone*, kondensasi uap, dan pengumpulan produk *biooil*. Setelah itu akan dilakukan analisis dan evaluasi hasil penelitian dan terakhir dibuat kesimpulan.

### **3.2 Variabel Penelitian**

Variabel yang digunakan dalam percobaan ini terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis umpan. Umpan yang digunakan untuk menghasilkan *biooil* berupa bagian dari kelapa sawit antara lain : batang, daun, tandan kosong, pelepah, dan cangkang kelapa sawit yang dilakukan proses *fast-pyrolysis* pada temperatur 450, 550, dan 650°C.

Adapun parameter yang ingin diketahui pada berbagai kondisi operasi atau sebagai variabel terikat pada penelitian ini adalah berat jenis, viskositas, pH, dan kandungan gugus fungsi

### 3.3 Skema Peralatan



Gambar 3. 2 Skema peralatan proses *fast pyrolysis*

Unit operasi *fast pyrolysis* ini bekerja pada tekanan atmosferik. Umpan dimasukkan ke dalam reaktor *fluidized fixed bed* yang dipanaskan dan dialiri oleh gas inert  $N_2$ . Kemudian uap hasil *fast pyrolysis* dikondensasi. Produk cairnya ditampung di *oil pot* dan dianalisis.

### 3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang akan digunakan pada proses *fast pyrolysis* kelapa sawit adalah:

- |                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| 1. Tempat umpan ( <i>feeder</i> ) | 8. <i>Flow meter</i> 1,5 L/m |
| 2. Pipa logam                     | 9. Selang silikon            |
| 3. Oil pot                        | 10. Ember                    |
| 4. Motor pengaduk umpan           | 11. Statip                   |
| 5. <i>Tube furnace</i>            | 12. Termokopel               |
| 6. Reaktor stainless ss-304       | 13. Water bath               |
| 7. Kondenser                      |                              |

Untuk bahan yang digunakan adalah:

1. Serbuk kelapa sawit (cangkang, serat, tanda) dengan diameter 0,1 - 2 mm
2. Gas N<sub>2</sub>
3. Air
4. Pasir zircon silika

### 3.5 Prosedur Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian, maka rincian kegiatan penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 3.5.1 Persiapan Awal Biomasa

Proses persiapan awal biomasa terdiri dari pencacahan (pemotongan kecil-kecil) biomasa, perendaman, dan pengeringan.

##### a. Pencucian

Pencucian dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi kadar abu dan kotoran yang terdapat pada limbah kelapa sawit. Dengan mengurangi kadar abu tersebut maka kita dapat menghilangkan pengotor yang akan mengganggu proses *fast pyrolysis*. Pencucian dilakukan dengan menaruh umpan dibawah air keran yang mengalir dan menyikat kotoran yang terlihat

##### b. Pengeringan

Hasil perendaman tersebut kembali dikeringkan dengan tujuan untuk menghilangkan kadar air yang terdapat pada umpan limbah kelapa sawit.

##### c. Pencacahan

Kelapa sawit yang diperoleh akan dipotong-potong menjadi bagian kecil dengan panjang rata-rata  $\pm$  5-8 cm. Limbah kelapa sawit ini kemudian dijemur di bawah sinar matahari selama  $\pm$  5-6 jam yang dilakukan selama 3 hari lamanya. Proses pemanasan awal ini dilakukan untuk menghilangkan kandungan air dari bahan. Jika secara fisik sudah terasa kering, maka langkah pencacahan sudah dapat dilakukan.

Pencacahan kelapa sawit sampai ke bagian yang terkecil menggunakan pisau dan *crusher*. Penggunaan pisau dilakukan untuk mengecilkan limbah kelapa

sawit hingga sampai ukuran  $\pm 1-2$  cm, sedangkan *crusher* digunakan untuk memperoleh partikel dengan ukuran 0,1-2 mm.

### 3.5.2 Proses Persiapan *Fast Pyrolysis*

Sebelum pelaksanaan penelitian, ada beberapa hal yang harus dilakukan yaitu mengkalibrasi pengatur laju alir gas N<sub>2</sub> (*flowmeter*) dan mengukur laju minimum *fluidized* reaktor.

#### 1. Kalibrasi *Flowmeter*

Tujuan dari kalibrasi *flowmeter* ini adalah untuk menghitung berapa banyak gas yang keluar dalam tiap waktunya pada tiap skala *rotameter*. *Rotameter* adalah alat pemutar pada *flowmeter* yang ditunjukkan pada skala dimulai dari 0-150 L/m oleh bandul pemberat yang terdapat didalamnya. Jika angka pada bandul pemberat berada pada angka 20, menunjukkan bahwa skala *rotameter* adalah 20 dan bukan menunjukkan laju alir gas sebesar 20 mL/menit.

Pada peralatan ini terdapat tiga *flowmeter* yang pengaturannya diatur oleh tiga *rotameter* yang berbeda. Untuk penelitian ini yang dipakai hanya dua *flowmeter* saja, yaitu *flowmeter* di sebelah kiri (*flowmeter 1*) dan *flowmeter* di sebelah kanan (*flowmeter 2*).

*Flowmeter 1* mengalirkan gas N<sub>2</sub> dari tangki menuju bagian *feeder*. Gas di bagian ini juga berfungsi untuk mendorong umpan biomasa yang masuk ke dalam reaktor melalui pipa reaktor. Dalam aplikasinya, *flowmeter* ini dapat digantikan oleh *electric motor (stirrer)*. Pada *flowmeter 2* mengalirkan gas N<sub>2</sub> dari tangki menuju ke bagian bawah reaktor. Gas ini bertujuan untuk mem-*fluidized* pasir yang berada dalam reaktor. Keberadaan pasir ini bertujuan agar panas di dalam reaktor tersebut tersebar merata. Cara mengkalibrasinya adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan semua peralatan kalibrasi dimulai dari tabung gas N<sub>2</sub>, *flowmeter*, *rotameter*, *bubble soap column*, dan *stopwatch*.
- b. Membuka tabung gas N<sub>2</sub> hingga mencapai tekanan 8 bar.
- c. Membuka valve pada *f<sub>1</sub>* yang berskala 0-150. Masing-masing nilai skala, kita kalibrasi agar mendapat berapa jumlah laju alir gas N<sub>2</sub> tiap waktunya.
- d. Jika sudah ada gas N<sub>2</sub> yang mengalir, maka selanjutnya menghitung laju alir buih sabun yang mengalir pada *bubble soap column*.

e. Mencatat waktu yang didapat untuk tiap skala *bubble soap*.

Jika pada tiap skala *flowmeter* sudah didapatkan nilai laju alir gas N<sub>2</sub> yang mengalir tiap waktunya, maka untuk selanjutnya kita dapat melakukan proses *fast pyrolysis*.

2. Mengukur laju alir gas N<sub>2</sub> minimum untuk mem-*fluidized* pasir di dalam reaktor.

Di dalam reaktor terdapat pasir yang digunakan untuk menyebarkan panas secara merata di dalam reaktor. Pengukuran laju alir gas N<sub>2</sub> minimum bertujuan untuk mengetahui berapa laju alir gas N<sub>2</sub> yang didapat untuk menggerakkan/menyebarkan pasir sedikit saja di dalam reaktor. Dengan mengetahui laju minimum ini, maka ketika dilakukan percobaan kita harus menset laju alir gas N<sub>2</sub> diatas nilai minimum yang sudah ditentukan. Jika tidak, maka proses penyebaran panas di dalam reaktor tidak akan merata dikarenakan pasir tidak bergerak (*bubbling*).

### 3.5.3 Pembuatan *Biooil*

Pembuatan *biooil* dilakukan dengan cara *fast pyrolysis* pada biomasa limbah kelapa sawit yang sudah berukuran 0,1-2 mm. Umpan biomasa dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 2-3 g/menit dengan dibantu dorongan gas N<sub>2</sub>. Proses di dalam reaktor ini akan berlangsung cepat. Diharapkan dengan waktu tinggal yang cepat ini akan mendapatkan produk cair yang lebih banyak.

Sebelum dilakukan proses *Fast Pyrolysis*, kami akan mencoba melakukan pirolisis secara konvensional, yaitu dengan cara memasukkan langsung umpan biomasa ke dalam reaktor yang kemudian dibakar. Proses ini caranya sama dengan proses pembuatan arang.

Tujuan dilakukannya proses ini adalah untuk memastikan apakah reaktor sudah bisa digunakan dan layak untuk proses *fast pyrolysis*. Apabila pembakaran ini menghasilkan produk cair walaupun tidak terlalu banyak, maka peralatan diindikasikan sudah dapat dipakai untuk proses *fast pyrolysis*. Proses pembuatan *biooil* mempunyai tahapan sebagai berikut:

a. Persiapan bahan

1. Menyiapkan bahan-bahan yang akan digunakan sebelum reaktor dinyalakan, yaitu berupa biomasa dari bagian-bagian kelapa sawit (tandan, cangkang, daun, batang, pelepah). Umpan biomasa ini dimasukkan ke dalam *feeder* bagian atas.
2. Menyiapkan bahan pendingin. Pada penelitian ini digunakan oil bath fischer sehingga suhu air pendingin dapat diset sesuai dengan kebutuhan. Selanjutnya pompa air dinyalakan untuk mengalirkan air dingin yang mengalir dari ember ke pendingin spiral.
3. Menyiapkan gas N<sub>2</sub> sebagai *gas carrier* ketika proses berlangsung.
4. Memasukkan pasir ke dalam reaktor dengan tinggi sekitar 8 cm.

b. Reaksi *Fast Pyrolysis*

1. Jika semua bahan dan persiapan proses sudah siap, selanjutnya mulai menyetel temperatur yang diinginkan pada kontrol temperatur yang berada di panel.
2. Membuka kecil valve *flowmeter* dengan tujuan penyebaran panas di dalam reaktor dapat merata.
3. Jika temperatur dari reaktor sudah sama dengan temperatur setelan, maka laju alir gas N<sub>2</sub> diperbesar sesuai dengan setelan yang kita buat.
4. Memasukkan umpan dari *feeder* yang dibantu dengan menggunakan pengaduk berputar yang dibantu oleh motor penggerak.
5. Membiarkan proses *fast pyrolysis* berlangsung sampai umpan di *feeder* habis. Proses ini dapat terjadi pada rentang waktu ½ -1 jam, tergantung dari kondisi umpan biomasa saat dimasukkan ke dalam reaktor.
6. Umpan yang dimasukkan ke dalam reaktor diputar dengan menggunakan motor penggerak dengan laju 0,2 gram/menit.
7. Hasil dari proses ini akan menghasilkan arang yang langsung dipisahkan dari produk lain berupa *biooil*.

### 3.5.4 Kondensasi Uap

Kondensasi uap adalah proses pendinginan uap hasil proses *fast pyrolysis* yang berupa *biooil*. Proses pendinginan ini akan dilakukan dengan dua kali proses

pendinginan. Pendinginan pertama adalah dengan *dry ice* yang berada pada pendingin kotak dan yang kedua adalah air dingin yang berada pada pendingin spiral. Tujuan dari dua kali pendinginan ini adalah untuk mendapatkan banyak produk yang terkondensasi.

### 3.6 Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Produk cair yang didapat selanjutnya akan dianalisis karakteristik fisika dan kimianya. Karakteristik yang diuji yaitu berupa berat jenis, viskositas, pH, kandungan sulfur, nilai kalor HHV, kandungan gugus fungsi, dan kandungan unsur dasar C, H, O, dan N.

#### ▪ Berat Jenis

Metode yang digunakan: ASTM D-3505

Cara kerja:

- a. Menimbang piknometer kosong, beratnya  $W_0$ .
- b. Mengisi piknometer dengan sampel, beratnya  $W$ .
- c. Volume piknometer =  $V$
- d. Berat jenis sampel dapat ditentukan dengan rumus =  $\frac{W-W_0}{V}$

#### ▪ Viskositas

Metode yang digunakan: ASTM D-446

Peralatan:

- *Batch viscosity*                      - Termometer
- *Viskometer tube*                      - Stopwatch

Cara kerja:

- a. Memilih viskometer tube yang tepat dan bersih, lalu dikeringkan
- b. Mengisi viskometer tube dengan sampel
- c. Memasukkan tube ke dalam batch pemanas pada suhu 40°C
- d. Menghisap sampel sampai ke garis batas, kemudian dilonggarkan penghisapnya agar permukaan cairan turun.
- e. Menghitung waktu alir dari batas awal sampai batas akhir dengan menggunakan stopwatch.
- f. Perhitungan viskositas:  $cSt = C \times t$

Dimana:       $C$  = faktor viskometer                       $t$  = waktu alir sampel (detik)

- **pH**

Metode yang digunakan: pH meter

Cara kerja:

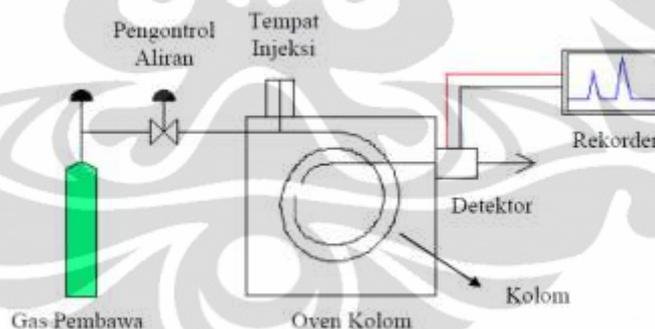
- a. menyiapkan sampel secukupnya  $\pm$  10-15 mL
- b. mencelupkan ujung elektroda pH meter ke dalam sampel
- c. mencatat angka yang tertera pada pH meter

- **Kandungan gugus fungsi dan komposisi**

Metode yang digunakan: GC-MS

Cara kerja:

- a. Menyalakan alat GC-MS dan perangkat komputer berikut softwarenya
- b. Menginjeksikan sampel pada suhu tertentu
- c. Zat terlarut akan teradsorpsi kemudian akan merambat dengan laju rambatan masing-masing komponen
- d. Detektor mencatat sederetan sinyal yang timbul akibat perubahan konsentrasi dan perbedaan laju elusi
- e. Melihat hasil pada detector



**Gambar 3. 3** Skema kromatografi gas

### 3.7 Cara Penafsiran dan Penyimpulan Hasil Penelitian

Setelah dilakukannya pengujian terhadap karakteristik dari *biooil* yang didapatkan, maka akan dapat kita simpulkan apakah produk *biooil* tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil atau untuk dijadikan bahan baku industri petrokimia. Hal ini dilakukan dengan cara membandingkan karakteristik dari minyak diesel dan mengetahui kandungan gugus kimia di dalam *biooil*.

## BAB 4

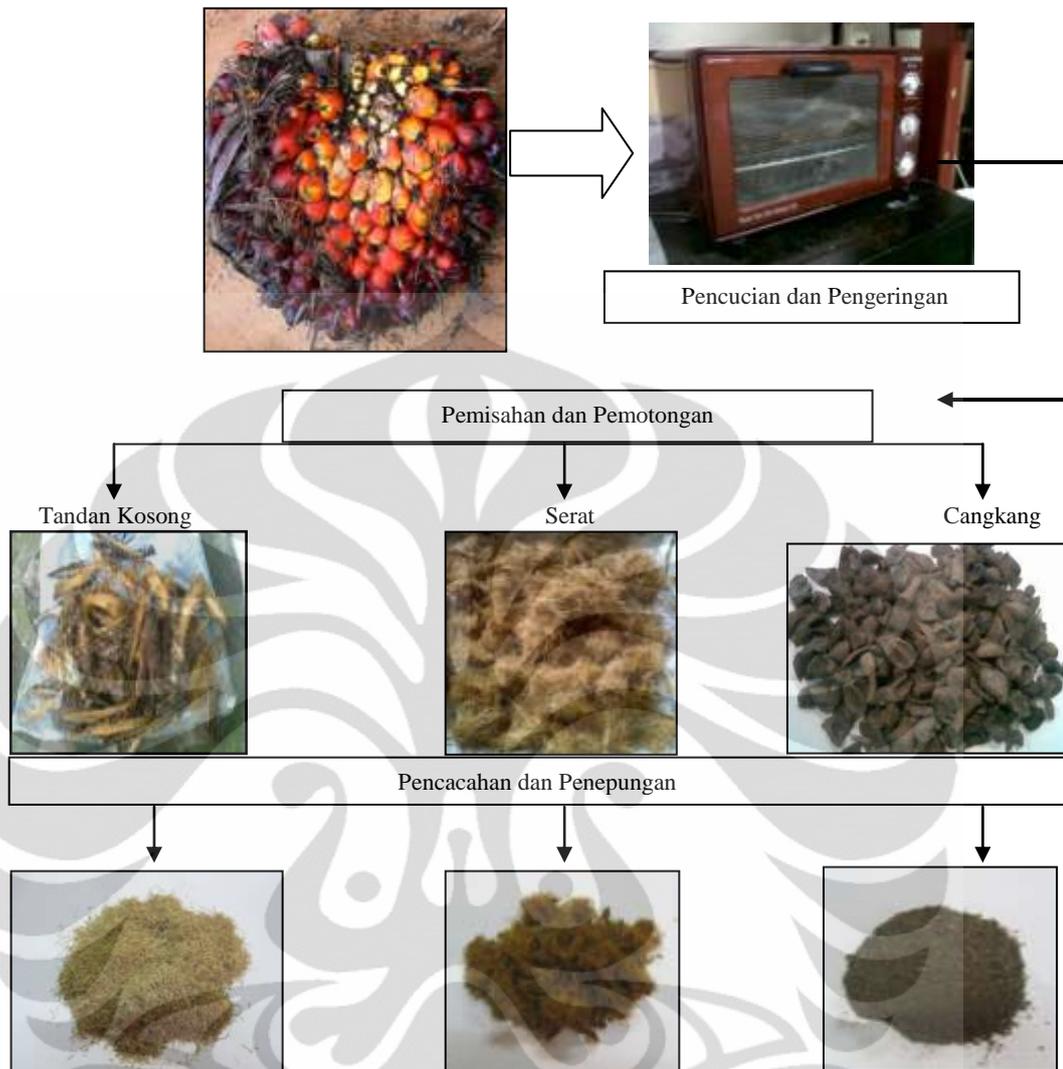
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Analisis Umpan *Fast Pyrolysis*

Dalam bab ini dipaparkan tentang hasil penelitian pirolisis dan pembahasan berupa analisis produk cair yang didapatkan. Selain itu, juga dipaparkan pembahasan dan hasil analisis terhadap variabel operasi yang dilakukan, yaitu berupa variasi suhu dan variasi jenis bagian kelapa sawit.

Umpan pirolisis yang digunakan pada penelitian kali ini adalah berupa tiga bagian dari kelapa sawit, yaitu cangkang, tandan, dan serat. Kelapa sawit tersebut didapatkan dari beberapa perkebunan kelapa sawit yang terletak di PTPN V Pekanbaru, Riau. Umpan kelapa sawit tersebut diberikan beberapa perlakuan, yaitu pencucian, pemisahan, pengeringan, dan pencacahan. Pencacahan menjadi perlakuan yang penting karena ukuran biomasa yang benar merupakan salah satu kunci yang menjamin pembakaran yang efisien. Ukuran biomasa yang tepat, sesuai dengan sistem pembakaran yang digunakan, dapat membantu pembakaran, mengurangi kehilangan abu, dan efisiensi pembakaran yang lebih baik.

Ukuran biomasa diperkecil dengan penggilingan/*milling* dan penghancuran/*crushing*. Visual perlakuan awal penelitian terhadap umpan tandan kosong kelapa sawit tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini:



**Gambar 4. 1** Perlakuan awal umpan kelapa sawit

Perlakuan awal yang dilakukan berdasarkan gambar tersebut adalah:

- (1) Pencucian umpan untuk menghilangkan kotoran tanah yang terbawa selama proses pengiriman dan agar memudahkan dalam pemisahan bagian kelapa sawit (tandan, cangkang, dan serat)
- (2) Pemisahan. Buah kelapa sawit yang masih menempel dengan tandan dipisahkan sehingga akan didapat tandan kosong dan buah utuh
- (3) Buah kelapa sawit di rebus dengan presto agar memudahkan dalam pemisahan serat dan cangkang.
- (4) Umpan yang masuk dengan kondisi sangat basah dikeringkan dengan matahari dan kipas. Setelah sudah tidak begitu basah, pengeringan kedua dilakukan dengan menggunakan oven pada suhu 100 °C. Ketika

terjadi pemanasan dengan suhu tinggi, air dalam bentuk *moisture* di permukaan bahan akan menguap, sedangkan yang berada di dalam akan mengalir keluar melalui pori-pori partikel dan akan menguap juga. Dengan demikian akan terjadi pengurangan kadar air dalam umpan.

- (5) Pencacahan pertama. Penggilingan dan penghancuran dari biomasa dilakukan di BBP MEKTAN. Bahan baku berupa cangkang, serat, dan tandan yang sudah dikeringkan dimasukkan ke alat penghancur (*roll crusher*) hingga didapati biomasa dengan ukuran yang lebih kecil (antara 4 s/d 6 mm)
- (6) Pencacahan kedua dilakukan dengan alat penepung. Umpan dimasukkan ke alat penepung agar diameter partikel biomasa mencapai 0,1-2 mm.

## **4.2 Hasil Analisis Pengaruh Variabel Penelitian terhadap Produk Pirolisis**

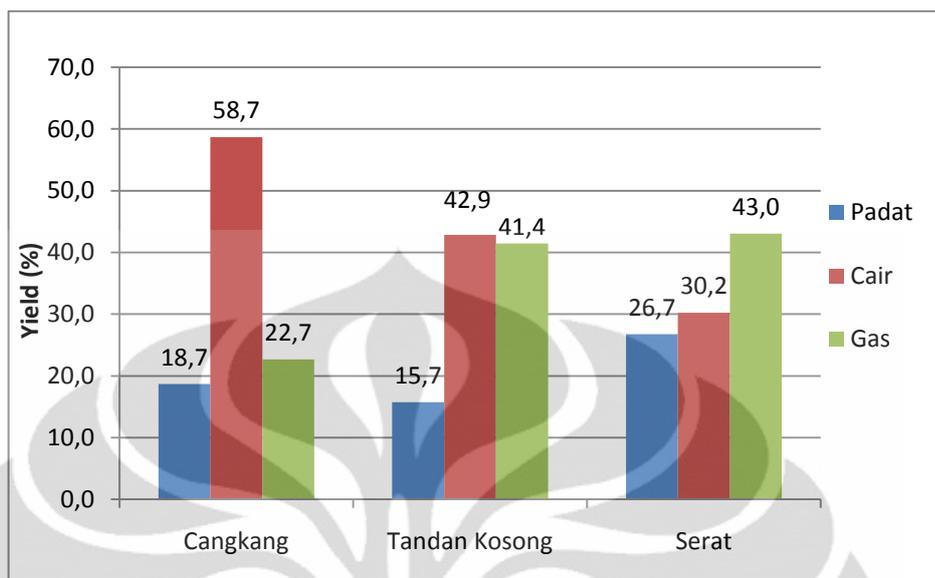
Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua variabel, yaitu variasi suhu dan variasi jenis bagian kelapa sawit berupa cangkang, tandan, dan serat. Hasil penelitian dan analisis terhadap hasil tersebut akan dijelaskan dalam penjelasan sebagai berikut.

### **4.2.1 Hasil Analisis Pengaruh Jenis Kelapa Sawit terhadap Produk Pirolisis**

Variabel jenis kelapa sawit yang digunakan adalah bagian tandan kosong, cangkang, dan serat. Proses *fast pyrolysis* ini menggunakan variabel terikat yaitu suhu. Variasi ini dibantu dengan kondisi operasi pada kondenser dengan suhu konstan 17 °C dan ukuran partikel 0,1-2 mm. Pada suhu yang ditetapkan tersebut, maka akan didapatkan produk cair dari jenis kelapa sawit dengan jumlah dan persentase yang berbeda. Jadi, dengan besar suhu yang ditentukan maka akan didapat hasil terbesar (optimum) *biooil* dari satu variabel jenis kelapa sawit.

Berikut ini adalah grafik tiap suhu yang ditetapkan dengan variasi umpan kelapa sawit dan pengaruhnya terhadap produk (gas, cair, padat) pirolisis :

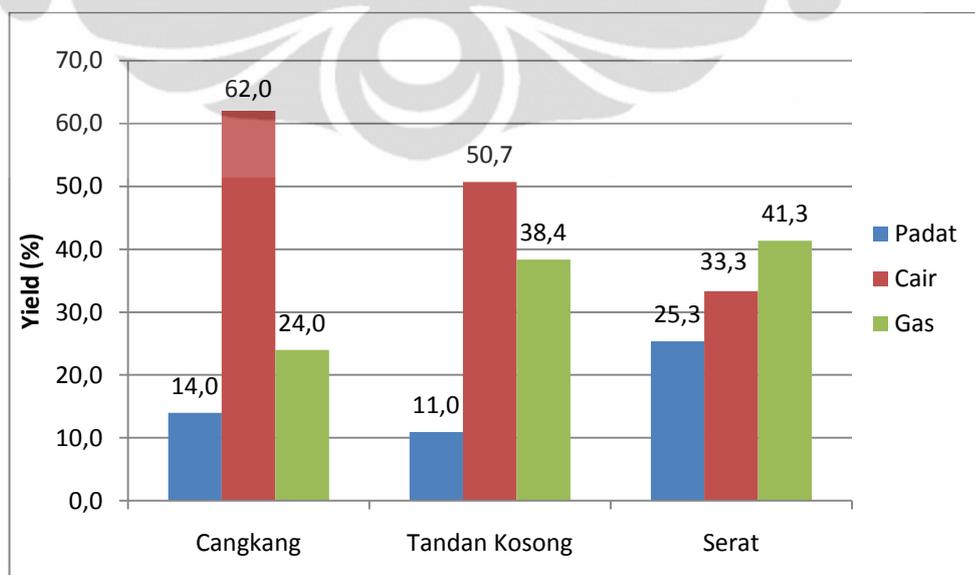
### a. Suhu Operasi 450°C



**Gambar 4. 2** Pengaruh variasi umpa terhadap persentase produk pirolisis pada suhu 450°C

Pada suhu operasi 450°C dapat dilihat bahwa umpa cangkang yang paling banyak menghasilkan *biooil* dengan *yield* sebesar 58,75%. Sementara serat dan tandan kosong memiliki *yield* masing-masing sebesar 42,9 dan 30,2%. Pada suhu ini *yield* terbesar yang dimiliki tandan masih berupa gas dengan *yield* abu yang cukup kecil. Dengan jumlah gas yang tidak terlalu besar menandakan bahwa proses *fast pyrolysis* sudah terjadi.

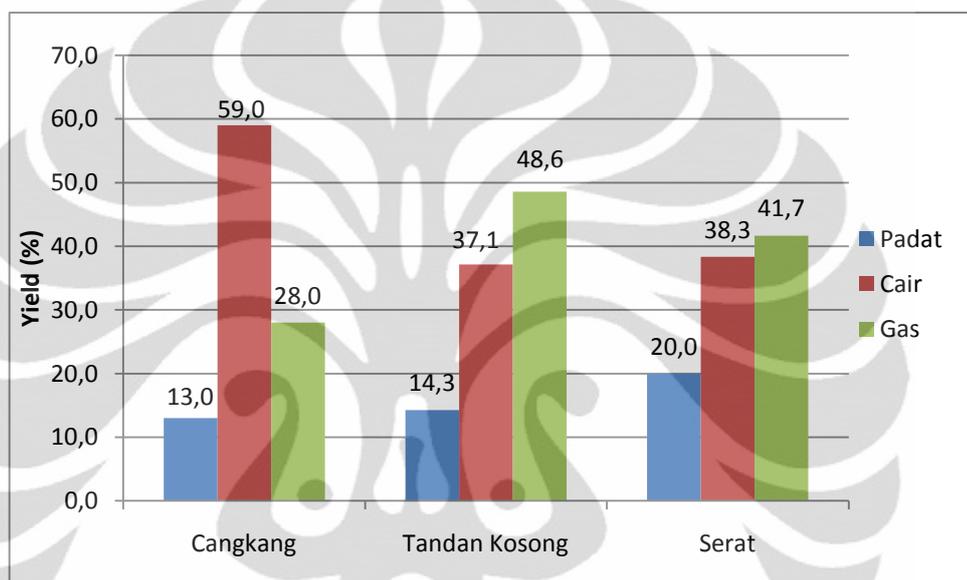
### b. Suhu Operasi 550°C



**Gambar 4. 3** Pengaruh variasi umpa terhadap persentase produk pirolisis pada suhu 550°C

Pada suhu operasi 550°C, cangkang masih memiliki *yield biooil* yang paling besar jika dibandingkan dengan dua umpan lainnya yakni *biooil* sebesar 62%. Sedangkan tandan memiliki jumlah *yield biooil* sebesar 50,7% dan serat sebesar 33,3%. Pada suhu ini serat memiliki jumlah *yield gas* lebih besar dari *yield biooil* (yakni 41,3%). Maka pada umpan serat, suhu 550°C bukan merupakan suhu optimum untuk proses *fast pyrolysis*.

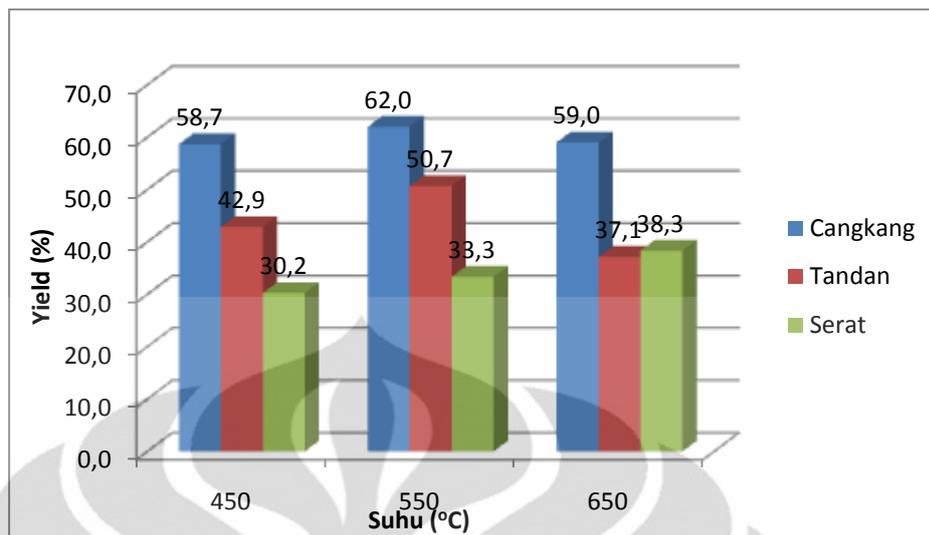
### c. Suhu Operasi 650°C



**Gambar 4. 4** Pengaruh variasi umpan terhadap persentase produk pirolisis pada suhu 650°C

Pada suhu operasi 650°C, *yield biooil* terbesar berasal dari umpan cangkang yaitu 59%. Sedangkan tandan memiliki *yield gas* yang lebih besar dari *yield biooil* (*yield biooil* tandan 37,1%). Sehingga pada tandan kosong, suhu 650°C sudah merupakan proses gasifikasi. Begitu pula yang terjadi pada serat. Sementara itu, cangkang masih merupakan umpan yang paling berpotensi dalam menghasilkan *biooil*.

Dari ketiga grafik di atas (Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4), maka dapat disimpulkan hasilnya dalam grafik pada Gambar 4.5 dibawah ini:

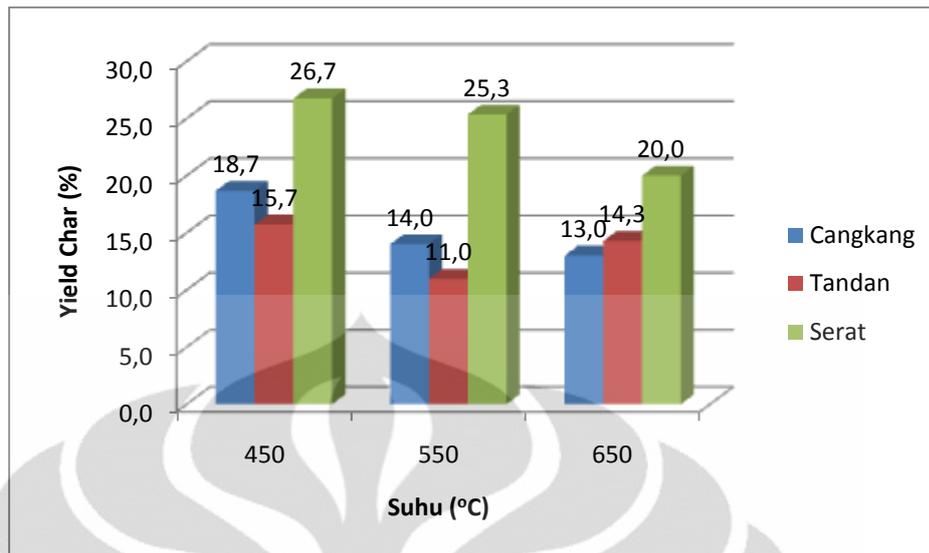


**Gambar 4. 5** Pengaruh suhu terhadap persentase produk cair pirolisis.

Dari ketiga jenis umpan yang digunakan (cangkang, tandan, dan serat), cangkang kelapa sawit merupakan umpan yang paling baik untuk menghasilkan yield *biooil* yang paling besar pada semua suhu operasi yang diujikan (450°C, 550°C, 650°C). Hal ini disebabkan karena kandungan biopolimer yang dimiliki cangkang (jumlah selulosa, hemiselulosa, dan lignin) paling besar diantara kedua umpan lainnya yakni sebesar 94,2%. Sedangkan jumlah biopolimer pada tandan sebesar 90% dan serat sebesar 80% (ditunjukkan pada Tabel 2.4). Sesuai dengan hasil *biooil* yang didapat, urutan *biooil* terbanyak adalah cangkang, tandan, dan serat. Semakin banyak kandungan biopolimer yang dimiliki biomasa, maka akan semakin banyak jumlah perengkahan yang dihasilkannya.

Jumlah kandungan karbon yang dimiliki umpan cangkang kelapa sawit lebih besar dibanding kedua umpan lainnya (ditunjukkan pada Tabel 2.6) yakni sebesar 53,8%. Banyaknya atom karbon yang dimiliki umpan memperbesar jumlah *biooil* yang dihasilkan. Sumber panas dari furnace akan dengan mudah membakar karbon yang dikandung umpan dan menghasilkan asap pembakaran dengan jumlah banyak sehingga hasil kondensasi *biooil* akan lebih besar.

Jumlah *char* dari ketiga umpan juga ditimbang setelah dilakukannya proses pirolisis. Hasil *char* dari ketiga umpan tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.6 dibawah ini



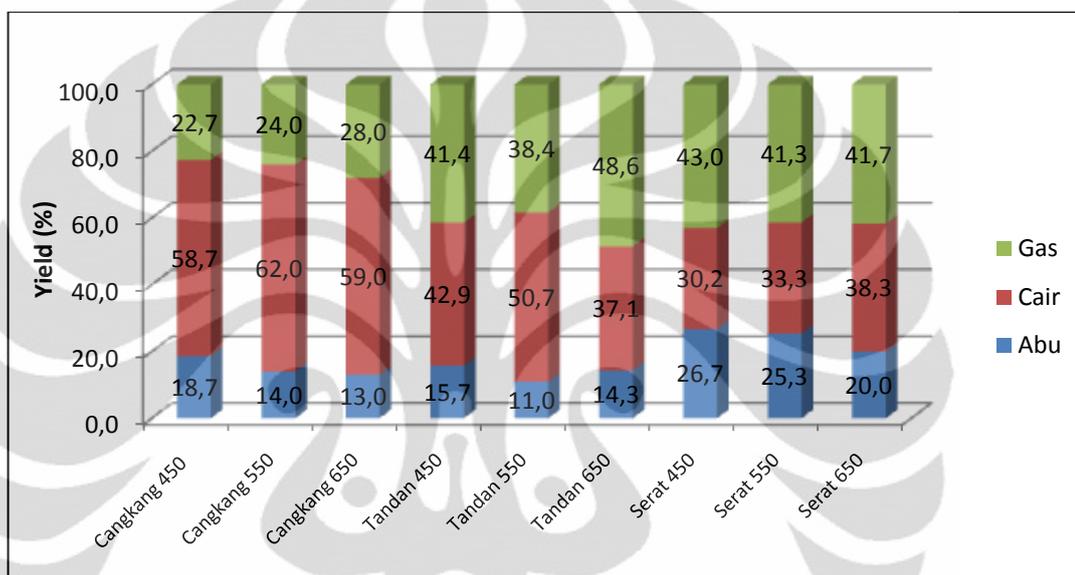
Gambar 4. 6 Pengaruh suhu terhadap jumlah *char*

Jumlah *char* yang dihasilkan pada proses *fast pyrolysis* dipengaruhi oleh jumlah kandungan abu yang berada dalam umpan. Berdasarkan jumlah abu (dilihat pada tabel 2.5) serat merupakan umpan yang paling besar mengandung abu, yakni 5,3%. Sedangkan cangkang dan tandan memiliki kandungan abu sebesar 3% dan 2,2%. Hal ini terbukti dalam Gambar 4.6 di atas bahwa dalam proses *fast pyrolysis*, kandungan *char* yang dihasilkan serat paling besar disusul oleh cangkang dan tandan.

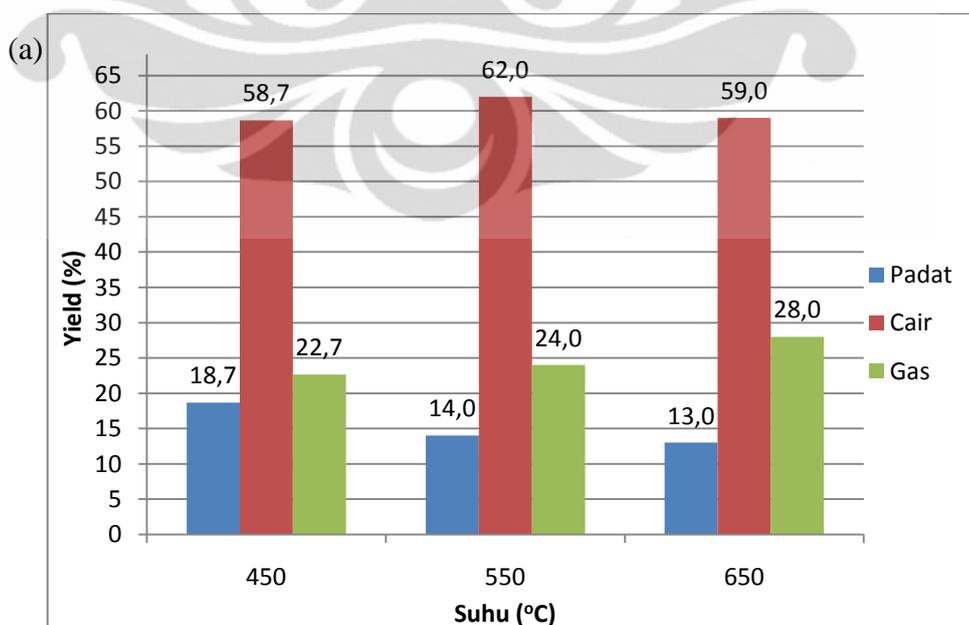
Pirolisis biomasa umumnya berlangsung melalui serangkaian jalur reaksi kompleks. Pada tingkat pemanasan yang rendah ( $<100^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ ), bahan biomasa terurai melalui tahap evolusi kelembaban, dekomposisi hemiselulosa, dan dekomposisi selulosa (Raveendran et.al., 1996). Sedangkan peningkatan jumlah *yield* minyak pada suhu 350 sampai  $500^{\circ}\text{C}$  diikuti dengan peningkatan produksi lignin yang berasal dari oligomers tak larut dalam air namun larut dalam  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ . Pada tingkat pemanasan pirolisis cepat ( $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) saat suhu mencapai  $300^{\circ}\text{C}$  terjadi degradasi dari hemiselulosa. Pada suhu antara  $350^{\circ}\text{C}$  dan  $390^{\circ}\text{C}$  berpengaruh dalam degradasi selulosa. Sedangkan degradasi lignin terjadi pada rentang suhu degradasi selulosa dan hemiselulosa (Garcia-Perez, 2001). Maka kandungan jumlah karbon, selulosa, dan hemiselulosa pada umpan biomasa akan mempengaruhi jumlah *biooil* yang dihasilkan

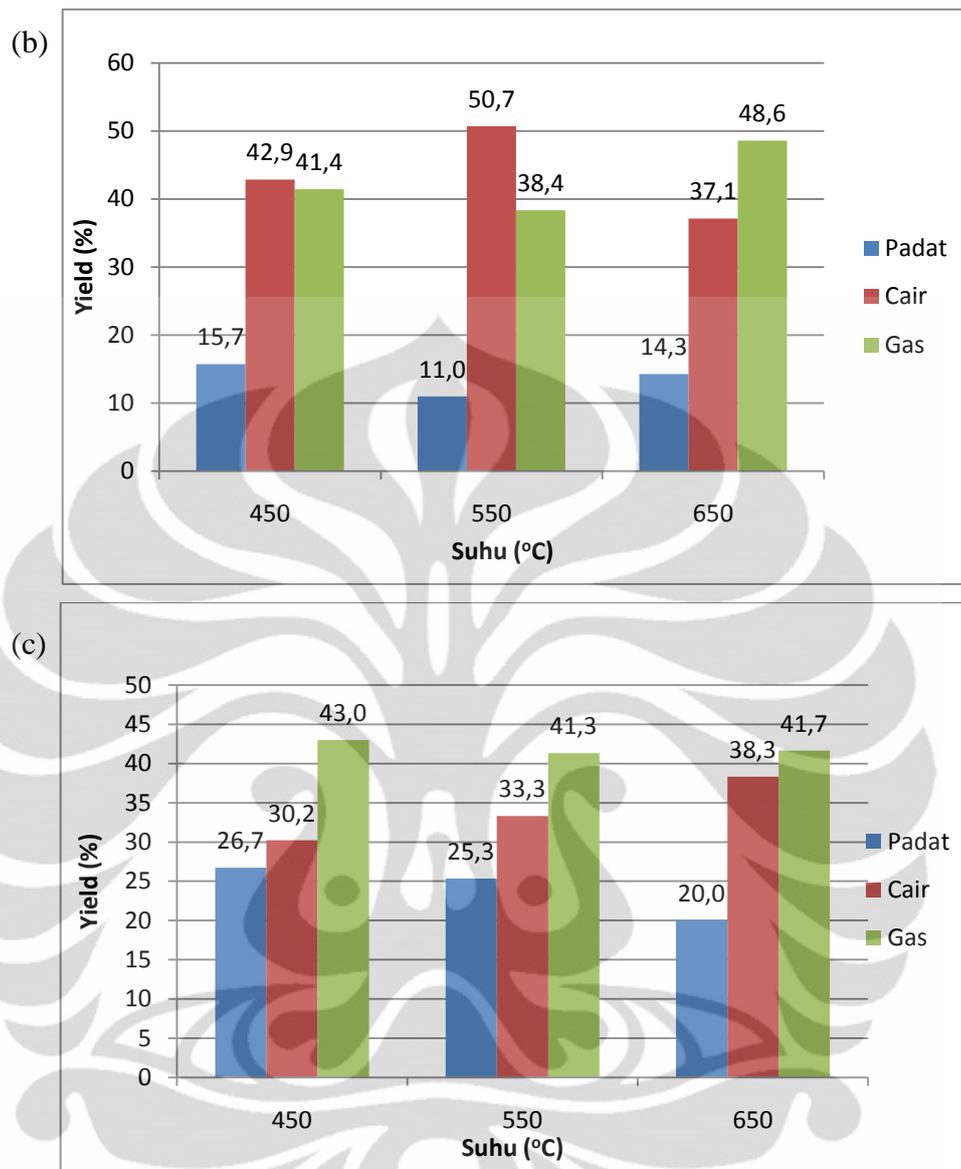
#### 4.2.2 Pengaruh Suhu terhadap Produk Pirolisis

Dari Gambar 4.5 yang telah dijelaskan di atas, kita dapat mengetahui jenis kelapa sawit yang menghasilkan produk cair paling besar. Sehingga dapat diketahui jenis umpan yang berpotensi sebagai bahan baku pembuatan pirolisis. Untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap produk pirolisis, maka akan dilakukan analisis pengaruh suhu terhadap produk pirolisis. Hasilnya dapat ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibawah ini:



Gambar 4.7 Pengaruh suhu operasi terhadap persentasi produk pirolisis





**Gambar 4. 8** Pengaruh suhu operasi terhadap produk pirolisis pada umpan : (a) cangkang, (b) tandan, (c) serat

Berdasarkan Gambar 4.8 diatas dapat kita lihat bahwa:

- Persentase produk cair pada cangkang, tandan, dan serat akan meningkat seiring peningkatan suhu. Namun, terjadi penurunan jumlah *biooil* umpan cangkang dan tandan pada suhu 650°C. Sedangkan pada serat persentase produk cair akan meningkat seiring peningkatan suhu dari 450-650 °C
- Persentase produk padat berupa *char* memiliki kecenderungan menurun seiring dengan naiknya suhu dan naiknya produksi gas.
- Persentase produk gas memiliki kecenderungan akan meningkat seiring dengan naiknya suhu.

Pada percobaan, suhu dari furnace menjadi parameter penting yang berpengaruh dalam produksi *biooil*. Pengaruh suhu dapat meningkatkan jumlah *yield* yang dihasilkan. Peningkatan suhu yang diberikan diikuti pula dengan peningkatan jumlah *yield biooil* sampai pada titik maksimum. Setelah titik maksimum dicapai, efek dari penambahan temperatur akan menyebabkan penurunan *yield biooil*

Produk pirolisis diperoleh dari hasil reaksi dekomposisi senyawa-senyawa yang terkandung di umpan. Laju reaksi dekomposisi tersebut meningkat seiring dengan peningkatan temperatur. Peningkatan perolehan ini terjadi karena kenaikan temperatur akan meningkatkan laju pemecahan rantai-rantai senyawa di dalam bahan. Dengan peningkatan temperatur tersebut kandungan air dan senyawa-senyawa volatil akan teruapkan secara cepat dengan jumlah yang lebih besar pula. Hal ini akan menyebabkan produk pirolisis cair meningkat pada temperatur yang lebih tinggi hingga mencapai titik temperatur dimana proses gasifikasi akan lebih dominan.

Untuk temperatur dibawah 450 °C, proses perengkahan tidak akan terjadi secara sempurna melainkan lebih banyak terjadi proses karbonisasi dimana produk padat berupa *char* yang akan dominan dihasilkan. Hal ini terbukti dari hasil penelitian bahwa produk padat memiliki *yield* tertinggi pada variasi temperatur terendah (450 °C) dan akan semakin berkurang seiring meningkatnya temperatur.

Untuk temperatur diatas 550°C hingga 650 °C maka proses yang terjadi adalah pirolisis dan gasifikasi, dimana akan banyak dihasilkan produk berupa uap/gas sebagai hasil gasifikasi. Peningkatan temperatur akan menyebabkan semakin banyaknya produk gas yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada tabel hasil pirolisis diatas. Hal ini disebabkan karena pada temperatur ini gas yang dihasilkan adalah gas *non-condensable*. Selain itu pada kondisi ini, uap/gas panas tadi akan membentuk produk lanjutan sesudah produk intermediet, dimana untuk proses pirolisis cepat uap yang ingin dikondensasi adalah produk intermediet dari degradasi cepat selulosa, hemiselulosa, dan lignin.

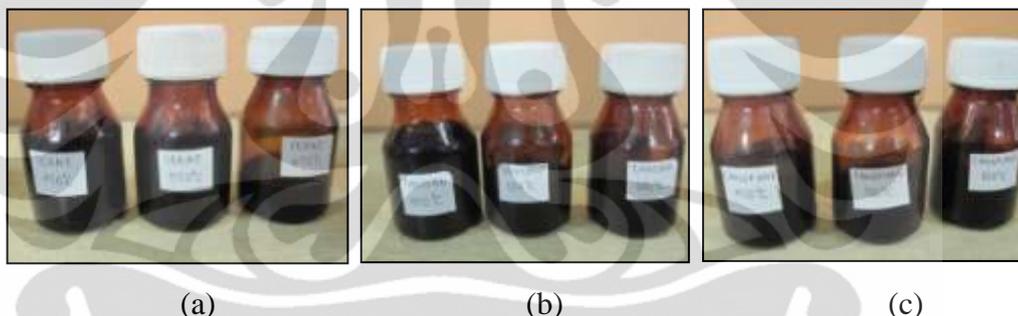
Produk cair hasil pirolisis yang didapatkan terdiri atas air dan senyawa organik yang dikondensasikan dan dikumpulkan setelah melalui tahap-tahap

pirolisis. Cairan ini merupakan campuran yang sangat kompleks dan mudah menguap.

Selain produk cair, pirolisis juga menghasilkan produk padat *char* (sisa padatan pirolisis). Dari pengamatan yang dilakukan secara kuantitatif, jumlah *char* berkurang seiring peningkatan temperatur pirolisis. Hal ini disebabkan oleh konversi pirolisis yang semakin cepat terjadi pada temperatur yang lebih tinggi sehingga jumlah *residue solid* yang dihasilkan semakin kecil. Jumlah *residue solid* dapat juga digunakan sebagai parameter efisiensi pirolisis. Semakin kecil *residue solid* maka reaksi pirolisis semakin efisien dalam menghasilkan produk cair.

### 4.3 Analisis Produk Cair Pirolisis

Produk cair yang didapatkan memiliki karakteristik berwarna coklat kekuningan, kental, dan berbau sangat tajam. Sementara itu produk padat berupa abu hitam. Produk hasil pirolisis tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut.



**Gambar 4. 9** Produk cair hasil pirolisis, (a) umpan serat; (b) umpan tandan; (c) umpan cangkang



**Gambar 4. 10** Padatan pada proses pirolisis (a) umpan sebelum pirolisis (b) setelah pirolisis

Produk cair tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui sifat fisik dan kimia dari produk pirolisis. Karakteristik kimia dilakukan dengan uji pembakaran

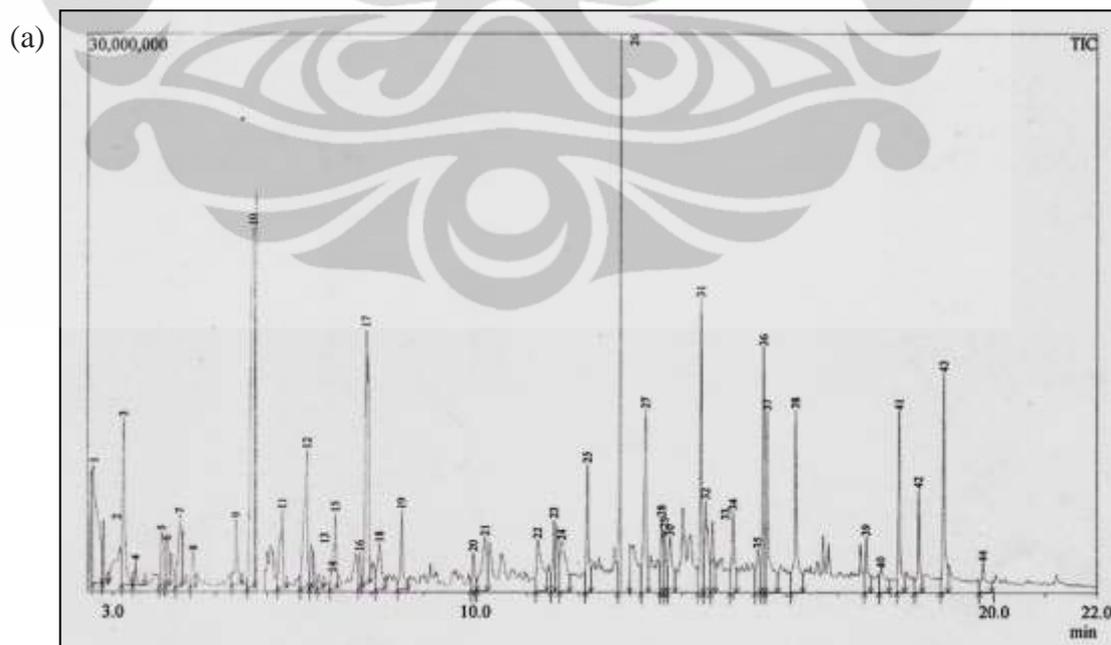
dan identifikasi komponen dengan menggunakan GC-MS. Karakteristik fisik dilakukan dengan mengukur pH, viskositas, dan densitas.

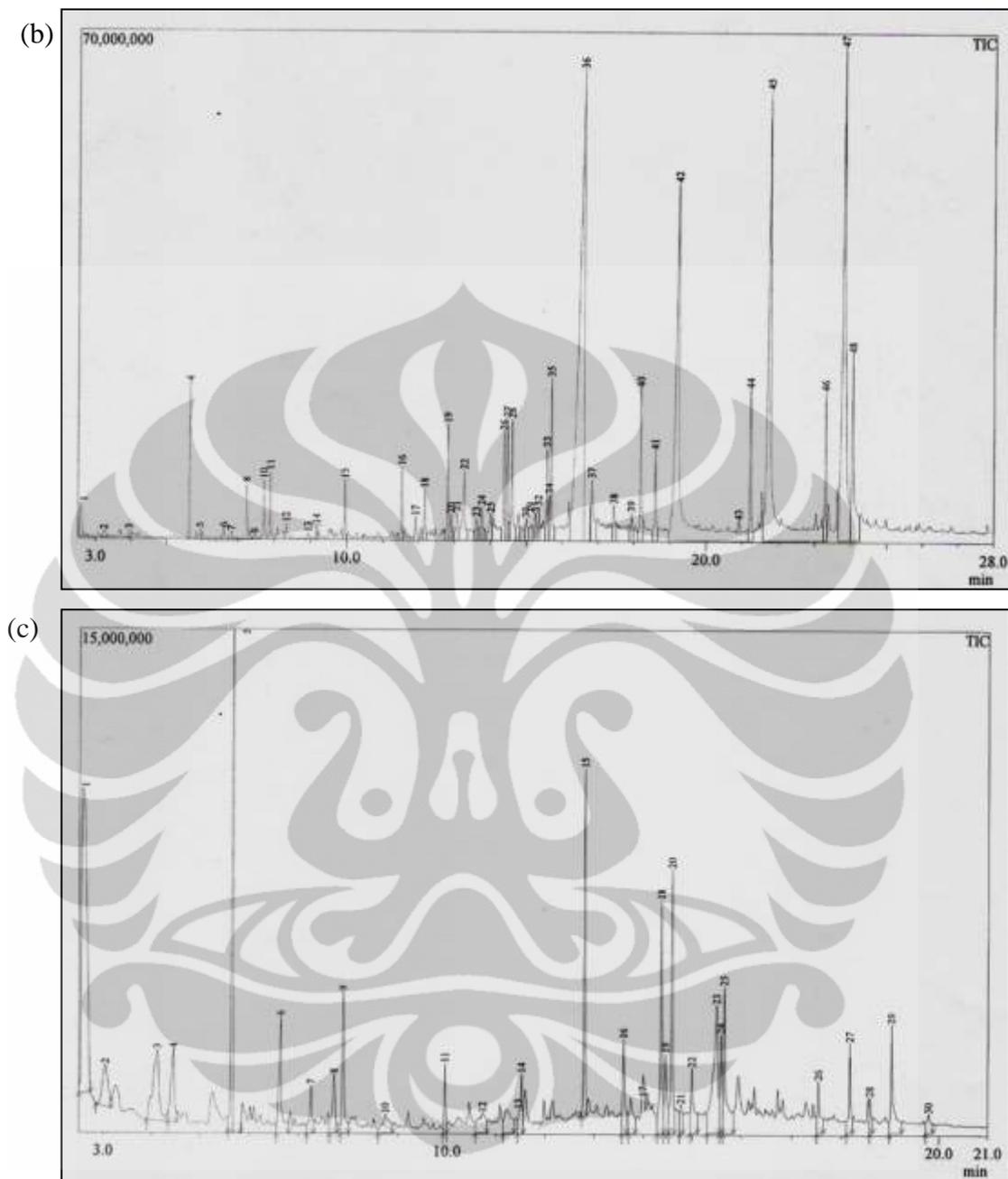
Berikut akan dipaparkan analisis terhadap karakteristik fisik dan kimia produk cair hasil pirolisis.

#### 4.3.1 Identifikasi Komponen Produk Cair dengan Metode GC-MS.

Pada umumnya, metode optimasi hasil pirolisis dilakukan sesuai dengan tujuan dari proses pirolisis yang dilakukan, apakah untuk menghasilkan produk cair berupa *biooil* yang berkualitas *biofuel* (hidrokarbon non aromatik) atau senyawa aromatik. Perbedaan jenis umpan akan menentukan distribusi senyawa produk atau komponen produk cair sehingga juga berpengaruh terhadap reaksi yang terlibat dalam proses. Identifikasi senyawa dilakukan untuk mengetahui kualitas produk cair yang dihasilkan.

Pada penelitian ini, identifikasi produk cair dilakukan dengan menggunakan metode GC-MS. Identifikasi ini dilakukan untuk mengetahui distribusi komponen senyawa pada produk cair hasil pirolisis. Berikut adalah hasil pemecahan spectra pada GC-MS terhadap produk cair pirolisis yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut.





**Gambar 4. 11** Identifikasi senyawa produk cair dengan metode GC-MS pada temperatur 550°C dari umpan; (a) tandan; (b) cangkang ; (c) serat.

Puncak-puncak spektra (bisa disebut dengan *peak*) pada Gambar 4.11 diatas menunjukkan jenis-jenis komponen yang dikandung oleh cairan pirolisis. Sebagai contoh, berdasarkan Gambar 4.11 (a) diatas dapat dilihat bahwa jumlah komponen yang teridentifikasi mencapai 44 jenis komponen yang ditunjukkan dengan terbentuknya 44 *peak*. Begitu juga pada umpan cangkang (gambar b) yang menunjukkan 48 jenis komponen dengan terbentuknya 48 *peak*, dan 30 komponen

pada umpan serat. Hasil identifikasi terhadap komponen tersebut kemudian ditabulasikan pada Tabel 4.1 ; 4.2; dan 4.3 berikut.

**Tabel 4. 1** Karakterisasi GC-MS produk cair pirolisis pada umpan tandan temperatur 550 °C

No	Komponen	Rumus Molekul	% Area
1	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	10,74
2	Phenol, 2-methoxy-	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	6,01
3	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	5,92
4	4-Methylpyridine	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	4,86
5	Phenol, 4-methoxy-3-(methoxymethyl)-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	3,8
6	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	3,72
7	2,5-Dimethoxy-4-methylbenzaldehyde	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	3,6
8	Octanoic acid, 2-propenyl ester	C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	3,57
9	Propane-2-one, 1-(4-isopropoxy-3-methoxyphenyl)	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub>	3,53
10	1-(2,6-Dihydroxy-4-methoxyphenyl)-1-butanone	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	3,47
11	1,2,3-Trimethoxy-5-methylbenzene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	3,13
12	2-Furanmethanol	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,81
13	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-Propenyl)	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	2,69
14	Phenol, 2-methoxy-4-propenyl	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	2,5
15	1,4-Benzenediol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,34
16	Pyrogallol 1-methyl ether	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	2,18
17	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	2,17
18	5-(Hydroxymethyl)dihydro-2(3H)-furanone	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	2,16
19	2(5H)-FURANONE	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1,94
20	2-Furanmethanol, tetrahydro-	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	1,85
21	1,4-Benzenediol, 2,6-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	1,74
22	Ethanone,1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	1,73
23	Ethanone,1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	1,67
24	Phenol, 2-methyl-/o-Cresol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1,6
25	3-Ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	1,5
26	Trans-2-nonenol	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	1,45
27	2-Methyl-2-Cyclopentenone	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	1,42
28	Benzoic acid, 4-hydroxy-, methyl ester	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,31
29	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	1,28
30	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	1,28
31	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3-methoxy-	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,25
32	1,4-Benzenediol, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1,17
33	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	1,14
34	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	1,13

35	4-Hydroxy-2-methylbenzaldehyde	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1,1
36	3,4,5-Trimethoxyacetophenon	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	1,06
37	2-Furyl Methyl Ketone	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1,05
38	2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-one	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	0,78
39	Phenol, 2-Methoxy-4-methyl	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0,77
40	2(3H)-Furanone, 5-methyl	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	0,65
41	Cyclopentenone	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	0,64
42	Phenol, 3-methyl	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	0,57
43	n-Butylethylenediamine	C <sub>6</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub>	0,39
44	4-Methyl-2(5H)-Furanone	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	0,31

Tabel 4. 2 Karakterisasi GC-MS produk cair pirolisis pada umpan cangkang temperatur 550 °C

No	Komponen	Rumus Molekul	% Area
1	Dodecaic acid	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	19,93
2	Tetradecanoic acid	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	16,08
3	Hexadecanoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	15,47
4	Oleic acid	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	13,46
5	Octadecaoin acid	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	3,85
6	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	1,9
7	Dodecaic acid, methyl ester	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	1,83
8	9-Octadecanoic acid, methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	1,69
9	Hexadecanoic acid, methyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	1,67
10	Benzoic acid, 4-hidroxy-, methyl ester	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,62
11	Benzoic acid, 4-methoxy-, methyl ester	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	1,46
12	2,4-Hexadienedioic acid, 3-methyl-4-propyl	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> O <sub>4</sub>	1,31
13	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	1,28
14	Phenol, 4-methoxy-3-(methoxymethyl)	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	1,26
15	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1,26
16	Tetradecanoic acid, metyhl ester	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	1,2
17	Phenol, 2,6-dimethoxy	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	1,19
18	1,2,3-Trimethoxy-5-methylbenzene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	0,97
19	Phenol, 3-methyl	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	0,78
20	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0,72
21	1H-Isoindole-1,3(2H)-dione, 2 methyl	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	0,72
22	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	0,67
23	Phenol, 2-methoxy	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0,66
24	Phenol, 2-methyl	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	0,63
25	2,5-Dimethylfuran	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	0,61
26	Phenol, 4-ethenyl-2-methoxy	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0,58
27	1H-Isoindole-1,3(2H)-dione	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	0,54

28	Phenol, 2-methoxy-4-methyl	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0,52
29	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0,52
30	cis-9-triscosene	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub>	0,52
31	2-Tridecanone	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O	0,5
32	n-Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	0,49
33	Propane-2-one, 1-(4-isopropoxy-3-methoxyphenyl)	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>3</sub>	0,49
34	Phenol, 2-methoxy-4-propyl	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	0,48
35	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	0,45
36	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3-methoxy	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	0,42
37	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0,39
38	2-Hendecanone	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O	0,36
39	2-Methylbenzofura	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O	0,21
40	2-Nonadecanone	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O	0,2
41	2-Cyclopente-1-one,2-hydroxy-3methyl	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0,18
42	Benzofuran	C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O	0,17
43	Benzene, 1,4-dimethyl	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	0,16
44	2-Methyl-2-cyclopentenone	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	0,15
45	Phenol, 2,4-dimethyl	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	0,14
46	2,3-dimethyl-2-cyclopentenone	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	0,12
47	Phenol, 3-ethyl	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	0,11
48	Ethanone, 1-phenyl	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	0,1

**Tabel 4. 3** Karakterisasi GC-MS produk cair pirolisis pada umpan serat temperatur 550 °C

No	Komponen	Rumus Molekul	% Area
1	2-Furancarboxaldehyde	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	17,88
2	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	10,06
3	Benzoic acid, 4-hydroxy	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	6,77
4	Phenol, 2,6-dimethoxy	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	5,22
5	2-(5H)-Furanone	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	4,93
6	Benzoic acid, 4-hydroxy, methyl ester	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	4,88
7	Phenol, 4-methoxy-3-(methoxymethyl)	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	4,55
8	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	4,29
9	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	3,43
10	Desaspidinol	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	3,35
11	Phenol, 2-methoxy	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2,96
12	2-(3H)-Furanone, 5-methyl	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,8
13	2-Furanmethanol	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	2,57
14	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	2,18
15	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3-methoxy	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	2,17
16	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	2,00

17	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	1,93
18	Ethanone, 1-(2,6-hydroxy-4-methoxyphenyl)	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	1,91
19	Pyrogallol 1 methyl ester	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,87
20	Phenol, 3-methyl	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1,8
21	2-Furancarboxaldehyde, 5-hydroxymethyl	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	1,69
22	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1,62
23	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	1,54
24	2,7-Octadien-4-ol, 2-methyl-6-methylene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	1,47
25	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	1,44
26	Phenol, 2-methyl	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1,32
27	2-Methoxy-4-Methylphenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	1,07
28	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	0,86
29	1H-Isondole-1,3(2H)-dione	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	0,73
30	4-Hydroxy-2-methoxycinnamaldehyde	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	0,71

Dari ketiga tabel diatas (Tabel 4.1, Tabel 4.2, dan Tabel 4.3) didapat dilihat bahwa komponen utama cairan produk pirolisis adalah fenol, senyawa asam, senyawa oksigenat, dan beberapa senyawa aromatik. Pada *biooil* hasil umpan tandan dan serat, fenol dan turunannya adalah senyawa dengan komposisi paling besar. Sedangkan pada *biooil* hasil umpan cangkang, senyawa *dodecanoic acid* dan turunannya memiliki presentase paling besar dan cukup signifikan dari komposisi lainnya. Hal ini terbukti ketika dilakukan uji pH dengan pH indikator, *biooil* hasil umpan cangkang memiliki pH yang sangat kecil. Hasil uji pH ditunjukkan pada Tabel 4.4 dibawah ini :

**Tabel 4. 4** Hasil pengukuran pH *biooil*

Kelapa Sawit	Suhu (°C)		
	450	550	650
Cangkang	2,5	3	3
tandan	4	4	4
Serat	5	5	3,5

Senyawa *dodecanoic acid* dan turunannya (termasuk *oleic acid*), merupakan asam utama dalam minyak kelapa dan minyak inti sawit dan memiliki sifat anti antimikroba. Sedangkan senyawa fenol dapat meningkatkan kemampuan terbakar produk cair, tetapi karena produk cair ini masih memiliki kandungan air dan senyawa oksigenat yang tinggi maka pembakaran produk cair

ini masih tergolong lama. Kehadiran senyawa aromatik, asam asetat dan furan berasal dari degradasi senyawa biopolimer seperti selulosa dan hemiselulosa. Sedangkan degradasi senyawa lignin diidentifikasi dengan adanya senyawa fenol dan *guaicol*. *Pyrogalol* pada produk umpan serat merupakan komponen organik yang termasuk kedalam fenol, biasa disebut *1,2,3-trihydroxybenzene*. Jenis senyawa lain adalah propanon yang merupakan hasil degradasi senyawa C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>.

#### 4.3.2 Uji Pembakaran

Salah satu sifat fisik yang ingin diketahui dari produk cair pirolisis ini adalah mengidentifikasi kemampuan bakarnya. Uji pembakaran dilakukan secara visual terhadap produk cair pirolisis. Hal ini dilakukan dengan dengan cara menggunakan sumbu dan membasahinya untuk kemudian dilakukan uji bakar terhadap sumbu tersebut.

Dari pengujian yang dilakukan didapatkan bahwa produk cair pirolisis ini tidak dapat terbakar. Hal ini mengindikasikan kemampuan nyala dari produk cair pirolisis belum memenuhi kualitas bahan bakar yang sebenarnya. Hal ini menunjukkan pula bahwa produk cair pirolisis sebagian besar masih mengandung air dengan sedikit hidrokarbon.

#### 4.3.3 Analisis Densitas Produk Cair

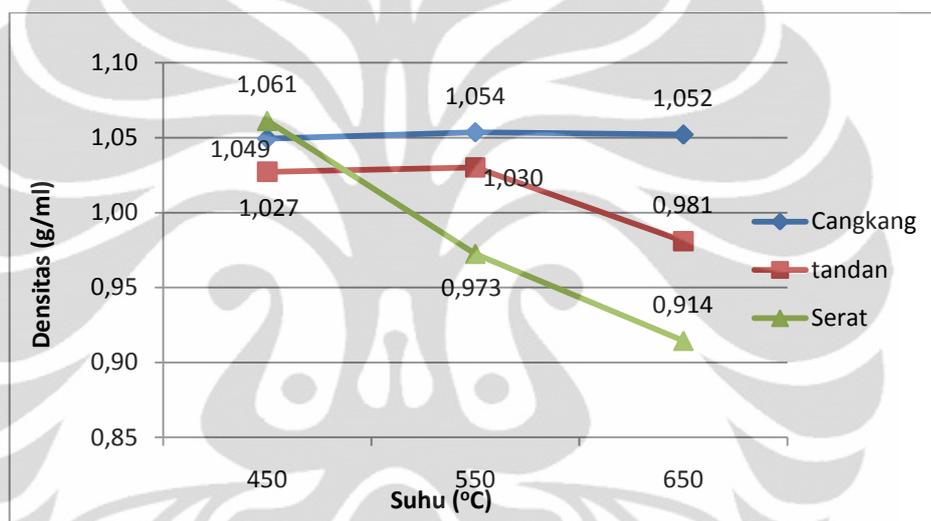
Sifat fisik produk cair hasil pirolisis sangat ditentukan oleh senyawa-senyawa yang terkandung dalam produk cair tersebut. Peningkatan atau penurunan konsentrasi suatu senyawa akan mempengaruhi karakteristik produk cair tersebut. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa suhu reaksi sangat mempengaruhi konsentrasi dan jenis-jenis senyawa yang dikandung oleh produk cair. Dengan demikian, perubahan suhu secara langsung turut mempengaruhi karakteristik produk cair pirolisis.

Densitas merupakan salah satu sifat fisik yang diuji untuk mengetahui kedekatan karakteristik produk cair komersial dengan produk cair hasil pirolisis. Pengukuran densitas dilakukan dengan menggunakan alat piknometer seperti yang dilihat pada Gambar 4.12



**Gambar 4. 12** Biooil di dalam alat ukur densitas piknometer

Hasil perhitungan data densitas terhadap suhu ditunjukkan pada Gambar 4.13



**Gambar 4. 13** Densitas produk cair dari tiap temperatur dan jenis umpan

Berdasarkan grafik Gambar 4.13 didapati bahwa

1. Hasil pengukuran densitas *biooil* dari serat pada suhu 450°C didapati sebesar 1,061 g/ml. Naiknya suhu diikuti oleh turunnya nilai densitas dari *biooil*
2. Densitas *biooil* yang berasal dari *pyrolysis* cangkang di suhu 450°C adalah 1,049 g/ml. Pada suhu 550 °C mengalami penurunan menjadi 1,054 g/ml. Sedangkan di suhu 650 °C densitas mengalami kenaikan menjadi 1,052 g/ml. Kenaikan dan penurunan nilai densitas *biooil* yang berasal dari cangkang tidak begitu signifikan, hanya berkisar  $\pm 0,005$  g/ml.
3. Densitas *biooil* dari tandan juga mengalami kenaikan dan penurunan yang tidak signifikan yakni sebesar  $\pm 0,02$  g/ml. Pada suhu 450 °C densitas *biooil* sebesar 1,027 g/ml. Suhu 550 °C densitas mengalami peningkatan

menjadi 1,03 g/ml dan pada suhu 650°C densitas *biooil* turun kembali menjadi 0,981 g/ml

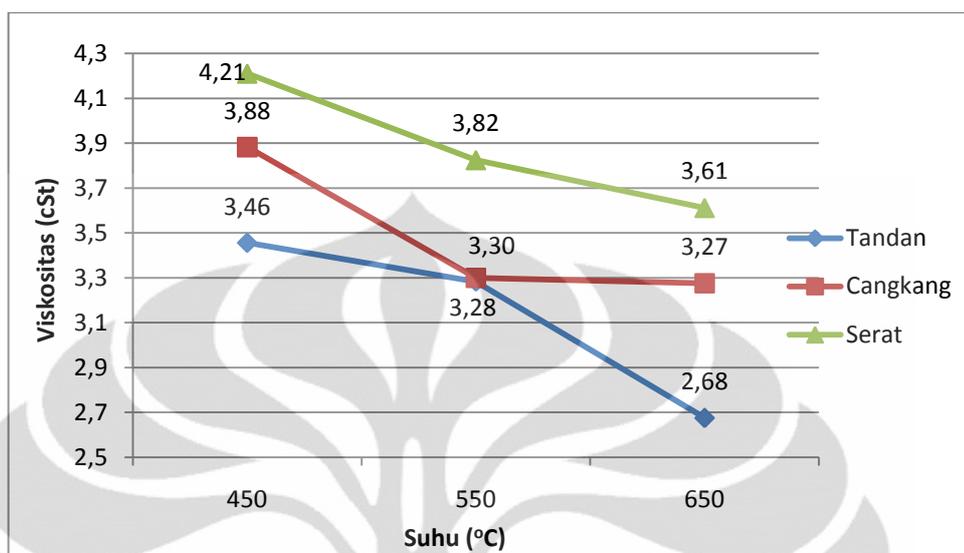
Dari literatur didapati bahwa peningkatan suhu berbanding terbalik dengan densitas dari *biooil*, hal ini yang menunjukkan terbentuknya senyawa yang lebih ringan (rantai pendek). Semakin tinggi suhu reaksi, reaksi perengkahan akan berlangsung semakin cepat sehingga dihasilkan pula senyawa dengan rantai molekul yang lebih pendek. Sehingga, semakin tinggi suhu maka semakin kecil densitasnya

Ada beberapa dari hasil perhitungan yang didapat menunjukan ketidaksesuaian dari teori. Hal ini dilakukan karena kesalahan dari penyimpanan *biooil*. *Biooil* merupakan zat cair dengan tingkat *volatility* yang tinggi, sehingga dalam penyimpanannya harus ditempatkan pada lokasi dengan suhu rendah seperti kulkas. Akan tetapi hal ini tidak dilakukan sehingga berpengaruh pada hasil densitas yang didapat.

Secara general nilai densitas produk mendekati densitas air yaitu 1 g/ml dan lebih besar bila dibandingkan dengan nilai densitas minyak diesel yang berada pada kisaran nilai 850 kg/m<sup>3</sup>. Kedekatan nilai densitas produk cair dengan densitas air membuktikan bahwa produk cair pirolisis ini masih memiliki kandungan air.

#### 4.3.4 Analisis Viskositas Produk Cair

Berikut adalah gambar pengaruh suhu terhadap viskositas dari produk cair:



**Gambar 4. 14** Viskositas produk cair pada variasi suhu dan jenis umpan.

Gambar 4.14 menunjukkan pengaruh suhu pirolisis terhadap viskositas produk cair hasil pirolisis. Viskositas menggambarkan cepat atau lambatnya cairan tersebut dapat mengalir. Dari grafik dapat kita lihat bahwa viskositas produk cair akan semakin kecil seiring dengan peningkatan suhu operasi. Terjadinya penurunan nilai viskositas pada suhu yang lebih tinggi disebabkan karena terjadinya perenggangan ikatan pada molekul tersebut. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa perbedaan ini juga diakibatkan adanya perbedaan senyawa-senyawa yang dikandung oleh produk cair tersebut yang akan lebih memiliki senyawa rantai pendek pada suhu yang lebih tinggi akibat perenggangan yang semakin banyak.

Dari penelitian ini, viskositas produk cair pada suhu 450°C berkisar antara 3,46-4,21 cSt. Nilai dari viskositas tersebut akan semakin menurun hingga di angka terkecil yakni 2,68 cSt. Jika dibandingkan dengan *biooil* komersial, maka produk cair ini sudah mendekati viskositas *biooil* komersial yaitu 4 cSt pada suhu 450-550°C.

Berdasarkan analisis sifat fisik produk cair diatas, dengan melihat hasil perhitungan dan analisis densitas dan viskositasnya yang mendekati air, dapat disimpulkan bahwa produk cair yang dihasilkan masih mengandung air. Kehadiran

air ini berasal dari kandungan kelembaban (*moisture*) di dalam umpan biomasa dan indikasi masih adanya sedikit oksigen yang terdapat dalam proses pembuatan *biooil*. Reaksi pembentukan air terjadi karena masih terdapat sejumlah gas oksigen. Keberadaan oksigen ini memungkinkan terjadinya reaksi pembakaran biasa yang menghasilkan air dan karbon dioksida. Kesalahan ini terdapat pada bagian prosedur pengusiran oksigen dari dalam reaktor. Kondisi reaktor yang bebas dari oksigen tidak dapat diidentifikasi secara terukur.

#### 4.4 Perbandingan Karakteristik Produk Cair Pirolisis dengan Minyak Diesel

Setelah dilakukan perhitungan sifat fisik terhadap produk cair hasil pirolisis, maka hasilnya dibandingkan dengan karakteristik minyak diesel dengan tujuan untuk membuat produk cair pirolisis sebagai pengganti minyak diesel. Perbandingan tersebut ditampilkan pada Tabel 4.8 berikut.

**Tabel 4. 5** Perbandingan karakteristik minyak diesel dengan produk cair hasil pirolisis

Karakteristik	Diesel	Produk Cair Pirolisis		
		Tandan	Serat	Cangkang
Viskositas (cSt)	4	2,6-3,6	3,6-4,2	3,3-3,9
pH	5	4	5	2,5-3
Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	850	980-1027	914-1061	1049-1052

Berdasarkan Tabel 4.5 di atas dapat dilihat bahwa tidak ada produk cair dari ketiga umpan yang divariasikan dapat serupa dengan karakteristik minyak diesel. Hal ini menandakan bahwa ketiga jenis *biooil* yang didapat tidak bisa langsung digunakan sebagai bahan bakar pengganti diesel. Contohnya tandan dan cangkang yang masih memiliki pH yang terlalu asam. Jika *biooil* ini langsung masuk ke dalam mesin maka keasaman yang bersifat korosif akan merusak logam di dalam mesin. Selain itu densitas dari ketiga produk cair di atas masih terlalu tinggi jika dibandingkan dengan minyak diesel. Meskipun tidak ada satu jenis *biooil* yang tepat serupa karakteristiknya, tetapi karakteristik yang dimiliki serat paling mendekati minyak diesel, terutama pada pH dan viskositas.

Hasil analisis komponen menunjukkan bahwa produk cair hasil pirolisis didominasi oleh senyawa  $C_5-C_{10}$  yang mencapai 70-80%. Hal ini tidak seiring dengan komponen penyusun diesel/solar yang didominasi senyawa  $C_{16}-C_{20}$ . Produk cair pirolisis juga masih belum memiliki daya bakar yang tinggi seperti yang dibutuhkan untuk dijadikan sebagai bahan bakar.

Dalam pengaplikasian produk cair ini antara lain dapat dicampurkan dengan etanol 20% sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar. Dapat juga digunakan sebagai binder biobriket untuk menahan agar briket dapat tahan lama ketika terbakar (tidak dapat cepat menjadi abu). Hal ini disebabkan karena senyawa yang terdapat di produk cair pirolisis mempunyai kemampuan untuk menahan interaksi air ke dalamnya. Caranya adalah dengan mencampurkan 10% berat produk cair pirolisis terhadap bahan baku biomasa pembuatan biobriket. Selain itu, jika dilihat pada hasil GC-MS umpan cangkang, terdapat senyawa *oleic acid* yang sangat dominan pada *biooil* tersebut. *Oleic acid* dan *dodecanoic acid* bersifat antimikroba dan dapat digunakan sebagai bahan baku kosmetik dan sabun. Sehingga dari *biooil* ini dapat diolah dengan proses selanjutnya untuk dijadikan bahan baku farmasi atau *petrochemical*.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini di antaranya adalah:

1. Proses *fast pyrolysis* akan menghasilkan konversi produk cair maksimum pada kondisi temperatur 550 °C untuk umpan cangkang dan tandan, dan kondisi temperatur 650 °C untuk umpan serat dengan hasil konversi produk cair maksimum pada temperatur optimum masing-masing umpan adalah: cangkang 62%; tandan 50,7%; dan serat 38,3%
2. Produk cair pirolisis memiliki kecenderungan susah terbakar karena memiliki kadar air dan senyawa oksigenat yang tinggi.
3. Produk cair pirolisis tidak memiliki keserupaan karakteristik dengan minyak diesel. Selain itu biooil masih belum memiliki energi penyalanya yang tinggi sehingga sulit terbakar dengan pH yang cukup asam.
4. Berdasarkan hasil GC-MS produk cair hasil umpan cangkang dapat juga digunakan sebagai bahan baku industri farmasi karena mengandung banyak *oleic acid*.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan perolehan penelitian ini adalah:

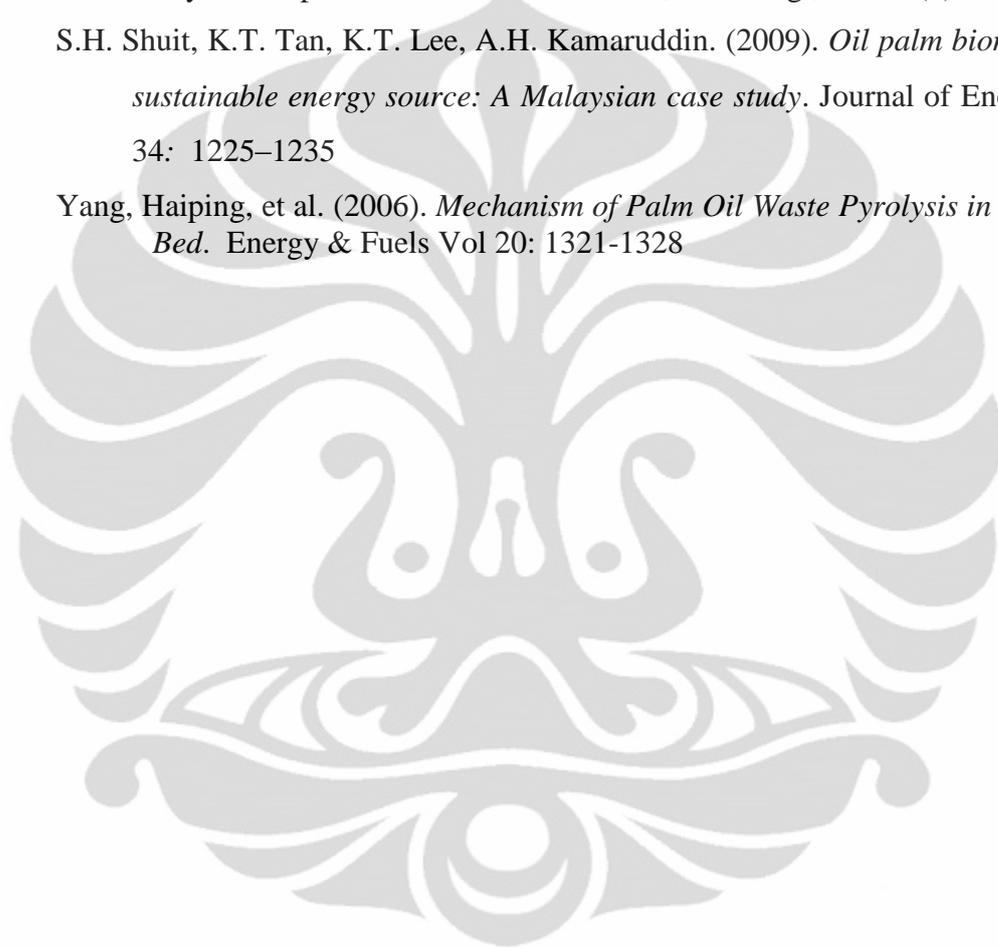
1. Memakai katalis agar reaksi dapat diarahkan menuju komponen penyusun bahan bakar tertentu.
2. Penempatan hasil produk cair pada kondisi temperatur yang rendah (10°C) untuk menjaga agar produk cair yang bersifat volatile tidak menguap.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah N, Gerhauser H, Bridgwater AV., (2007). *Bio-Oil from Fast Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches*. Journal of Physical Science, Vol. 18(1): 57–74.
- Abdullah, Kamaruddin. *Biomass Energy Potentials And Utilization In Indonesia*. Laboratory of Energy and Agricultural Electrification, Department of Agricultural Engineering, IPB. Bogor. 2006.
- Anonim. (2009). Potensi Biomasa Lignoselulosa di Indonesia sebagai Bahan Baku Bioetanol : Tandan Kosong Kelapa Sawit. Dirjen Perkebunan, Jakarta.
- Anonim. (2007). Gambaran Sekilas Industri Kelapa Sawit. Dirjen Perkebunan, Jakarta.
- Anonim. The Australian Energy Website, *What is Biomass*, <http://www.acre.murdoch.edu.au>. (12 Maret 2010)
- Anonim. (2009). *Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) Indonesia*. Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Arif Siregar, Fahri. Tinjauan Fungsi Fisik Aplikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit. <http://dedidoank.files.wordpress.com/tinjauan-fungsi-fisik-aplikasi-tandan-kosong-kelapa-sawit.doc/>. (15 Maret 2010)
- Azri Sukiran Muhammad. (2009). *Bio-oils from Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches*. MSc Thesis. University of Malaya, Selangor.
- Baak Burcu Uzun, Aye Eren Ptn, dan Ersan Ptn. (2007). *Rapid Pyrolysis of Olive Residue. 1. Effect of Heat and Mass Transfer Limitations on Product Yields and Bio-oil Composition*. Journal of Energy Fuels, 21 (3):1768-1776
- Bambang Pramudono. “Jurnal CSICI, No. 10/2009. Petro Strategy Menuju Visi Indonesia 2030”. <http://dirgopurbo.blogspot.com/>. Diakses 20 Maret 2009.
- Bridgwater, AV. (2004). *Biomass Fast Pyrolysis*. Journal of thermal science, Vol. 8 (2):21-49.
- Bridgwater, AV. (2007). *Bio-Oil From Fast Pyrolysis Of Oil Palm Empty Fruit Bunches*. Journal of Physical Science, Vol. 18(1): 57–74

- Budiono, Chayun. Utilization of Biomass Wastes of Wood Based Industry. [www.adb.org/Clean-Energy/.../INO-FS-Biomass-Wastes-Woodwaste.pdf/](http://www.adb.org/Clean-Energy/.../INO-FS-Biomass-Wastes-Woodwaste.pdf/). (26 April 2010)
- Garcia, Manuel-Perez. (2008). *The Formation of Polyaromatic Hydrocarbons and Dioxins During Pyrolysis: A Review of the Literature with Descriptions of Biomass Composition, Fast Pyrolysis Technologies and Thermochemical Reactions*. Washington State University, USA.
- Garcia-Perez, M.; Chaala, A.; Yang, J.; Roy, C. (2001). *Co-pyrolysis of Sugarcane Bagasse with Petroleum Residue. Part I: Thermogravimetric Analysis*. *Journal of Fuel* 80: 1245.
- Handayani, Nita. (2010). *Perancangan Kompor Biomasa untuk Masyarakat Urban dengan Prinsip Heat Recovery dan Integrasi Sistem Knock-Down pada Cerobong*. DTK FTUI.
- Kiichiro Hayashi. (2007). *Environmental Impact of Palm Oil Industry in Indonesia*. Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2007, ISETS07
- Mahajoeno, Edwi. (2005). *Energi Alternatif Pengganti BBM: Potensi Limbah Biomasa Sawit sebagai Sumber Energi Terbarukan*, Jakarta.
- Malaysian – Danish Environmental Cooperation Programme (Renewable Energy and Energy Efficiency Component). (2006). *Ethanol Potential for Empty Fruit Bunches Pre-treated by Wet-Explosion*.
- Nugroho Agung Pambudi. *Energi Berkelanjutan itu bernama Biomasa*. <http://netsains.com/2008/04/energi-berkelanjutan-itu-bernama-biomasa-2/>. (12 Maret 2010)
- Peby, Agrian. (2010). *Biomassa to Liquid: Proses Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi Biooil dengan Metode Pirolisis*. Jakarta
- Sumathi S, Chai SP, Mohamed AR. (2008). Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Journal of Renewable Sustainable Energy Rev*, Vol 12(9): 2404–2421.
- Ratih Asthary. *Biomass to Liquid (BTL)*. <http://majarimagazine.com/2008/05/biomass-to-liquid-btl/>. (19 Maret 2010)

- Ranzi, Eliseo, et.al. (2008). *Chemical Kinetics of Biomass Pyrolysis*. Energy & Fuels., 22: 4292-4300.
- Raveendran, K.; Ganesh, A.; Khilar, K. C. (1996). *Pyrolysis Characteristics of Biomass and Biomass Components*. Journal of Fuel 75 (8): 987-998.
- Tilani Hamid, Rachman Yusuf. (2002). Preparasi Karakteristik Biodiesel dari Minyak Kelapa Sawit. Journal of Makara, Teknologi, Vol. 6 (2): 60-64
- S.H. Shuit, K.T. Tan, K.T. Lee, A.H. Kamaruddin. (2009). *Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study*. Journal of Energy, Vol 34: 1225–1235
- Yang, Haiping, et al. (2006). *Mechanism of Palm Oil Waste Pyrolysis in a Packed Bed*. Energy & Fuels Vol 20: 1321-1328



**LAMPIRAN 1**  
**PENGOLAHAN DATA DENSITAS DAN VISKOSITAS PRODUK CAIR**

**1.1 Perhitungan Densitas Produk Cair**

Kelapa Sawit	Suhu 450°C			Suhu 550°C			Suhu 650°C		
	massa 1 (g)	massa 2 (g)	m rata2 (g)	massa 1 (g)	massa 2 (g)	m rata2 (g)	massa 1 (g)	massa 2 (g)	m rata2 (g)
Cangkang	25,929	25,899	25,914	25,945	25,967	25,956	25,952	25,930	25,941
tandan	25,686	25,700	25,693	25,722	25,723	25,7225	25,224	25,235	25,2295
Serat	26,026	26,040	26,033	25,160	25,130	25,145	24,560	24,568	24,564

Kelapa Sawit	Suhu 450°C		Suhu 550°C		Suhu 650°C	
	m larutan - m piknometer kosong (g)	densitas (g/ml)	m larutan - m piknometer kosong (g)	densitas (g/ml)	m larutan - m piknometer kosong (g)	densitas (g/ml)
Cangkang	10,494	1,049	10,547	1,054	10,532	1,052
tandan	10,273	1,027	10,303	1,030	9,804	0,981
Serat	10,613	1,061	9,71	0,973	9,14	0,914

**Contoh Data Perhitungan Densitas**

Massa piknometer kosong : 15,41 gr

Massa 1 biooil dalam piknometer (450°C cangkang) : 25,926 gram

Massa 2 biooil dalam piknometer (450°C cangkang) : 25,899 gram

Massa biooil dalam piknometer rata2 :  $\frac{25,926+25,899}{2} = 25,914$  gram

Massa biooil (450°C cangkang) :  $25,37 - 15,41 = 10,494$  gram

Volume piknometer : 10 mL

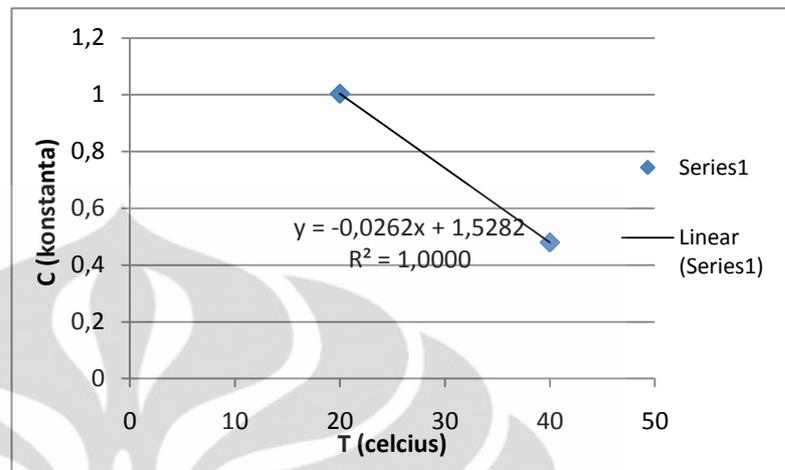
Sehingga densitas cairan tersebut adalah:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} = \frac{10,494}{10} = 1,049 \text{ gram/mL}$$

## 1.2 Perhitungan Viskositas Produk Cair

### Perhitungan Konstanta

T (Celcius)	C (konstanta)
20	1.0038
40	0.4794



Mencari nilai konstanta untuk perkalian viskositas, didapat kalibrasi alat pada suhu 20 dan 40 °C. Suhu pada saat pengukuran adalah 27°C, maka :

$$Y = -0,0262x + 1,5282$$

Dengan  $x = 27$ , maka konstanta  $\rightarrow C = -0,0262 (27) + 1,5282$   
 $= 0,8208$

Kelapa sawit	Suhu 450 °C		Suhu 550 °C		Suhu 650 °C	
	t <sub>1</sub> (detik)	t <sub>2</sub> (detik)	t <sub>1</sub> (detik)	t <sub>2</sub> (detik)	t <sub>1</sub> (detik)	t <sub>2</sub> (detik)
Cangkang	4,3	4,12	4,27	3,73	3,17	3,35
Tandan	4,62	4,84	3,98	4,06	3,71	4,27
Serat	4,98	5,28	4,23	5,09	4,3	4,5

Kelapa sawit	Suhu 450 °C		Suhu 550 °C		Suhu 650 °C	
	t rata2 (detik)	Viskositas (cSt)	t rata2 (detik)	Viskositas (cSt)	t rata2 (detik)	Viskositas (cSt)
Cangkang	4,21	3,456	4	3,283	3,26	2,676
Tandan	4,73	3,882	4,02	3,230	3,99	3,275
Serat	5,13	4,211	4,66	3,825	4,4	3,612

**Perhitungan viskositas:**  $\mu = c \times t_{rata-rata}$

Contoh Perhitungan:

Untuk produk cair cangkang kondisi operasi 450 °C, memiliki viskositas:

$$\mu = c \times t_{rata-rata}$$

$$\mu = 0,8208 \times 4,21 = 3,456cst$$

## LAMPIRAN 2

### DATA HASIL PRODUK

**Tabel** Data hasil pirolisis umpan cangkang

Suhu (der Celcius)	Feed (gram)	Kecepatan Feeder (rpm)	Waktu (s)	Laju (gr/s)	Waktu (menit)		massa (gram)			% yield		
					Mulai-Biooil terbentuk	Biooil terbentuk-biooil habis	Padat	Cair	Gas	Padat	Cair	Gas
450	100	160	263	0.38	17	37	18.7	58.7	22.7	18.7	58.7	22.7
550	100	160	522	0.19	9	54	14.0	62.0	24.0	14.0	62.0	24.0
650	100	160	539	0.19	6	54	13.0	59.0	28.0	13.0	59.0	28.0

**Tabel** Data hasil pirolisis umpan tandan

Suhu (der Celcius)	Feed (gram)	Kecepatan Feeder (rpm)	Waktu (s)	Laju (gr/s)	Waktu (menit)		massa (gram)			% yield		
					Mulai-Biooil terbentuk	Biooil terbentuk-biooil habis	Padat	Cair	Gas	Padat	Cair	Gas
450	100	160	263	0.38	18	36	15.7	42.9	41.4	15.7	42.9	41.4
550	100	160	522	0.19	12	34	11.0	50.7	38.4	11.0	50.7	38.4
650	100	160	539	0.19	6	42	14.3	37.1	48.6	14.3	37.1	48.6

**Tabel** Data hasil pirolisis umpan serat

Suhu (der Celcius)	Feed (gram)	Kecepatan Feeder (rpm)	Waktu (s)	Laju (gr/s)	Waktu (menit)		massa (gram)			% yield		
					Mulai-Biooil terbentuk	Biooil terbentuk-biooil habis	Padat	Cair	Gas	Padat	Cair	Gas
450	100	160	263	0.38	0:20	0:30	26.7	30.2	43.0	26.7	30.2	43.0
550	100	160	522	0.19	0:26	0:24	25.3	33.3	41.3	25.3	33.3	41.3
650	100	160	539	0.19	0:16	0:28	20.0	38.3	41.7	20.0	38.3	41.7

**LAMPIRAN 3**  
**GAMBAR PERALATAN**

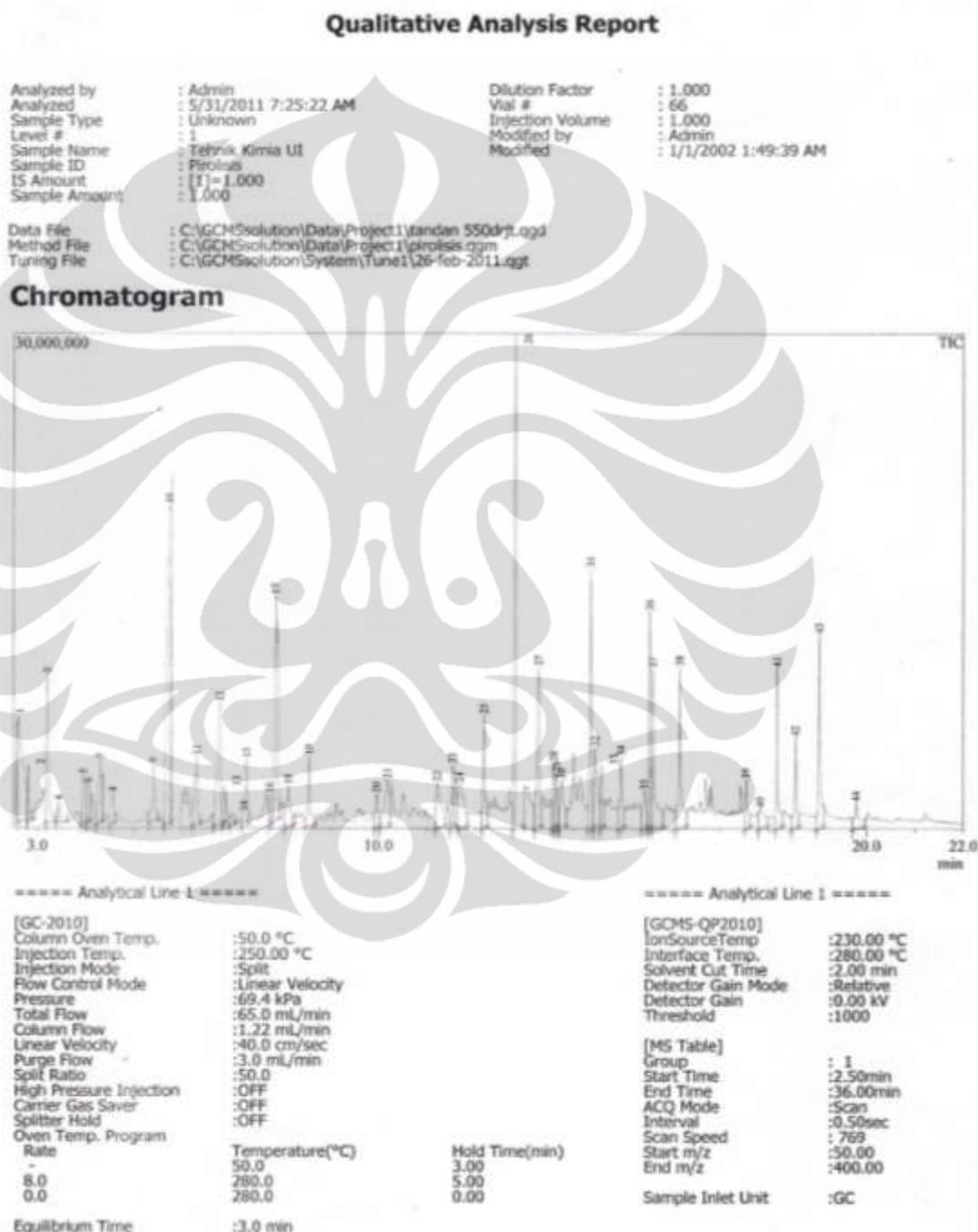


**Gambar** Peralatan penelitian “*fluidized bed reactor*”

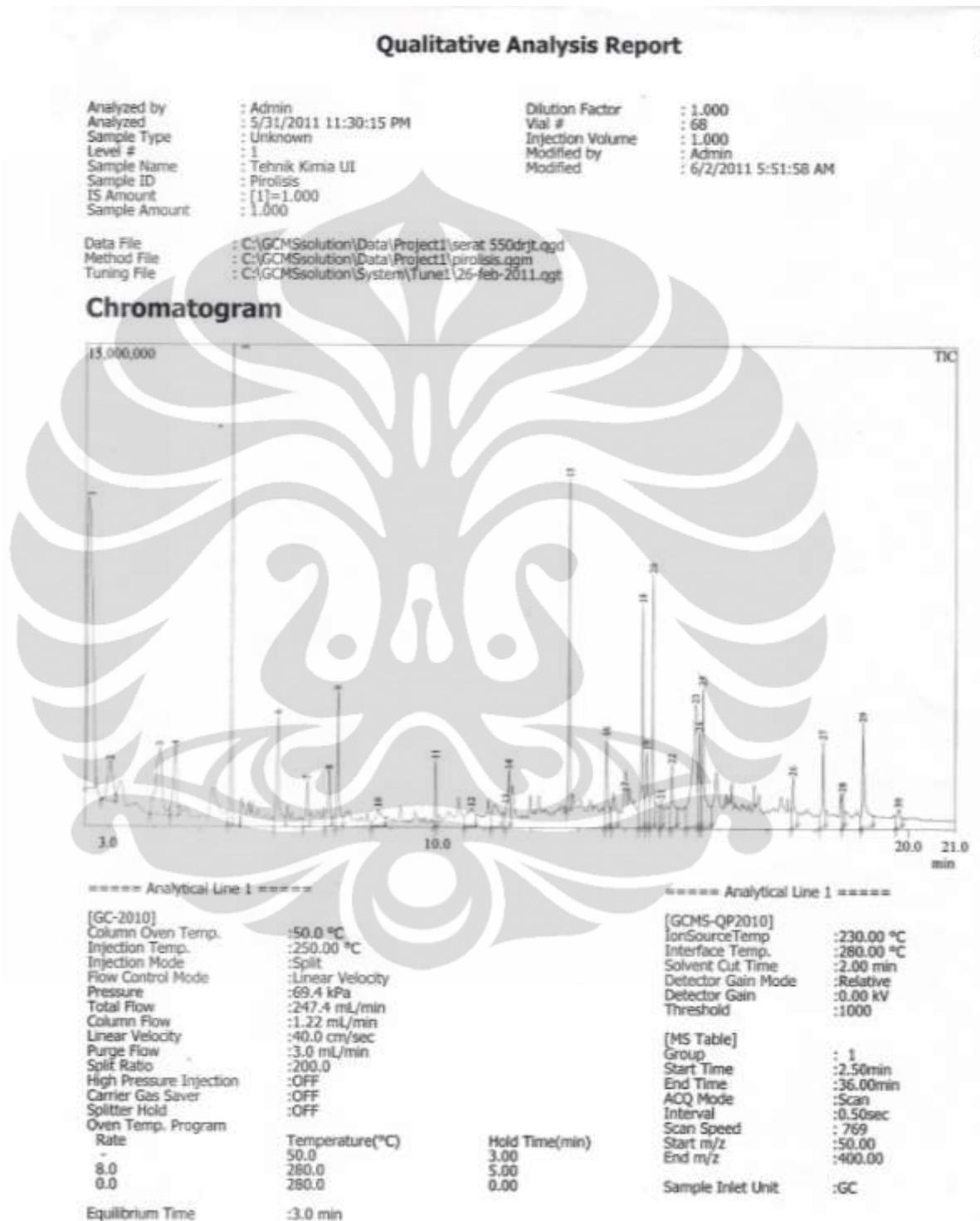
## LAMPIRAN4

### HASIL GC-MS PRODUK CAIR

#### 4.1 GC-MS Biooil Umpan Tandan Suhu 550°C



## 4.2 GC-MS Biooil Umpan Serat Suhu 550°C



### 4.3 GC-MS Biooil Umpan Cangkang Suhu 550°C

