



## BAB II

### URAIAN DAN PEMILIHAN PROSES

#### II.1 Macam-Macam Proses

Dalam memproduksi fenol dari bahan organik (biomassa) terdapat 2 tahapan utama, yaitu :

- a. Proses biomassa menjadi Bio-oil, yang mana pada proses ini dapat dilakukan dengan dua proses yaitu :
  - 1) *Hydrothermal liquefaction*
  - 2) Pirolisis
- b. Proses ekstraksi fenol dari Bio-oil

##### II.1.1 Hydrothermal Liquefaction

*Hydrothermal liquefaction* (HTL), adalah proses depolimerisasi termokimia dalam reaktor tertutup untuk mengubah biomassa basah menjadi minyak mentah dan bahan kimia pada suhu sedang (200 °C-400°C) dan tekanan tinggi (10-25 MPa) (Zhang, 2018). Proses diawali dengan pencampuran biomasa lignin-selulosa, pelarut campuran, dan katalis. Sebagian besar aplikasi *hydrothermal liquefaction* beroperasi pada suhu antara 250-550°C dan tekanan tinggi 5-25 MPa serta menggunakan katalis selama 20-60 menit, meskipun suhu yang lebih tinggi atau lebih rendah dapat digunakan untuk mengoptimalkan hasil gas atau cairan secara berturut-turut. Pada suhu dan tekanan tersebut, air yang ada dalam biomassa menjadi subkritis atau superkritis, tergantung pada kondisi, dan bertindak sebagai pelarut, reaktan, dan katalis untuk memfasilitasi reaksi biomassa menjadi Bio-oil (Elliot, 2007).

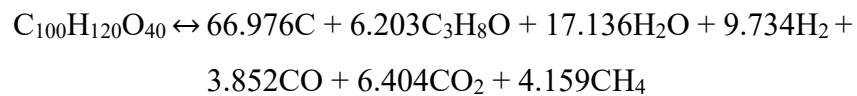
Proses *hydrothermal* dibagi menjadi tiga proses berdasarkan kondisi operasinya. Pada suhu di bawah 520 K dikenal dengan *hydrothermal carbonization*. Produk utama pada proses ini adalah *hydrochar*. Pada suhu sedang yang berkisar antara 520 K dan 647 K proses ini dikenal dengan *hydrothermal liquefaction*, yang mana hasil dari proses ini adalah cairan yang berupa *biocrude*. Pada suhu yang tinggi di atas 647 K disebut dengan proses *hydrothermal gasification* yang



menghasilkan gas sintesis (Elliot, 2015). *Hydrothermal liquefaction* memiliki beberapa kekurangan, antara lain biaya modal yang tinggi karena memerlukan peralatan khusus dan korosi yang parah sehingga memerlukan pemeliharaan karena kondisi reaksi yang parah (Zakaria et al, 2023).

### II.1.2 Pirolisis

Pirolisis adalah dekomposisi termokimia biomassa menjadi berbagai macam produk yang bermanfaat. Teknik pirolisis mengonversikan biomassa menjadi bahan bakar padat (char), produk gas (syngas), dan liquid (Bio-oil) tanpa adanya oksigen didalam reaktor. Reaksi yang terjadi pada proses pirolisis adalah:



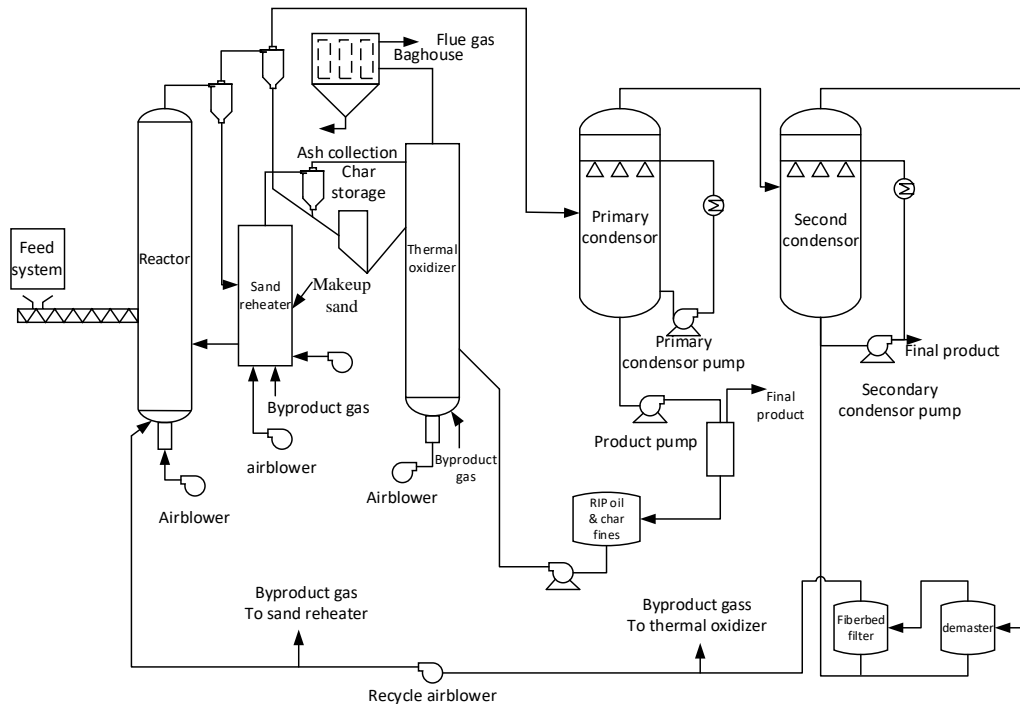
(Benanti, E., et al 2011)

Berikut adalah jenis pirolisis dan perbedaannya:

Tabel II.1 Perbedaan Jenis Pirolisi

Proses	Suhu Reaksi (°C)	Heating Rate	Ukuran Bahan Baku	Hasil (%)
<i>Slow pyrolysis</i>	300-550	<50°C/min (0.1-0.8°C/s)	<i>Briquette/ whole</i>	Bio-oil :20-50 Biochar : 25-35 Gas : 20-50
<i>Intermediate pyrolysis</i>	300-450	200-300°C/min (3-5°C/s)	<i>Coarse/ chopped</i>	Bio-oil : 35-50 Biochar : 25-40 Gas : 20-30
<i>Fast pyrolysis</i>	300-1000	10-1000°C/s	<i>Finely ground</i>	Bio-oil : 60-75 Biochar : 10-25 Gas : 10-30

Berdasarkan ketiga metode pirolisis, *fast pyrolysis* menghasilkan presentase Bio-oil yang paling tinggi. Bio-oil yang dihasilkan banyak mengandung fenol, asam dan ester, alkana, serta *polycyclic aromatic hydrocarbon* (Nury,2022). Berikut untuk diagram alir pembuatan Bio-oil dari biomassa dengan metode *fast pyrolysis*.

Gambar II.1 Pembuatan Bio-oil dari Biomassa dengan Metode *Fast Pyrolysis*

(Patent No: US006485841B1, 2002)

Berdasarkan gambar II.1, feed masuk (biomassa) dimasukkan ke dalam fluidized bed reaktor yang memanaskan biomassa hingga mencapai suhu pirolisis, di mana proses dekomposisi terjadi. Gas yang terkondensasi, gas yang tidak terkondensasi, dan char keluar dari reaktor dan masuk ke dalam cyclone untuk memisahkan antara char dan gas. Char yang dihasilkan ditampung di tempat penampungan char, sedangkan gas dari hasil cyclone masuk ke dalam gas kondensor untuk memisahkan antara gas yang terkondensasi dengan gas yang tidak terkondensasi. Gas yang terkondensasi berubah fase menjadi liquid, yang biasa disebut Bio-oil. Sedangkan gas yang tidak terkondensasi dilakukan proses recycle untuk digunakan sebagai bahan bakar pemanasan gas yang digunakan di reaktor pirolisis. Mekanisme proses pirolisis yakni sebagai berikut :

1. Pengerinan ( $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), selama fase awal pemanasan biomassa pada suhu rendah, uap air dan sebagian air yang terkandung dilepaskan. Uap air akan menguap dan panas masuk ke dalam biomassa. Jika kelembapannya tinggi, air



yang terdapat di dalam biomassa membantu meleburkan fraksi lignit, yang membeku pada pendinginan berikutnya.

2. Tahap awal (100°C-300°C), tahap ini dehidrasi eksotermik biomassa terjadi dengan pelepasan air dan gas dengan berat molekul rendah seperti CO dan CO<sub>2</sub>.
3. Tahap menengah (200 °C). Pada tahap ini merupakan tahap pyrolysis yang utama dan berlangsung pada kisaran suhu 200 °C-600°C. Sebagian besar uap diproduksi pada tahap ini. Molekul besar partikel biomassa terurai menjadi arang, gas yang dapat terkondensasi, dan gas yang tidak dapat terkondensasi.
4. Tahap akhir (~ 300 °C- 900 °C). Tahap akhir pirolisis melibatkan tahap sekunder perengkahan zat-zat yang mudah menguap menjadi arang dan gas-gas yang tidak dapat terkondensasi. Gas yang dapat terkondensasi, jika dikeluarkan dengan cepat dari proses pirolisis akan mengembun di luar reaktor sebagai tar atau Bio-oil (Basu, 2013).

Berdasarkan proses biomassa menjadi Bio-oil dapat dilakukan perbandingan sebagai berikut :

Tabel II.2 Kelebihan dan Kekurangan *Hydrothermal Liquefaction* dan Pirolisis

	<b>Pirolisis</b>	<b><i>Hydrothermal Liquefaction</i></b>
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"><li>- Regenerasi katalis mudah (tanpa pembongkaran)</li><li>- Distribusi suhu seragam</li><li>- Besarnya luas permukaan reaksi</li><li>- Suhu proses yang tinggi sehingga memudahkan proses perengkahan</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Energi tinggi dan efisien dalam pemisahan</li><li>- Dapat digabungkan dengan metode lain</li><li>- Dapat menggunakan berbagai jenis material</li></ul>
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ukuran partikel bahan mentah yang kecil</li><li>- Pemisahan arang dari bahan material</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Korosif</li><li>- Terjadi pembentukan kerak</li><li>- Memerlukan modal investasi yang tinggi</li><li>- Dapat terjadi penyumbatan</li><li>- Sulit untuk dilakukan regenerasi katalis</li></ul>



## II.2 Pemilihan Proses

Adapun uraian-uraian pertimbangan dalam pemilihan proses yang akan digunakan yaitu :

Tabel II.3 Perbandingan *Hydrothermal Liquefaction* dengan Pirolisis

No.	Parameter	<i>Hydrothermal Liquefaction</i>	Pirolisis	Referensi
1.	Bahan Baku	Biomassa basah	Biomassa kering	<i>Hydrothermal liquefaction</i> : (Katongtuang, 2022) <b>Pirolisis</b> : (Basu, 2013)
2.	Tekanan operasi	10-25 Mpa	1 bar	<i>Hydrothermal liquefaction</i> : (Katongtuang, 2022) <b>Pirolisis</b> : (Basu, 2013)
3.	Suhu operasi	200 °C-400°C	300 °C-1000 °C	<i>Hydrothermal liquefaction</i> : (Katongtuang, 2022) <b>Pirolisis</b> : (Basu, 2013)
4.	Hasil Bio-oil	50%	60%-75%	<i>Hydrothermal liquefaction</i> : (Katongtuang, 2022) <b>Pirolisis</b> : (Basu, 2013)

Berdasarkan tabel II.3 dapat disimpulkan bahwa proses biomassa menjadi Bio-oil menggunakan proses pirolisis cepat dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Konversi lebih tinggi, yaitu bio-oil yang dihasilkan mencapai 60-75%
2. Kondisi tekanan operasi yang lebih rendah sehingga membutuhkan energi yang lebih sedikit
3. Biaya peralatan murah dan mudah perawatan

## II.3 Proses Ekstraksi Fenol

Komponen Bio-oil yang dihasilkan dari proses pirolisis sangat kompleks dan sebagian komponen utama adalah fenol, asam asetat, dan hidroksi aseton. Fenol dapat dipisahkan dari Bio-oil dengan menggunakan metode ekstraksi cair-cair dengan bantuan air yang bersifat sebagai *solvent* dalam metode tersebut. Air digunakan karena merupakan pelarut yang ramah lingkungan untuk mengekstrak senyawa fenol dari bio-oil dan mempunyai ikatan hidrogen yang sangat kuat (Zullaikah, 2014). Kandungan fenol yang terdapat di dalam bio-oil merupakan hasil



dari pemecahan phenyl-propane yang terkandung di dalam lignoselulosa di biomassa. Proses pirolisis berkatalis menghasilkan fenol sebesar 35,11% (Sangthong, 2022).

#### **II.4 Katalis untuk Proses Pirolisis**

Pirolisis berkatalis adalah proses di mana biomassa dan katalis bercampur di dalam reaktor. Pada proses tersebut, gas yang dihasilkan masuk dengan cepat ke dalam pori-pori katalis. Pada proses pirolisis berkatalis gas yang dihasilkan meningkat lebih cepat dibandingkan dengan proses pirolisis sederhana yang mana diproses pirolisis sederhana waktu tinggalnya selama 5 detik sedangkan penggunaan katalis pada proses pirolisis, waktu tinggal untuk biomassa di dalam reaktor kurang dari 5 detik (Wang, 2022). Katalis ZSM-5 banyak digunakan sebagai katalis untuk pirolisis biomassa. Katalis ZSM-5 sangat baik digunakan pada proses pirolisis biomassa dikarenakan dapat meningkatkan komponen aromatic di dalam kandungan Bio-oil. Selain itu, katalis ini tahan pada suhu yang tinggi (Ding, 2020).

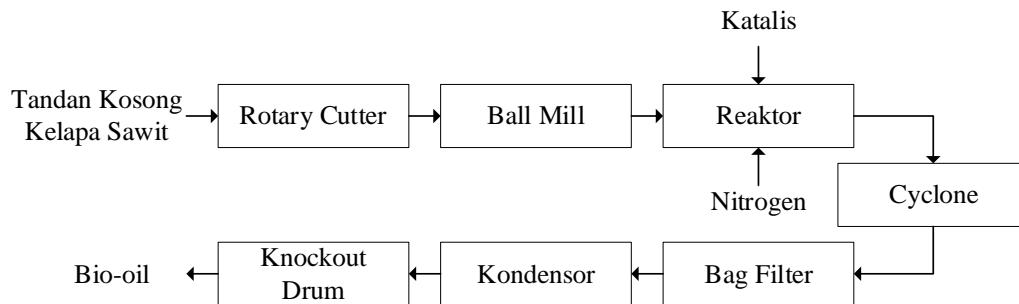
#### **II.5 Uraian Proses**

Pembuatan prarancangan pabrik fenol dari tandan kosong kelapa sawit dengan proses pirolisis berkatalis dapat dilihat secara lengkap pada diagram alir yang tertera di bawah ini. Tahapan-tahapan pembuatan fenol dibagi menjadi 2 tahapan, antara lain:

1. Proses pirolisis tandan kosong kelapa sawit menjadi Bio-oil
2. Proses pengambilan senyawa fenol dari Bio-oil



### II.5.1 Proses Pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-oil



Gambar II.2 Diagram Alir Proses Pirolisis TKKS Menjadi Bio-oil

Proses pembuatan fenol dari tandan kosong kelapa sawit diawali dengan mengubah lignin selulosa menjadi Bio-oil

#### 1. Tahap penyiapan bahan baku

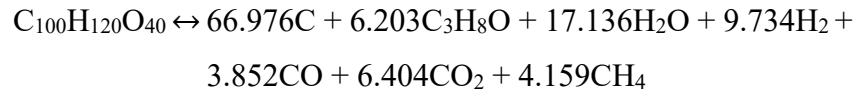
Bahan baku tandan kosong kelapa sawit diambil dalam keadaan kering dengan komponen lignin 26,51%, selulosa 33,61%, hemiselulosa 19,21%, air 9%, dan abu 1,61%. Diumpangkan menuju *rotary cutter* untuk diperkecil ukurannya kemudian menuju *bucket elevator* dan diumpangkan ke *ball mill* untuk lebih diperkecil ukurannya serta dihaluskan yang bertujuan memperlebar luas permukaan untuk mempercepat reaksi yang terjadi di tahap pirolisis. Tandan kosong kelapa sawit yang telah diperkecil kemudian dilewatkan *screening* agar ukuran yang masuk ke dalam reaktor seragam.

#### 2. Proses pirolisis

Tandan kosong kelapa sawit yang telah di-*screening* diumpangkan ke dalam reaktor. Reaktor yang digunakan pada proses *fast pyrolysis* ini merupakan *fluidized bed reactor* dengan bantuan katalis. Selanjutnya nitrogen akan diumpangkan ke dalam reaktor yang berfungsi sebagai alat pembakaran pada reaktor. Tandan kosong kelapa sawit yang berada di dalam reaktor ini dipanaskan menggunakan suhu 500 °C dengan tekanan 1 atm dan melalui *jacket* reaktor. Prinsip dasar reaksi ini adalah mendekomposisi tandan kosong kelapa sawit menjadi senyawa yang lebih sederhana dan mengubah tandan kosong kelapa sawit menjadi char, abu, dan gas. Char dan abu akan di bawa ke Gudang penyimpanan char sedangkan gas akan diumpangkan ke cyclone untuk memisahkan padatan yang terikat dari campuran gas. Setelah itu diumpangkan



ke dalam bag filter untuk memisahkan padatan yang masih terikut dalam campuran gas. Gas kemudian dialirkan menuju kondensor untuk dikondensasi pada suhu 95 °C. Reaksi yang terjadi pada reaktor adalah sebagai berikut :

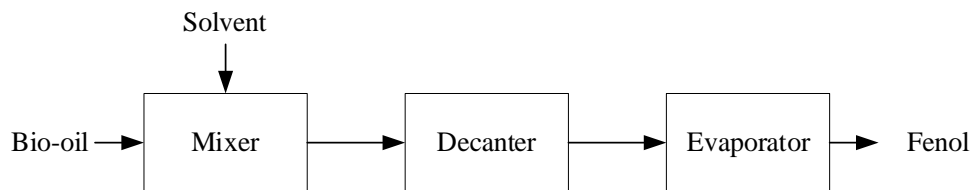


(Benanti et al, 2011)

### 3. Proses pemisahan

Tahap untuk mendapatkan Bio-oil adalah tahap pemisahan. Gas yang telah dikondensasikan dalam kondensor selanjutnya akan dialirkan menuju knock-out drum untuk dipisahkan berdasar prinsip gravitasi di mana Bio-oil akan menjadi fase liquid dan akan jatuh ke bawah, sedangkan gas yang berupa CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub> nantinya akan diumpankan ke burner.

#### II.5.2 Proses Ekstraksi Fenol dari Bio-oil



Gambar II.3 Diagram Alir Proses Ekstraksi Fenol dari Bio-oil

Bio-oil yang dihasilkan akan dimasukkan ke dalam mixer untuk dicampurkan dengan *solvent*. Bio-oil yang sudah tercampur dengan *solvent*, selanjutnya diumpankan ke dalam decanter untuk memisahkan fenol dari Bio-oil yang tidak terlarut. Setelah itu, fenol diumpankan ke dalam evaporator untuk memurnikan fenol dengan menguapkan zat pengotor (air). Hasil dari proses evaporasi selanjutnya diumpankan ke cooler untuk menurunkan suhu dari proses evaporasi dan selanjutnya untuk disimpan ke dalam tangki penyimpanan.





## PRA RANCANGAN PABRIK

### “Pabrik Fenol dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Pirolisis Berkatalis”

Berikut perbandingan perancangan pabrik fenol terdahulu dengan pra rancangan pabrik fenol dari tandan kosong kelapa sawit dengan proses pirolisis berkatalis.

<b>Penulis</b>	<b>Alfaridzi dan Nugraha</b>	<b>Selin</b>	<b>Syafiq dan Nabila</b>	<b>Erda dan Niken</b>
<b>Tahun</b>	2019	2021	2023	2024
<b>Institusi</b>	Universitas Islam Indonesia	Universitas Bosowa	Universitas Islam Indonesia	UPN “Veteran” Jawa Timur
<b>Judul</b>	Prarancangan Pabrik Fenol dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Kapasitas 25.000 Ton/Tahun	Prarancangan Pabrik Fenol dari Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Kapasitas 12.000 Ton/Tahun	Prarancangan Pabrik Fenol dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Kapasitas 30.000 Ton/Tahun	Prarancangan Pabrik Fenol dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Pirolisis Berkatalis
<b>Reaktor</b>	Fluidized bed dengan menggunakan jacket	Fluidized bed dengan menggunakan jacket	Fluidized bed dengan menggunakan coil	Fluidized bed dengan menggunakan jacket
<b>Kelebihan</b>	Pembersihan dan perawatan yang mudah		-	Pembersihan dan perawatan yang mudah
<b>Kekurangan</b>	Kinerja perpindahan panas yang lebih rendah		Proses pembersihan reactor yang susah	Kinerja perpindahan panas yang lebih rendah



PRA RANCANGAN PABRIK

“Pabrik Fenol dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Proses Pirolisis Berkatalis”

<b>Pemisahan Padatan dengan Gas</b>	Cyclone	Cyclone dan bag filter
<b>Kelebihan</b>	Sederhana	Lebih optimal dalam memisahkan partikel padatan
<b>Kekurangan</b>	Kurang optimal dalam pemisahan padatan yang terikut gas	Alat yang dibutuhkan lebih banyak
<b>Pemisahan cairan dengan gas</b>	Flash drum	Knockout drum
<b>Kelebihan</b>	Mudah dioperasikan	Perlindungan untuk tahap selanjutnya
<b>Kekurangan</b>	Pemisahan fraksi yang tidak sempurna	Memerlukan perawatan yang rutin