

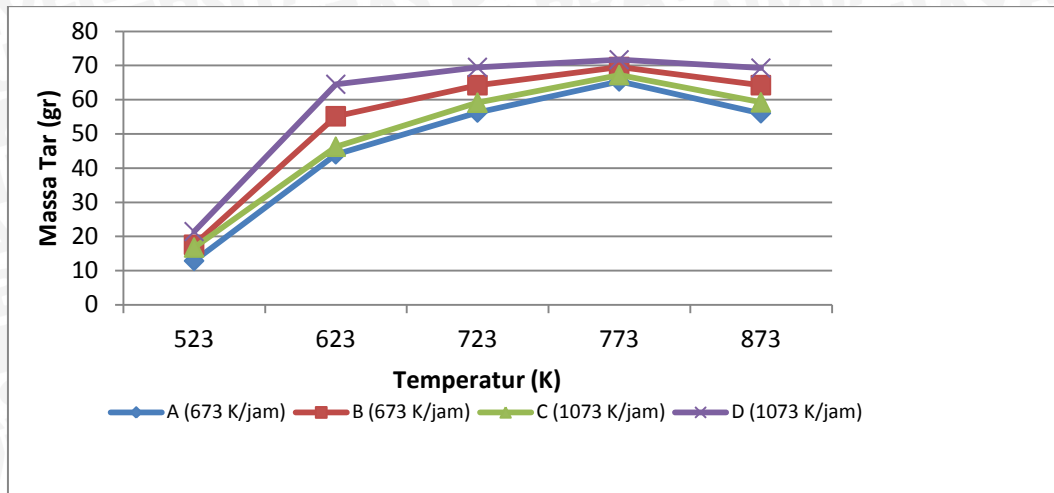
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

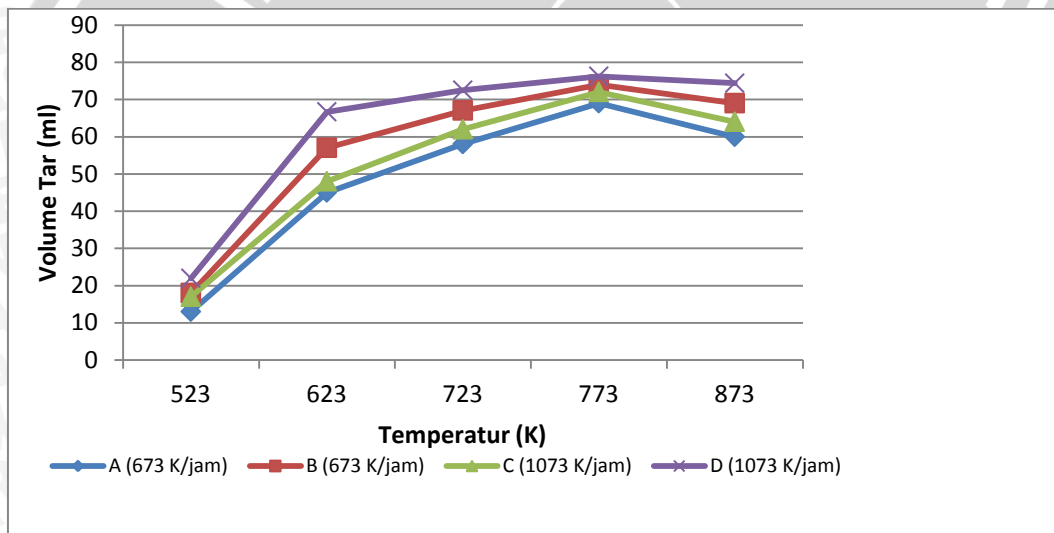
Untuk meningkatkan hasil produk *tar*, Danarto, 2010 meneliti tentang pengaruh prosentase katalisator zeolit terhadap serbuk kayu. Proses pirolisis menggunakan tungku tipe *fix bed* yang dilengkapi dengan kondesor. Temperatur yang digunakan konstan yaitu 700°C. Massa kayu yang digunakan dalam penelitian sebesar 200 gram. Katalis yang digunakan berupa serbuk dan bongkahan dengan variasi massa yaitu pada katalis serbuk variasi massa 50 gram, 100 gram, 150 gram, dan 200 gram yang dicampur langsung dengan biomassa serbuk kayu dalam reaktor serta katalis bongkahan dengan variasi massa sebesar $\frac{1}{4}$ bagian tabung katalis 423,82 gram, $\frac{1}{2}$ bagian tabung 646,60 gram, $\frac{3}{4}$ bagian tabung katalis sebesar 904,25 gram dan 1 bagian tabung katalis sebesar 1143,67 gram. Dalam penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa pirolisis dengan katalisator zeolit dalam reaktor jumlah *tar* yang terbentuk lebih banyak dibanding dengan tanpa katalis dan semakin banyak massa zeolit dalam reaktor saat pirolisis maka *tar* yang terbentuk semakin banyak. Hal ini disebabkan katalis dapat meningkatkan reaksi dekomposisi biomassa sehingga semakin banyak rantai hidrokarbon panjang yang terdekomposisi menjadi rantai hidrokarbon rantai pendek. Sedangkan pada penggunaan katalis bongkahan hasil *tar* yang terbentuk lebih sedikit dengan tanpa katalis dan semakin besar massa katalis bongkahan saat proses pirolisis maka semakin sedikit *tar* yang terbentuk. Hal ini dikarenakan serbuk kayu tidak bersentuhan langsung dengan katalis sehingga katalis zeolit tidak berfungsi untuk meningkatkan laju dekomposisi pada serbuk kayu dan sebagian gas hasil pirolisis sebelum dikondensasi menempel terlebih dahulu ke katalis zeolit sehingga sebagian gas tersebut tidak terkondensasi di kondesor karena terserap oleh zeolit.

Kemudian Kumara, 2015 melakukan penelitian dengan pengaruh variasi heating rate dan temperatur terhadap hasil produk *tar* pada serbuk kayu mahoni dengan katalis zeolit. Dalam penelitian tersebut massa serbuk kayu yang digunakan sebesar 200 gram dan katalisator zeolit yang digunakan sebesar $\frac{1}{3}$ dari massa kayu. Dalam penelitian tersebut didapatkan data sebagai berikut:



Keterangan : A dan C massa *tar* tanpa zeolit
B dan D massa *tar* dengan zeolit

Gambar 2.1 Grafik hubungan penambahan massa *tar* dengan temperatur
Sumber: Kumara, 2015



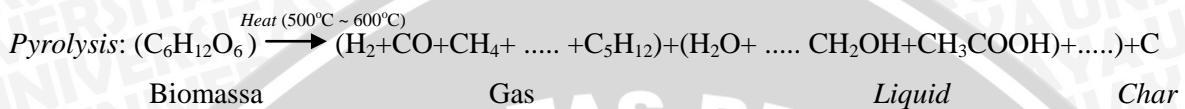
Keterangan : A dan C volume *tar* tanpa zeolit
B dan D volume *tar* dengan zeolit

Gambar 2.2 Grafik hubungan penambahan volume *tar* dengan temperatur
Sumber: Kumara, 2015

Pada penelitian tersebut terlihat bahwa semakin besar temperatur, *heating rate* baik dengan zeolit maupun tanpa zeolit maka massa dan volume *tar* yang terbentuk semakin besar hal ini dikarenakan semakin besar temperatur maka semakin banyak struktur ikatan hidrokarbon panjang yang terpecah menjadi struktur hidrokarbon pendek. Hasil pirolisis biomassa dengan katalis lebih besar dibanding dengan tanpa katalis, hal ini disebabkan pirolisis dengan katalis dapat meningkatkan reaksi dekomposisi biomassa sehingga semakin banyak rantai hidrokarbon panjang yang terdekomposisi menjadi rantai hidrokarbon rantai pendek.

2.2 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses dekomposisi zat dengan suhu tinggi yang digunakan untuk mendapatkan energi hidrokarbon dimana oksidatornya berupa gas inert (N_2). Selama pirolisis, molekul-molekul hidrokarbon yang memiliki rantai panjang yang rumit dipecah menjadi molekul yang lebih kecil dan sederhana dalam bentuk *char*, *liquid*/ cair, dan gas. Pada dasarnya hasil pirolisis terdapat gas yang dapat dikondensasikan (*liquid*/ cair), gas yang tidak dapat dikondensasikan (gas), dan *char*.



Sumber: JIE, 2002

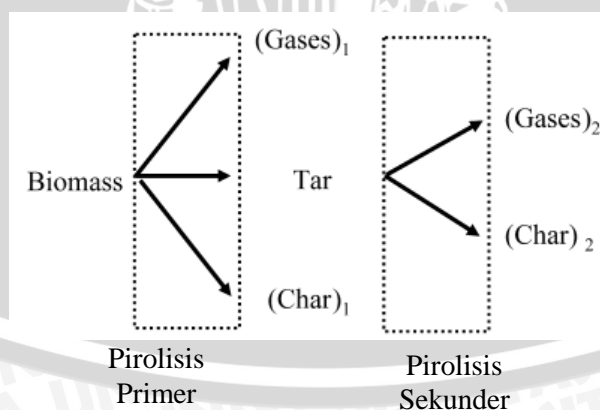
Dalam proses pirolisis terbagi menjadi dua tahap, yaitu:

a. Pirolisis primer

Pirolisis primer adalah pirolisis yang terjadi pada bahan baku (umpan). Pada pirolisis primer, hasil yang terbentuk adalah gas₁, tar, dan char₁. Char terbentuk akibat dari energi panas yang mengakibatkan terjadinya oksidasi pada biomassa sehingga senyawa karbon yang kompleks terurai menjadi char atau arang.

b. Pirolisis sekunder

Pirolisis sekunder merupakan lanjutan dari pirolisis primer akibat peningkatan temperatur. Pada pirolisis sekunder tar yang terbentuk pada pirolisis primer sebagian menjadi gas₂ dan char₂.



Gambar 2.3 Tahap-tahap pirolisis

Sumber: Tanoue, 2007

Berdasarkan pada pemanasnya, pirolisis dibagi menjadi dua, yaitu:

a. Pirolisis konvensional

Pirolisis konvensional adalah pirolisis yang sumber pemanasnya langsung dari aliran listrik dan ini yang paling banyak digunakan saat ini. Dalam penelitian ini proses pirolisis konvensional yang dipakai saat pengujian.

b. Pirolisis *microwave*

AIST, Jepang telah mengembangkan pirolisis dengan *microwave*. *Microwave* bisa memanaskan kayu dari sisi dalam dan dengan ukuran kayu yang besar. Pirolisis *microwave* adalah proses pirolisis yang menggunakan gelombang mikro sebagai media pemanasnya. Gelombang mikro adalah gelombang elektromagnetik dengan frekuensi yang sangat tinggi, pada umumnya sebesar 2450 MHz dengan panjang gelombang 12,24 cm. Radiasi gelombang mikro yang diserap suatu benda yang akan menghasilkan efek pemanasan pada benda tersebut dan hal inilah yang menyebabkan suatu material atau tungku tersebut menjadi panas tanpa disertai gas oksigen (O_2) dalam proses dekomposisinya.

Pirolisis Berdasarkan temperatur dan waktu tinggal (*residence time*) dibedakan menjadi tiga, yaitu:

a. *Slow pyrolysis*

Hasil utama pirolisis lambat adalah arang (*char*), senyawa organik dan *non-combustible* seperti CO_2 , dan uap air akan hilang pada suhu 100-200°C. Pada suhu di atas 200°C terjadi pemecahan struktur komponen organik menjadi gas dengan massa molekul yang rendah dan pada suhu 500°C *char* karbon semua *volatile* menghilang dan menjadi *char*. Ciri-ciri pirolisis lambat adalah waktu pemanasan yang lama, temperatur yang kecil dan laju pemanasan (*heating rate*) yang lambat yaitu kurang dari 0,1 – 2°C/detik (Bridgwater, 2005, Wang et al, 2005)

b. *Fast pyrolysis*

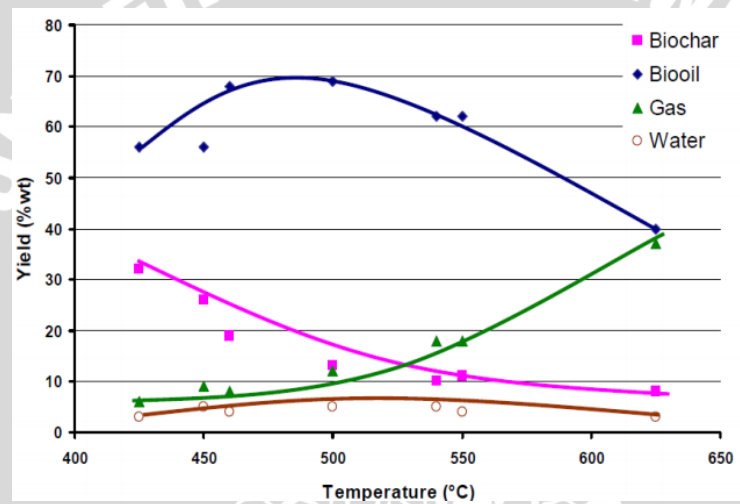
Biomassa dipanaskan sampai suhu tinggi tanpa adanya oksigen (O_2) atau dalam keadaan inert, biasanya produk hasil pirolisis cepat 60 %-70 % berupa produk bio-oil, 15 %-20 % *char*, dan 10 %-20 % berupa *non-condensable gas* dan kandungannya tergantung dari biomassa yang digunakan (Mohan et al, 2005). Ciri-ciri pirolisis cepat adalah laju pemanasan (*heating rate*) yang digunakan 500 hingga 10⁵ °C/detik dengan ukuran spesimen yang digunakan < 2mm. Ini dilakukan agar panas tersebar merata dan waktu pemanasan yang relatif cepat yaitu 0,5-5 detik. Untuk menghasilkan produk cair yang maksimal, temperatur yang digunakan sebesar 500°C, ukuran partikel sebesar <

2mm, kelembaban <10 % dan uap harus segera dipisahkan dari *char* agar tidak terjadi proses sekunder sehingga menyebabkan terbentuknya gas (Bridgwater, 2005, Wang et al, 2005)

c. *Flash pyrolysis*

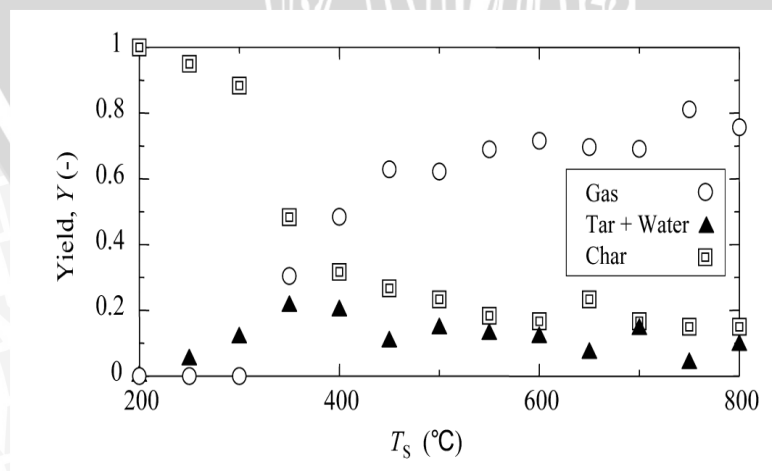
Ciri *flash pyrolysis* adalah laju pemanasan (*heating rate*) yang sangat cepat yaitu lebih dari 10^5 °C/detik, temperatur yang digunakan antara 450°C sampai 1000°C dan waktu tinggal gas yang sangat cepat yaitu kurang dari 1 detik. Dibanding pada *slow pyrolysis*, pada *flash pyrolysis* dihasilkan *char* dan gas yang lebih sedikit dan dihasilkan produk *tar* lebih banyak (Bridgwater, 2005, Wang et al, 2005)

Kecenderungan produk proses pirolisis dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.4 Hubungan temperatur dengan produk akhir proses pirolisis *yield* biomassa (%wt)

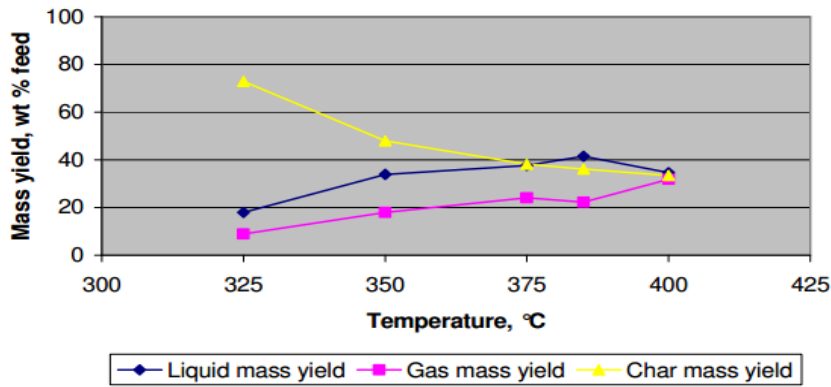
Sumber: Jahirul et al, 2012



Gambar 2.5 Hubungan temperatur dengan produk akhir proses pirolisis *yield* biomassa (-)

Sumber: Tanoue et al, 2007

Intermediate pyrolysis of powdered straw: Haloclean process yields



Gambar 2.6 Hubungan temperatur dengan produk akhir proses pirolisis *mass yield* biomassa wt% *feed*

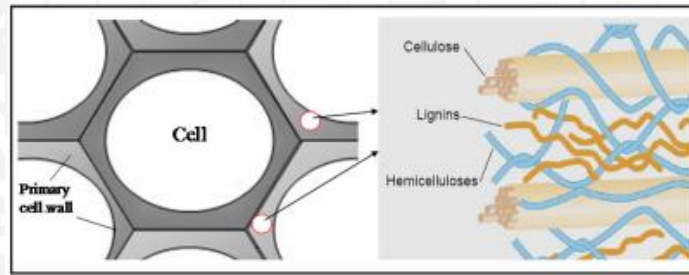
Sumber: Hornung, 2008

Dari grafik di atas terlihat bahwa semakin besar temperatur pirolisis maka kecenderungan hasil produk *char* semakin kecil, produk yang berupa gas kecenderungannya semakin besar, dan produk *tar* kecenderungannya semakin besar akan tetapi pada suhu tertentu produk *tar* akan mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan hasil produk *tar* pada suhu tersebut terjadi tahap pirolisis sekunder sehingga sebagian *tar* yang terbentuk pada pirolisis primer akan menjadi gas dan *char*.

2.3 Biomassa

Biomassa adalah salah satu sumber energi alternatif yang ramah lingkungan yang merupakan zat organik. Yang termasuk golongan biomassa yaitu limbah pertanian, limbah perhutanan, tanaman air, kotoran binatang, dan agro industri. Biomassa dapat diubah menjadi biooil dengan menggunakan proses termal, biologi, dan fisika. Biomassa mengandung sulfur, nitrogen, dan abu dalam jumlah yang sedikit akan tetapi pembakaran dengan biooil tidak menghasilkan gas yang berbahaya dalam jumlah yang banyak seperti nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), dan jelaga jika dibanding dengan pembakaran dengan menggunakan energi fosil.

Biomassa tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Struktur tersebut akan terurai atau terdekomposisi pada saat proses pirolisis berlangsung.



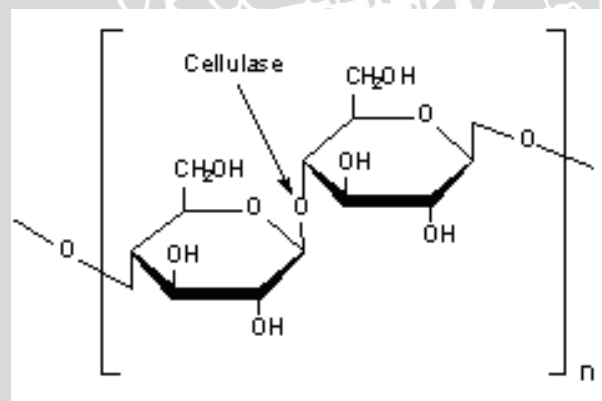
Gambar 2.7 Skema komponen utama penyusun dinding sel biomassa
 Sumber: Shen et al, 2013

2.3.1 Selulosa

Selulosa merupakan polisakarida yang tersusun dari D-glukosida. Selulosa terbentuk oleh ± 10.000 monomer glukosa yang diikat dengan oleh ikatan 1,4- β -glukosida. Setiap monomer glukosa memiliki tiga gugus hidroksil ($-OH$). Sebanyak 36 molekul selulosa terikat bersama-sama oleh ikatan hidrogen membentuk seberkas fibril elementer. Fibril elementer bergabung membentuk mikrofibril, kemudian mikrofibril bergabung membentuk fibril dan akhirnya membentuk serat-serat selulosa (Sjostrom, 1993).

Selulosa adalah bagian terbesar penyusunan kayu, hampir setengah penyusun kayu adalah selulosa baik dalam kayu keras (*hard wood*) atau kayu lunak (*soft wood*).

Rumus molekul selulosa adalah $(C_6H_{12}O_6)_n$, derajat polimerasinya ditunjukkan oleh huruf n dengan nilai kisaran antara beberapa ribu sampai puluhan ribu (JIE, 2002).



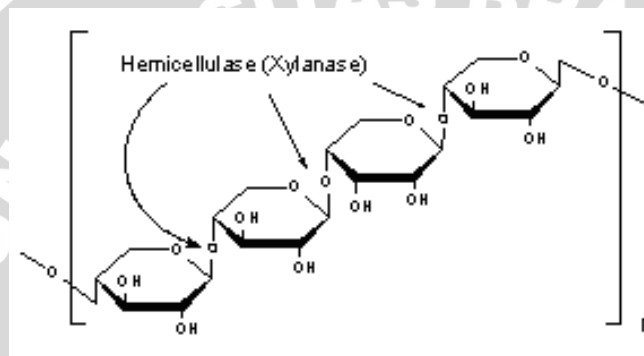
Gambar 2.8 Selulosa
 Sumber : Fengel et al, 1995

2.3.2 Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah polisakarida dimana unit-unitnya tersusun atas monosakarida. Hemiselulosa adalah heteropolimer dengan berbagai monomer gula, dan rantai molekulnya lebih pendek dari selulosa. Hemiselulosa merupakan senyawa amorf, karena banyak percabangan pada rantai molekulnya. Selain ketiga komponen tersebut terdapat juga zat-

zat dalam kayu yang bukan penyusun struktur kayu yang dikelompokkan sebagai zat ekstraktif (Walker, 1993).

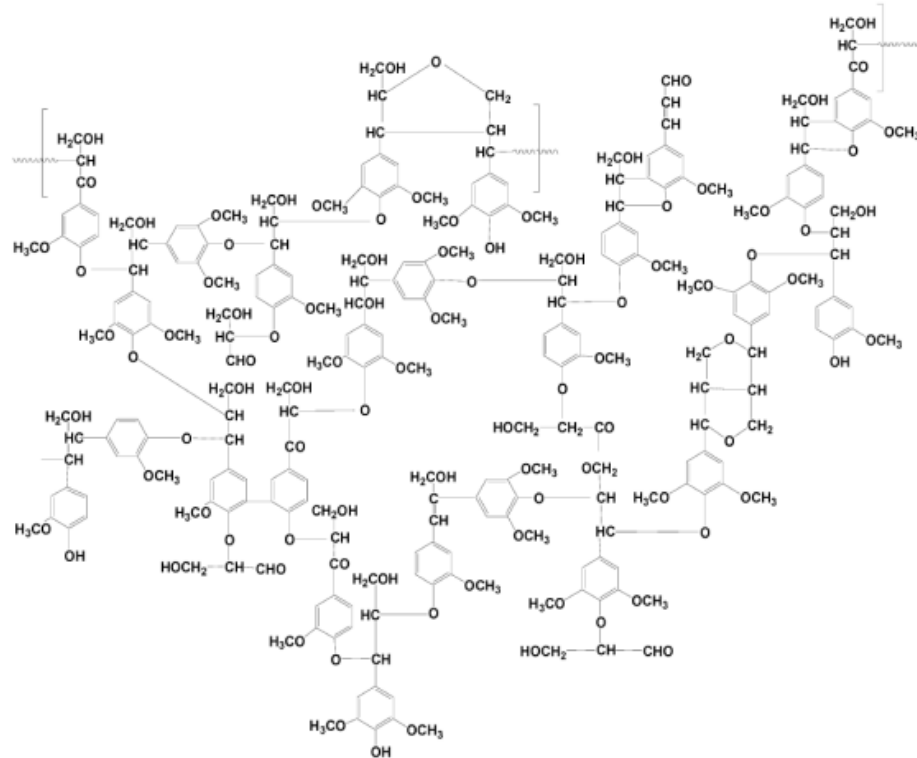
Dalam tumbuhan fungsi hemiselulosa hampir sama dengan selulosa yaitu sebagai bahan pendukung pada dinding sel biomassa. Jumlah monosakarida karbon-6 lebih sedikit dibanding monosakarida karbon-6 dan rumus molekul hemiselulosa rata-ratanya adalah $(C_5H_8O_4)_n$. Hemiselulosa memiliki derajat polimerisasi berkisar antara 50 hingga 200, oleh sebab itu derajat polimerisasinya lebih kecil dibanding selulosa sehingga hemiselulosa lebih mudah terurai dibanding selulosa, serta hemiselulosa mudah terlarut dalam larutan alkali.



Gambar 2.9 Hemiselulosa
Sumber : Fengel et al, 1995

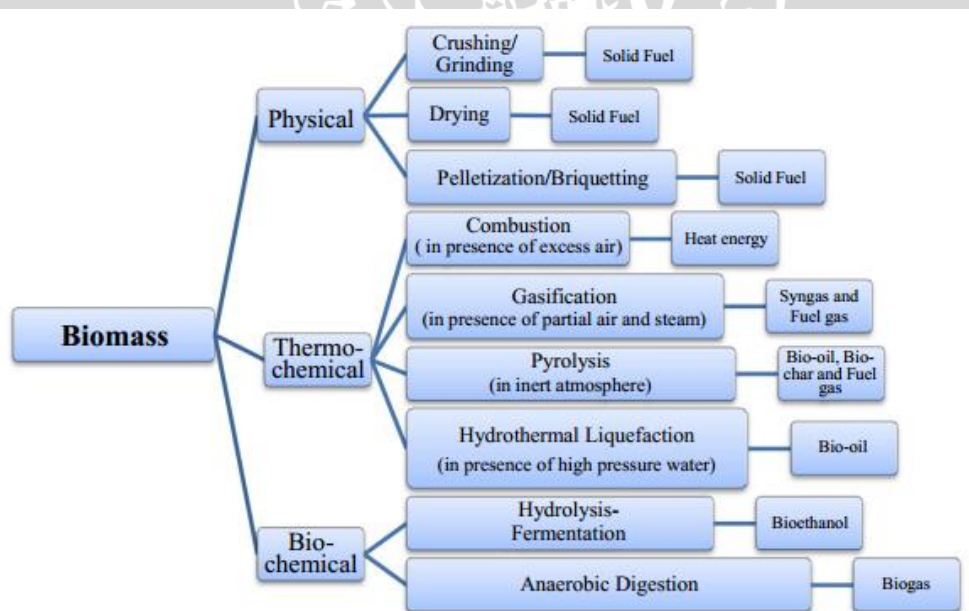
2.3.3 Lignin

Lignin adalah suatu polimer senyawa aromatik yang sebagian besar tidak larut dalam kebanyakan pelarut organik. Lignin tidak dapat diuraikan menjadi satuan monomer, karena bila dihidrolisis, monomer sangat cepat teroksidasi dan segera terjadi reaksi kondensasi. Pada kayu, lignin umumnya terdapat di daerah lamela tengah yang berfungsi sebagai pengikat antar sel serta menguatkan dinding sel kayu. Lignin adalah senyawa amorf total (non kristalin).



Gambar 2.10 Lignin
Sumber: Bozic, 2009

Untuk mendapatkan bioenergi yang bersumber dari biomassa dapat dilakukan dengan berbagai proses, yaitu seperti berikut:



Gambar 2.11 Macam-macam konversi biomassa menjadi bioenergi
Sumber: Sharma et al, 2014

- *Physical* = Proses konversi energi biomassa menjadi *solid*



fuel adalah dengan cara memberikan perlakuan fisik pada biomassa.

- *Thermo-chemical* = Proses konversi biomassa dengan *thermo-chemical* atau dengan cara pemberian panas pada biomassa sehingga berubah ke bentuk energi lain sesuai dengan tipe perlakuan *thermo-chemical*nya.
- *Bio-chemical* = Proses konversi biomassa dengan *bio-chemical* atau dengan cara pelibatan bakteri dalam proses dekomposisi biomassa sehingga berubah ke bentuk energi lain sesuai dengan tipe perlakuan *thermo-chemical*nya. Pada proses *hydrolysis-fermentation* biomassa diubah menjadi energi *bioethanol* sedangkan pada proses *anaerobic digestion* biomassa diubah menjadi energi biogas.

2.4 Kayu Mahoni

Kayu mahoni merupakan salah satu biomassa yang jumlahnya banyak. Berdasarkan data potensi mahoni di Jawa dan di luar Jawa mencapai 45.259.541 batang dan sebanyak 9.479.192 batang yang siap tebang, atau setara dengan 2,4 juta m³ (Sukadaryati, 2006).

Kayu mahoni memiliki kandungan selulosa 42,86%, pentosan (hemiselulosa) 14,37 %, dan lignin 23,75% (Batubara, 2009).

Struktur kimia pirolisis kayu akan mengalami penguraian atau dekomposisi ketika pada suhu sebagai berikut:

- Hemiselulosa terdegradasi pada 200-260°C
- Selulosa pada 240-350°C
- Lignin pada 280-500°C

Degradasi termal dapat dilakukan dengan adanya pelarut dalam jumlah rendah sehingga reaksi berjalan lebih cepat (Sjostrom, 1993).

Berdasarkan penyusunan komposisi unsumnya, kayu tersusun seperti tabel 2.1:

Tabel 2.1 Komposisi unsur penyusun kayu

Unsur	Berat Kering (%)
Karbon	49
Hidrogen	6
Oksigen	44
Nitrogen	Sedikit
Abu	0,1

Sumber: Haygreen.J.G, 1987

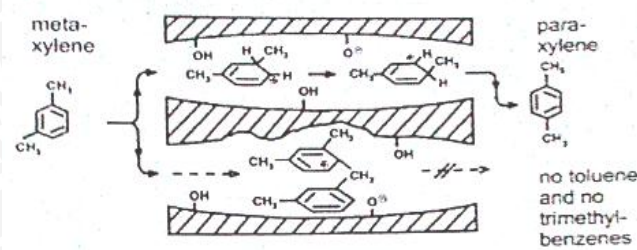
2.5 Zeolit

Zeolit adalah senyawa zat kimia alumino-silikat berhidrat dengan kation natrium, kalium dan barium. Secara umum, zeolit memiliki molekular sruktur yang unik, dimana atom silikon dikelilingi oleh 4 atom oksigen sehingga membentuk semacam jaringan dengan pola yang teratur. Di beberapa tempat di jaringan ini, atom Silikon digantikan dengan atom Alumunium, yang hanya terkoordinasi dengan 3 atom Oksigen. Atom Alumunium ini hanya memiliki muatan 3^+ , sedangkan Silikon sendiri memiliki muatan 4^+ .

Pada prosesnya terdapat perpindahan atom (-) atau (+) dari zeolit ke biomassa. Pada biomassa terdapat ikatan atom $-OH$ dimana unsur O merekat pada unsur H dan bergerak bebas serta mudah melepas sehingga kekosongan antara unsur O dan H dapat digantikan oleh zeolit. Pada saat dekomposisi biomassa, zeolit akan memecah ikatan karbon rantai panjang menjadi ikatan karbon rantai pendek dan mudah dikondensasi menjadi minyak pirolisis/ *tar* (Danarto et al, 2010).

Proses perpindahan atom zeolit terjadi di permukaan dimana atom yang bermuatan tersebut akan menyerap energi karena adanya panas pada saat proses pirolisis berlangsung. Oleh karena itu pemutusan struktur kimia pada biomassa tidak memerlukan energi yang besar serta dapat menghasilkan jumlah *tar* dan gas yang banyak pula.

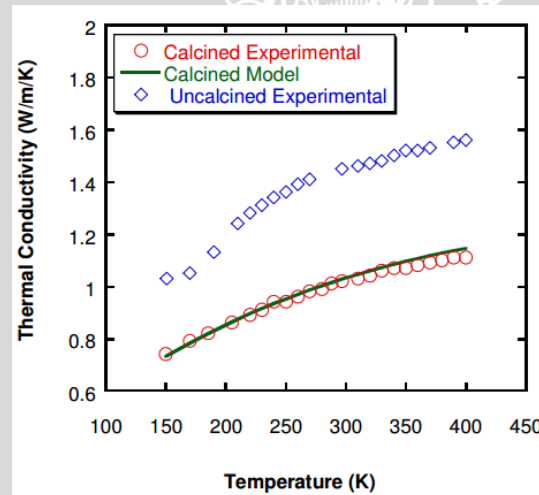
Zeolit juga sering disebut sebagai “*molecular sieve*” atau “*molecular mesh*” (saringan molekuler) karena zeolit memiliki pori-pori berukuran molekuler sehingga mampu memisahkan/menyaring molekul dengan ukuran tertentu.



Gambar 2.12 Efek pori dalam selektifitas dalam zeolit
Sumber: Weithkamp dan Puppe, 1999

Dalam proses dekomposisi, zeolit juga dapat mempercepat pemutusan rantai hidrokarbon panjang pada selulosa, hemiselulosa, dan lignin menjadi rantai hidrokarbon pendek.

Zeolit memiliki kandungan antaralain SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Cr_2O_3 , Na_2O , K_2O , dan TiO_2 . Zeolit dapat berfungsi sebagai media perambatan panas karena kandungan yang dimilikinya.



Gambar 2.13 Sifat konduktivitas termal dari zeolit MFI
Sumber: Greenstein, A.M., et al, 2006

Pada gambar tersebut terlihat bahwa semakin besar temperatur pemanasan zeolit maka konduktivitas termal yang dimiliki zeolit semakin tinggi oleh karena itu zeolit juga berfungsi sebagai media perambatan panas. Jika zeolit dijadikan sebagai katalis dalam proses pirolisis biomassa, maka proses dekomposisi termal akan berlangsung lebih cepat.

Katalis terbagi menjadi dua bagian umum, yaitu:

1. Katalis homogen

Katalis heterogen adalah katalis yang bentuk fasenya sama dengan reaktannya. Misalkan antara katalis cair dengan reaktan cair, seperti halnya asam yang dicampur dengan larutan berair.

2. Katalis heterogen

Katalis heterogen adalah katalis yang bentuk fasenya berbeda dengan reaktannya. Misalnya katalis yang berbentuk padat dengan reaktan gas. Seperti perubahan karbondioksida menjadi metana dengan menggunakan katalis Ni/Zeolite yang berbentuk padat.

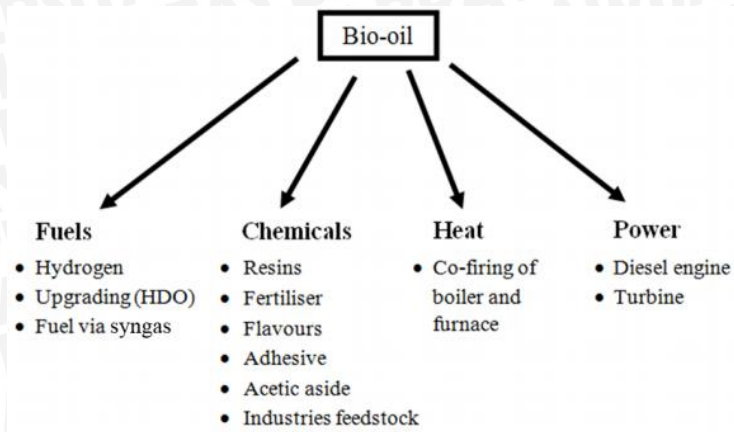
2.6 Tar

Tar merupakan salah satu produk hasil dari proses pirolisis serbuk kayu mahoni yang berwarna hitam dan berbentuk cairan. *Tar* memiliki banyak campuran senyawa. Di dalam *tar* masih terdapat uap air yang ikut terkondensasi yang jumlahnya cukup besar dan terkadang terdapat *char* yang ikut terbawa. *Tar* dan air tidak bercampur, posisi air berada di permukaan dan *tar* mengendap di bagian bawah. Nama lain dari *tar* adalah bio-oil, bio-crude oil, wood liquids, pyrolysis oil, dan liquid smoke.

Tar terbentuk dari dekomposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada temperatur antara 250^oC hingga 800^oC. Struktur tersebut mengalami pemutusan ikatan dari struktur ikatan hidrokarbon panjang menjadi struktur hidrokarbon pendek saat dekomposisi termal berlangsung kemudian dikondensasi menjadi cairan yang disebut minyak pirolisis.

Dalam proses pemutusan ikatan terbagi menjadi dua reaksi yaitu reaksi primer dan reaksi sekunder. Reaksi primer terjadi pada suhu antara 250^oC hingga 450^oC dan terbentuk *char*, *tar*, dan gas. Reaksi sekunder terjadi pada suhu antara 450^oC hingga 800^oC dimana pada reaksi tersebut sebagian *tar* yang terbentuk saat reaksi primer menjadi *char* dan gas pada reaksi sekunder.

Tar dapat digunakan dalam berbagai aplikasi yaitu sebagai bahan *fuels*, *chemicals*, *heat*, dan *power*.



Gambar 2.14 variasi aplikasi dari biooil pirolisis
Sumber: Jahiril et al, 2012

2.7 Char

Char adalah salah satu produk hasil proses pirolisis serbuk kayu mahoni. *Char* berbentuk padat dan berwarna gelap dengan komposisi utamanya adalah unsur karbon (C). Sama halnya seperti *tar*, *char* terbentuk akibat dekomposisi dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada suhu tertentu pada saat proses pirolisis berlangsung. *Char* dapat digunakan sebagai bahan bakar padat dan dapat menyuburkan tanaman.

Char terbentuk saat reaksi primer dan dapat terbentuk saat reaksi sekunder dimana *tar* yang terbentuk saat reaksi primer sebagian menjadi *char*. Hal ini terjadi antara temperatur 450⁰C hingga 800⁰C.

2.8 Rotary Kiln

Perkembangan teknologi termal biomassa telah dikembangkan untuk mendapatkan proses pirolisis yang baik. Produk hasil biomassa tergantung dari jenis biomassa dan proses yang digunakan. Pirolisis *rotary kiln* merupakan proses pirolisis yang baik dan tepat dalam proses dekomposisi beragam biomassa.

NREL telah mengembangkan sebuah reaktor tabung yang dapat berputar, dimana partikel kayu dapat berpindah posisi dari suatu sisi ke sisi yang lain pada dinding reaktor yang panas. *Rotary kiln* merupakan alat penukar panas dimana energi fase gas panas diekstraksi oleh bahan yang mengalami serangkaian proses pertukaran panas. Fenomena dekomposisi termal bahan bakar dari padatan hanya akan terjadi pada tingkat temperatur tertentu pada permukaan padatan itu sendiri.

Penyangga dimiliki *rotary kiln* untuk menopang berat *rotary kiln* itu sendiri. Dan terdapat satu motor yang berfungsi untuk memutar tungku yang memiliki sudu-sudu

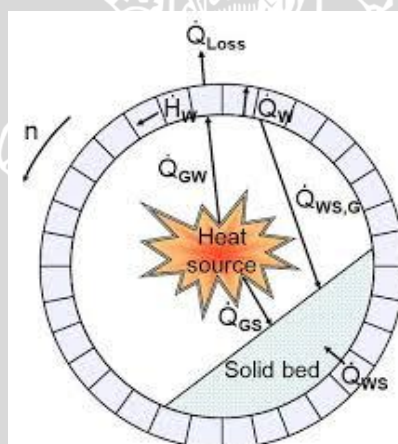
dengan kecepatan tertentu pada *rotary kiln* saat proses berlangsung agar terjadi perpindahan panas pada partikel serbuk kayu mahoni dengan cepat.

Berdasarkan sumber panas, *rotary kiln* dibedakan menjadi:

1. *Rotary kiln* dengan proses pembakaran langsung

Rotary kiln dengan proses pembakaran langsung (*direct fire rotary kiln*) memiliki gas-gas pembakaran yang langsung melalui ruang pemanas. Pembakaran dapat terjadi dalam sebuah ruang pembakaran atau apinya diarahkan disepanjang tungku *rotary kiln*. Kontak antara gas dan padatan adalah bentuk utama perpindahan panas. Gas dan padatan dapat dialirkan searah atau berlawanan

Rotary kiln jenis ini juga dapat dioperasikan dalam molekul reduksi atau oksidasi. Pada tipe, sumber panas diposisikan dalam silinder. Keuntungan tipe ini adalah efisiensinya lebih besar. Model perpindahan panas untuk *rotary kiln* dengan pemanasan internal ditunjukkan dalam gambar sebagai berikut:



Gambar 2.15 Model perpindahan panas *rotary kiln* pembakaran langsung

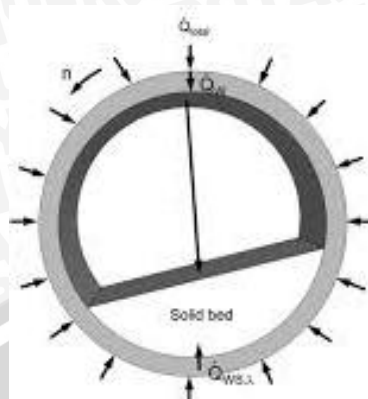
Sumber: Sonawane, 2010

Sumber panas dianggap berada di pusat silinder. Lapisan padatan mendapatkan panas dari sumber secara langsung dan pada saat yang sama dinding silinder mendapatkan panas dari sumber panas pusat. Dinding memantulkan sebagian panas ke lapisan padat dan sebagiannya disimpan dalam dinding dalam bentuk entalpi. Sebagian panas yang lain terbuang ke lingkungan

2. *Rotary kiln* pembakaran tak langsung

Rotary kiln pembakaran tak langsung (*indirect fired rotary kiln*) pembakaran atau pemanasan dalam bentuk lain terjadi pada bagian luar dinding tabung. Material yang diproses tidak berkontak langsung dengan gas pembakaran. Hal ini penting untuk kualitas produk untuk menjaga produk agar tidak bereaksi dengan gas tersebut.

Keuntungan lain adalah jumlah gas dari tabung yang dibutuhkan melalui sistem kontrol emisinya sangat kecil. Model perpindahan panas dapat dilihat pada gambar berikut:

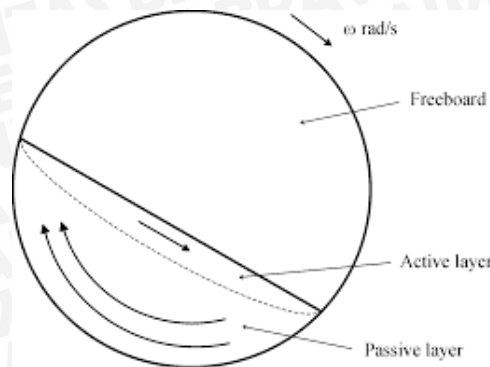


Gambar 2.16 Model perpindahan panas *rotary kiln* pembakaran tak langsung
Sumber: Sonawane, 2010

Sumber panas yang umumnya berupa energi listrik berada di bagian luar tabung (*reactor*). sumber panas eksternal ditransfer ke bagian dinding tabung. Lapisan padatan biomassa mendapatkan panas dari dinding secara tidak langsung dimana sebagian panas disimpan dalam dinding tersebut dalam bentuk entalpi. Dinding panas tersebut mentransfer energi panasnya sebagian ke biomassa dan sebagian ke lingkungan.

2.8.1 Gerak Partikel Biomassa Pada *Rotary Kiln*

Fokus utama gerak biomassa pada *rotary kiln* adalah pada dindingnya *kiln*. Biomassa pada *rotary kiln* dapat berpindah dari satu sisi ke sisi yang lain pada dinding *kiln* dan kecepatan partikel tergantung dari kecepatan sudut *kiln*. Dalam perpindahan partikel tersebut akan mengakibatkan tranfer panas dari dinding ke partikel lebih merata karena partikel akan bergeser mengikuti bentuk *kiln*. Transfer panas antara partikel satu sama lainnya juga terjadi lebih cepat karena partikel yang satu dengan yang lain akan saling bertubrukan sehingga seluruh partikel akan mendapatkan panas yang merata.



Gambar 2.17 Penampang lintang *radial rotary kiln*
Sumber: Heydenrych, 2001

Analisa gerak partikel dalam sebuah tabung yang berputar telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa gerak partikel dalam tabung tergantung pada angka non dimensi froude yaitu sebagai berikut:

$$Fr = \omega^2 R / g \quad (\text{sumber: Fox, 1994})$$

Dimana:

ω = kecepatan sudut (rad/sec)

R = jari-jari tabung (m)

g = percepatan gravitasi (m/dt^2)

Dalam penelitian ini *rotational speed* yang digunakan adalah 10 rpm, maka nilai dari *froud number* penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Fr &= \frac{\omega^2 R}{g} \\ &= \frac{(2\pi n / 60)^2 \cdot R}{g} \\ &= \frac{(2 \cdot \pi \cdot 10 / 60)^2 \cdot 0,05}{9,8} \\ &= 0,56 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

2.8.2 Perpindahan Panas Dalam *Rotary Kiln*

Pada prinsipnya sumber panas pirolisis *rotary kiln* berasal dari luar yang merambat ke dalam tabung *rotary kiln*. Pada saat tabung *rotary kiln* panas maka terjadi perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi partikel serbuk kayu mahoni. Model perpindahan panas yang ada dalam proses ini adalah (Sonawane, 2010).

a. Konduksi internal

Konduksi internal terjadi perpindahan panas dari permukaan partikel itu sendiri menuju inti partikel.

b. Konduksi partikel ke partikel

Perpindahan panas secara konduksi antara partikel dengan partikel yang lain karena bersentuhan selama proses pirolisis berlangsung *bed rotary kiln*.

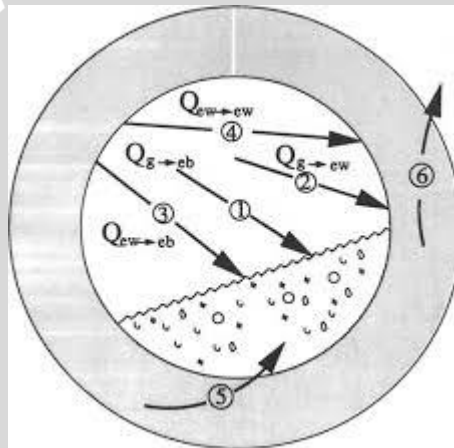
c. Radiasi partikel ke partikel

Perpindahan panas secara radiasi antara partikel yang satu dengan partikel yang lain.

d. Konveksi antar partikel

Perpindahan panas secara konveksi antara partikel yang satu dengan partikel yang lain.

Sedangkan perpindahan panas antara tabung *rotary kiln* dengan partikel adalah seperti gambar di bawah.



Gambar 2.18 Alur perpindahan panas pada *rotary kiln*
Sumber: Valle, 2012

Keterangan gambar:

1. Aliran gas panas ke biomassa
2. Aliran gas panas ke dinding tabung
3. Perpindahan panas antara dinding tabung dan biomassa
4. Perpindahan panas antara dinding tabung
5. Kontak antara dinding tabung dan biomassa
6. Kehilangan panas ke lingkungan.

2.9 Hipotesis

1. Semakin besar prosentase zeolit maka hasil *charnya* lebih sedikit akan tetapi hasil *tar* semakin banyak karena semakin banyak prosentase zeolit maka semakin banyak pula

biomassa yang dapat didekomposisi hal ini dikarenakan zeolit dapat mempercepat laju dekomposisi biomassa.

2. Pada temperatur 450°C hasil *char* lebih sedikit dibanding temperatur 250°C sedangkan hasil *tarnya* lebih banyak karena semakin besar temperatur pemanasan selama pirolisis berlangsung maka semakin banyak biomassa yang terdekomposisi menjadi *tar*.

