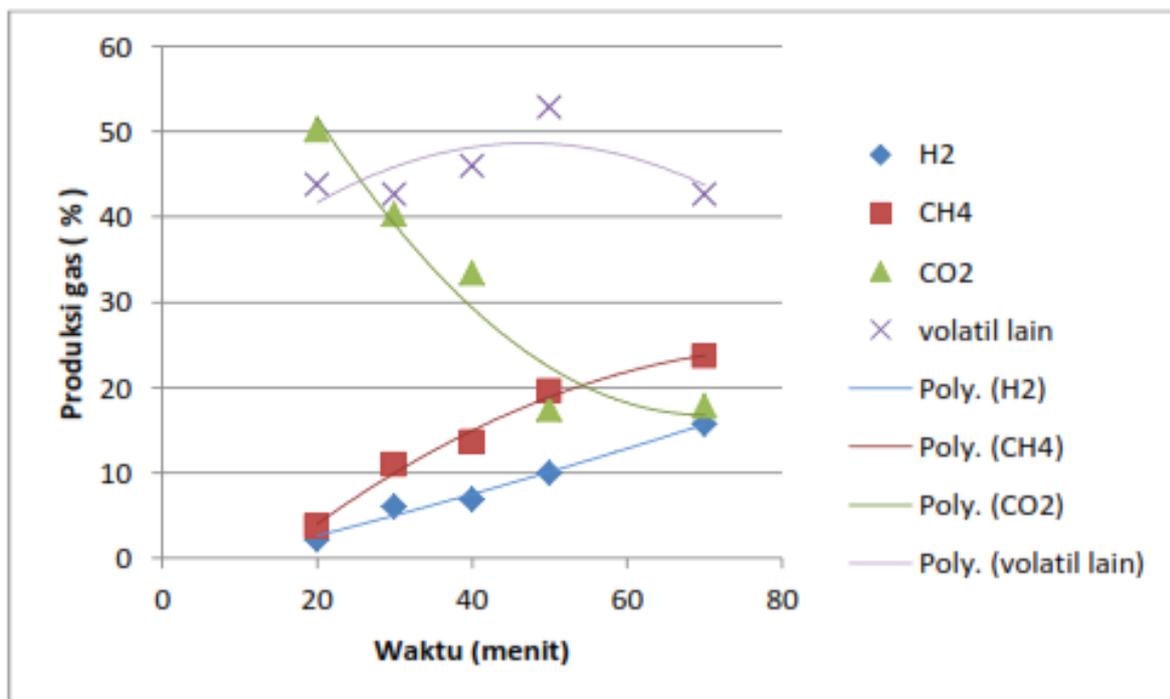


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

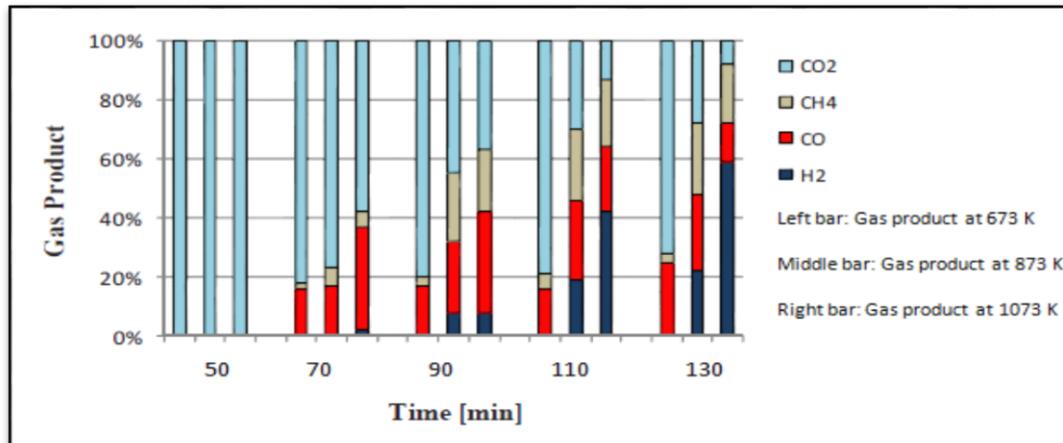
#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Amin (2015) dalam penelitiannya gas yang dihasilkan dari limbah kayu *hardwood mahoni*. Dengan variasi temperatur 350°C-800°C. Semakin meningkatnya temperatur, maka gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang terbentuk semakin menurun, tetapi gas metana (CH<sub>4</sub>) dan hidrogen (H<sub>2</sub>) semakin meningkat.



Gambar 2.1 Perbandingan komposisi gas dengan waktu pada suhu 700°C  
Sumber : Amin, (2015)

Widya (2013) melakukan penelitian mengenai pembentukan *char* dan gas dari pirolisis biomassa *cedar* atau kayu cemara dimana dalam penelitian tersebut temperatur untuk *char* dilakukan pada temperatur 523K sampai suhu 1073K dan temperatur untuk gas dilakukan pada temperatur 673k sampai 1073K dengan menggunakan *heating rate* 400K/jam. Pada penelitian ini sudah dilakukan pengujian komposisi gas tetapi belum dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pembentukan entalpi gas pada setiap komposisi gas yang terjadi apakah terjadi proses eksotermis atau endotermis.



Gambar 2.2 Komposisi gas produk penelitian Widya Wijayanti  
Sumber : Wijayanti, (2013)

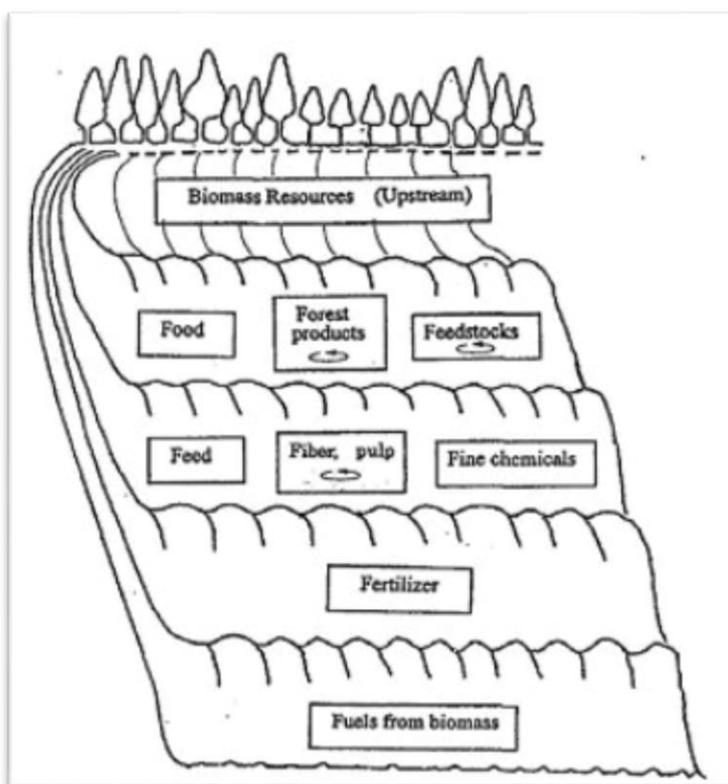
## 2.2 Biomassa

Biomassa didefinisikan sebagai jumlah total bahan organik hidup di atas tanah pada pohon termasuk ranting, daun, cabang, batang utama dan kulit yang 4 dinyatakan dalam berat kering oven ton per unit area (Amin, 2015). Biomassa dibedakan menjadi dua kategori, yaitu biomassa di atas permukaan tanah (*above ground biomass*) dan biomassa di bawah permukaan tanah (*bellow ground biomass*). Biomassa di atas permukaan tanah adalah berat bahan organik per unit area pada waktu tertentu yang dihubungkan ke suatu fungsi sistem produktivitas, umur tegakan, dan distribusi organik (Kusmana 1993) diacu dalam Salim 2005). Sedangkan biomassa di bawah permukaan tanah diartikan sebagai semua biomassa dari akar tumbuhan yang hidup. Biomassa tersusun oleh senyawa karbohidrat yang terdiri dari elemen karbon, hidrogen, dan oksigen yang dihasilkan dari proses fotosintesis tanaman (White & Planskett 1991 diacu dalam Salim 2005). Pada proses fotositesis tumbuhan menyerap CO<sub>2</sub> dari udara kemudian mengubahnya menjadi bahan organik sehingga jumlah total biomassa tumbuhan dapat bertambah. Faktor iklim, seperti curah hujan dan suhu merupakan faktor yang mempengaruhi laju peningkatan biomassa pohon (Johnsen et al. 2001 diacu dalam Onrizal 2004).

Ketika biomassa dibakar, energi akan terlepas, umumnya dalam bentuk kalor/panas. Karbon dalam biomassa bereaksi dengan oksigen di udara sehingga membentuk karbondioksida. Apabila dibakar sempurna, maka jumlah karbondioksida yang dihasilkan akan sama dengan jumlah yang diserap dari udara ketika tanaman tersebut tumbuh.

Di alam bebas, biomassa yang dibiarkan begitu saja di tanah akan terurai pada waktu yang lama, melepaskan karbondioksida dan energi yang tersimpan perlahan-lahan. Dengan membakar biomassa, energi yang tersimpan akan terlepas dengan cepat dan dapat dimanfaatkan. Oleh karena itu proses konversi biomassa menjadi energi yang berguna meniru proses alam dengan laju reaksi yang lebih cepat.

Biomassa dapat langsung digunakan (misalnya membakar kayu untuk pemanas dan memasak) dan dapat juga digunakan untuk produksi bahan bakar cair (biodiesel dan alkohol) atau biofuel gas (biogas) yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Misalnya alkohol dari ubi kayu dapat digunakan sebagai bahan pengganti bensin atau biogas dari kotoran hewan ternak dapat digunakan sebagai bahan pengganti gas alam.



Gambar 2.3 Diagram pemanfaatan dan pendaur ulangan biomassa  
Sumber : *The Asian Biomass Handbook*, (2008)

Pengangkutan dan penyimpanan biomassa tidaklah mudah karena ukurannya terlalu besar dan mudah terurai. Oleh karena itu, biomassa layak untuk digunakan di daerah dimana biomassa tersebut di produksi. Berdasarkan alasan ini, biomassa sering digunakan di daerah terdekat dimana pasokan dan permintaan biomassa seimbang. Hal ini dilakukan untuk menekan biaya transportasi dan penanganannya. Biaya tersebut dapat direduksi

dengan menempatkan generator dekat sumber biomassa seperti tempat penggergajian, penggilingan gula, atau penggilingan bubur kayu.



Gambar 2.4 Berbagai macam sumber biomassa

### 2.3 Kayu Mahoni

Kayu mahoni merupakan salah satu jenis kayu yang termasuk dalam kelas gymnospermae, termasuk dalam kategori (*hardwood*) dan termasuk kayu berdaun lebar. Kayu mahoni adalah salah satu biomassa yang jumlahnya melimpah. Di Indonesia, tercatat potensi mahoni di Indonesia mencapai 45.259.541 batang dan sejumlah 9.479.192 batang siap tebang, atau setara 2,4 juta m<sup>3</sup> (Sukadaryati, 2006).

Kayu mahoni memiliki tiga komponen utama yang dapat terdekomposisi menjadi senyawa-senyawa lain yaitu Selulosa, Hemiselulosa dan lignin. Kayu mahoni memiliki komposisi selulosa 35-50%, hemiselulosa 20-30%, dan lignin 25-30% dari kandungan kayu (Jahirul *et al.*, 2012).

<b>Klasifikasi</b>
Kingdom: Plantae
Subkingdom: Tracheobionta
Superdivisi: Spermatophyta
Divisi: Magnoliophyta
Kelas: Magnoliopsida
Subkelas: Rosidae
Ordo: Sapindales
Famili: <b>Meliaceae</b>
Genus: <b>Swietenia</b>
Spesies: <b><i>Swietenia mahagoni</i> (L.) Jacq.</b>

Gambar 2.5 Klasifikasi pohon mahoni  
Sumber: Tjitrosoepomo, G. (2000)

Pohon tahunan dengan tinggi mencapai 5-25 m. Batang berbentuk bulat, banyak bercabang dan kayunya bergetah. Daun majemuk menyirip genap, helaian anak daun (berbentuk bulat telur, ujung dan pangkal runcing, tepi rata, tulang menyirip, panjang 3-15 cm), serta daun mudanya berwarna merah dan setelah tua berwarna hijau. Mahoni berasal dari Hindia Barat dan dapat ditemukan tumbuh liar di hutan jati dan tempat-tempat lain yang dekat dengan pantai. Tumbuhan ini kebanyakan sengaja ditanam di hutan tumbuhan atau sebagai tumbuhan tepi jalan sebagai pohon pelindung. Jenis ini dapat tumbuh subur bila tumbuh di pasir payau dekat dengan pantai dan banyak tersebar di dataran rendah. (Zuhud, 2013)

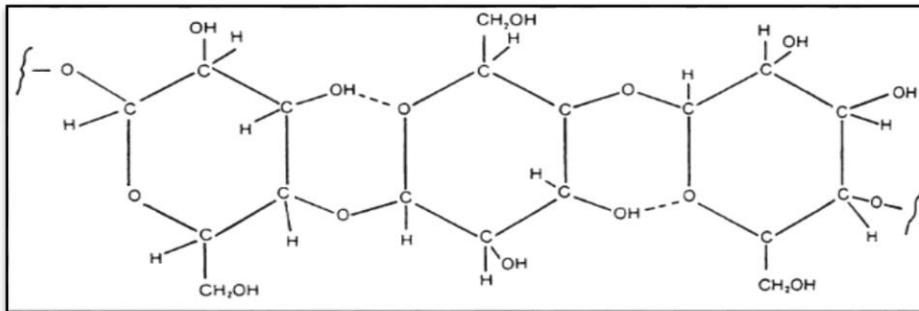
#### 2.4 Komponen Utama Kayu

Biomassa yang berasal dari kayu memiliki 3 komponen utama, yaitu Selulosa, Hemiselulosa, dan Lignin. dimana besarnya adalah untuk hemiselulosa sebesar 20-40 %, selulosa 40-60 % dan lignin 10-25 % (Gospodinova).

### 2.4.1 Selulosa

Selulosa adalah senyawa organik yang merupakan komponen struktural utama dinding sel dari tanaman hijau. Beberapa spesies bakteri mengeluarkan itu untuk membentuk biofilm. Sekitar 33% dari semua materi tanaman adalah selulosa. Selulosa menjadi komponen kimia utama dalam membentuk serat dinding kayu dan berat totalnya sekitar 40-45% dari berat kering kayu (Sjostrom, 1993). Dekomposisi selulosa mulai terjadi pada temperatur 260-350°C.

Selulosa merupakan senyawa organik dengan rumus  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , sebuah polisakarida yang terdiri dari rantai linier dari beberapa ratus hingga lebih dari sepuluh ribu ikatan glikosidik unit D-glukosa (Nishiyama, 2002).

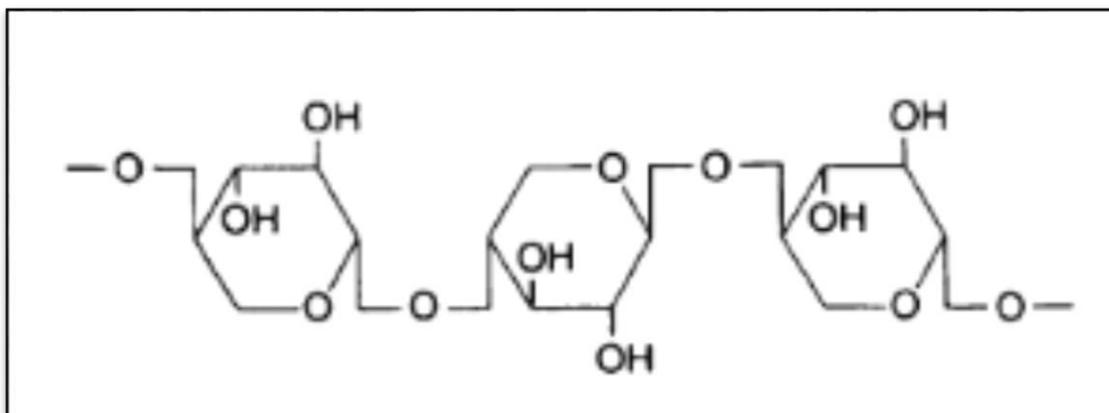


Gambar 2.6 Struktur molekul selulosa  
Sumber : Basu (2010)

### 2.4.2 Hemiselulosa

Hemiselulosa dapat tersusun oleh gula dengan lima karbon dengan rumus  $C_5H_{10}O_5$  disebut pentosan atau gula dengan enam karbon  $C_6H_{12}O_6$  disebut hexosan. Zat-zat ini berperan sebagai bahan bangunan dinding-dinding sel juga sebagai bahan zat cadangan. Secara biokimiawi, hemiselulosa adalah semua polisakarida yang dapat diekstraksi adalah larutan basa (alkalis), dan mengisi ruang antara serat-serat selulosa dalam dinding sel tumbuhan.

Monomer penyusun hemiselulosa adalah rantai D-glukosa, dan juga berbagai bentuk monosakarida yang terikat pada rantai, baik sebagai cabang atau mata rantai, seperti D-mannosa, D-galaktosa, D-fukosa, dan pentosa-pentosa seperti D-xilosa dan L-arabinosa. Komponen utama hemiselulosa pada *Dicotyledoneae* (jenis tumbuhan Mahoni) didominasi oleh xiloglukan. Hemiselulosa tersusun dari pentosan ( $C_5H_8O_4$ ) dan heksosan ( $C_6H_{10}O_5$ ). Berat kandungan hemiselulosa sekitar 20-30% dari berat kering kayu, dan dekomposisi hemiselulosa mulai terjadi pada temperatur 200-240°C.



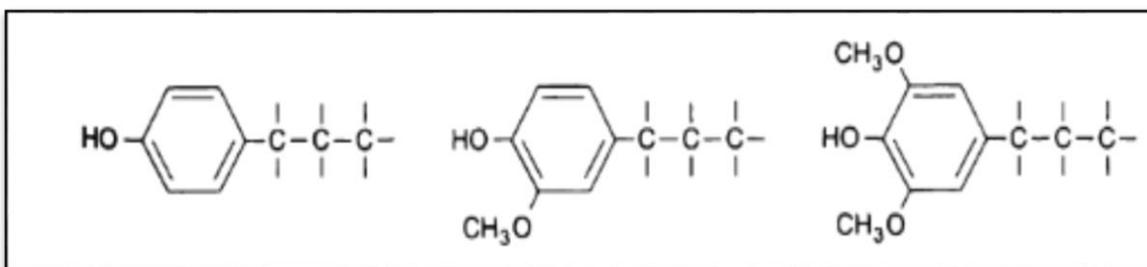
Gambar 2.7 Struktur molekul hemiselulosa  
Sumber : Basu (2010)

### 2.4.3 Lignin

Lignin adalah zat kayu yang merupakan salah satu zat komponen penyusun tumbuhan. Komposisi yang terdapat pada Lignin berbeda-beda bergantung jenisnya. Lignin banyak ditemukan pada batang tumbuhan berbentuk pohon dan semak. Pada batang, lignin berfungsi sebagai bahan pengikat komponen penyusun lainnya.

Struktur Kimia Lignin jika dibandingkan dengan Selulosa sangat berbeda, Selulosa hanya terbentuk dari gugus karbohidrat, sedangkan Lignin sangat kompleks dan tidak berpola sama. Gugus aromatik ditemukan pada lignin, yang saling dihubungkan dengan rantai alifatik, yang terdiri dari 2-3 karbon. Proses pirolisis lignin menghasilkan senyawa kimia aromatis berupa fenol, terutama kresol.

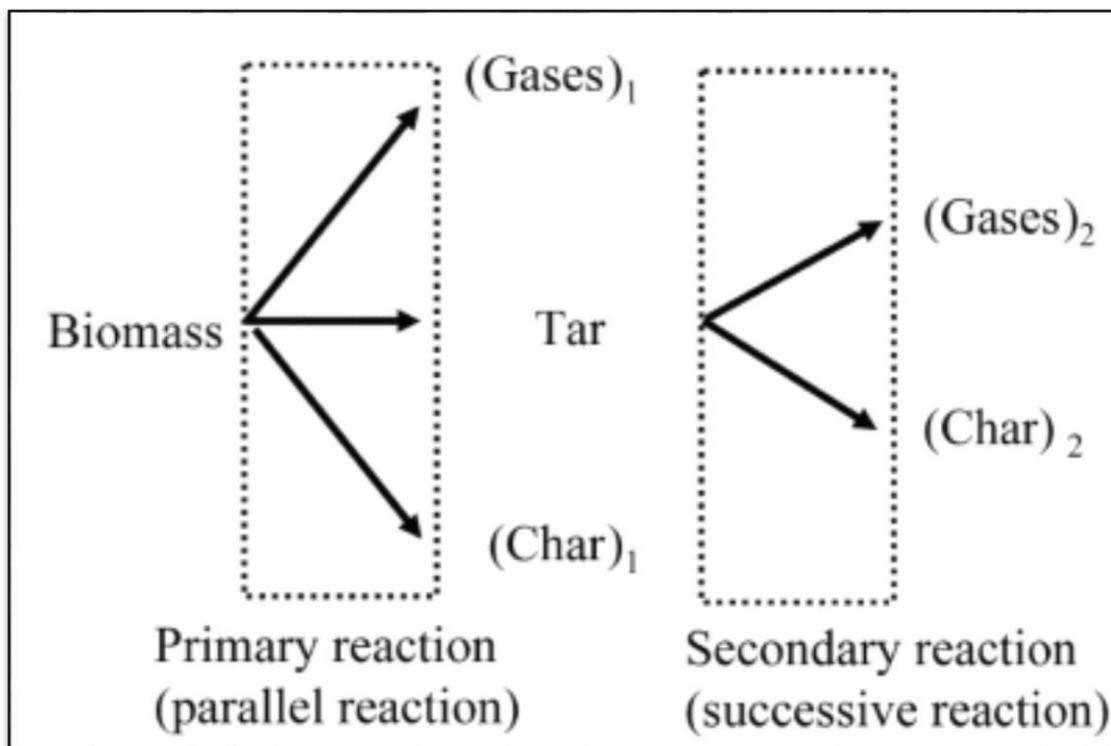
Lignin merupakan penyusun biomassa yang paling sulit dipecah, karena lignin bertugas memberi kekuatan mekanis dan perlindungan pada kayu. Lignin mulai terdekomposisi pada temperatur 280-500°C.



Gambar 2.8 Struktur lignin  
Sumber : Basu (2010)

## 2.5 Pirolisis

Pirolisis merupakan kata adopsi dari Pyro (Fire/Panas) dan Lyo (Loosening/Pelepasan) untuk dekomposisi termal dari suatu bahan organik. Jadi pirolisis adalah proses dekomposisi termal kimia bahan organik dengan menambahkan proses pemanasan dengan sedikit atau tanpa oksigen, dimana biomassa akan mengalami pemecahan struktur kimia sehingga menghasilkan produk char, tar, dan gas. Pirolisis menguraikan bahan organik secara kimia melalui pemanasan dengan mengalirkan nitrogen sebagai gas inert. Proses dekomposisi termal merupakan rangkaian kompleks yang dipengaruhi banyak faktor seperti heating rate, temperatur, tekanan, waktu tinggal, kelembaban, komposisi bahan dan ukuran partikel.



Gambar 2.9 Mekanisme reaksi kimia pirolisis  
Sumber : Broido, (1976)

Umumnya produk yang dihasilkan oleh proses pirolisis untuk material organik yang terdekomposisi yaitu berupa *char*, *tar*, dan gas. Selama proses pirolisis, panas ditransfer dari partikel biomassa yang paling luar dari heater secara radiasi, konduksi dan konveksi. Berikut ini adalah perpindahan panas yang terjadi dalam proses pirolisis:

- Konduksi yang terjadi di dalam partikel biomassa.
- Konveksi yang terjadi pada pori-pori biomassa.
- Konveksi dan radiasi dari permukaan partikel biomassa.

## 2.6 Macam – Macam Pirolisis

Macam-macam Pirolisis berdasarkan laju pemanasan (*heating rate*) dan waktu tinggal (*residence time*), pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu: *slow pyrolysis*, *fast pyrolysis*, dan *flash pyrolysis*.

Tabel 2.1  
Macam-macam proses pirolisis

Pyrolysis Process	Solid Residence Time (s)	Heating Rate (K/s)	Particle Size (mm)	Temp. (K)	Product Yield (%)		
					Oil	Char	Gas
Slow	450-550	0.1-1	5-50	550-950	30	35	35
Fast	0.5-10	10-200	<1	850-1250	50	20	30
Flash	<0.5	>1000	<0.2	1050-1300	75	12	13

Sumber : Jahirul *et al.*, (2012)

### 2.6.1 Slow Pyrolysis

*Slow pyrolysis* dengan temperatur pemanasan sekitar 550-950 K dan laju pemanasan (*heating rate*) 0,1-1 K/s yang terbilang cenderung rendah. *Slow pyrolysis* termasuk tipe pirolisis yang telah digunakan selama ribuan tahun. Saat proses berlangsung waktu uap yang tertinggal dalam ruang pemanas yaitu sekitar 5-30 menit memungkinkan uap yang terkondensasi menjadi *char* dan yang tidak terkondensasi menjadi gas.

*Slow pyrolysis* sangat cocok dalam memproduksi gas, karena waktu pada proses penguraian *slow pyrolysis* sangat lama, sehingga biomassa yang terurai semakin banyak dan gas yang dihasilkan juga semakin banyak. Presentase produk yang dapat dihasilkan 35 % *char*, 35% gas dan 30% *tar*.

### 2.6.2 Fast Pyrolysis

*Fast pyrolysis* merupakan pirolis dengan temperatur tinggi yaitu sekitar 1050-1250 K dan laju pemanasan (*heating rate*) sekitar 10-200 K/s. Waktu yang digunakan pada *Fast Pyrolysis* yaitu selama 0,5 – 5 detik. Jadi biomassa akan mengalami proses dekomposisi secara cepat karena pengaruh temperatur dari laju pemanasannya yang tinggi, serta ukuran partikel biomassa yang relative kecil yaitu < 1 mm. Adapun presentase produk yang dapat dihasilkan 20 % *char*, 30% gas dan 50% *tar*.

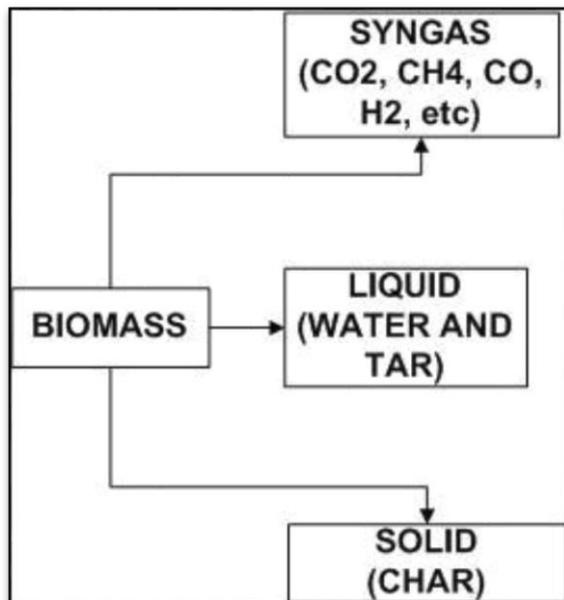
### 2.6.3 Flash Pyrolysis

*Flash pyrolysis* terjadi sangat cepat yaitu  $< 0,5$  detik. *Flash pyrolysis* dapat memanaskan biomassa dan menghasilkan *volatile* (uap biomassa) dengan waktu yang singkat dikarenakan pada proses *flash pyrolysis* ini memiliki tingkat pemanasan temperatur yang sangat tinggi yaitu sekitar  $450-1000^{\circ}\text{C}$  dan laju pemanasan (*heating rate*) yang tinggi pula yaitu sekitar  $> 1000$  K/s, lebih tinggi dibandingkan *fast pyrolysis*.

Produk yang dihasilkan pada proses ini apabila di presentasikan didominasi oleh pembentukan *tar* yaitu sekitar 75%, diikuti gas 13%, dan char yang hanya terbentuk 12%. Namun pada proses ini masih memiliki kekurangan karena keterbasan teknologi, misalnya stabilitas *thermal* yang buruk dan membuat hasil *tar* atau *bio-oil* kotor karena terdapat padatan oleh senyawa basa yang terkandung di char ikut larut dalam *tar*.

## 2.7 Produk Pirolisis

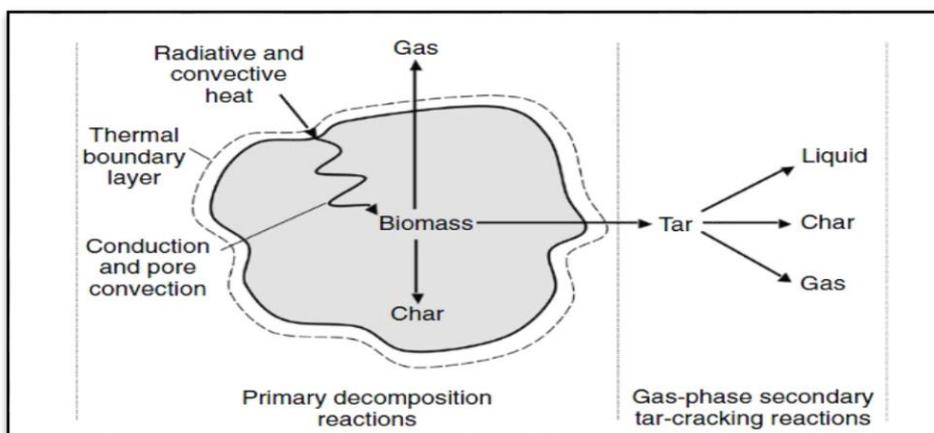
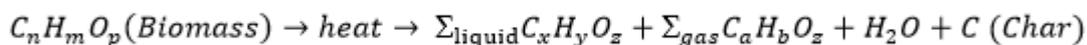
Produk pirolisis



Gambar 2.10 Hasil produk pirolisis  
Sumber : Hafid, (2014)

Produk awal dari proses pirolisis terdiri dari *solid char* dan gas yang dapat dikondensasi (*condensable gases*). *Condensable gas* kemudian dipecah menjadi gas yang tidak dapat dikondensasi (*noncondensable gases*) yang terdiri dari (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) serta tar dan char. Dekomposisi ini terjadi sebagian melalui reaksi fase-gas yang homogen dan sebagian melalui fase-gas-solid reaksi panas yang heterogen. Pada reaksi fase-gas, gas yang dapat terkondensasi terpecah menjadi molekul yang lebih kecil lalu menjadi

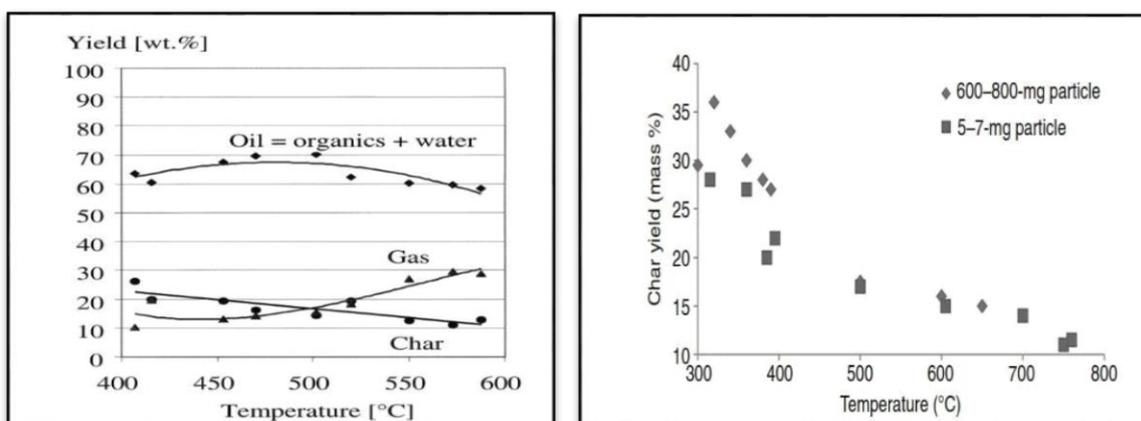
gas permanen yang tidak dapat terkondensasi (*noncondensable gas*) seperti CO dan CO<sub>2</sub>. Reaksi proses pirolisis secara umum dapat ditunjukkan seperti persamaan dibawah:



Gambar 2.11 Pirolisis partikel biomassa dengan dekomposisi primer dan sekunder  
Sumber: Basu, (2010)

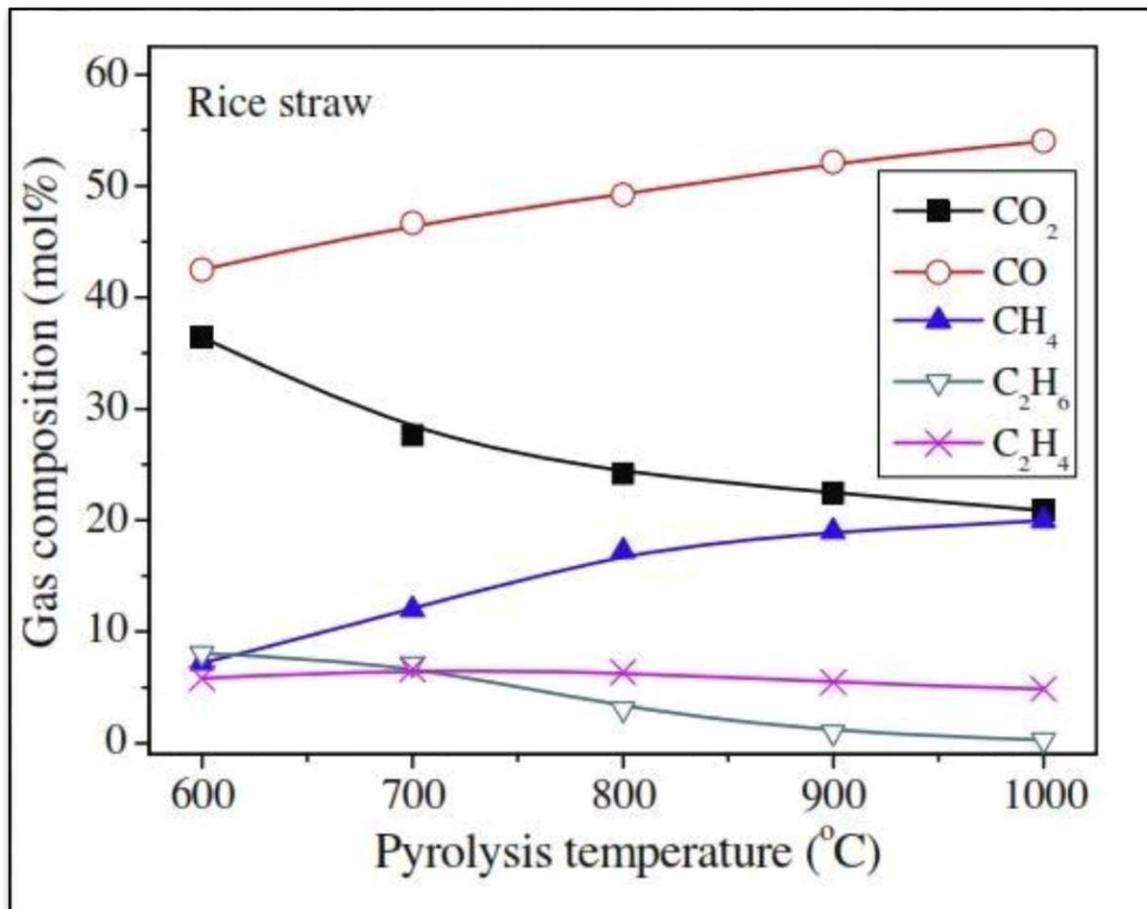
## 2.8 Efek Variasi Temperatur Pirolisis

Pada saat proses pirolisis, biomassa dipanaskan pada variasi temperatur tertentu. Dari pemanasan biomassa ini maka dengan meningkatnya temperatur biomassa akan semakin berkurang karena terdekomposisi menjadi tar dan gas. dengan meningkatnya temperatur pula tar yang dihasilkan semakin berkurang karena tar terdekomposisi menjadi gas. sehingga produksi gas akan meningkat dengan semakin meningkatnya temperatur pirolisis.



Gambar 2.12 Peningkatan produksi gas hasil pirolisis dan penurunan massa  
Sumber : Bridgwater, (1999) dan Basu, (2010)

Selain itu, variasi temperatur juga berpengaruh terhadap komposisi gas yang dihasilkan (Xiang et al., 2011). Semakin tinggi temperature yang digunakan, maka komposisi gas metana dan karbon monoksida akan meningkat dan gas gas yang lain ada yang menurun seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.13 Efek variasi temperatur terhadap komposisi gas  
Sumber : Xiang, (2011)

## 2.9 Efek Zeolit (AlO<sub>4</sub> dan SiO<sub>4</sub>)

Zeolit merupakan katalisator dimana zat yang dapat mempercepat laju reaksi dengan cara menurunkan energi aktivator pada proses reaksi kimia dimana terjadi perbedaan pada dekomposisi *thermal* biomassa dan terjadi perpindahan panas yang lebih cepat dan stabil. (Yilmaz, 2009)

Menurut penelitian (Tursunov, 2014) Pirolisis MSW (*Municipal Solid Waste*) dengan katalis zeolit untuk analisis gas yang dilakukan pada kondisi yang sama, reaksi kimia sudah teraktivasi pada suhu yang lebih rendah. Sesuai data dibawah ini.

Tabel 2.2  
Perbedaan Komposisi Gas dengan Katalis dan Non-katalis

Table 6  
Catalytic calcined dolomite and zeolite influence of reactor temperature on product concentration and gas characterization.

Gas concentration	Temperature °C											
	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
<i>Catalytic calcined dolomite influence of reactor temperature on product concentrations and gas characterization</i>												
HC vol%	0.004	0.18	0.16	0.1041	0.0735	0.0872	0.0032	0.0252	0.0207	0.0133	0.0055	0.0034
CO vol%	0.02	0.27	0.360	0.253	0.214	1.305	1.602	2.030	2.480	2.119	1.05	0.901
CO <sub>2</sub> vol%	0.08	0.59	0.50	0.28	0.21	0.40	0.37	0.39	0.46	0.41	0.29	0.32
<i>Catalytic zeolite influence of reactor temperature on product concentrations and gas characterization</i>												
HC vol%	0	0.4977	0.1046	0.0533	0.0504	0.06	0.024	0.0198	0.0202	0.018	0.0106	0.0083
CO vol%	0.01	0.866	0.424	0.215	0.391	0.83	0.583	0.776	0.831	0.52	0.444	0.341
CO <sub>2</sub> vol%	0.04	2.96	1.62	0.72	0.59	0.63	0.23	0.19	0.2	0.19	0.09	0.06
<i>Non-catalytic influence of reactor temperature on product concentrations and gas characterization</i>												
HC vol%	0.0002	0.0015	0.1145	0.0655	0.0378	0.0491	0.0396	0.02	0.0148	0.0101	0.0043	0.0033
CO vol%	0	0.055	0.588	0.324	0.191	1.071	1.365	1.256	1.018	0.848	0.315	0.255
CO <sub>2</sub> vol%	0.01	0.73	2.04	0.97	0.51	0.55	0.35	0.26	0.19	0.11	0.02	0

Sumber : Tursunov, 2014

Penambahan katalisator zeolit berpengaruh pada gas hasil pirolisis menjadi semakin aktif dan rantainya mudah pecah dan rentang nilai karbon relatif pendek. Semakin pendek rantai karbon maka semakin rendah titik didih dan titik leleh sehingga senyawa seperti metana, etana dan propena lebih mudah teraktivasi (Chen, 2014). Seperti data dibawah.

Tabel 2.3  
Perbandingan panjang rantai karbon dengan katalis dan non-katalis

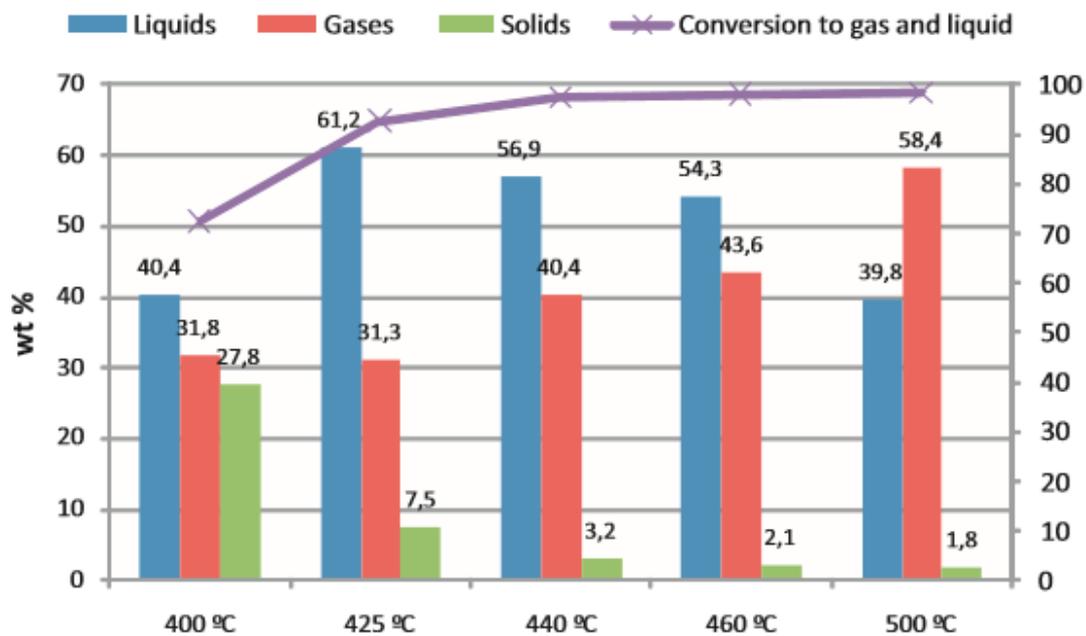
Case	C <sub>5</sub> -C <sub>12</sub> (%)	C <sub>12</sub> -C <sub>17</sub> (%)	>C <sub>18</sub> (%)
Without catalyst	36.14	22.19	34.86
With 5 wt% g-alumina	40.68	21.15	31.72
With 5 wt% zeolite ZSM-5	40.84	29.73	28.43

Sumber : Chen 2014

Pada penelitian sebelumnya (Lopez, 2011) yang menjelaskan tentang efek suhu terhadap hasil pirolisis katalitik (zeolit), kisaran antara 400 sampai 500° C menggunakan katalis ZSM-5 (zeolit). Hasil pirolisis yang diperoleh (% berat) dengan menyertakan konversi menjadi padat, cair, dan gas. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.16, 400° C adalah suhu yang tidak cukup tinggi untuk menguraikan keseluruhan sampel, karena residu padat mendekati 30% berat diperoleh. Sebaliknya, pada 425° C lebih dari 90% berat konversi tercapai, dan dari 440 sampai 500° C, hasil fraksi padat dapat dianggap kurang lebih konstan. Pada rentang suhu ini, sisa fraksi padat terutama terdiri dari bahan bakar yang diproduksi dalam pirolisis dari banyak bahan polimer. Karena itu, 440 °C adalah suhu yang cukup tinggi

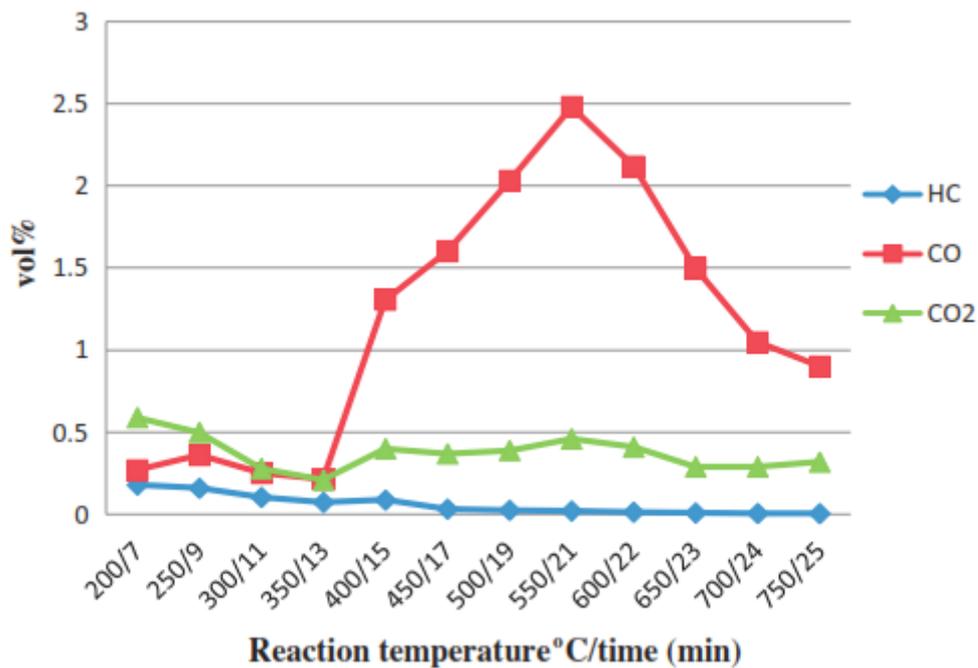
untuk mencapai konversi total campuran plastik menjadi produk gas dan cairan saat ZSM-5 (zeolit) digunakan.

Bisa juga dilihat bahwa saat suhu dinaikkan dari 425 menjadi 500° C, hasil cairan berkurang dan akibatnya produksi gas meningkat. Hal ini disebabkan oleh retakan kuat ikatan C-C yang terjadi pada suhu yang lebih tinggi, yang menghasilkan hidrokarbon ringan dengan rantai karbon yang lebih pendek. Di antara suhu di mana total konversi tercapai, 440° C adalah yang terendah dan pada saat bersamaan yang menghasilkan jumlah cairan yang banyak, sedangkan 500° C adalah suhu yang menghasilkan hasil gas tertinggi.

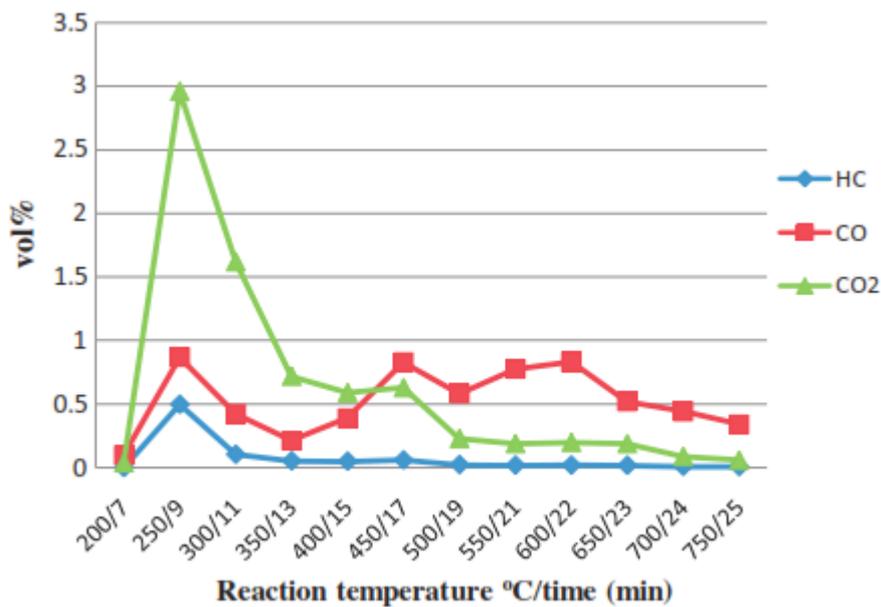


Gambar 2.14 Grafik % berat padat, cair, dan gas hasil pirolisis  
Sumber: Lopez, 2011

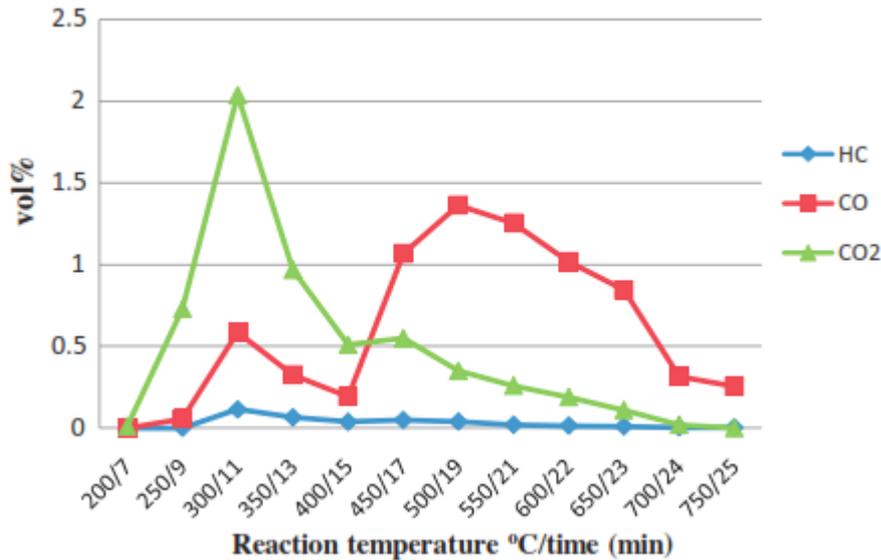
Komposisi gas Komposisi gas dengan zeolit, dolomit kalsinasi dan juga pirolisa non-katalitik pada suhu reaktor 200-750 ° C disajikan pada Gambar 2.16, 2.17 dan 2.18, masing-masing. Ini menunjukkan bahwa komponen gas adalah HC, CO dan CO<sub>2</sub>. Dengan adanya kandungan CO<sub>2</sub> dolomit yang dikalsinasi meningkat secara signifikan, sementara HC, kandungan CO<sub>2</sub> menunjukkan kecenderungan yang berlawanan. Total persentase gas produk adalah 24,98% (pirolisis katalitik dengan zeolit), 39,91 (pirolisis non-katalitik) dan 56,67% (pirolisis katalitik dengan dolomit kalsinasi). Selanjutnya, penurunan CO<sub>2</sub> yang luar biasa.



Gambar 2.15 Komposisi gas yang dihasilkan dengan katalis *calcined dolomite*  
Sumber: Tursunov, 2014



Gambar 2.16 Komposisi gas yang dihasilkan dengan katalis zeolit  
Sumber: Tursunov, 2014



Gambar 2.17 Komposisi gas yang dihasilkan tanpa katalis

Sumber: Tursunov, 2014

## 2.10 Hukum Kesetimbangan Massa

Hukum kekekalan massa atau dikenal juga sebagai hukum Lomonosov-Lavoisier adalah suatu hukum yang menyatakan massa dari suatu sistem tertutup akan konstan meskipun terjadi berbagai macam proses di dalam sistem tersebut (dalam sistem tertutup Massa zat sebelum dan sesudah reaksi adalah sama (tetap/konstan)). Pernyataan yang umum digunakan untuk menyatakan hukum kekekalan massa adalah massa dapat berubah bentuk tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Untuk suatu proses kimiawi di dalam suatu sistem tertutup, massa dari reaktan harus sama dengan massa produk

Kesetimbangan massa menjelaskan mengenai massa bahan yang melewati operasi pengolahan. Setiap bentuk kesetimbangan didasari oleh hukum konservasi dimana jika proses berlangsung tanpa terjadi akumulasi, maka massa yang masuk ke dalam sistem akan sama dengan massa yang ke luar sistem. Berdasarkan rumus dapat dituliskan sebagai berikut:

- Massa masuk = massa ke luar + massa terkumpul
- Masa reaktan = massa produk
- Bahan Baku = Produk + Sisa + Bahan baku tertumpuk

Hukum lavoisier pada ilmu kimia diaplikasikan

Pada penelitian ini hukum kekekalan massa digunakan untuk menentukan jumlah produk pirolisis yang berupa char, tar dan gas. Dan dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

Massa masuk = masa keluar

Massa biomassa = massa char + massa tar + massa gas

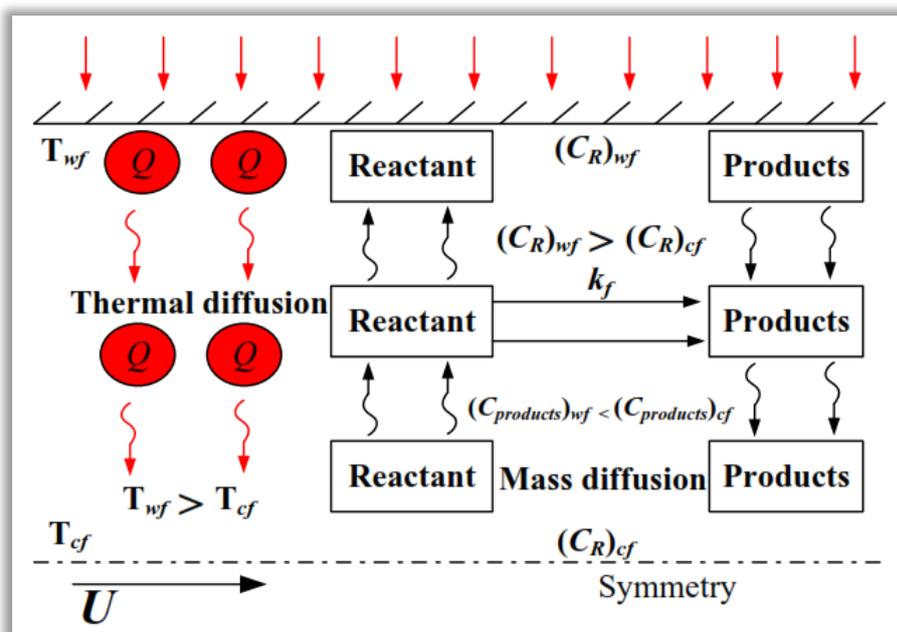
Pada katalitik pirolisis dengan zeolit sebagai katalis maka persamaan akan menjadi sebagai berikut :

Massa masuk = massa keluar

Massa biomassa + massa zeolit = massa char + massa tar + massa gas + massa zeolit

## 2.11 Heat & Mass Transfer

Pada proses pirolisis terjadi perpindahan panas dan massa karena pada proses pirolisis transformasi massa dan energi dalam reaksi endotermik. Dengan pengaruh lapisan batas termal, pirolisis dimulai dari daerah dekat dinding dan secara bertahap berkembang menjadi aliran inti, yang selanjutnya menghasilkan keseragaman distribusi konsentrasi reaktan dan produk. (Feng, 2017)

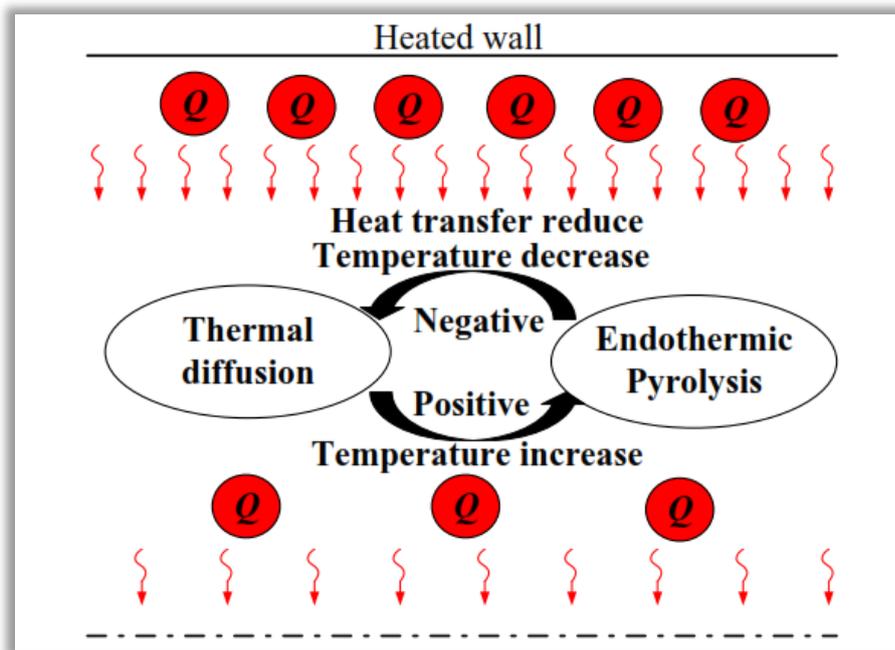


Gambar 2.18 Diagram skematik panas radial dan perpindahan massa  
Sumber: Feng, 2017

Jadi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19, konsentrasi reaktan di dekat dinding lebih rendah dari pada arus inti. Sebaliknya, konsentrasi produk yang dekat dengan dinding lebih tinggi dari pada aliran inti, yang menyebabkan arah perpindahan massa reaktan berbeda dari produk. (Feng, 2017)

Perpindahan panas pada proses pirolisis dipengaruhi oleh *heating rate* (laju pemanasan), karena perubahan besar sifat termofisik cairan dalam saluran panas. Tingkat reaksi di dekat dinding meningkat dengan fluks panas dinding, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.20, dua pengaruh disebabkan oleh kenaikan laju reaksi di dekat dinding, yaitu:

1. Gradien suhu radial di dekat dinding menurun karena kenaikan laju energi panas yang ditransformasikan menjadi energi kimia;
2. Molekul kecil diproduksi dan menyebabkan penurunan kepadatan tambahan, sehingga kecepatan di dekat dinding meningkat dengan kenaikan laju reaksi, yang berakibat pada penurunan gradien kecepatan radial dan tegangan geser. (Feng, 2017)



Gambar 2.19 Diagram skema hubungan gabungan antara perpindahan panas dan pirolisis  
Sumber: Feng, 2017

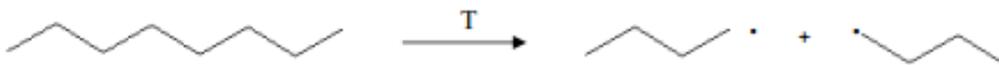
## 2.12 Thermal Cracking & Catalytic Cracking

### 2.12.1 Thermal Cracking

*Thermal cracking* adalah proses pemecahan senyawa hidrokarbon rantai panjang menjadi senyawa hidrokarbon menjadi rantai yang lebih pendek dengan bantuan kalor. Proses *thermal cracking* dibagi 3 proses yaitu *initiation*, *propagation* dan *termination*:

a. *Initiation*

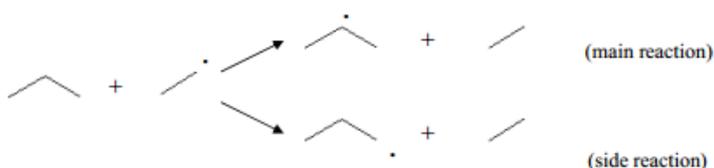
Terjadi pemutusan ikatan C-C akibat pemberian kalor pada hidrokarbon rantai panjang menjadi dua hidrokarbon panjang rantai karbon pendek dengan radikal bebas, misalnya oktana:



Gambar 2.20 *Initiation*  
Sumber: Angeira, (2008)

b. *Propagation*

Terjadi pembentukan hidrokarbon radikal bebas yang terus menerus terpecah menjadi hidrokarbon yang lebih pendek.



Gambar 2.21 *Propagation*  
Sumber: Angeira, (2008)

c. *Termination*

Terjadi pembentukan senyawa hidrokarbon stabil yang terjadi karena reaksi antara dua hidrokarbon dengan radikal bebas, dan reaksi hidrokarbon dengan radikal bebas dengan dinding *reactor*.



Gambar 2.22 *Termination*  
Sumber: Angeira, (2008)

### 2.12.2 *Catalytic Cracking*

*Catalytic Cracking* adalah proses pemecahan senyawa hidrokarbon dari senyawa rantai panjang menjadi rantai yang lebih pendek dengan bantuan katalisator. Proses pemecahan rantai hidrokarbon pada proses *catalytic cracking* disini melibatkan teori asam-basa bronsted-lowry dan asam-basa lewis pada zeolit (Sadeghbeigi, 2012). Biomassa

mengalami *thermal cracking* akibat naiknya temperatur sehingga memecah struktur padat menjadi gas, kemudian katalis mulai berperan saat bereaksi dengan gas dari biomassa tersebut. Gas hasil *thermal cracking* dari biomassa akan masuk kedalam pori-pori zeolit kemudian gas tersebut akan keluar dari zeolit dengan rantai yang lebih pendek dari sebelumnya.

### **2.13 Hipotesa**

Semakin tinggi temperatur pirolisis maka semakin banyak gas yang dihasilkan, dan pengaruh zeolit membuat gas hasil pirolisis menjadi semakin aktif dan rantainya mudah pecah dan rentang nilai karbon relatif pendek. Sehingga char yang dihasilkan semakin sedikit, dan meningkatkan produk *tar* dan juga gas.