

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PRODUK TAR
DAN CHAR HASIL PIROLISIS DAUN TEMBAKAU**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



OBI NAZARI GUSMANA

NIM. 145060201111061

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PRODUK TAR
DAN CHAR HASIL PIROLISIS DAUN TEMBAKAU

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



OBI NAZARI GUSMANA
NIM. 145060201111061

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal

DOSEN PEMBIMBING I

DOSEN PEMBIMBING II

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP 19750802 199903 2 002

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIK 19720903 199702 1 001

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 22 Mei 2018
Mahasiswa,



Obi Nazari Gusmana
NIM. 145060201111061

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





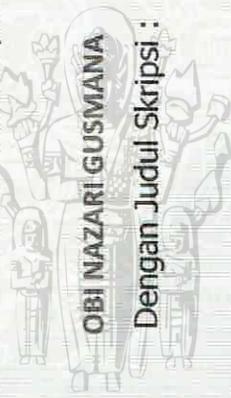
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 076 / UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :



OBI NAZARI GUSMANA
Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PRODUK TAR DAN CHAR HASIL
PIROLISIS DAUN TEMBAKAU

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20 \%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **09 JUL 2018**

Ketua Jurusan Teknik Mesin
Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TERHADAP PRODUK *TAR* DAN *CHAR*
HASIL PIROLISIS DAUN TEMBAKAU**

Nama Mahasiswa : Obi Nazari Gusmana
NIM : 145060201111061
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

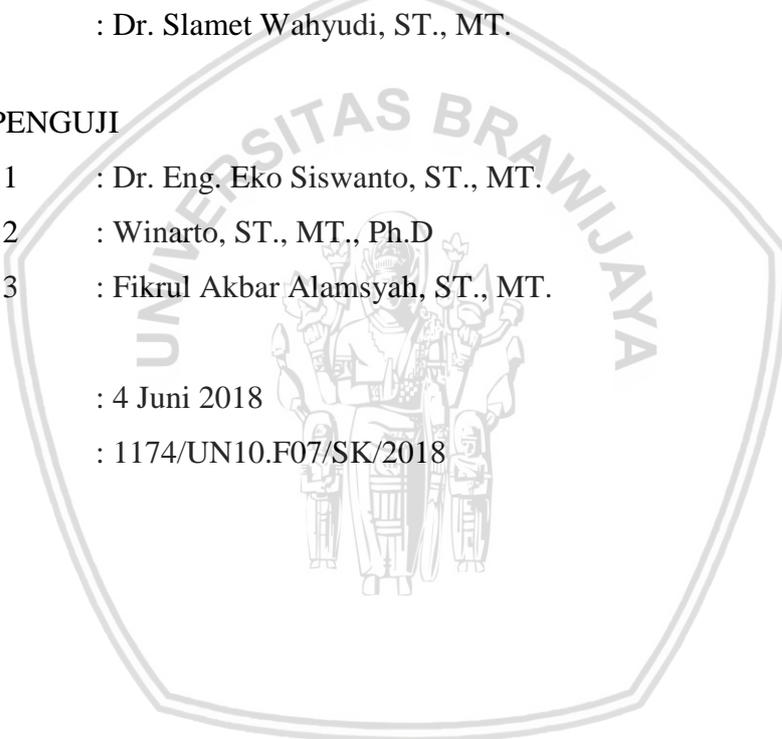
KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
Pembimbing II : Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Winarto, ST., MT., Ph.D
Dosen Penguji 3 : Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.

Tanggal Ujian : 4 Juni 2018
SK Penguji : 1174/UN10.F07/SK/2018



Karya Ilmiah ini Saya Tunjukkan Kepada::

Ibunda dan Alm. Ayahanda tercinta

Fariza Indra, Dian dan Bunga



Serta

Untuk Bangsa Indonesia Yang Lebih Baik

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala berkah rahmat dan karunia-NYA sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir skripsi saya dengan judul, **“Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Produk Tar dan Char Hasil Pirolisis Daun Tembakau”** sebagai salah satu persyaratan untuk melaksanakan studi di jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang dan sebagai syarat memperoleh gelar sarjana Teknik.

Dalam penelitian ini, penulis mendapat banyak bimbingan, kritik, saran, dan motivasi yang sangat besar dari berbagai pihak yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya skripsi ini. Untuk itu penulis dengan tulus hati ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Seluruh keluarga saya ibu Rosni Annah Rambe, Fariza Indra Tanjung, Mardian Putra Tanjung dan Maudia Bunga Marina Tanjung yang terus menerus mendukung saya dan mendoakan saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Ibu Dr.Eng. Widya WIjayanti, ST., M. Eng., selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Konversi Energi dan juga selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak bimbingan, bantuan, waktu serta ilmu dalam penyusunan skripsi ini, karena berkat bimbingan yang ibu berikan penulis bisa menyelesaikan segala proses dalam proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing II yang juga telah memberikan banyak waktu, bimbingan, bantuan, serta ilmu dan dukungan dalam penyusunan skripsi ini, berkat semangat yang bapak berikan penulis bisa menyelesaikan segala tahapan dalam proses penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Bayu Satriya Wardhana, ST., M.Eng. selaku Dosen Wali yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis untuk bisa melangkah lebih baik sehingga dapat menyelesaikan prososal skripsi ini.
7. Livia Dea Yuliani wanita tangguh yang terus menemani penulis dan memberikan masukan serta menjadi pendengar setia di setiap keluhan yang penulis rasakan dalam

- proses penyusunan skripsi ini, tanpa dirimu hal tersebut akan terasa kurang dalam proses penyusunan skripsi ini.
8. Teman-teman KINGDOM (reza, fadil, dana, romy, feyzar, topan, ilyas, ash, hilmy, isfan, abo, dhyan, satrio, ghani) yang telah memberikan banyak bantuan, pengalaman kenangan, pikiran maupun material.
 9. Keluarga besar APATTE-62 Brawijaya yang telah banyak memberikan penulis kenangan, pikiran, candaan, rasa capek selama bersama kalian
 10. Seluruh teman-teman seperjuangan M14VA (M'14) Brawijaya yang menemani saya dalam menyusun skripsi ini.
 11. Seluruh Asisten dan Laboran Laboratorium Motor Bakar yang telah banyak memberikan bantuan dalam menyusun skripsi ini.
 12. Seluruh pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar terciptanya karya tulis yang lebih baik. Semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

Malang, 9 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Prolisis	6
2.3 Mekanisme Pirolisis	7
2.3.1 Pirolisis Primer	7
2.3.2 Pirolisis Sekunder	8
2.4 Jenis pirolisis	10
2.4.1 Pirolisis Lambat (<i>Slow Pyrolysis</i>)	10
2.4.2 Pirolisis Cepat (<i>Fast Pyrolysis</i>)	10
2.4.3 Pirolisis Kilat (<i>Flash Pyrolysis</i>)	11
2.5 Produk Hasil Pirolisis	12
2.5.1 <i>Tar</i>	12
2.5.2 <i>Char</i>	13
2.5.3 Gas	13
2.6 Biomassa	14
2.7 Struktur dan komposisi Lignusellusa	16
2.7.1 Lignin	17
2.7.2 Selulosa	19
2.7.3 Hemiselulosa	21

2.8	Tembakau.....	22
2.9	Pengaruh Variasi Temperature Pada Pirolisis.....	23
2.10	<i>Thermal Cracking</i>	24
2.11	Bahan Bakar	25
2.11.1	Bahan Bakar Padat.....	25
2.11.2	Bahan Bakar Cair	26
2.12	Sifat-sifat fisik bahan bakar	27
2.12.1	Nilai Kalor (<i>Heating Value</i>).....	27
2.12.2	Titik Nyala (<i>Flash Point</i>).....	27
2.12.3	Massa Jenis (<i>Density</i>).....	28
2.12.4	Viskositas (<i>Viscosity</i>).....	28
2.13	Kadar Air.....	29
2.14	Pengujian Komposisi <i>Char</i>	29
2.14.1	Analisa SEM-EDX.....	29
2.15	Hipotesis.....	30
BAB III METODE PENELITIAN		31
3.1	Metode Penelitian.....	31
3.2	Tempat Pelaksanaan.....	31
3.3	Variabel Penelitian.....	31
3.4	Alat dan Bahan Penelitian.....	32
3.4.1	Alat Yang Digunakan.....	32
3.4.2	Bahan Yang Digunakan	36
3.5	Prosedur Penelitian	36
3.6	Diagram Alir Penelitian	37
3.7	Instalasi Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Hasil Penelitian	41
4.2	Pembahasan.....	41
4.2.1	Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Massa <i>Tar</i> dan <i>Char</i> ...	42
4.2.2	Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Volume <i>Tar</i> dan <i>Char</i>	43
4.2.3	Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Massa Jenis <i>Tar</i>	45
4.2.4	Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Massa Jenis <i>Char</i>	46
4.2.5	Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Viskositas	47
4.2.6	Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap <i>Flash Point</i>	48

4.2.7 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Nilai Kalor <i>Char</i>	49
4.2.8 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Nilai Kalor <i>Tar</i>	50
4.2.9 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Kandungan Unsur	51
BAB V PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Parameter Operasi Dan Produk Pirolisis Untuk Proses Pirolisis	12
Tabel 2.2	Unit Dasar Dalam Lignin.....	19
Tabel 2.3	Kandungan Kimia Tembakau	22
Tabel 2.4	Nilai Kalor Dari Batubara.....	26
Tabel 2.5	Perbandingan Sifat Bahan Bakar Minyak Pirolisis	27



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Grafik hubungan antara temperatur pirolisis dan massa <i>tar</i> hasil pirolisis....	5
Gambar 2.2	Grafik hubungan antara temperatur pirolisis dan nilai kalor pada <i>tar</i>	5
Gambar 2.3	Skema proses pirolisis	6
Gambar 2.4	Jalur reaksi pada mekanisme primer konversi konstituen biomassa (M: monomer; MW: berat molekul)	7
Gambar 2.5	Tahap pirolisis primer dan skunder	8
Gambar 2.6	Skema aliran karbon utama terkait dengan pirolisis biomassa	15
Gambar 2.7	Biomassa tumbuh dengan menyerap energi matahari, karbon dioksida, dan air fotosintesis	15
Gambar 2.8	Selulosa, hemiselulosa dan lignin dalam sel tumbuhan	17
Gambar 2.9	Kurva pirolisis hemiselulosa, selulosa, dan lignin dari TGA	17
Gambar 2.10	Unit dasar polimer lignin	19
Gambar 2.11	Struktur molekul selulosa	19
Gambar 2.12	Struktur kimia blok bangunan hemiselulosa	21
Gambar 2.13	Hubungan temperatur dengan produk akhir proses pirolisis <i>yield</i> biomassa (% wt)	23
Gambar 2.14	Reaksi <i>thermal cracking</i>	24
Gambar 3.1	Oven	32
Gambar 3.2	<i>Moisture analyzer</i>	32
Gambar 3.3	Timbangan elektrik	33
Gambar 3.4	<i>Pyrolyzer</i>	33
Gambar 3.5	Cawan Ukur	34
Gambar 3.6	<i>Stopwatch</i>	34
Gambar 3.7	<i>Flash point tester</i>	35
Gambar 3.8	<i>Bomb Calorimeter</i>	35
Gambar 3.9	<i>Viscometer</i>	35
Gambar 3.10	Instalasi penelitian	38



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pengolahan Data Hasil Pirolisis

Lampiran 2 Data SEM-EDX

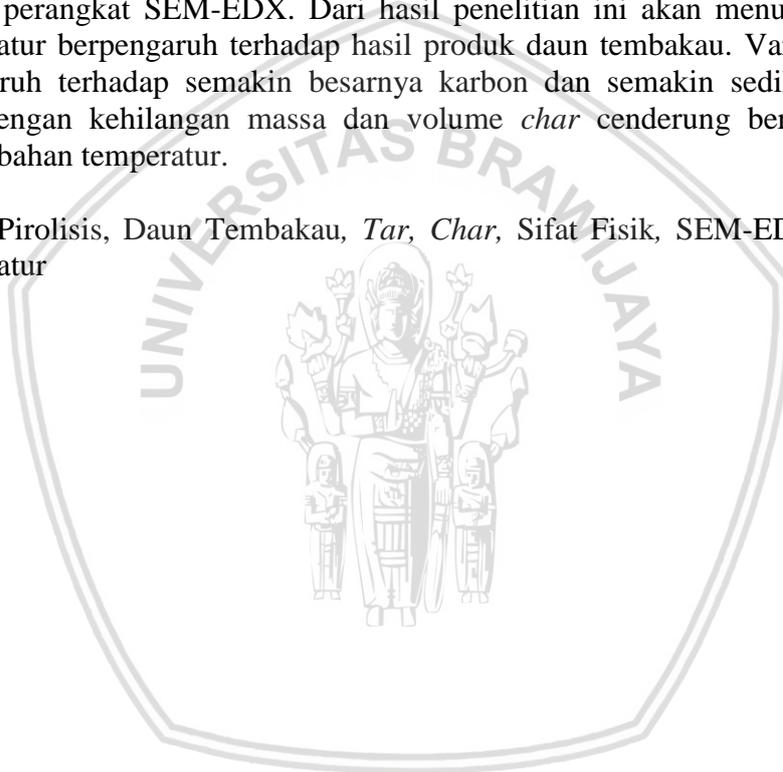


RINGKASAN

Obi Nazari Gusmana, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2018, Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Produk *Tar* Dan *Char* Hasil Pirolisis Daun Tembakau. Dosen Pembimbing: Widya Wijayanti, Slamet Wahyudi.

Pirolisis adalah dekomposisi termokimia biomassa ke dalam berbagai produk yang berguna, melalui proses pemanasan biomassa tanpa adanya udara atau oksigen. *Tar* (bio-oil) dan *char* (arang) merupakan produk hasil dari pirolisis. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi produk *tar* dan *char* hasil pirolisis daun tembakau dengan variasi temperatur. Dalam penelitian ini menggunakan variasi temperatur 350°C, 450°C, 550°C dan 650°C yang dilakukan selama 2 jam dengan bahan baku daun tembakau sebanyak 100 gram dengan kadar air 10%. Hasil dari penelitian ini akan diuji sifat fisik sebagai pembandingan untuk substansi bahan bakar cair dan padat begitu juga kadar unsur dengan menggunakan perangkat SEM-EDX. Dari hasil penelitian ini akan menunjukkan bahwa variasi temperatur berpengaruh terhadap hasil produk daun tembakau. Variasi temperatur juga berpengaruh terhadap semakin besarnya karbon dan semakin sedikitnya oksigen, begitu juga dengan kehilangan massa dan volume *char* cenderung bertambah seiring dengan penambahan temperatur.

Kata Kunci: Pirolisis, Daun Tembakau, *Tar*, *Char*, Sifat Fisik, SEM-EDX, Kandungan Unsur Temperatur



SUMMARY

Obi Nazari Gusmana, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of engineering, Universitas Brawijaya, July 2018, Effect of Temperature on Tar and Char Products of Tobacco Leaves. Academic Supervisor: Widya Wijayanti, Slamet Wahyudi.*

Pyrolysis is the decomposition of thermochemical biomass into a variety of useful products, through the heating process of biomass in the absence of air or oxygen. Tar (bio-oil) and char (charcoal) are the result of products of pyrolysis. The purpose of this study is to identify tar and char products from the resulting pyrolysis of tobacco leaf with variations of temperature. In this study used variations of temperature 350°C, 450°C, 550°C and 650°C conducted for 2 hours with the raw material of tobacco leaf as much as 100 grams with 10% moisture content. The results of this study will be tested for physical properties as comparators for liquid and solid fuel substances as well as elemental content by using SEM-EDX devices. The results of this study will show that variations of temperature affect towards tobacco leaf product results. Variations of temperature also affect towards the greater carbon and the less oxygen, as well as mass losses and char volumes tend to increase along with the addition of temperature.

Keywords: *Pyrolysis, Tobacco Leaf, Tar, Char, Physical Properties, SEM-EDX, Element Temperature Content*



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan ketersediaannya banyak di alam. Biomassa itu sendiri terbentuk dari tumbuhan, pepohonan, rumput, perkebunan, pertanian, dan peternakan bahkan dari limbah sampah sekalipun. Biomassa merupakan salah satu sumber energi alternatif yang memiliki keunggulan yang dapat diperbaharui (*renewable*) sehingga ketersediaannya untuk menyediakan sumber energi dapat diproduksi secara kontinyu. Salah satu biomassa yang dapat kita gunakan untuk mendapat hidrokarbon dari proses pirolisis adalah sampah/limbah daun tembakau. Sampah/limbah daun tembakau merupakan salah satu biomassa yang dapat digunakan untuk mendapatkan bio-oil dengan metode pirolisis.

Tembakau (*Nicotiana tabacum*) merupakan tanaman yang sudah banyak dikenal oleh masyarakat Indonesia yang dijadikan sebagai komoditi perkebunan bernilai jual yang cukup tinggi, artinya memiliki arti penting yaitu sebagai sumber pendapatan para petani dan juga negara. Produksi tembakau sudah banyak tersebar di seluruh wilayah Indonesia, dimana menurut (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2016) bahwa pada tahun 2016, luas areal tembakau di Indonesia adalah 206.337 Ha dengan hasil produksi tembakau adalah 196.154 ton dan di perkirakan pada tahun 2017, luas areal tembakau di Indonesia adalah 206.514 Ha dengan hasil produksi tembakau adalah 198.296 ton, dari data tersebut dapat dilihat bahwa ada peningkatan untuk setiap tahunnya.

Kota Jember merupakan salah satu daerah penghasil tembakau terbesar di Jawa Timur, di Kota Jember sendiri terdapat perkebunan tembakau yang biasa mengekspor tembakau ke Eropa dalam bentuk cerutu, hal ini dapat dilakukan karena tembakau di Indonesia merupakan tembakau dengan kualitas terbaik. Untuk setiap kali panen perusahaan ini dapat menghasilkan sekitar 5 ton dengan komposisi 2,5 ton daun dan 2,5 ton batang. Dalam proses produksinya tidak semua hasil panen dapat digunakan sebagai bahan baku rokok, hanya kualitas tembakau yang baik yang dapat digunakan sebagai bahan baku rokok. Dengan begitu tembakau dengan kualitas kurang tidak terpakai dan hanya akan menjadi sampah, pada akhirnya tembakau tersebut hanya di pendam di dalam tanah.

Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia biomassa menjadi produk yang berguna, dengan proses pemanasan biomassa tanpa adanya udara atau oksigen. Selama

pirolisis, molekul hidrokarbon kompleks yang besar dari biomassa terurai menjadi molekul gas, cair (*tar*), dan padat (*char*) yang relatif lebih kecil dan sederhana (Basu, 2010).

Salah satu parameter yang mempengaruhi kualitas produk *tar* dan *char* hasil pirolisis adalah temperatur. Jika temperatur pirolisis dinaikkan, maka molekul pada biomassa memiliki tingkat energi yang meningkat. Telah banyak dilakukan penelitian yang membahas pengaruh temperatur pirolisis terhadap kualitas *tar* hasil pirolisis, diantaranya penelitian yang dilakukan oleh (Lailunnazar et al, 2013). Pada penelitian tersebut membahas mengenai pengaruh temperatur pirolisis terhadap kualitas *tar* hasil pirolisis serbuk kayu mahoni, dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa dengan meningkatnya temperatur pirolisis maka massa *tar* yang terbentuk akan meningkat pada semua titik. Peningkatan tertinggi terjadi di titik 500°C di mana peningkatan terjadi sebanyak 4 kali lipat dibandingkan dengan titik 450°C. Sedangkan untuk nilai kalor dari *tar* pada titik 250°C, 350°C, 450°C nilai dari nilai kalor *tar* hasil pirolisis meningkat namun pada titik 500°C terjadi penurunan nilai kalor sebesar 70 kali lipat dibandingkan dengan titik 450°C.

Berdasarkan penelitian tersebut bahwa variasi temperatur pirolisis dapat mempengaruhi produk hasil pirolisis. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Lailunnazar menggunakan bahan dasar serbuk kayu mahoni, oleh karena itu sangat menarik untuk meneliti tentang pengaruh temperatur pirolisis terhadap kualitas produk *tar* dan *char* hasil pirolisis daun tembakau. Dalam penelitian ini penulis menggunakan sampah/limbah dari daun tembakau untuk mereduksi sampah/limbah daun tembakau tersebut menjadi produk bahan bakar alternatif yang diharapkan dapat menjawab masalah pemerintah melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Dalam penelitian ini juga diamati produk dan sifat fisik *tar* dan *char* pada variasi temperatur yang berbeda yaitu pada temperatur 350°C, 450°C, 550°C dan 650°C. Dari pengaruh variasi temperatur itu nantinya hasil pirolisis akan diuji apakah sudah mempunyai sifat seperti bahan bakar sehingga pada penelitian ini diharapkan mendapat metode pirolisis yang optimal dimana produk *tar* dan *char* yang dihasilkan dapat sesuai dengan yang diinginkan, baik secara kuantitas maupun komposisi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur terhadap produk *tar* dan *char* hasil pirolisis daun tembakau?

2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur terhadap sifat fisik *tar* dan *char* hasil pirolisis daun tembakau?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Biomasassa yang digunakan adalah daun tembakau yang telah dirajang.
2. *Furnace* menggunakan *fix bed*.
3. Pada proses pemindahan daun tembakau setelah dikeringkan ke *pyrolyzer* dianggap tidak mempengaruhi kadar air daun tembakau.
4. Temperatur awal pirolisis 25°C -28°C dan temperatur fluktuatif holding tungku pirolisis $\pm 10^{\circ}\text{C}$.
5. Ukuran daun tembakau dianggap sama.
6. Kadar air pada daun tembakau adalah 10%.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mereduksi sampah/limbah daun tembakau menjadi bahan bakar alternatif
2. Mengetahui pengaruh variasi temperatur terhadap produk dan sifat fisik *tar* dan *char* hasil pirolisis daun tembakau

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

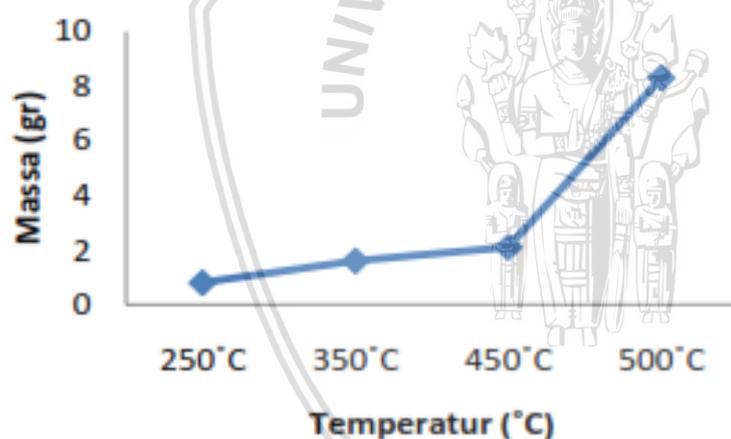
1. Memberikan tambahan pengetahuan dan wawasan bagi penulis tentang pelaksanaan teori-teori yang telah diperoleh selama perkuliahan.
2. Menjadi studi literatur dan juga pembanding untuk data-data dalam penelitian teknologi pirolisis selanjutnya.
3. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan pengetahuan kepada masyarakat tentang pengaruh temperatur pirolisis terhadap produk dan sifat fisik *tar* dan *char* hasil pirolisis pada daun tembakau.
4. Memberikan manfaat sebagai substansi bahan bakar cair dan padat.



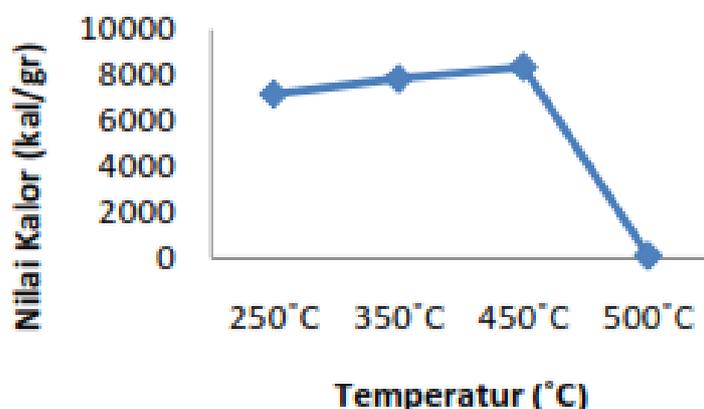
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Lailunnazar (2013). Meneliti variasi temperatur terhadap massa dan energy yang dihasilkan pirolisis serbuk kayu mahoni. Penelitian ini menggunakan variasi temperatur 250°C, 350°C, 450°C dan 500°C selama 3 jam. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya temperatur pirolisis maka massa *tar* yang terbentuk akan meningkat pada semua titik. Peningkatan tertinggi terjadi di titik 500°C di mana peningkatan terjadi sebanyak 4 kali lipat dibandingkan dengan titik 450°C. Sedangkan untuk nilai kalor dari *tar* pada titik 250°C, 350°C, 450°C nilai dari nilai kalor *tar* hasil pirolisis meningkat namun pada titik 500°C terjadi penurunan nilai kalor sebesar 70 kali lipat dibandingkan dengan titik 450°C. Jumlah produk minyak pirolisis (*tar*) dan nilai kalor dari *tar* yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan 2.2.



Gambar 2.1 Grafik hubungan antara temperatur pirolisis dan massa *tar* hasil pirolisis
Sumber: Lailunnazar et al (2013)



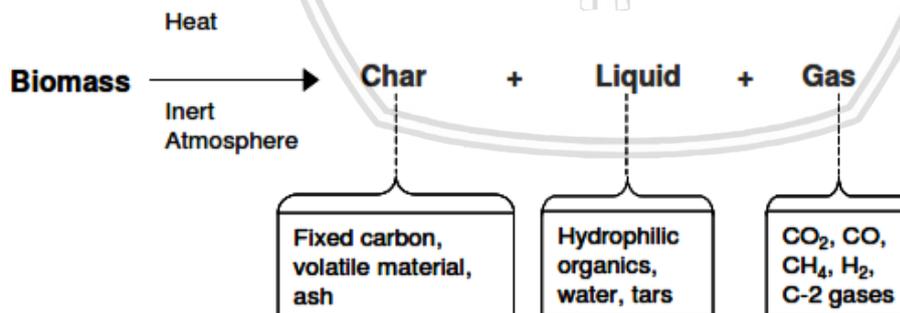
Gambar 2.2 Grafik hubungan antara temperatur pirolisis dan nilai kalor pada *tar*
Sumber: Lailunnazar et al (2013)

2.2 Pirolisis

Pirolisis adalah dekomposisi termokimia biomassa ke dalam berbagai produk yang berguna. Pirolisis melibatkan pemanasan biomassa tanpa adanya udara atau oksigen pada tingkat yang ditentukan sampai temperatur maksimum, yang dikenal sebagai temperatur pirolisis, dan menahannya di sana untuk waktu tertentu. Sifat produknya bergantung pada beberapa faktor, termasuk temperatur pirolisis dan laju pemanasan. Selama pirolisis, molekul hidrokarbon kompleks yang besar dari biomassa terurai menjadi molekul gas, cair (*tar*), dan padat (*char*) yang relatif lebih kecil dan sederhana. Produk dari pirolisis berawal dari gas yang dapat dikondensasi dan padat (*char*). Lalu gas yang dapat dikondensasi dapat memecah lebih jauh ke dalam gas yang tidak dapat dikondensasi (CO , CO_2 , H_2 , dan CH_4), cair (*tar*), *char*. Pirolisis menjanjikan konversi biomassa limbah menjadi bahan bakar cair yang bermanfaat. Tidak seperti pembakaran, tidak eksotermik (Basu, 2010).

Pirolisis memiliki kesamaan dan beberapa tumpang tindih dengan proses seperti retak, devolatilisasi, karbonisasi, distilasi kering, distilasi destruktif, dan thermolisis, namun tidak memiliki kesamaan dengan proses gasifikasi, yang melibatkan reaksi kimia dengan agen eksternal yang dikenal sebagai media gasifikasi. Pirolisis biomassa biasanya dilakukan dalam kisaran temperatur yang relatif rendah yaitu 300°C sampai 650°C dibandingkan dengan 800°C sampai 1000°C untuk gasifikasi (Basu, 2010).

Produk awal pirolisis terbuat dari kondensasi gas dan solid *char*. Gas-gas dapat dibagi menjadi gas-gas yang tidak dapat dikondensasi (CO , CO_2 , H_2 , and CH_4), *tar* (minyak) dan *char* (karbon padat). Proses pirolisis dapat ditunjukkan pada reaksi seperti berikut.



Gambar 2.3 Skema proses pirolisis

Sumber: Brownsort (2009)

Dekomposisi ini terjadi sebagian melalui reaksi homogen fase gas dan sebagian melalui reaksi termal heterogen fase padat gas. Dalam reaksi fase gas, uap yang dapat dikondensasi dipecah menjadi molekul-molekul permanen yang lebih kecil dari gas permanen yang tidak dapat dikondensasi seperti CO dan CO_2 .

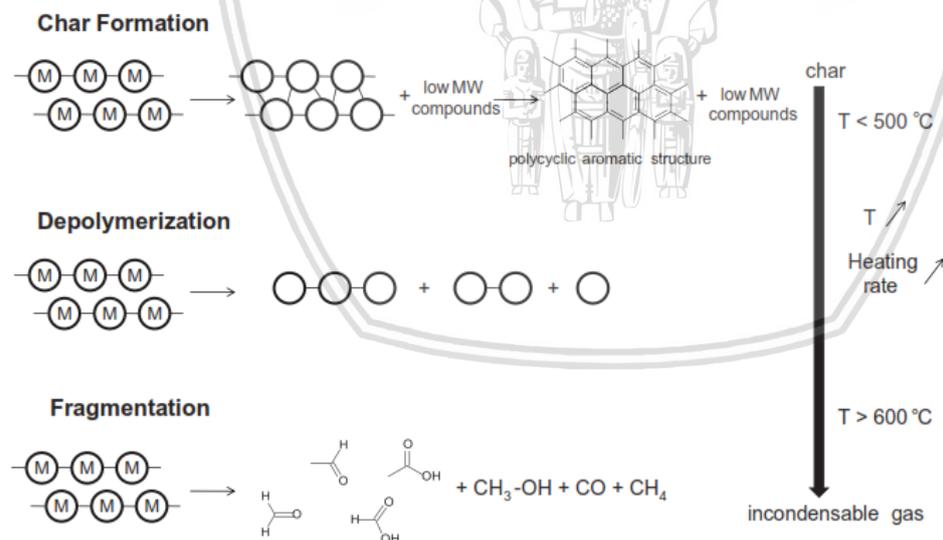
2.3 Mekanisme Pirolisis

Selama proses pirolisis, ikatan-ikatan kimia yang berbeda di dalam polimer rusak, sehingga menghasilkan pelepasan senyawa volatil dan dalam reaksi penataan ulang dalam matriks residu. Reaksi-reaksi ini dianggap sebagai mekanisme primer. Kemudian, pada proses pembentukannya tersebut, terdapat beberapa senyawa volatil yang tidak stabil sehingga mengalami konversi tambahan yang disebut reaksi sekunder.

2.3.1 Pirolisis Primer

Pada pirolisis primer biomassa akan membelah dan terdevolatilisasi dimana menjadi penyusun utama karena efek panas. Karbonil karboksil, karbonil, dan gugus hidroksil yang berbeda juga terbentuk pada tahap primer ini. Pada proses devolatilisasi melibatkan pelepasan air, karbon monoksida, dan karbon monoksida (Tripathi et al 2015).

konstituen biomassa utamanya adalah biopolimer. Menurut literatur, konversi utama biomassa menyajikan karakteristik umum dan dapat dijelaskan oleh tiga jalur utama, tergantung pada sifat ikatan kimia yang rusak. Istilah yang paling sering digunakan untuk mengkarakterisasi jalur ini yakni formasi *char*, depolimerisasi dan fragmentasi yang dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Jalur reaksi pada mekanisme primer konversi konstituen biomassa (M: monomer; MW: berat molekul)

Sumber: Collard and blind (2014)

1. Proses Pembentukan *Char*

Proses pembentukan *Char* terbentuk dari konversi biomassa dalam residu padat yang disebut *char* yang menyajikan struktur polisiklik aromatik. Pada jalur ini umumnya terjadi reaksi penataan ulang intra dan intermolekular, yang menghasilkan lebih tinggi

tingkat retikulasi dan stabilitas termal yang lebih tinggi dari residu. Langkah-langkah utama dari jalur ini adalah pembentukan cincin benzena dan kombinasi cincin-cincin dalam struktur polisiklik. Semua reaksi penataan ulang ini umumnya disertai dengan pelepasan air atau gas yang tak terkondensasi.

2. Proses Depolimerisasi

Pada proses depolimerisasi terjadi pemecahan ikatan antara unit monomer dari polimer. Setelah terjadinya pemecahan ikatan-ikatan tersebut, reaksi stabilisasi dari dua ujung rantai baru terjadi. Hasil polimerisasi dalam penurunan tingkat polimerisasi rantai sampai molekul yang dihasilkan menjadi mudah menguap. Molekul-molekul ini, yang dapat dikondensasi pada temperatur ambien, paling sering ditemukan dalam fraksi cair dalam bentuk turunan-monomer, dimer atau trimer.

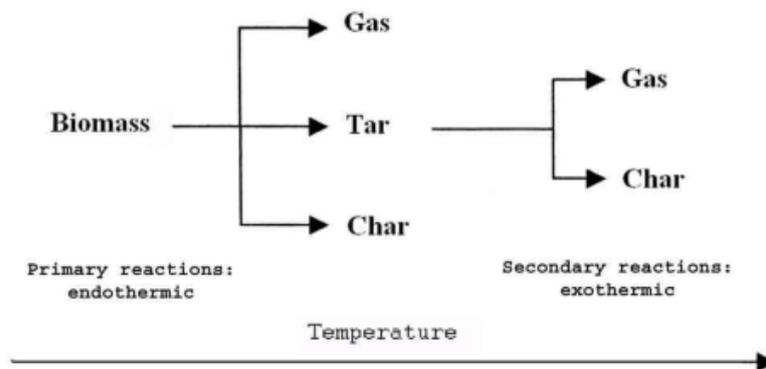
3. Proses Fragmentasi

Proses fragmentasi terbentuk dari hubungan banyak ikatan kovalen polimer, bahkan di dalam unit monomer, sehingga menghasilkan pembentukan gas tak terkondensasi dan keragaman senyawa organik rantai kecil yang dapat dikondensasikan pada temperatur kamar.

2.3.2 Pirolisis Sekunder

Proses pirolisis sekunder sesuai dengan pirolisis primer dimana terjadi *cracking* pada senyawa berat yang mengubah biomassa menjadi CH_2 , CH_4CO dan CO_2 . Selain itu terdapat beberapa molekul yang kembali terkondensasi yang menjadi fase cair atau disebut dengan bio-oil. Terkadang *cracking* ini adalah *thermal cracking* dan terkadang *catalytic cracking* tergantung pada kondisi pirolisis.

Berikut tahapan dari Pirolisis Primer dan Sekunder.



Gambar 2.5 Tahap pirolisis primer dan skunder
Sumber: Zajec L (2009)

Pada Gambar 2.5 merupakan tahap pertama, panas yang dipasok ke biomassa memicu reaksi primer, memutus rantai panjang matriks polimer organik. Depolimerisasi terjadi pada temperatur yang lebih rendah dan menghasilkan fraksi volatil (gas primer dan *tar*) dan fraksi padat (primary *char*). Pada tahap kedua, *tar*, primer pada temperatur yang lebih tinggi, berubah menjadi reaksi eksoterm sekunder (partikel *char*) dan berubah menjadi gas dengan berat molekul lebih rendah melalui proses pemecahan (Zajec L, 2009).

Pelepasan senyawa volatil yang dilepaskan yang tidak stabil di bawah kondisi temperatur reaktor akan mengalami reaksi sekunder seperti retak atau rekombinasi. Reaksi retak ini terjadi karna pemecahan ikatan kimia dalam senyawa volatil, yang menghasilkan pembentukan molekul MW (molekul berat) yang lebih rendah. Karena pecahnya ikatan kimia yang terjadi baik di dalam polimer atau dalam senyawa volatil, ada kesamaan dalam produk yang diperoleh dari fragmentasi dan reaksi retak dan kadang-kadang sulit untuk melihat jalur mana yang terutama bertanggung jawab atas pembentukan senyawa MW rendah. Rekombinasi (rekondensasi) terdiri dari kombinasi senyawa volatil untuk menghasilkan molekul MW yang lebih tinggi, yang terkadang tidak lagi mudah menguap dalam kondisi temperatur reaktor. Ketika rekombinasi terjadi di dalam pori-pori polimer, reaksi ini dapat mengarah pada pembentukan *char* sekunder. Dalam fase gas, kehadiran PAH adalah karakteristik kondisi yang menguntungkan untuk reaksi rekombinasi. Mekanisme sekunder dapat dikatalisasi pada permukaan arang, dari reaktor atau dari katalis yang ditambahkan. Dalam kasus rekombinasi, reaksi-reaksi ini dapat mengarah pada pembentukan deposit pada permukaan katalitik.

Distribusi arang dan hasil volatil sangat tergantung pada laju pemanasan polimer. Dengan tingkat pemanasan rendah ($<10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$), ketika ikatan kimia terlemah putus, banyak yang lain masih stabil, sehingga struktur polimer hanya sedikit terpengaruh, sehingga menghambat pembentukan senyawa volatil. Dengan tingkat pemanasan yang sangat tinggi ($>100^{\circ}\text{C}/\text{s}$), banyak jenis ikatan kimia secara bersamaan rusak, yang mengarah pada pelepasan banyak senyawa volatil, sebelum reaksi penataan ulang mungkin terjadi. Ukuran partikel dari bahan baku secara langsung berkaitan dengan laju pemanasan bahan bakar padat. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa hasil dari volatil meningkat dengan penurunan ukuran partikel, terutama dalam kasus partikel halus ($<1\text{mm}$).

Distribusi senyawa volatil sangat bergantung pada temperatur reaktor. Sementara untuk proses terjadinya reaksi depolimerisasi pada temperatur 250°C dan 500°C , reaksi fragmentasi pada rentang temperatur ini hanya menyangkut beberapa jenis ikatan kimia.

Sebagai akibatnya hasil cairan optimum diperoleh dalam proses di mana temperatur reaktor umumnya terdiri antara 450°C dan 550°C. Dengan naiknya temperatur reaktor di atas 550°C, maka semakin banyak reaksi fragmentasi yang terjadi, yang menghasilkan pembentukan senyawa rendah MW, yang beberapa di antaranya tidak dapat dikondisikan. Mengenai reaksi sekunder, Penelitian spesifik telah menunjukkan bahwa pengaruh retak senyawa volatil pada hasil produk menjadi signifikan untuk temperatur di atas 600°C, sedangkan penampilan PAH, karakteristik reaksi rekombinasi, umumnya diamati pada temperatur yang jauh lebih tinggi ($\geq 800^\circ\text{C}$). Reaksi sekunder ini lebih mungkin terjadi ketika waktu tinggal dari senyawa volatil dalam reaktor panjang (Collard and blind, 2014).

2.4 Jenis Pirolisis

Berdasarkan temperatur, laju pemanasan, dan waktu tinggal (*residence time*), pirolisis diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama yaitu Pirolisis lambat (*slow pyrolysis*), Pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) Pirolisis kilat (*flash pyrolysis*)

2.4.1 Pirolisis Lambat (*Slow Pyrolysis*)

Pirolisis lambat merupakan jenis pirolisis konvensional yang dicirikan dengan laju pemanasan yang lambat dan waktu tinggal yang lama. terjadi pada temperatur di atas 400°C dan waktu tinggal yang tinggi (4-8 menit). Dengan laju pemanasan 1-5°C/detik, reaksi terjadi dalam keseimbangan. Dengan kondisi ini, fase gas dari produk akan tinggi karena reaksi sekunder yang lengkap. Hasil akhir *char* menurun dengan meningkatkan temperatur proses dari 400°C menjadi 700°C. *Char* akan mencapai nilai maksimum sekitar 550°C dan turun pada temperatur 700°C. Penurunan hasil *char* pada temperatur yang lebih tinggi terkait dengan peningkatan volatil (gas primer dan *tar*) dari *tar*. Itu menjadi sasaran reaksi sekunder, yang berarti kurang produksi cairan dan gas lebih banyak (Basu, 2010).

2.4.2 Pirolisis Cepat (*Fast Pyrolysis*)

Pirolisis cepat terjadi pada temperatur antara 500°C - 950°C, dengan laju pemanasan sekitar 100°C -300°C/detik dan waktu tinggal yang sangat singkat (1-5 detik). Bila waktu tinggal terlalu pendek (<1 s), hasilnya adalah depolimerisasi biomassa yang tidak lengkap dan produk cairan yang kurang homogen yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan bio-oil. Selain tingkat pemanasan yang tinggi perlu untuk mendinginkan uap pirolisis dengan sangat cepat agar diperoleh produk yang lebih stabil. Untuk memanaskan biomassa

dengan sangat cepat, partikel homogen yang lebih kecil harus digunakan, sering kali diolah dengan penggiling mekanis. Teknologi yang terkait dengan jenis pirolisis ini mendapat banyak perhatian karena bahan bakar cair yang dihasilkan lebih padat dan mudah ditangani (Basu, 2010).

Pirolisis cepat digunakan untuk produksi bio-oil sebagai hasil produk bio-oil dalam pirolisis cepat mendominasi hasil produk arang dan gas. Pirolisis cepat yang khas menghasilkan 60-75% produk cair, 15-25% bio-char dan 10-20% produk gas tak terkondensasi. Tingkat pemanasan tinggi dalam pirolisis cepat mengubah biomassa menjadi produk cair sebelum dapat bereaksi untuk membentuk arang yang tidak diinginkan. Bio-oil yang diproduksi oleh pirolisis cepat sangat korosif karena nilai pH yang rendah. Nilai kalor tinggi dari bio-oil ini kira-kira setengah dari minyak mentah, yang membuat peningkatan bio-oil diperlukan sebelum menggunakannya, proses pirolisis cepat saat ini sedang digunakan di beberapa aplikasi lain seperti produksi makanan flavor atau untuk produksi bahan kimia tertentu juga (Tripathi et al, 2015).

2.4.3 Pirolisis Kilat (*Flash Pyrolysis*)

Pirolisis kilat adalah jenis pirolisis yang ditandai dengan tingkat pemanasan tinggi ($> 1000^{\circ}\text{C/s}$), waktu tinggal pendek (0,1-1 detik) dari komponen padat dan mudah menguap dan rentang temperatur yang berbeda tergantung pada produk yang diinginkan. Untuk temperatur antara 450°C dan 750°C , sampai 80% berat fraksi cair tercapai, sedangkan untuk temperatur di atas 750°C (flash pirolisis pada temperatur tinggi) produksi gas dapat mencapai 80% dari berat produk. dan pada saat yang sama, mengingat kecepatan reaksi yang tinggi, ia memiliki *tar* kurang dan nilai kalor gas meningkat sebesar 5-10% (Basu, 2010).

Beberapa hal penting pada proses pirolisis cepat untuk memproduksi cairan adalah:

1. Tingkat pemanasan dan perpindahan panas yang sangat tinggi. Untuk biomassa biasanya berukuran kurang dari 3 mm, biomassa umumnya memiliki konduktivitas termal yang rendah.
2. Temperatur reaksi pirolisis yang dikontrol berkisar 500°C untuk dapat memaksimalkan hasil cairan sebagian besar biomassa.
3. *Resistences times* biasanya kurang dari 2 s untuk meminimalkan reaksi sekunder
4. Pendinginan yang cepat pada uap pirolisis untuk menghasilkan produk bio-oil.

Berikut adalah ringkasan tabel dari berbagai jenis pirolisis yang dijelaskan dalam paragraf ini sesuai dengan parameter proses dan produk pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Parameter Operasi Dan Produk Pirolisis Untuk Proses Pirolisis

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

Sumber: Jahirul et al (2012)

2.5 Produk Hasil Pirolisis

Terdapat tiga produk utama yang dihasilkan pada pirolisis biomassa yaitu *Tar* (bio-oil), gas, dan bio-*char*.

2.5.1 *Tar*

Tar atau bio-oil merupakan campuran dari air, hasil arang, dan senyawa (monomer, oligomer, polimer, atau fragmen) yang berasal dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin makropolimer biomassa, yang meliputi gula, asam, alkohol, aldehida, keton, furan, ester, fenol, guaiacol, syringols, dan senyawa multifungsi, seperti asam hidroksiasetat, hidroksialdehid, dan hidroksiketon. Bahan organik ini hadir dalam bio-oil terus bereaksi untuk bergerak menuju kesetimbangan kimia. Bio-oil memiliki komposisi unsur yang hampir sama dengan bahan baku biomassa sehingga memiliki kandungan oksigen yang tinggi, yang membuatnya berbeda dari minyak petroleum. Karena bio-oil mengandung sebagian besar asam organik seperti asam asetat dan formiat, ia memiliki nilai pH yang rendah.

Bio-oil dapat dipisahkan menjadi fraksi yang larut dalam air dan tidak larut dalam air. fraksi yang larut dalam air mengandung senyawa organik ringan, sedangkan fraksi yang tidak larut dalam air mengandung molekul besar yang berasal dari lignin, yang dikenal sebagai lignin pyrolytic. Kandungan fraksi bio-oil yang tidak larut dalam air bervariasi dari sekitar 20 hingga 40% berat. Lignin pyrolytic terutama terdiri dari tri- dan tetramer dari subunit lignin (hidroksifenil, guaiacyl, dan unit syringil), memiliki berat molekul rata-rata antara 650 dan 1300 g / mol, dan mewakili hampir 80% dari kandungan asli biomassa lignin. oligomer lignin yang ditemukan dalam lignin pirolitik dibentuk oleh pemisahan mekanis langsung dari partikel biomassa sebagai hasil dari retak parsial molekul lignin. Polimerisasi berlanjut sampai fraksi kaya lignin terberat memisahkan keluar dari matriks sebagai endapan kental. Konsekuensi dari reaksi polimerisasi dapat dilihat dari peningkatan berat molekul rata-rata dan viskositas bio-oil dari waktu ke waktu

sebagaimana diketahui bahwa viskositas bio-oil berkorelasi langsung dengan berat molekul rata-rata (Mw) dan fraksi bio-oil yang tidak larut dalam air. Peningkatan bio-oil Mw terjadi karena reaksi kondensasi atau dehidrasi dari konstituen yang diturunkan dari karbohidrat seperti aldehida dan keton yang menghasilkan air sebagai produk sampingan. Oleh karena itu, peningkatan kadar air bio-oil bisa mengarah pada pemisahan fase bio-oil dengan endapan berat di bagian bawah dan cairan encer ringan di bagian atas (Rosendahl L, 2013).

2.5.2 Char

Char, bio-*char* atau arang merupakan residu padat partikel biomassa pirolisis. *Char* biasanya dilepas dari aliran uap oleh pemisahan siklon. *Char* mengandung proporsi tinggi karbon dengan jumlah kecil oksigen dan hidrogen. *Char* juga mengandung sebagian besar anorganik yang ada dalam biomassa asli. Oleh karena itu, dapat digunakan untuk amandemen tanah, sehingga menangkap karbon kembali ke bumi. Karena produk arang memiliki nilai kalor (HHV) sekitar 23 MJ / kg, *char* dapat digunakan sebagai sumber energi untuk proses panas. Arang juga dapat digunakan untuk produksi hidrogen atau syngas dengan steam reforming atau proses perengkahan termal. Arang dapat digunakan sebagai bahan bakar padat dalam boiler atau dapat disedot dengan bahan bakar fosil konvensional. Akibatnya, arang dapat dianggap sebagai produk sampingan yang berharga. Arang juga dapat diaktifkan secara fisik atau kimia untuk meningkatkan struktur permukaan mikroskopisnya sehingga digunakan sebagai penyaringan dan adsorpsi polutan organik dan anorganik (Rosendahl L, 2013).

2.5.3 Gas

Gas tak terkondensasi dari pirolisis cepat biomassa tersusun dari karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2), metana (CH_4), etena atau etilena (C_2H_4), etana (C_2H_6), propena atau propilena (C_3H_6), dan propana (C_3H_8). Selain itu, jika unit pengumpul cair tidak 100% efektif, beberapa volatil ringan dapat berada dalam aliran gas seperti pentana, benzena, toluena, xilena, dan asetaldehida. Karena gas pirolisis mengandung jumlah karbon dioksida yang signifikan bersama dengan metana dan beberapa lainnya. Gas yang mudah terbakar, mungkin digunakan sebagai bahan bakar untuk keperluan pembakaran industri, oleh karena itu penggunaan yang paling efektif untuk gas pirolisis adalah sebagai medium fluidising atau gas pembawa untuk reaktor

unggulan fluida dan juga dapat digunakan di dalam pabrik untuk menyediakan panas proses (Rosendahl, L. 2013).

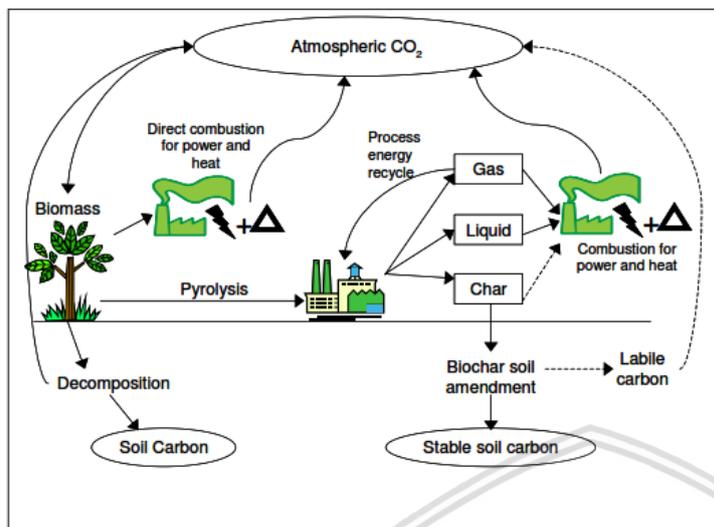
Dekomposisi primer biomassa menghasilkan gas yang dapat dikondensasi (uap) dan gas yang tidak dapat dikondensasi (gas primer). Uap terbuat dari molekul yang lebih berat, dan mengembun pada pendinginan sehingga menambah hasil pirolisis cair. Campuran gas yang tidak dapat dikondisikan mengandung gas dengan berat molekul rendah seperti karbon dioksida, karbon monoksida, metana, etana, dan etilen, gas-gas tersebut tidak mengembun pada pendinginan. Gas-gas tak terkondensasi tambahan yang dihasilkan melalui retak sekunder uap disebut gas sekunder. Produk gas akhir yang tidak dapat dikondensasi dengan demikian adalah campuran dari gas primer dan sekunder. LHV gas primer biasanya 11 MJ / Nm³, namun gas pirolisis yang terbentuk setelah retak sekunder yang parah pada uap jauh lebih tinggi: 20MJ / Nm³ (Diebold and Bridgwater, 1997).

2.6 Biomassa

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan yang ketersediaannya banyak di alam. Biomassa itu sendiri terbentuk dari tumbuhan, pepohonan, rumput, perkebunan, pertanian, dan peternakan bahkan dari limbah sampah sekalipun. Siklus terbentuknya biomassa berasal dari bahan organik non fosil yang hasil pembakarannya tidak menimbulkan CO₂ yang berbahaya bagi lingkungan sehingga menjadikannya sebagai sumber energi yang ramah lingkungan. Karbon ini disebut sebagai karbon netral karena karbon dioksida yang dilepaskan saat pembakaran biomassa diserap kembali oleh tumbuhan. Biomassa merupakan salah satu sumber energi alternatif yang memiliki keunggulan yang dapat diperbaharui (*renewable*) sehingga ketersediaannya untuk menyediakan sumber energi dapat diproduksi secara kontinyu.

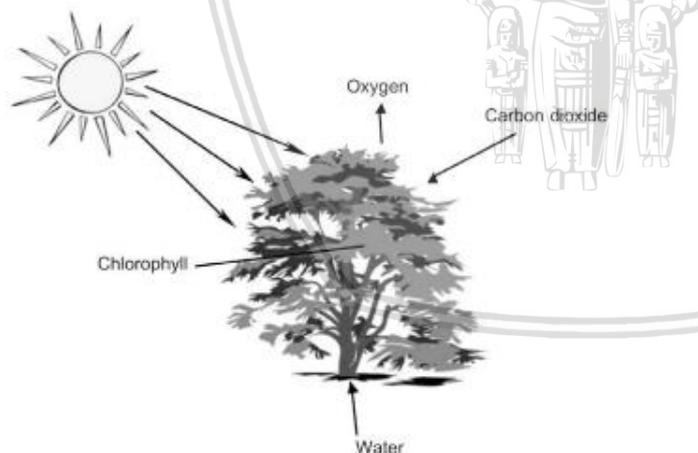
Biomassa sebagai bahan bakar alternatif menyediakan energi sebesar 3×10^{12} Joule per tahun dan yang dimanfaatkan hanya dibawah 2% sebagai bahan bakar (Abraham, 2012). Dengan ketersediaan energi biomassa sebesar itu maka penggunaan energi biomassa perlu untuk ditingkatkan. Saat ini penggunaan energi biomassa hanya dilakukan dengan cara konvensional yaitu dengan membakarnya secara langsung namun penggunaan energi biomassa secara langsung sebagai bahan bakar kurang efisien, sehingga mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar dianggap lebih baik dalam pemanfaatannya, cara mengkonversikan biomassa menjadi bahan bakar dapat dilakukan secara *physical*, *thermos-chemical* dan *bio-chemical*. Dari ketiga cara tersebut dihasilkan *char* (karbon

padat), tar (bio-oil), dan gas permanen yang meliputi metana, hidrogen, karbon monoksida dan karbon dioksida.



Gambar 2.6 Skema aliran karbon utama terkait dengan pirolisis biomassa
Sumber: Brownsort (2009)

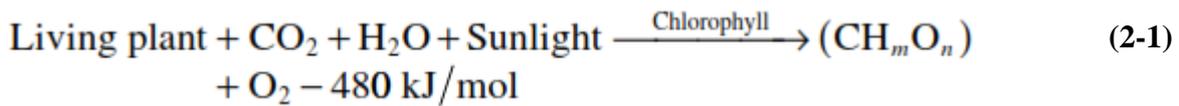
Biomasa botani terbentuk melalui konversi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer menjadi karbohidrat oleh energi matahari dengan adanya klorofil dan air. Spesies biologis tumbuh dengan mengonsumsi spesies botani atau spesies biologis lainnya. Tanaman menyerap energi matahari dalam proses yang disebut fotosintesis pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Biomassa tumbuh dengan menyerap energi matahari, karbon dioksida, dan air fotosintesis

Sumber: Basu (2010)

Dengan adanya sinar matahari dengan panjang gelombang tertentu, tanaman hijau memecah air untuk mendapatkan elektron dan proton dan menggunakannya untuk mengubah CO₂ menjadi glukosa (diwakili oleh CH_mOn), melepaskan O₂ sebagai produk limbah. Prosesnya dapat diwakili oleh persamaan ini:



Untuk setiap mol CO₂ yang diserap menjadi karbohidrat atau glukosa dalam biomassa, 1 mol oksigen dilepaskan. Oksigen ini berasal dari air yang diambil tanaman dari tanah atau atmosfer. Klorofil meningkatkan penyerapan karbon dioksida dari atmosfer, menambah pertumbuhan tanaman. Bahan penting untuk pertumbuhan biomassa adalah:

- Tanaman hidup
- Spectrum radiasi matahari
- Karbon dioksida
- Klorofil (berfungsi sebagai katalis)
- Air

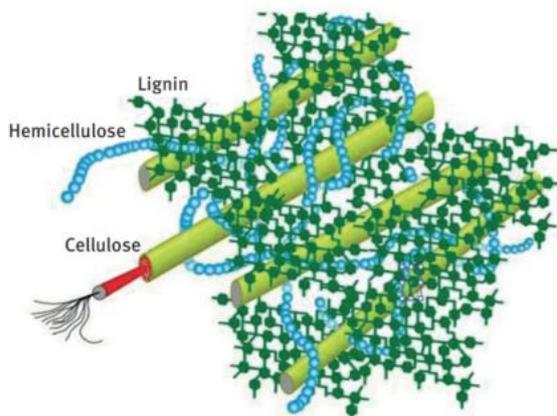
Energi kimia yang tersimpan dalam tanaman kemudian diteruskan ke hewan dan manusia yang menjadikan tanaman sebagai makanan. Limbah hewan dan manusia juga berkontribusi terhadap biomassa.

2.7 Struktur dan Komposisi Lignoselulosa

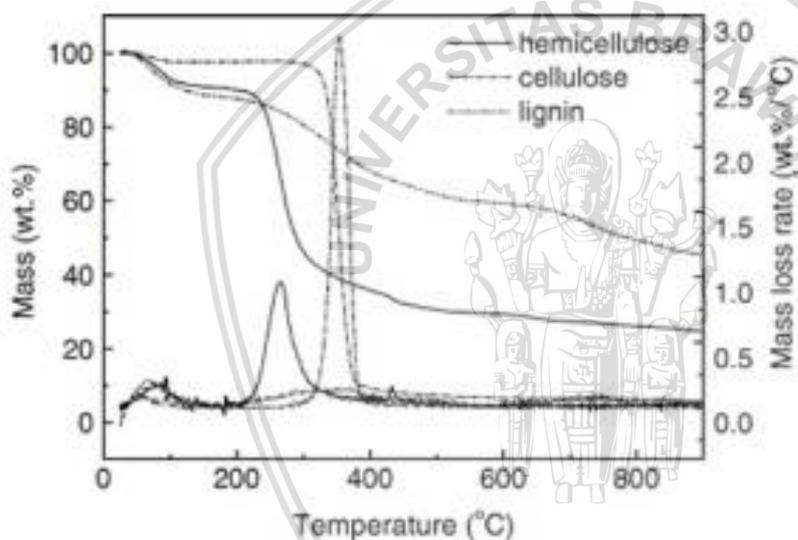
Biomassa lignoselulosa terdiri dari tiga komponen utama, selulosa, hemiselulosa dan lignin, dengan sejumlah kecil ekstraktif dan abu. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8 tiga komponen utama tidak terdistribusi secara merata di dinding sel sebagai kerangka, menghubungkan material dan padatan keras, masing-masing. Selulosa makromolekul secara teratur berkumpul untuk membentuk serat mikro keras yang berfungsi sebagai bahan kerangka dinding sel, dan ruang dalam dikemas dengan menghubungkan bahan hemiselulosa amorf dan lignin. Selulosa terhubung dengan molekul hemiselulosa atau lignin terutama melalui ikatan hidrogen, sedangkan hubungan antara hemiselulosa dan lignin termasuk ikatan hidrogen dan kovalen. Karbohidrat dan lignin terkait erat dalam kompleks lignin-karbohidrat, yang menghasilkan sisa fragmen karbohidrat atau lignin dalam sampel lignin atau hemiselulosa yang diekstraksi.

Komposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin dalam biomassa bervariasi secara signifikan, tergantung pada jenis biomassa. Kandungan selulosa bisa mencapai 40-60%, kandungan hemiselulosa adalah 15-30%, dan kandungan lignin sekitar 10-25%. Selain tiga komponen utama, sebagian kecil ekstraktif dan abu anorganik juga ada dalam biomassa sebagai komponen nonstruktural yang tidak merupakan dinding sel atau lapisan sel. Biomassa makanan mengandung jumlah yang jauh lebih tinggi dari tiga komponen

utama (~ 90%), sementara biomassa pertanian dan herba mengandung lebih banyak ekstraktif dan abu.



Gambar 2.8 Selulosa, hemiselulosa dan lignin dalam sel tumbuhan
Sumber: Wang et al (2017)



Gambar 2.9 Kurva pirolisis hemiselulosa, selulosa, dan lignin dari TGA
Sumber: Yang et al (2007)

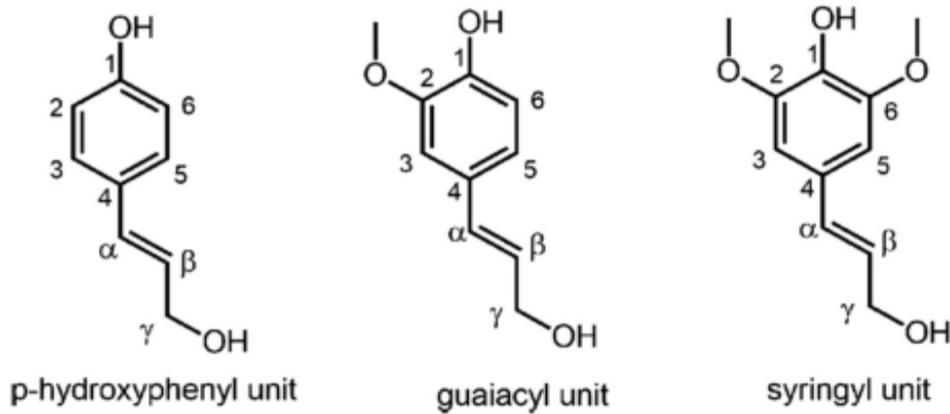
2.7.1 Lignin

Lignin merupakan salah satu polimer organik yang paling melimpah di Bumi setelah selulosa dan merupakan penyusun penting ketiga dari dinding sel biomassa kayu. Lignin tidak larut bahkan dalam asam sulfat sekalipun, berbeda dengan struktur karbohidrat selulosa dan hemiselulosa, lignin memiliki matriks aromatik yang menambah kekuatan dan kekakuan pada dinding sel. Kandungan lignin bervariasi di antara spesies biomassa dan bahkan di antara bagian morfologi tanaman. Sebagai contoh, lignin kayu lunak menyumbang 25-35% dari total massa tanaman, sedangkan lignin kayu keras menyumbang 20-25% dan rumput sekitar 10-15% (Wang et al, 2017).

Lignin merupakan komponen lignoselulosa yang sulit terdekomposisi, dekomposisinya terjadi perlahan-lahan dibawah rentan temperatur hemiselulosa dan selulosa hingga 900C, tetapi dg tingkat kehilangan mass rendah <0,14wt%/C dan residu padat yg tersisa dari lignin ~45,7wt%/C dapat dilihat pada Gambar 2.9. Lignin penuh dengan cincin aromatik dengan berbagai cabang, aktivitas ikatan kimia di lignin menutupi rentang yang sangat luas, yang menyebabkan degradasi lignin yang terjadi dalam rentang temperatur yang luas (100-900C). Degradasi termal lignin menghasilkan lebih banyak produk *char* hampir setengah dari persen biomassa dan lebih sedikit *tar* dan gas (Zajec L, 2009).

Lignin pyrolytic dispekulasikan untuk bertanggung jawab atas viskositas tinggi, berat molekul rata-rata tinggi, dan stabilitas bio-oil yang rendah. Biomassa dengan proporsi lignin yang lebih tinggi dapat meningkatkan berat molekul rata-rata dan viskositas bio-oil (Rosendahl L, 2018).

Lignin merupakan polimer tridimensional amorf yang terdiri dari tiga satuan dasar, yaitu p-coumaryl (4-hydroxycinnamyl), coniferyl (3-methoxy 4-hydroxycinnamyl) dan sinapyl (3,5-dimethoxy 4-hydroxycinnamyl) alkohol, yang juga dikenal sebagai p-hydroxyphenyl (H), guaiacyl (G) dan syringyl (S) dapat dilihat pada gambar 2.7. Perbedaan utama dalam ketiga unit tersebut yakni pada jumlah gugus methoxyl yang menempel pada cincin aromatik. Unit H, G dan S masing-masing tidak memiliki satu dan dua gugus methoxyl. Unit dasar ini mengandung gugus fenil dan rantai samping propil oleh karena itu, unit aromatik yang khas dalam lignin disebut unit fenilpropana (ppu). Proporsi unit H/G/S di lignin sangat tergantung pada spesies biomassa. Seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2, kayu lunak lignin memiliki kandungan tinggi unit guaiacyl, lignin kayu menghadirkan campuran unit guaiacyl dan syringyl, dan rumput lignin mengandung campuran dari ketiga unit [147, 149]. Menurut kelimpahan tiga unit dasar, lignin dapat diklasifikasikan sebagai tipe-G (kayu lunak lignin), tipe-G-S (lignin kayu keras) dan tipe-H-G-S (rumput lignin). Unit-unit ini membentuk matriks lignin melalui berbagai hubungan, dan gugus fungsi yang berbeda melekat pada rantai samping propil, yang mengarah ke struktur lignin yang sangat rumit.



Gambar 2.10 Unit dasar polimer lignin.
 Sumber: Wang et al (2017)

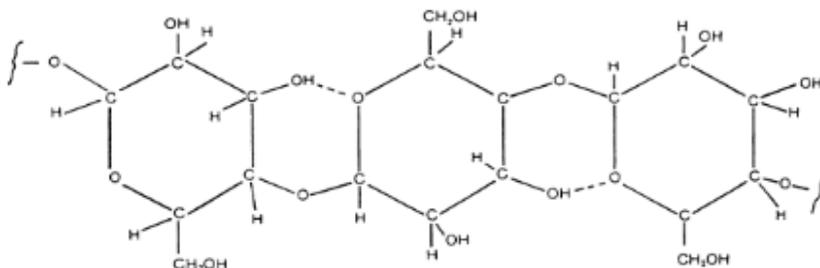
Tabel 2.2
 Unit Dasar Dalam Lignin

Basic unit	Softwood lignin	Hardwood lignin	Grass lignin
Syringyl unit (S)	0-1%	50-75%	25-50%
Guaiacyl unit (G)	90-95%	25-50%	25-50%
p-hydroxyphenyl unit (H)	0.5-3.4%	Trace	10-25%

Sumber: Wang et al (2017)

2.7.2 Selulosa

Selulosa merupakan komponen yang ketersediannya melimpah dan juga merupakan struktural utama dinding sel dalam biomassa. Jumlahnya beragam yakni 90% yang terkandung dalam kapas, sedangkan pada tanaman lainnya yakni 33%. Selulosa merupakan polimer rantai panjang dengan tingkat polimerisasi tinggi (~10.000) dan berat molekul besar (~500.000), memiliki Struktur kristal ribuan unit, yang terdiri dari banyak glukosa molekul dan merupakan komponen utama dalam kayu yang menghasilkan sekitar 40 sampai 44% dengan berat kering. Selulosa terdiri dari d-glukosa, yang terbuat dari enam karbon atau heksosa gula, salah satu kelas gula sederhana yang molekulnya mengandung enam atom karbon, seperti glukosa dan fruktosa. Mereka umumnya memiliki rumus kimia $C_6H_{12}O_6$ (Basu,2010). Gambar 2.11 merupakan struktur molekul dari selulosa.



Gambar 2.11 Struktur molekul selulosa
 Sumber: Basu (2010)



Selulosa terdekomposisi pada range temperatur 315-400°C dgn tingkat kehilangan mas max 2,84wt.%/°C pada temperatur 355°C, ketika temperatur mencapai 400°C hampir semua selulosa terdekomposisi dengan residu yg sangat rendah ~6,5wt.%/°C tersisa, dapat dilihat pada Gambar 2.9. Degradasi termal selulosa menghasilkan hasil minimal arang dan hasil maksimum *tar* dan gas sementara degradasi termal lignin saja menghasilkan hasil *char* yang tinggi dan lebih sedikit gas dan *tar* (Yang H et al, 2007). Munculnya konten selulosa akan menurunkan hasil arang tetapi meningkatkan hasil *tar* dan gas. Akibatnya, selulosa bertanggung jawab untuk pembentukan fraksi volatil dari produk sementara lignin terutama berkontribusi pada pembentukan fraksi padat (Zajec L, 2009).

Ikatan glikosidik yang menghubungkan unit glukosa dalam selulosa tidak kuat dan cenderung membelah di bawah kondisi asam atau temperatur tinggi. Oleh karena itu, struktur selulosa menurun tajam selama tahap awal pirolisis cepat dengan pengurangan DP karena pembelahan ikatan glikosidik. Pemutusan ikatan b-1,4- glycosidic berkontribusi besar pada pembentukan furan dan levoglucosan (LG). Selain itu, DP juga memiliki dampak penting pada perilaku pirolisis selulosa. LG, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), furfural, methylglyoxal, hydroxyacetaldehyde (HAA) dan asam asetat adalah produk utama dari pirolisis karbohidrat berbasis glukosa (Basu, 2010).

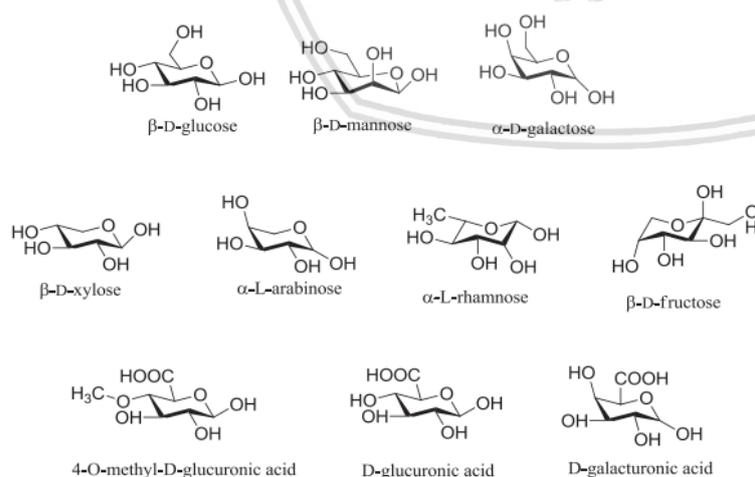
Berdasarkan pola pengaturan molekul rantai, ultrastruktur selulosa dapat diklasifikasikan menjadi daerah kristal dan amorf. Wilayah kristal selulosa memiliki stabilitas termal yang lebih baik daripada wilayah amorf karena struktur selulosa yang padat. Selama proses pirolisis, daerah amorf terdegradasi pertama, dan wilayah kristal harus menyerap panas yang besar untuk memutus jaringan ikatan hidrogen sebelum penguraian struktur kristal. Setelah reaksi air berevolusi pada temperatur awal 200°C, selulosa mengalami pembelahan ikatan hidrogen intra-dan intermolekular di bawah 300°C. Dehidrasi selanjutnya adalah reaksi dominan di antara ikatan-H intramolekul, di mana pembelahan intramolekul O₂-H•••O₆ ikatan hidrogen, ikatan hidrogen intermolekuler O₆•••H-O₃ dan cincin pyran CH pertama kali terjadi, diikuti oleh pembelahan ikatan hidrogen intramolekul O₃-H•••O₅ (Wang et al, 2017).

Selulosa kristal menghasilkan pembentukan LG yang lebih besar, sedangkan selulosa amorf berkontribusi lebih banyak terhadap pembentukan arang dan gas. Selulosa amorf juga diyakini menghasilkan lebih banyak furfural dan HMF dalam kisaran temperatur 200°C - 300°C. Tingginya kadar selulosa amorf menghasilkan hasil LG yang tinggi pada temperatur rendah, sedangkan sampel kristalinitas yang lebih tinggi menghasilkan hasil anhidrosugars yang lebih tinggi pada temperatur tinggi. Sementara itu, sampel dengan

kristalinitas rendah menghasilkan lebih banyak senyawa furanik yang lebih besar (HMF, 5-metilfurfural, dan furfural), yang terbentuk melalui mekanisme kontraksi cincin asam-katalis dan langkah-langkah eliminasi air secara berurutan (Wang et al, 2017).

2.7.3 Hemiselulosa

Hemiselulosa ($C_5H_8O_4$) terdiri dari heteropolisakarida rantai pendek dan menyajikan struktur amorf dan bercabang. Meskipun bentuk rantai polisakarida mirip dengan selulosa, derajat polimerisasi hemiselulosa rata-rata hanya sekitar 200. Unit monosakarida yang merupakan hemiselulosa termasuk terutama heksosis (glukosa, manosa, dan galaktosa) dan pentosa (xilosa dan arabinosa), serta beberapa sakarida rendah konten lainnya (rhamnose dan fruktosa). Selain itu, ada beberapa asam uronat (asam 4-O-metil-d-glukuronat, asam d-glukuronat, dan asam d-galacturonic) dan kelompok asetil dalam struktur hemiselulosa. Struktur kimia pada hemiselulosa terdapat pada Gambar 2.9, struktur kimia ini merupakan polisakarida, seperti glukuronoksi, galaktoglukomanan, arabinoglucuronoxylan, xyloglucose, xyloglucan dan arabinoxylan. Kandungan hemiselulosa dan spesies polisakarida sangat bergantung pada sumber biomassa. Kayu keras, kayu lunak, dan tumbuhan herba memiliki kandungan hemiselulosa masing-masing 10-15%, 18-23% dan 20-25%. Polisakarida pada hemicellulose kayu keras terdiri dari glucuronoxylan, xyloglucan dan glucomannan, sementara hemicellulose softwood terdiri dari xyloglucan, arabinoglucuronoxylan dan galactoglucomannan, dan hemiselulosa herba terdiri dari glucuronoarabionxylan dan xyloglucan.



Gambar 2.12 Struktur kimia blok bangunan hemiselulosa

Sumber: Wang et al (2017)

Hemiselulosa mulai terdekomposisi pada temperatur 220°C - 315°C dgn tingkat kehilangan mass max 0,95 wt.%/ $^{\circ}\text{C}$ pada temperatur 268°C dan masih ada ~20% residu

padat yg tersisa bahkan pada temperatur 900°C, dapat dilihat pada gambar 2.7 (Yang et al, 2007) sedangkan pada temperatur 500°C sepenuhnya terdegradasi menjadi *tar*, (air dan CO₂) dan hidrokarbon lainnya (Zajec, 2009) Hemiselulosa juga cenderung menghasilkan lebih banyak gas dan sedikit *tar* dibanding selulosa (Milne, 2002).

2.8 Tembakau

Tembakau merupakan salah satu jenis tanaman yang sangat dikenal di kalangan masyarakat Indonesia. Tanaman tembakau tersebar di seluruh Nusantara dan mempunyai kegunaan yang sangat banyak terutama daunnya digunakan untuk bahan baku pembuatan rokok. Selain itu tembakau juga dimanfaatkan orang sebagai kunyahan (Jawa : susur), terutama di kalangan ibu-ibu di pedesaan.

Tanaman tembakau memiliki karakteristik seperti berwarna hijau, berbulu halus, batang, dan daun diliputi oleh zat perekat. Pohonnya berbatang tegak dengan ketinggian rata-rata mencapai 250 cm, akan tetapi kadang-kadang dapat mencapai tinggi sampai 4 m apabila syarat-syarat tumbuh baik. Umur tanaman ini rata-rata kurang dari 1 tahun. Daun mahkota bunganya memiliki warna merah muda sampai merah, mahkota bunga berbentuk terompet panjang, daunnya berbentuk lonjong pada ujung runcing, dan kedudukan daun pada batang tegak (Abdullah, 1982).

Kandungan pada daun dan batang tembakau akan mempengaruhi dari hasil produk pirolisis. Berikut merupakan jenis kandungan kimia yang terkandung pada limbah tembakau.

Tabel 2.3
Kandungan Kimia Tembakau

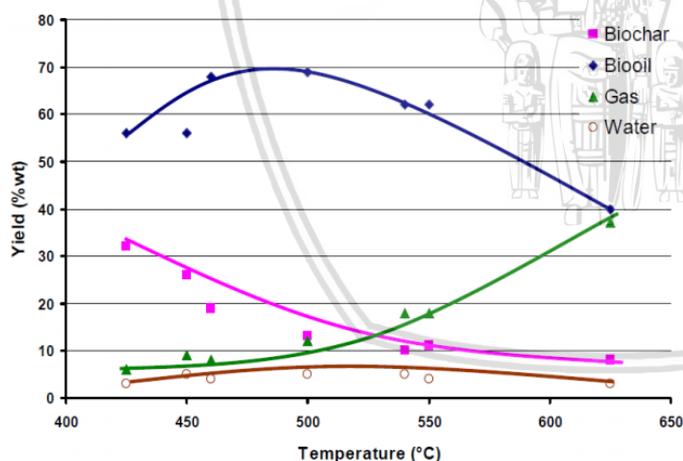
NO.	Biomass		
	Tobacco leaf	Tobacco stalk	
1	Fiber Analysis, %		
	Cellulose	36.3	42.4
	Hemicellulose	34.4	28.2
	Lignin	12.1	27.0
2	Proximate Analysis, %		
	Moisture	8.4	8.9
	Volatil matter	72.6	79.6
	Fixed Carbon	11.2	18.0
	Ash	17.2	2.4
3	HHV, MJ/kg	15.0	17.7

Sumber: Dhyani and Bhaskar (2017)

2.9 Pengaruh Variasi Temperatur Pada Pirolisis

Temperatur adalah salah satu parameter operasi yang paling signifikan dalam pirolisis karena mengendalikan reaksi retak rantai polimer. Molekul tertarik bersama oleh gaya Van der Waals dan ini mencegah molekul dari kolaps. Ketika temperatur di sistem meningkat, getaran molekul di dalam sistem akan lebih besar dan molekul cenderung menguap menjauh dari permukaan benda. Hal ini terjadi ketika energi yang diinduksi oleh gaya Van der Waals sepanjang rantai polimer lebih besar dari pada entalpi ikatan C-C dalam rantai, mengakibatkan rantai rusak (S. D. Anuar Sharuddin et al, 2016).

Pengaruh temperatur pada proses pirolisis sangat berpengaruh terhadap komposisi dan hasil produk yang dihasilkan. Pada grafik dijelaskan bahwa semakin tinggi temperatur pirolisis maka hasil produk yang berupa gas kecenderungannya juga semakin besar, dan produk *Char* akan semakin sedikit sedangkan pada produk *tar* semakin tinggi temperaturnya maka produknya akan semakin bertambah dan optimal pada temperatur tertentu lalu akan menurun jika temperaturnya terus ditambahkan. Hal ini disebabkan karena pada saat temperatur semakin tinggi molekul yang terbentuk dalam bentuk cair dan padat berubah menjadi molekul yang lebih kecil lagi dimana akan menaikkan produk gas yang dihasilkan pada pirolisis (Jahirul et al, 2012).

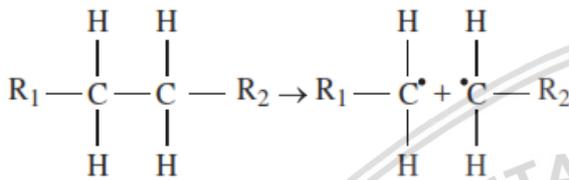


Gambar 2.13 Hubungan temperatur dengan produk akhir proses pirolisis *yield* biomassa (% wt)
Sumber: Jahirul et al (2012)

Proses pemanasan biomassa menimbulkan beberapa komponen biomassa secara kimia menjadi tidak stabil dan terdegradasi secara termal atau diuapkan. Pola pengaruh temperatur pada laju reaksi bergantung pada sifat termodinamika reaksi tersebut, jika temperaturnya dinaikkan maka molekul memiliki tingkat energi yang meningkat, kenaikan energi molekul tersebut menyebabkan semakin besar frekuensi tumbukan. Energi minimal yang dibutuhkan untuk terjadinya reaksi akan semakin terlampaui dan tentunya laju reaksi akan semakin besar (Fatimah, 2013).

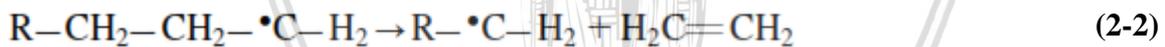
2.10 Thermal Cracking

Thermal cracking merupakan istilah lain dari fungsi temperatur dan waktu. Dimana reaksi terjadinya ketika hidrokarbon dalam ketiadaan katalis diekspos ke temperatur tinggi pada kisaran 800°F -1,200°F (425°C -650°C). Langkah awal dalam kimia retak termal adalah pembentukan radikal bebas. Mereka terbentuk saat membagi ikatan C-C. Radikal bebas adalah molekul tak bermuatan dengan elektron tak berpasangan. Pecahnya menghasilkan dua bagian tak bermuatan yang terbagi menjadi sepasang elektron. Gambar 2.11 menunjukkan pembentukan radikal bebas ketika molekul parafin secara termal retak.

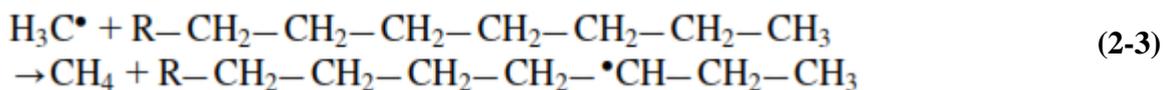


Gambar 2.14 Reaksi *thermal cracking*
 Sumber: Sadeghbeigi R (2013)

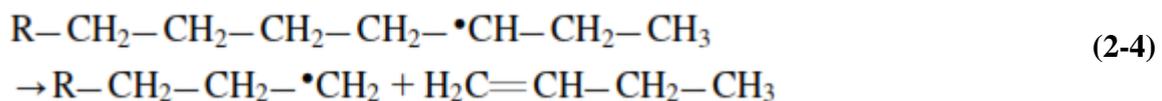
Radikal bebas sangat reaktif dan berumur pendek. Mereka dapat menjalani alpha-scission, beta-scission, dan polimerisasi. (Alpha-scission adalah pemutusan satu karbon jauh dari radikal bebas dan beta-scission merupakan dua karbon menjauh) beta-scission menghasilkan olefin (ethylene) dan radikal bebas primer dapat dilihat pada persamaan (2-2) yang memiliki dua atom karbon lebih sedikit.



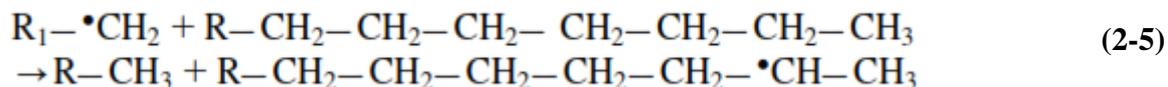
Radikal bebas primer yang baru terbentuk dapat menjalani lebih lanjut beta-scission untuk menghasilkan lebih banyak ethylene. Alpha-scission tidak disukai secara termodinamik tetapi terjadi. Alpha-scission menghasilkan radikal metil, yang dapat mengekstrak atom hidrogen dari molekul hidrokarbon netral. Ekstraksi hidrogen menghasilkan metana dan radikal bebas sekunder atau tersier.



Radikal ini bisa menjalani beta-scission. Produk akan menjadi alpha-olefin dan radikal bebas utama



Mirip dengan radikal metil, radikal $R\cdot\text{CH}_2$ juga dapat mengekstrak atom hidrogen dari parafin lain untuk membentuk radikal bebas sekunder dan parafin yang lebih kecil.



$R\cdot\text{CH}_2$ lebih stabil daripada $\text{H}_3\cdot\text{C}$. Akibatnya, tingkat ekstraksi hidrogen dari $R\cdot\text{CH}_2$ lebih rendah daripada radikal metil. Urutan reaksi ini membentuk produk yang kaya C1 dan C2, dan jumlah olefin alpha yang cukup. Radikal bebas mengalami percabangan kecil (isomerisasi).

2.11 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan semua bahan yang dapat dibakar untuk melepaskan energi panas. Kandungan utama bahan bakar terdiri dari hydrogen (H) dan karbon (C), oleh karena itu disebut bahan bakar hidrokarbon dan dilambangkan dengan rumus umum C_xH_y (Cengel, Y. A. dan Boles, M. A, 1989). Berdasarkan bentuknya bahan bakar dapat dibedakan menjadi bahan bakar padat, bakar cair dan bahan bakar gas. Sedangkan secara umum bahan bakar dapat dibagi menjadi bahan bakar primer dan bahan bakar sekunder. Bahan bakar primer merupakan bahan bakar yang dapat langsung digunakan, dimana bahan bakar primer seperti kayu bakar dan gas alam. Sedangkan bahan bakar sekunder merupakan bahan bakar yang ketika digunakan perlu pengolahan terlebih dahulu contoh bahan bakar sekunder seperti biogas dan refinery.

2.11.1 Bahan Bakar Padat

Bahan bakar ini menjadi sumber energi panas yang biasa digunakan oleh manusia untuk melakukan berbagai proses pembakaran. Bahan bakar padat yang sering digunakan adalah batu bara, cokes dan biomassa. Dalam pemilihan bahan bakar padat, harus dipertimbangkan sifat fisik dan sifat kimianya karna nantinya akan dibandingkan dengan produk pirolisis yang dihasilkan apakah sifatnya mendekati bahan bakar fosil apa tidak. Sifat fisik bahan bakar meliputi kadar air, nilai kalor, densitas. Berikut adalah sifat fisik dari bahan bakar padat.

Tabel 2.4
Nilai Kalor Dari Batubara

Class	Group		Fixed carbon	Volatil matter	Heating values
	Name	Symbol	Dry %	Dry %	Dry basis (Kcal/kg)
I. Anthracite	Meta-anthracite	ma	>98	>	7740
	anthracite	an	92-98	2.0-8.0	8000
	semianthracite	sa	86-92	8.0-15	8300
II. Bituminous	low-volatil	lvb	78-86	14-22	8741
	medium volatil	mvb	78-89	22-31	8640
	high-volatil A	hvAb	<69	>31	8160
	high volatil B	hvBb	57	57	6750-8160
	high volatil C	hvCb	54	54	7410-8375
III. Subbituminous	subbituminous A	subA	55	55	6880-7540
	subbituminous B	subB	56	56	6540-7230
	subbituminous C	subC	53	53	5990-6860
IV. Lignite	lignite A	ligA	52	52	4830-6360
	lignite B	ligB	52	52	<5250

Sumber: Billah (2010)

2.11.2 Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair (*Liquid Fuel*) merupakan istilah umum untuk bahan bakar berwujud cair. Dalam konteks energi terbarukan bahan bakar cair meliputi tiga jenis utama yakni bioetanol, biodiesel, dan bahan bakar cair hasil perengkahan senyawa organik besar/biomassa. Hingga sekarang bahan bakar cair yang sudah berkembang hingga skala industri adalah bioetanol dan biodiesel. Berikut adalah sifat fisik dari biodiesel, Bensin dan etanol.

Tabel 2.5
Perbandingan Sifat Bahan Bakar Minyak Pirolisis

Physical properties	Commercial standard value (ASTM 1979)	
	Gasoline	Diesel
Calorific value (MJ/kg)	42.5	43.0
API gravity @ 60°F	55	38
Viscosity (mm ² /S)	1.17	1.9-4.1
Density @ 15°C (g/cm ³)	0.780	0.807
Ash (wt%)	–	0.01
Octane number MON (min)	81-85	–
Octane number RON (min)	91-95	–
Pour point (°C)	–	6
Flash point (°C)	42	52
Aniline point (°C)	71	77.5
Diesel index	–	40

Sumber: Sharuddin et al (2016)

2.12 Sifat-Sifat Fisik Bahan Bakar

Secara umum beberapa sifat fisik yang perlu diketahui dari bahan bakar minyak antara lain nilai kalor (*heating value*), titik nyala (*flash point*), massa jenis (*density*), viskositas (*viscosity*).

2.12.1 Nilai Kalor (*Heating Value*)

Nilai kalor adalah besar energy yang dapat dilepaskan oleh suatu bahan bakar. Nilai kalor bisa menunjukkan kualitas produk dari suatu bahan bakar. Jika semakin tinggi nilai kalor dari suatu bahan bakar berarti menunjukkan semakin besar pula energy panas yang dapat dilepaskan untuk melakukan proses pembakaran maupun pemindahan kalor.

Nilai kalor rendah (LHV, *low heating value*) merupakan jumlah energy yang dilepaskan dalam proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. pada kondisi ini air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan ayau setelah terbakar temperatur gas hasil pembakaran dibuat 25°C maka diperoleh nilai kalor atas (HHV, *Higher Heating Value*). Pada temperatur ini air akan berada dalam kondisi fasa cair. Salah satu cara untuk mengukur nilai kalor suatu bahan bakar adalah dengan menggunakan *bomb calorimeter*. Caranya dengan membakar bahan bakar yang diuji menggunakan arus listrik, kemudian mencatat kenaikan temperatur yang terjadi pada kalorimeter kemudian membandingkannya dengan standar asam benzoat untuk mendapatkan nilai kalor bahan bakar tersebut.

2.12.2 Titik Nyala (*Flash Point*)

Flash point atau titik nyala merupakan suatu angka yang menyatakan temperatur terendah pada uap diatas permukaan bahan bakar minyak yang akan terbakar dengan cepat, apabila pada permukaan minyak didekatkan pada nyala api. Titik nyala sangat berpengaruh pada proses pembakaran bila titik nyala atau flash point terlalu tinggi maka penyalaan atau pembakaran yang terjadi terlambat, sementara bila titik nyala atau flash point terlalu rendah maka dapat terjadi detonasi atau ledakan-ledakan kecil yang terjadi sebelum saatnya. Dan juga titik nyala berpengaruh pada faktor safty yaitu apabila titik nyala terlalu rendah berarti sangat mudah menguap sehingga akan mudah terbakar maka dengan itu cara penyimpanan suatu bahan bakar haruslah tepat.

2.12.3 Massa Jenis (*Density*)

Massa jenis atau kerapatan massa merupakan perbandingan antara jumlah massa suatu material dengan volume material tersebut. Dengan jumlah volume yang sama untuk material yang berbeda bisa memiliki massa yang berbeda, artinya massa jenis juga menunjukkan kerapatan molekul dalam suatu volume yang sama. Semakin besar massa materialnya dan semakin kecil volume dari material tersebut artinya massa jenisnya makin besar. Massa jenis digunakan sebagai perhitungan kuantitatif dan pengkajian kualitas penyalaan. Hal ini berkaitan dengan nilai kalor dan daya yang dapat dihasilkan oleh bahan bakar tersebut per satuan volume bahan bakar. Berikut rumus yang digunakan untuk menghitung massa jenis:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (5)$$

Dimana, ρ = Massa Jenis (kg/m^3)

m = Massa (kg)

v = Volume (m^3)

2.12.4 Viskositas (*Viscosity*)

Viskositas menunjukkan komposisi kimia dari sampel minyak. Dimana viskositas sendiri merupakan pengukuran resistensi terhadap aliran. Kekentalan kinematis (mengalir) ditentukan dengan mengukur waktu untuk aliran tertentu melalui tabung kapiler berdiameter dan panjang tertentu. Unit viskositas kinematik stoke. Namun, dalam praktik umum, centistoke digunakan. Poise terkait dengan stoke dengan persamaan:

$$\text{Centistoke (cSt)} = \frac{\text{Centipoise}}{\text{Density}} \quad (6)$$

Metode ASTM D445 digunakan untuk mengukur viskositas kinematik. Nilai viskositas kinematik dilaporkan dalam milimeter kuadrat per detik (mm^2/s), di mana 1 mm^2/s sama dengan 1 cSt. Metode ASTM D2161 dapat digunakan untuk mengkonversi viskositas kinematik ke Saybolt Universal Seconds (SUS) pada temperatur yang sama dan juga untuk viskositas Saybolt Furol pada 122°F dan 210°F (50°C dan 98.9°C). Nilai viskositas kinematik didasarkan pada air menjadi 1,0034 mm^2/s (cSt) pada 68°F (20°C) (Sadeghbeigi R, 2013).

Viskositas menjadi sifat yang begitu penting dalam penggunaan bahan bakar minyak, dikarenakan viskositas akan mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk

handling, penyimpanan dan atomisasi yang diinginkan. Viskositas yang tinggi akan menyulitkan kinerja injektor karena sulit dialirkan. Atomisasi yang buruk menyebabkan terjadinya endapan karbon pada ujung burner atau pada dinding-dinding silinder. Jika semakin tinggi nilai viskositas minyak akan semakin kental maka tahanan untuk dapat mengalir akan semakin tinggi. Sebaliknya makin rendah nilai viskositas minyak akan semakin encer yang menyebabkan lebih mudah minyak tersebut dapat mengalir. Viskositas juga dipengaruhi oleh temperatur dan dapat berkurang dengan meningkatnya temperatur.

2.13 Kadar Air

Kadar air adalah jumlah air yang terkandung di dalam suatu zat (biomassa pada penelitian ini) dan dinyatakan dalam persentase (%). Kadar air, hal ini dapat ditetapkan oleh mengambil contoh dari biomassa, memanaskan biomassa tersebut di dalam pemanas agar seluruh air dapat menguap, dan menimbanginya kembali. Perbedaan dari berat akan memberikan hasil berat air yang menguap. Dari perbedaan ini, prosentase dari air dapat dihitung.

Pada pengujian kadar air akan dicari nilai dari berat awal dan berat akhir biomassa. Berat awal didapat dari berat biomassa. Berat akhir didapat dari berat biomassa yang dihilangkan air bebasnya melalui proses pengeringan. Untuk menghilangkan air dapat dilakukan dengan cara pengujian kadar air dari biomassa. Timbang biomassa 50 gram dan keringkan dalam tungku pengering pada 100°C sampai 110°C untuk satu atau dua jam. Specimen yang telah dikeringkan itu didinginkan ke temperatur kamar dalam sebuah desikator dan kemudian ukur lagi beratnya. Nyatakan perbedaan antara berat mula dan berat akhir pada temperatur kamar dan nyatakan perbandingan antara harga tersebut dengan berat mula dalam prosentase. Harga ini berarti harga kadar air bebas.

2.14 Pengujian Komposisi Char

2.14.1 Analisis SEM-EDX

Scanning Electron Microscopy-Energi Dispersive X-ray Spektrometer (SEM-EDX) merupakan instrumen untuk menghasilkan gambar hasil pembesaran dari sampel dengan cara memfokuskan sinar pada elektron sampel tersebut. Dalam SEM, sebuah pistol elektron dilengkapi dengan katoda filamen tungsten ditempatkan di bagian atas mikroskop yang secara thermionical memancarkan sinar elektron. Pancaran sinar elektron difokuskan ke sampel secara lurus vertikal kebawah. Ketika elektron mengenai sampel, maka

keluarlah elektron sekunder dari gugus atom secara pemisahan inelastik. Elektron ini memiliki energi yang kecil (<50 eV) dan keluar berjarak beberapa nanometer dari permukaan sampel dan elektron inilah yang menjadi bahan untuk diamati permukaan luarnya oleh sebuah detector yang mana hasil dari SEM ini berupa foto mikroskopik.

Energy dispersive X-ray (EDX) adalah metode nondesdraktif dalam pengujian suatu sampel untuk melihat susunan elemennya. Menggunakan pancaran gelombang x-ray yang terbaca dalam membombardir sebuah sampel padat dengan sinar elektron terfokus. Proses ini melibatkan interaksi elektron dengan atom menyebabkan elektron kulit terdalam atom akan keluar. Lalu terjadilah kekosongan yang nantinya diisi oleh elektron dari orbit yang lebih tinggi. Untuk mengisi kekosongan ini elektron tersebut perlu *de-excite*.

2.15 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur pirolisis maka produk hasil pirolisis *tar* yang dihasilkan akan semakin meningkat dan optimal pada temperatur tertentu lalu akan menurun jika temperaturnya terus ditambahkan dan produk *char* yang dihasilkan juga akan menurun. Hal ini disebabkan karena pada saat temperatur semakin tinggi molekul yang terbentuk dalam bentuk cair dan padat berubah menjadi molekul yang lebih kecil lagi dimana akan menaikkan produk gas yang dihasilkan pada pirolisis.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan di dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimen nyata (*true experimental research*). Dalam penelitian ini penulis menggunakan biomassa daun tembakau dengan variasi temperatur pemanasan dalam proses pirolisisnya untuk diambil hasil produk *tar* dan *char* pada proses tersebut guna untuk memperoleh bahan bakar alternatif. Proses pirolisis yang digunakan merupakan proses *slow pyrolysis* dengan menggunakan *fix bed pyrolyzer*.

3.2 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Tempat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Laboratorium Motor Bakar, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya-Malang. Dilaksanakan pada bulan Februari – April 2018.

3.3 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat 3 variabel yang dipergunakan, antara lain:

1. Variabel bebas

Variabel bebas: temperatur pemanasan pada saat proses pirolisis yaitu 350 °C, 450°C, 550°C, 650°C.

2. Variabel terikat

Variabel terikat: jumlah produk *tar* dan *char*, sifat fisik *tar* dan *char*, dan kandungan unsur *char*

3. Variabel terkontrol

Variabel penelitian terkontrol: daun tembakau dengan massa 100 gram dipirolisis selama 2 jam.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat Yang Digunakan

1. Oven



Gambar 3.1 Oven

Sumber: Dokumentasi pribadi

Oven digunakan untuk memanaskan daun tembakau dengan spesifikasi alat:

- Merk : Tiga Roda
- Frekuensi : 50-60 Hz
- Dimensi : P x L x T (40cm x 40cm x 40cm)
- Voltase : 100-120V 80mA / 200-240V 45mA
- Daya : 600 Watt
- Temperatur maksimal : 110°C

2. Moisture Analyzer



Gambar 3.2 Moisture analyzer

Sumber: Dokumentasi pribadi

Sebelum dilakukan pirolisis, *Moisture Analyzer* digunakan untuk mengukur jumlah kadar air dari sampel spesimen uji. Spesifikasi alat:

- Merk : Sartorius
- Arus : 3,3 A/ 1,6 A
- Voltase : 100 – 120 / 220 – 290 VAC

- Model : MA 30
- Frekuensi : 50-60 Hz

3. Timbangan Elektrik



Gambar 3.3 Timbangan elektrik

Sumber: Dokumentasi pribadi

Timbangan elektrik digunakan untuk mengukur berat spesimen daun tembakau, produk *tar* dan *char*. Berikut spesifikasinya:

- Merk : Melter
- Frekuensi : 50-60 Hz
- Ketelitian : 0,01 gram
- Voltase : 100-120V 80mA /200-240V 45mA

4. Pyrolyzer



Gambar 3.4 Pyrolyzer

Sumber: Dokumentasi pribadi

Pyrolyzer digunakan untuk proses pirolisis. Pada pirolisis terdiri dari *heater* sebagai pemanas, *themocouple* yang berfungsi untuk mengatur besarnya pemanasan. Kapasitas ruang pirolisis 5571.93 cm³, temperatur maksimal 800°C.

5. Cawan Ukur



Gambar 3.5 Cawan Ukur

Sumber: Dokumentasi pribadi

Cawan ukur digunakan untuk mengukur volume daun tembakau sebelum proses pirolisis. Cawan ukur yang digunakan memiliki ketelitian 50 mL dengan kapasitas 1500 mL.

6. Kamera

Kamera ini berfungsi untuk mengambil gambar spesimen uji sebelum dan sesudah pirolisis. Dengan spesifikasi alat :

- Merk : Canon
- Tipe : EOS 650d
- *Efective pixels* : 18 MP
- *Shutter speed* : 30 – 1/4000 second
- *Continuous* : Max. 5 frame per second

7. Stopwatch



Gambar 3.6 Stopwatch

Sumber: Dokumentasi pribadi

Stopwatch ini berfungsi untuk mengukur waktu. Di dalam penelitian ini *stopwatch* digunakan untuk mengukur waktu pirolisis dan waktu pengovenan.

8. *Flash Point Tester*

Gambar 3.7 Flash point tester
Sumber: Dokumentasi pribadi

Flash point tester digunakan untuk mengetahui besar titik nyala api pada produk *tar* hasil pirolisis daun tembakau

9. *Bomb Calorimeter*

Gambar 3.8 Bomb Calorimeter
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Bomb Calorimeter digunakan untuk mengukur besar nilai kalor pada produk *tar* hasil pirolisis daun tembakau

10. *Viscometer*

Gambar 3.9 Viscometer
Sumber: Dokumentasi pribadi

Viscometer digunakan untuk mengukur besar viskositas pada produk *tar* hasil pirolisis daun tembakau

11. Laptop

Digunakan dalam pengolahan data dan pembahasan hasil pengujian pirolisis.

3.4.2 Bahan Yang Digunakan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Daun tembakau yang sudah dirajang

Daun tembakau merupakan spesimen yang digunakan pada penelitian ini.

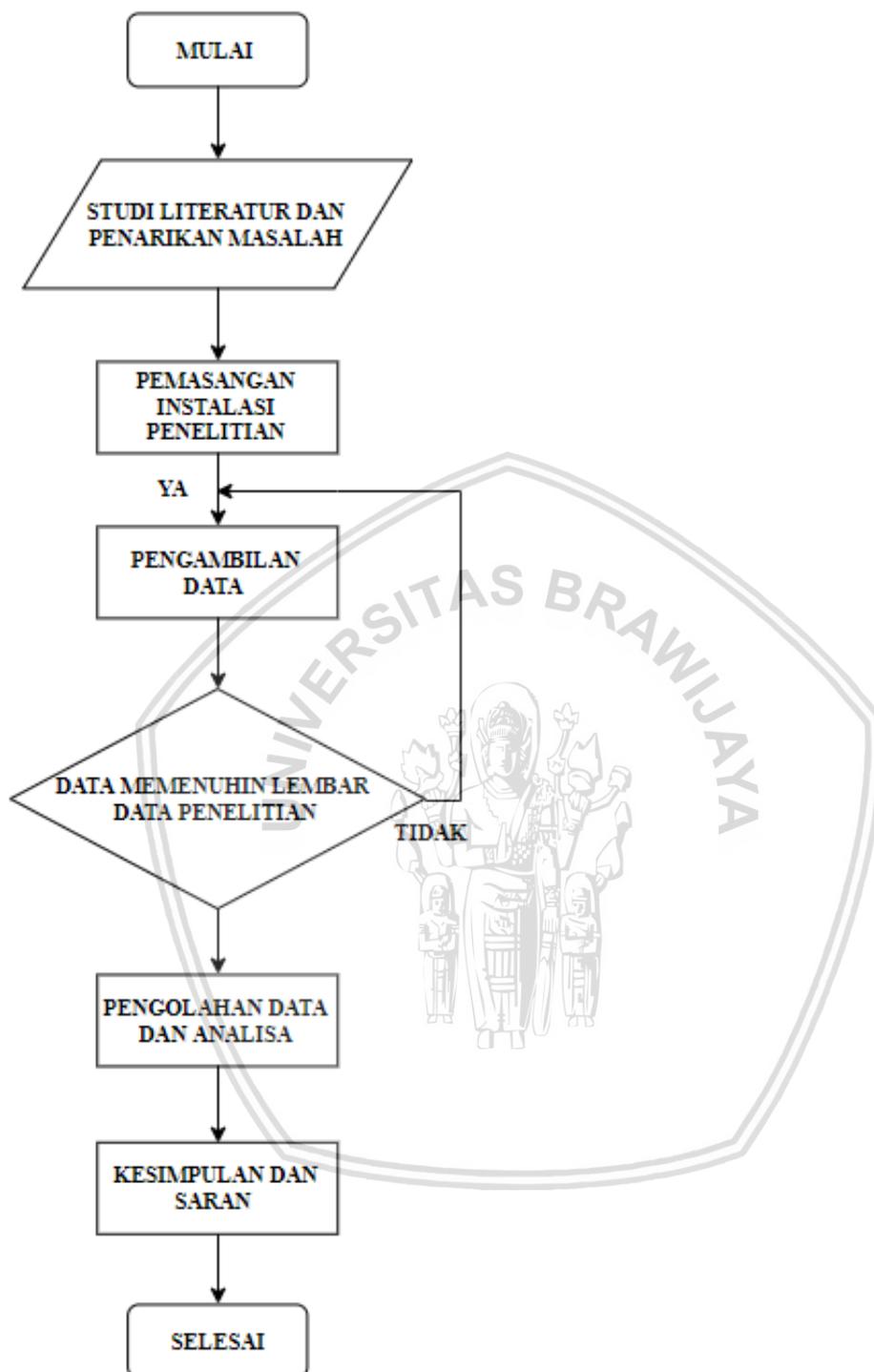
2. Gas inert (N₂)

Gas inert digunakan untuk mendorong oksigen yang ada pada tungku biomassa/*furnace* sehingga tidak terjadi proses pembakaran biomassa ketika proses pirolisis berlangsung

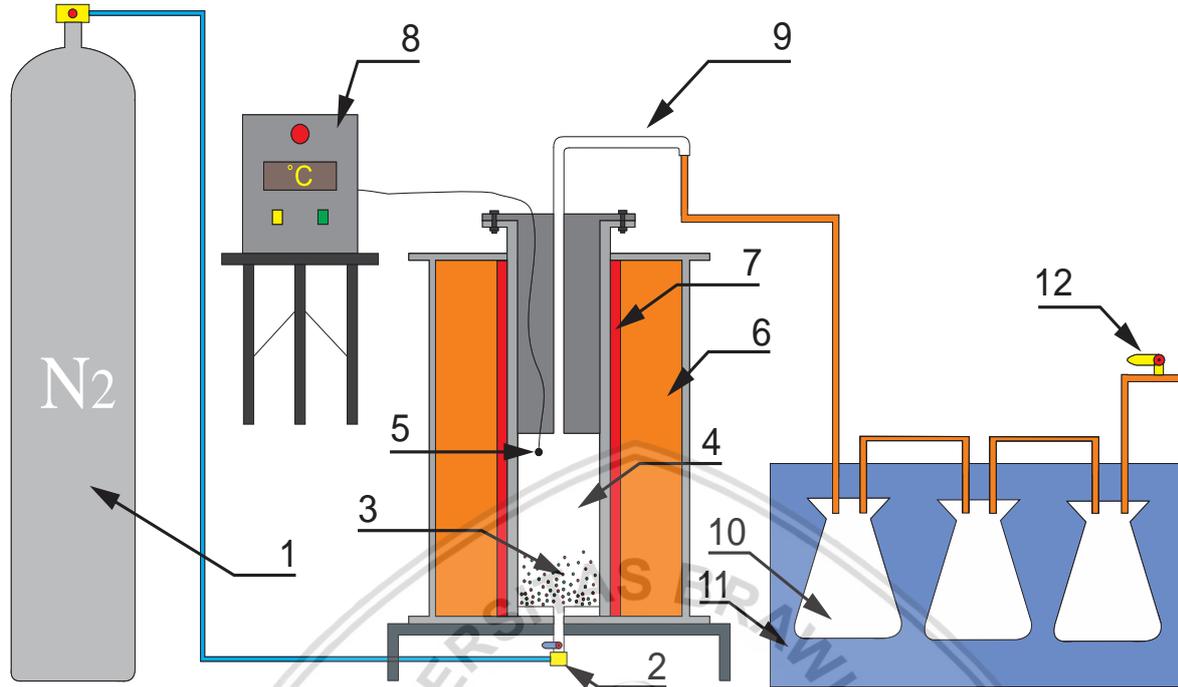
3.5 Prosedur Penelitian

1. Daun tembakau didapat dari perusahaan cerutu yang berada di Kota Jember.
2. Selanjutnya daun tembakau di rajang .
3. Kemudian ambil 150 gram daun tembakau untuk dilakukan proses pengeringan dengan dimasukkan ke dalam oven yang bertemperatur 100°C dan didiamkan selama dua jam.
4. Selanjutnya daun tembakau dikeluarkan dari oven untuk diuji kandungan airnya dengan mesin *moisture analyzer*.
5. Setelah dipastikan kadar air daun tembakau 10% maka daun tembakau ditimbang 100 gram untuk dimasukkan ke dalam tungku biomassa / *furnace*.
6. Katup nitrogen dibuka untuk mengalirkan nitrogen kedalam ruang pemanas piroliser selama tiga menit dengan flow rate tiga liter per menit.
7. Kemudian katup nitrogen ditutup dan selanjutnya mengatur temperatur sesuai variabel penelitian pada temperatur control lalu heater pada piroliser dihidupkan.
8. Tunggu proses pirolisis selama 2 jam.
9. Setelah selesai proses pirolisis, ukur massa dan volume *tar* dan *char*
10. *Tar* dan *char* yang didapatkan di uji sifat fisiknya

3.6 Diagram Alir Penelitian



3.7 Instalasi Penelitian



Gambar 3.10 Instalasi penelitian
Sumber: Dokumentasi pribadi

Penjelasan Gambar 3.10:

1. Tabung nitrogen

Tabung nitrogen digunakan sebagai tempat penyimpanan nitrogen dan juga digunakan sebagai penyalur gas nitrogen ke dalam tungku untuk mendorong udara (O_2) keluar, sehingga proses pirolisis dapat dilakukan tanpa udara.

2. N_2 Input

N_2 Input merupakan tempat masuknya nitrogen ke dalam tungku biomassa/furnace

3. Biomassa

Biomassa yang digunakan merupakan daun tembakau

4. Tungku biomassa/furnace

Tungku biomassa /furnace berupa besi berbentuk silinder dengan ukuran diameter 20 cm.

5. Thermocouple

Thermocouple digunakan sebagai pengukur besarnya temperatur pada *pyrolyzer*. Menggunakan tipe K agar dapat diubah ke dalam data digital. Thermocouple tipe K ini mampu membaca temperatur sampai $1000^\circ C$, dengan geometri panjang sensor 10 cm dan diameter sensor 4 mm.

6. Batu tahan panas dan *glass wool*

Batu tahan panas merupakan bahan yang digunakan untuk mencegah terjadinya *heat loss* yang keluar dari instalasi alat penelitian

7. Elemen pemanas

Elemen pemanas digunakan sebagai pemanas *gasifier* yang berasal dari kumpulan pemanas.

8. *Thermocontroller*

Thermocontroller digunakan sebagai pengatur arus yang masuk ke dalam heater sehingga dapat mengatur temperatur di dalam *pyrolyzer*, *thermocontrol* ini juga berfungsi sebagai saklar dari *pyrolyzer*.

9. Uap *Output*

Uap *Output* merupakan tempat terjadinya penguapan dan selanjutnya mengalir menuju tabung erlenmayer dan keluar menuju gas output

10. Tabung erlenmayer

Tabung elemeyer digunakan untuk menampung kandungan *tar* pada proses gasifikasi. *Tar* dapat hilang akibat proses kondensasi, oleh karena itu dibutuhkan temperatur yang lebih rendah saat proses kondensasi sehingga kandungan *tar* pada gas dapat terurai pada tabung elemeyer.

11. Air dan es batu sebagai kondensor

Air dan es batu digunakan sebagai media pendingin pada kondensor.

12. Gas *Output*

Tempat keluarnya gas-gas yang sudah tidak terkondensasi

Dalam penelitian ini hal pertama yang dilakukan yakni mengalirkan nitrogen ke *furnace* pirolisis melalui N_2 *input* untuk menghilangkan oksigen di dalam *furnace*. Biomassa yang sudah terdekomposisi dalam bentuk padat (*char*) akan tetap berada di dalam *furnace*, untuk uap sisa dari pirolisis akan keluar melewati saluran uap output menuju saluran gas output.

Selain itu tungku pirolisis dilapisi batu tahan api dan *glass wool* agar tidak banyak *heat loss* yang keluar dari instalasi alat penelitian. Panas tungku *heater* tersebut diatur dengan *thermocouple* yang terhubung langsung dengan *control temperatur* sehingga panas tungku *heater* dapat diatur sesuai dengan kebutuhan ketika proses pirolisis berlangsung serta temperatur pada *furnace* bisa tetap konstan.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

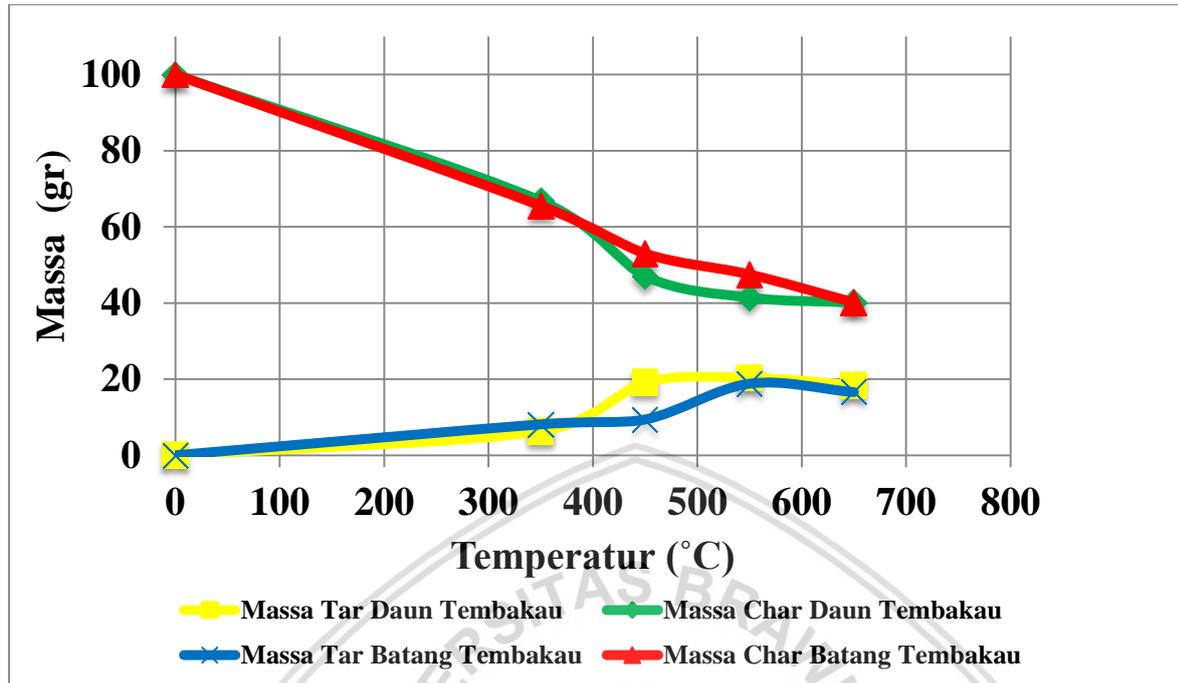
Data hasil penelitian ini merupakan penelitian *true experimental* dengan menggunakan reaktor pirolisis *fix bed*, dimana daun tembakau merupakan biomassa yang digunakan dalam penelitian ini dan variasi temperatur kerjanya yaitu 350; 450; 550; dan 650. Data hasil penelitian ini akan menghasilkan beberapa data yang menunjukkan pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap beberapa variabel terkait, yaitu:

1. Pada Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap massa *tar* dan *char*
2. Pada Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap volume *tar* dan *char*
3. Pada Gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap massa jenis *tar*
4. Pada Gambar 4.4 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap massa jenis *char*
5. Pada Gambar 4.5 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap viskositas
6. Pada Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap flash point
7. Pada Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap nilai kalor *char*
8. Pada Gambar 4.8 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap nilai kalor *tar*
9. Pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap Kandungan unsur *Char* hasil pengujian SEM- EDX
10. Tabel 4.1 kadar unsur residu padat pada setiap variasi temperatur
11. Pada Gambar 4.10 formasi *char*, depolimerisasi, dan fragmentasi pada mekanisme primer

4.2 Pembahasan

Pembahasan pada subbab ini yakni untuk mengetahui kecenderungan yang di dapat dari data hasil penelitian setiap variasi temperatur pirolisis terhadap perubahan massa volume, massa jenis, nilai kalor, flash point, dan viskositas spesimen.

4.2.1 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Massa *Tar* dan *Char*



Gambar 4.1 Grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap massa *tar* dan *char*

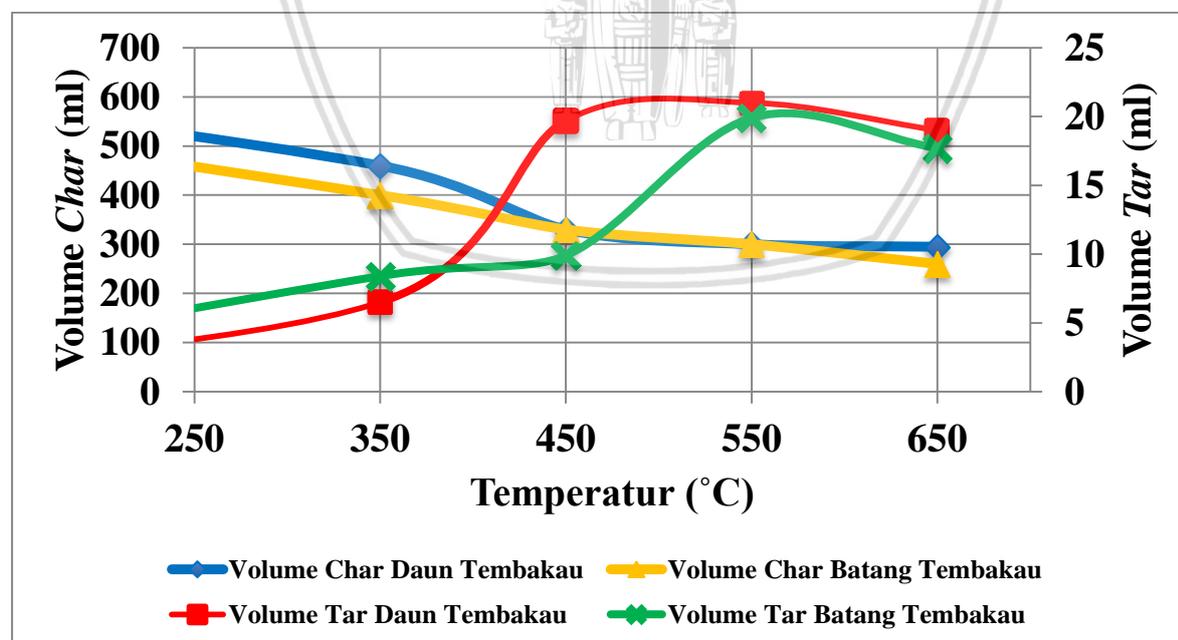
Gambar 4.1 menunjukkan hubungan temperatur pirolisis terhadap massa *tar* dan *char* yang dihasilkan dari pirolisis daun tembakau dan batang tembakau dengan temperatur pirolisis 350°C, 450°C, 550°C dan 650°C. Untuk data batang yang dibandingkan di dapat dari data (Prasangga, 2018).

Gambar 4.1 dapat kita lihat bahwa untuk produk *tar* semakin tinggi temperatur pirolisis maka besar massa *tar* yang dihasilkan akan semakin meningkat seiring dengan penambahan temperatur lalu terjadi penurunan pada temperatur optimumnya, sedangkan untuk produk massa *char* yang dihasilkan semakin menurun seiring dengan penambahan temperatur. Hal ini disebabkan karena terjadinya dekomposisi biomassa yang semakin terdekomposisi terus-menerus seiring dengan peningkatan temperatur. Hasil penelitian ini juga menunjukkan kesesuaian dengan dengan hasil penelitian (Jahirul et al, 2012).

Pada Gambar 4.1 tersebut dapat kita lihat bahwa pada temperatur yang semakin tinggi produk *tar* dan *char* yang dihasilkan akan menurun terutama pada produk *tar* terjadi penurunan setelah temperatur 550°C yakni pada temperatur 650°C dikarenakan terjadi reaksi sekunder seperti retak atau rekombinasi pada proses pirolisisnya karena senyawa volatil yang dilepaskan tidak stabil dibawah kondisi temperatur reaktor atau bisa disebut sudah pada temperatur optimumnya sehingga menghasilkan gas yang tidak dapat terdekomposisi lagi seperti CO, CO₂, H₂, CH₄ (Tripathi et all, 2016).

Gambar 4.1 diatas juga membandingkan mengenai produk *tar* yang dihasilkan dari daun dan batang tembakau dimana produk *tar* yang dihasilkan dari daun dan batang tembakau yakni massa *tar* cenderung lebih tinggi jumlahnya dibandingkan dengan menggunakan batang tembakau disebabkan karna dimensi pada daun lebih tipis dibandingkan batang tembakau setelah dilakukan proses perajangan yang sama dan juga komponen hemiselulosa lebih banyak dibandingkan daun yakni 34,45% dibanding batang yang hanya 28,2% sehingga massa *tar* yang dihasilkan daun lebih banyak karna hemiselulosa merupakan kompoenen kimia yang sepenuhnya menghasilkan *tar* (Zajec, L., 2009). Untuk massa *char* yang dihasilkan pada proses pirolisis daun tembakau lebih rendah jumlahnya dibandingkan dengan menggunakan batang tembakau. Hal ini disebabkan jumlah lignin yang terkandung dalam batang tembakau lebih banyak dibandingkan dengan daun tembakau yakni 27,0 % untuk jumlah lignin batang, sedangkan daun tembakau sebesar 12,1 % (Dhyani, 2017) sehingga menyebabkan jumlah *char* pada batang tembakau lebih banyak jumlahnya dibandingkan daun tembakau karna lignin merupakan komponen lignoselulosa yang mengandung paling banyak pembentukan *char* (Zajec, L., 2009).

4.2.2 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Volume *Tar* dan *Char*



Gambar 4.2 Grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap volume *tar* dan *char*

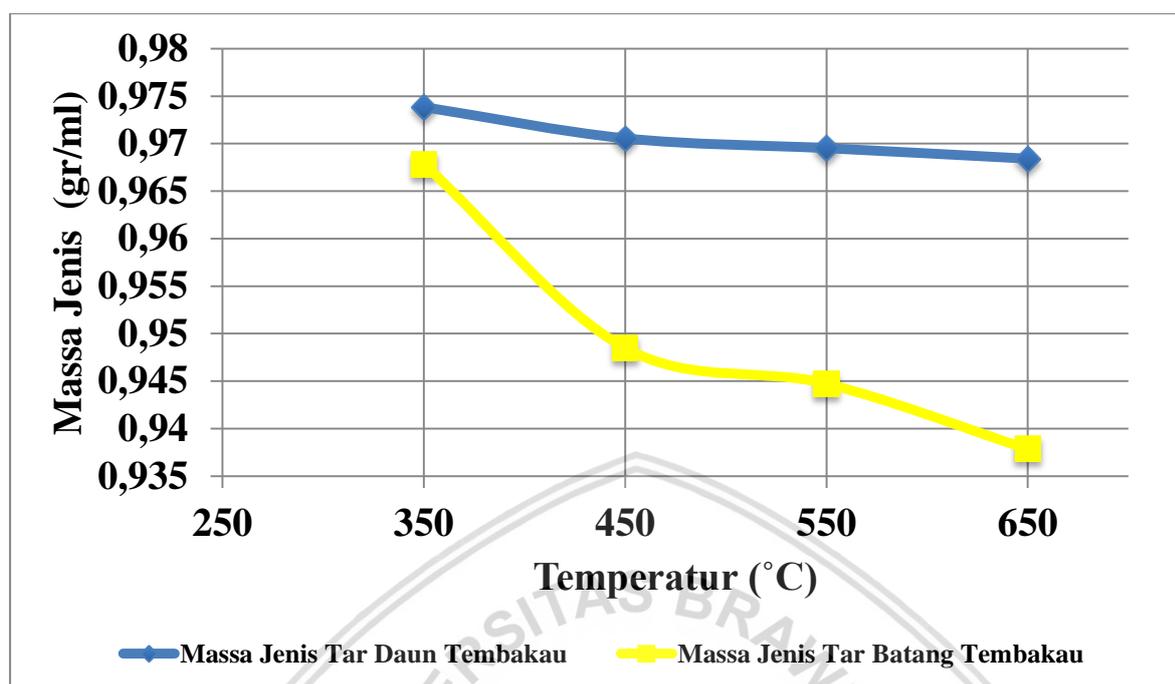
Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap volume *tar* dan *char* yang dihasilkan dari pirolisis daun tembakau dan batang tembakau dengan

temperatur pirolisis 350°C, 450°C, 550°C dan 650°C. Untuk data batang yang dibandingkan didapat dari data (Prasangga, 2018).

Pada Gambar 4.2 dapat kita lihat bahwa pada volume *tar* dengan semakin tinggi temperatur pirolisis maka besar volume *tar* yang dihasilkan akan semakin meningkat seiring dengan penambahan temperatur lalu terjadi penurunan pada temperatur optimumnya, sehingga menghasilkan gas yang tidak dapat terdekomposisi lagi seperti CO, CO₂, H₂, CH₄ (Tripathi, M. et al, 2016). Pada volume *char* yang dihasilkan akan semakin menurun seiring dengan penambahan temperatur. Hal ini disebabkan karna terjadinya dekomposisi biomassa yang semakin terdekomposisi seiring dengan meningkatnya temperatur. Hasil penelitian ini juga menunjukkan kesesuaian dengan dengan hasil penelitian (Jahirul et al, 2012).

Pada Gambar 4.2 diatas membandingkan mengenai volume *tar* dan *char* yang dihasilkan dari daun dan batang tembakau dimana volume *tar* dan *char* yang dihasilkan pada proses pirolisis daun tembakau cenderung lebih tinggi jumlahnya dibandingkan dengan menggunakan batang tembakau disebabkan karna dimensi pada daun lebih tipis dibandingkan batang tembakau setelah dilakukan proses perajangan yang sama sehingga menyebabkan proses dekomposisi hemiselulosa dan selulosa lebih cepat terdekomposisi dibandingkan batang tembakau.

4.2.3 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Massa Jenis Tar



Gambar 4.3 Grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap massa jenis tar

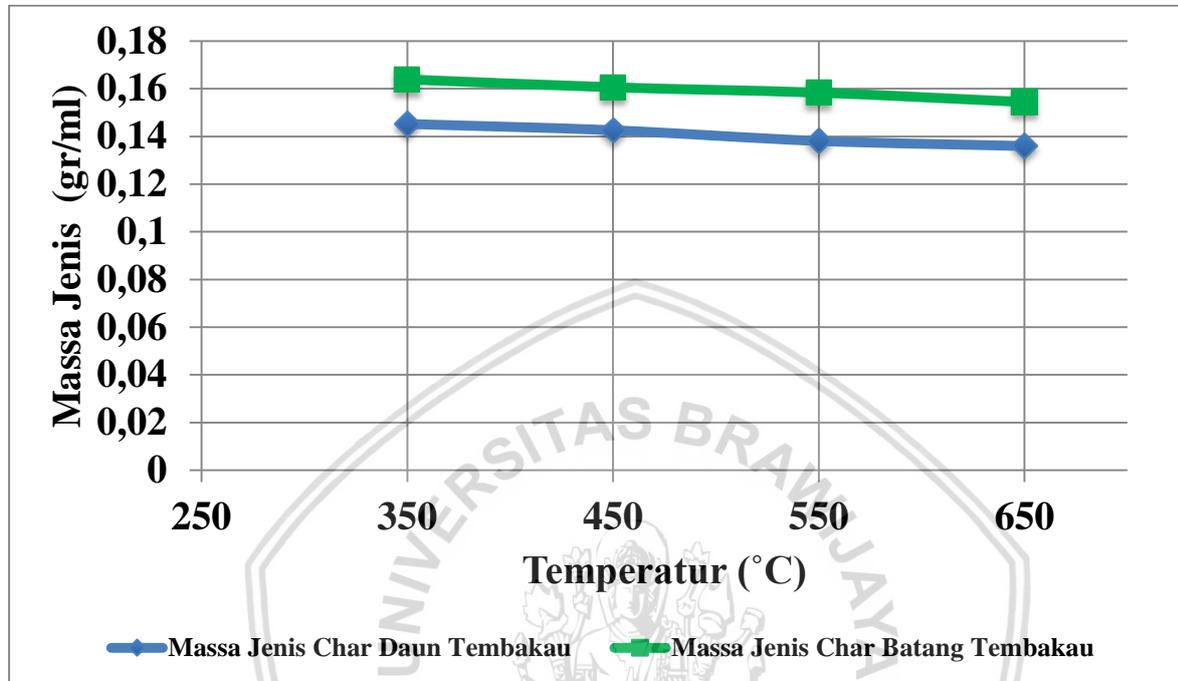
Gambar 4.3 diatas merupakan grafik hubungan temperatur terhadap massa jenis tar daun dan batang tembakau, dari grafik tersebut di tunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur menyebabkan nilai massa jenis tar-nya akan semakin menurun baik pada daun dan batang tembakaunya, disebabkan karna peningkatan massa tar-nya lebih kecil dibandingkan volumenya. Untuk data batang yang dibandingkan didapat dari data (Prasangga, 2018).

Pada Gambar 4.3 merupakan perbandingan antara kedua spesimen batang dan daun dimana pada grafik tersebut jumlah massa jenis tar daun yang lebih tinggi dibandingkan dengan massa jenis batang tembakau. Hal ini bisa disebabkan karna dengan semakin meningkatnya temperatur menyebabkan dekomposisi lingoselulosa daun tembakau lebih mudah terdekomposisi dibandingkan batang tembakau sehingga menghasilkan nilai massa dan volume yang lebih tinggi juga dibandingkan batang tembakau. Massa jenis tar ini juga mempunyai pengaruh terhadap viskositas, sehingga seiring dengan meningkatnya temperatur akan menurunkan massa jenis tar akibatnya viskositas juga akan terjadi penurunan pula.

Pirolisis lignin dispekulasikan untuk bertanggung jawab atas viskositas tinggi, berat molekul rata-rata tinggi, dan stabilitas bio-oil yang rendah. Biomassa dengan proporsi

lignin yang lebih tinggi dapat meningkatkan berat molekul rata-rata dan viskositas bio-oil (Rosendahl L, 2018).

4.2.4 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Massa Jenis *Char*

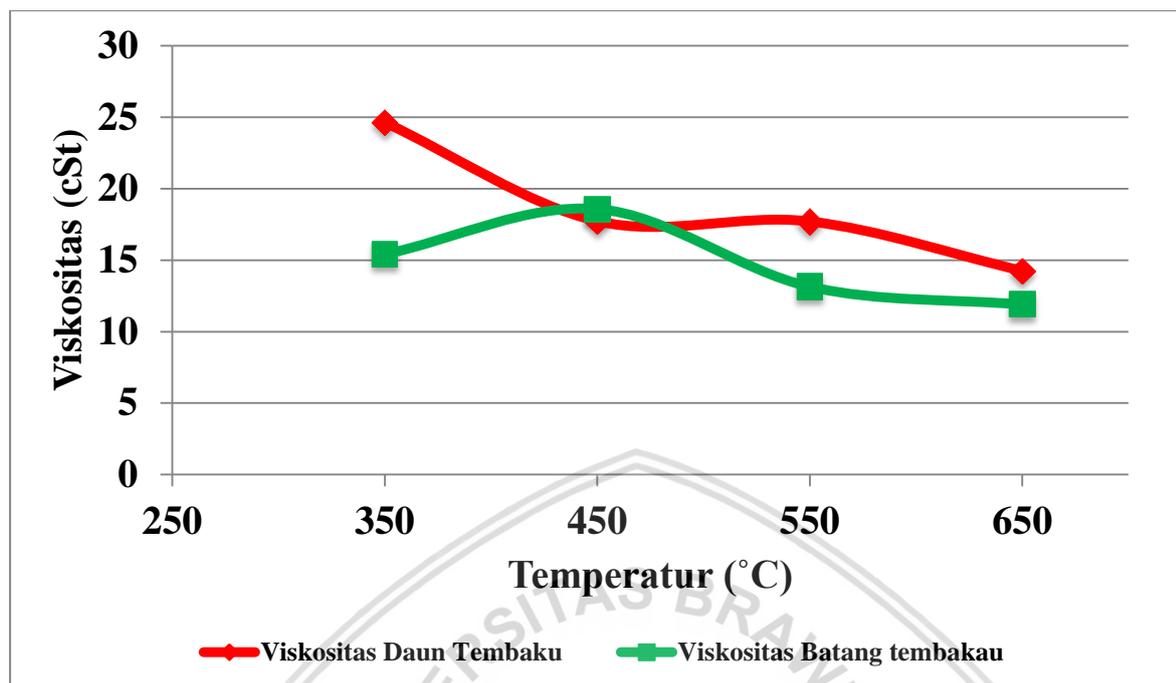


Gambar 4.4 Grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap massa jenis *char*

Pada Gambar 4.4 menunjukkan grafik hubungan hubungan temperatur terhadap massa jenis *char* daun dan batang tembakau, dari grafik tersebut di tunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur menyebabkan nilai massa jenis *char*-nya juga akan semakin menurun baik pada daun dan batang tembakau, hal ini disebabkan karna peningkatan massa *char*-nya lebih kecil dibandingkan volumenya. Data batang sendiri diperoleh dari data (Prasangga, 2018).

Pada Gambar 4.4 diatas menunjukkan perbandingan massa jenis *char* dari daun dan batang tembakau, dimana jumlah massa jenis yang paling banyak yaitu batang tembakau dibandingkan jumlah massa jenis daun tembakau, peningkatan massa jenis batang yang lebih tinggi disebabkan karna jumlah kandungan lignoselulosa batang tembakau yakni lignin lebih besar dibandingkan daun tembakau yang mana jenis biomassa juga mempengaruhi meningkatkan berat molekul rata-rata sehingga massa jenis batang lebih tinggi dibandingkan daun tembakau sehingga berdampak pada nilai viskositasnya juga.

4.2.5 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Viskositas



Gambar 4.5 Grafik hubungan temperatur terhadap viskositas

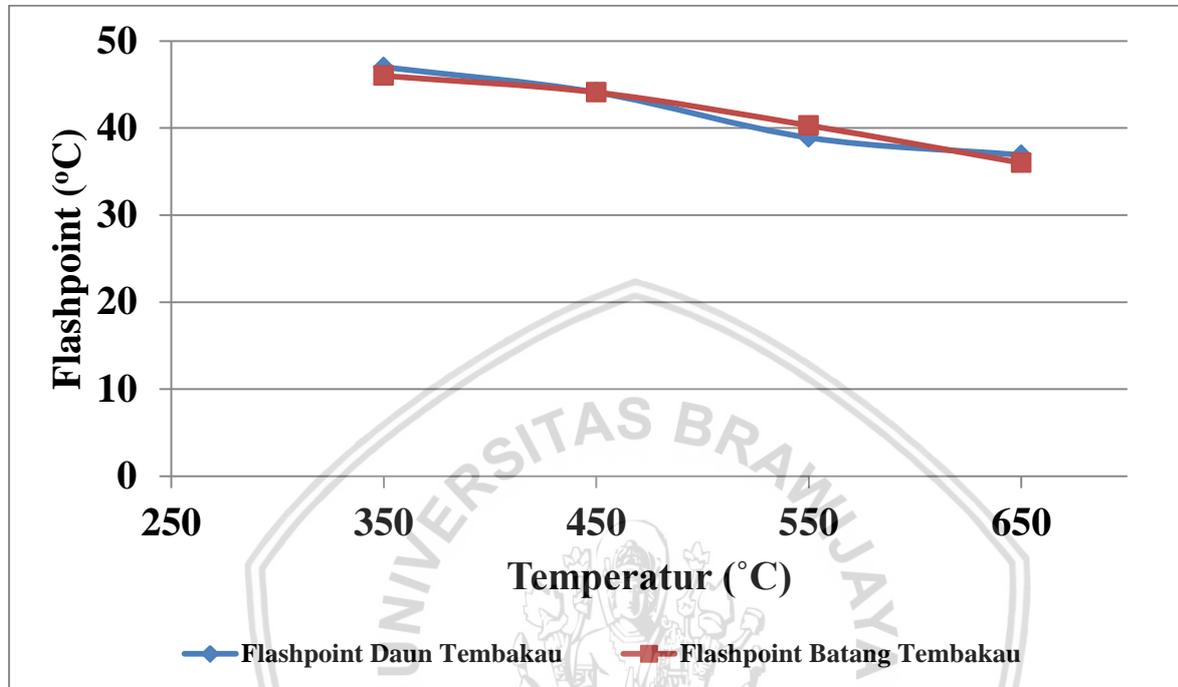
Pada Gambar 4.5 menjelaskan hubungan temperatur pirolisis terhadap viskositas yang dihasilkan dari daun tembakau, dan batang tembakau. Dari grafik diatas terlihat bahwa semakin tinggi temperatur maka akan menurunkan viskositas *tar* (Andrade, 1934), hasil pirolisis daun dan batang tembakau disebabkan karna semakin tinggi temperatur akan menghasilkan rantai karbon yang makin sederhana sehingga akan menghasilkan nilai viskositas yang semakin rendah dibandingkan temperatur 350°C. Hal ini juga berkesinambungan dengan peningkatan temperatur terhadap *flashpoint*.

Dari Gambar 4.5 tersebut dapat dilihat bahwa besar viskositas yang dihasilkan dari pirolisis daun tembakau lebih tinggi dibandingkan dengan hasil pirolisis batang tembakau. Hal ini di karenakan rantai karbon pada daun tembakau lebih sederhana seiring dengan meningkatnya temperatur dibandingkan batang tembakau sehingga menyebabkan viskositas daun lebih tinggi dibandingkan batang tembakau. Pengaruh lignin juga berpengaruh terhadap viskositas karna seiring dengan penambahan temperatur juga akan mempengaruhi molekul rata-rata-nya sehingga akan berdampak pada stabilitas bio-oil (Rosendahl L, 2018).

Pada temperatur 650°C menghasilkan *tar* dengan viskositas terendah yaitu sebesar 14,254 cSt pada daun tembakau dan 11,891 cSt pada batang tembakau, namun bila

dibandingkan dengan viskositas diesel nilai tersebut masih lebih tinggi dimana diesel memiliki viskositas yaitu $4,1 \text{ mm}^2/\text{s}$ atau $4,1 \text{ cst}$.

4.2.6 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap *Flash Point*



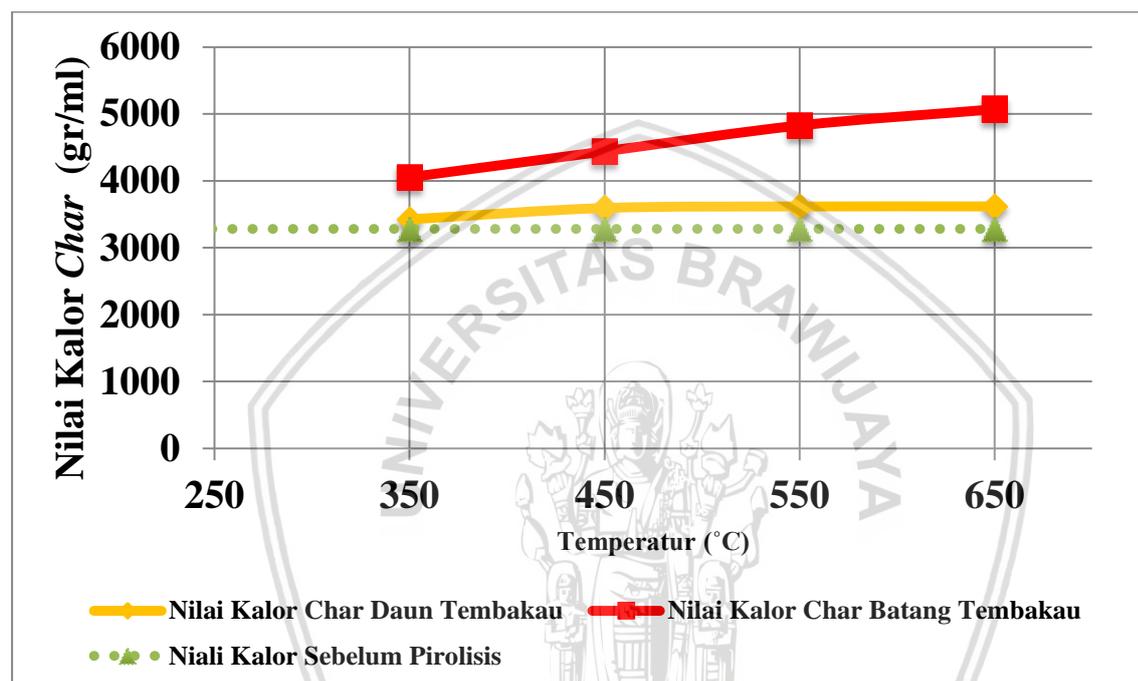
Gambar 4.6 Grafik hubungan temperatur terhadap *flash point*

Pada Gambar 4.6, merupakan grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap flash point yang dihasilkan dari pirolisis daun tembakau, dan batang tembakau, dimana data batang diperoleh dari data (Prasangga, 2018). Pada grafik di atas dapat kita lihat bahwa terjadi penurunan nilai flash point pada semua variasi temperatur pirolisis. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya temperatur pirolisis maka mengakibatkan proses terdekomposisinya biomassa berlangsung lebih efektif sehingga menyebabkan penguraian rantai karbon semakin pendek sehingga menyebabkan jarak terbakarnya *tar* akan semakin cepat terjadi karna nilai karbon ini sendiri berpengaruh terhadap titik nyala api yang mana jika semakin kecil nilai karbonnya akibatnya titik nyala apinya akan semakin mudah terbakar maka dari itulah kenapa pada temperatur semakin tinggi sehingga mengakibatkan penurunan *flash point*.

Dari grafik tersebut dapat kita lihat bahwa nilai flash point daun tembakau dan batang tembakau cenderung sama. Hal ini dikarenakan rantai karbon pada daun dan batang tembakau semakin sederhana seiring dengan penambahan temperatur.

Pada temperatur 350°C merupakan nilai flashpoint terbesar pada proses pirolisis daun dan batang tembakau namun pada temperatur 450°C memiliki besar nilai flashpoint yang hampir mendekati nilai flashpoint bensin yakni sebesar 44,1°C sedangkan nilai flashpoint untuk bensin sendiri yakni sebesar 42°C (Sharuddin et al, 2016), sehingga *tar* hasil pirolisis batang tembakau termasuk mudah terbakar.

4.2.7 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Nilai Kalor Char



Gambar 4.7 Grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap nilai kalor *char*

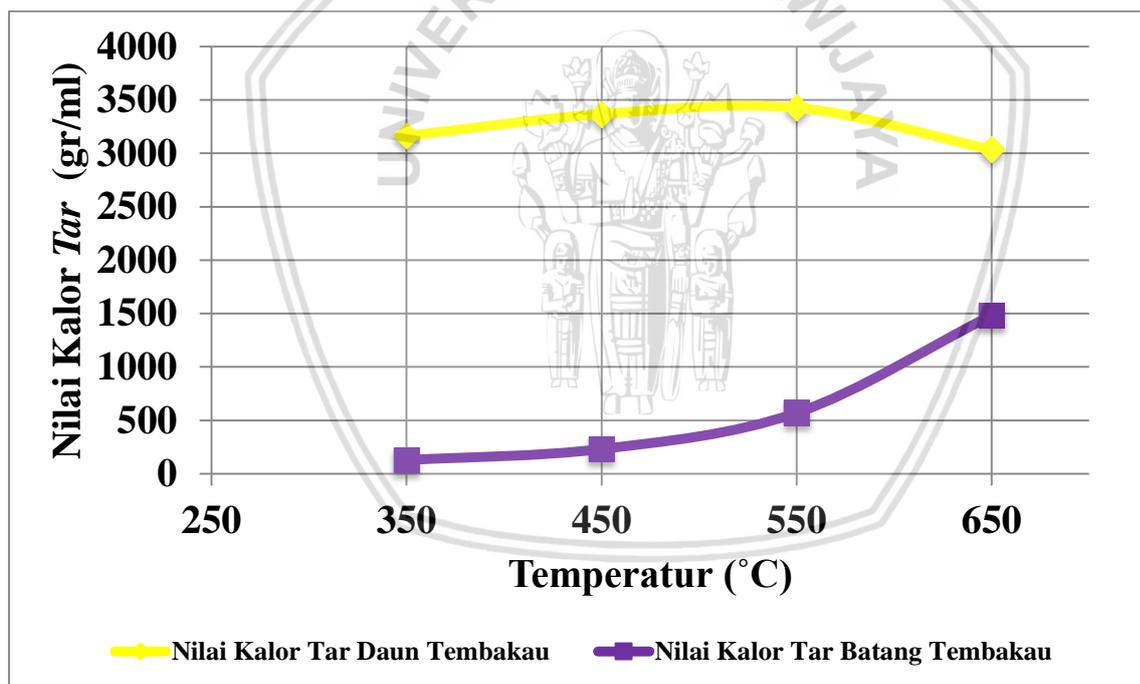
Pada Gambar 4.7, menunjukkan grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap nilai kalor *char* hasil pirolisis daun dan batang tembakau, dimana data batang diperoleh dari data prasangka, 2018. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperatur maka akan meningkatkan nilai kalor *char* dikarenakan semakin tingginya temperatur pirolisis maka menyebabkan terjadinya proses dekomposisi struktur biomassa yang menghasilkan pelepasan ikatan hidrokarbon dalam biomassa menjadi bentuk lain sehingga didapatkan kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan temperatur 350°C dapat dilihat pada Tabel 4.1, terutama komponen lignin karna lignin merupakan komponen terbanyak yang menghasilkan kandungan dari nilai *char* (Yang et al, 2007).

Pada grafik diatas merupakan perbandingan antara daun dan batang tembakau dimana pada grafik tersebut terlihat bahwa nilai kalor *char* hasil pirolisis daun tembakau lebih rendah dibandingkan hasil pirolisis batang tembakau dikarenakan kandungan unsur karbon

pada *char* hasil pirolisis batang tembakau lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan unsur karbon pada daun tembakau. Dapat dilihat pada table 4.1 pada temperatur 350°C daun tembakau persen nilai karbon atomic yang terbentuk sebesar 62,874% sedangkan batang tembakau sebesar 66,308%. Pada temperatur 650°C daun tembakau yakni 68,449%, sedangkan batang tembakau 73,059%. Dari perbandingan itulah mengapa bisa di simpulkan nilai kalor *char* pada batang tembakau lebih tinggi.

Pada temperatur 650°C merupakan nilai kalor *char* tertinggi dibandingkan dengan nilai kalor *char* pada temperatur lainnya yaitu sebesar 3618,334kal/gr untuk daun tembakau sedangkan batang tembakau sebesar 5070,688kal/gr. Nilai kalor tersebut bila dibandingkan dengan nilai kalor batubara setara dengan batubara class Lignite dan grup lignite B yang memiliki range nilai kalor <5250kal/gr (Billah, 2010).

4.2.8 Hubungan Antara Temperatur Pirolisis Terhadap Nilai Kalor Tar



Gambar 4.8 Grafik hubungan temperatur pirolisis terhadap nilai kalor tar

Gambar 4.8, menunjukkan grafik hubungan temperatur terhadap nilai kalor tar dengan variasi temperatur yaitu 350°C, 450°C, 550°C, dan 650°C. Pada grafik tersebut peningkatan nilai kalor terjadi pada beberapa titik saja pada daun tembakau yakni pada temperatur 350°C, 450°C, dan 550°C namun pada temperatur 650°C, sedangkan pada batang tembakau terjadi peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur. Data batang diperoleh dari data (Prasangga, 2018).

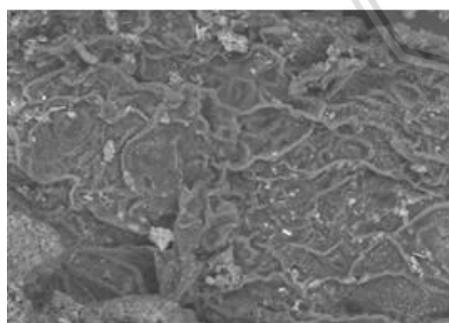
Pada Gambar 4.8 dapat kita lihat bahwa grafik tersebut merupakan grafik perbandingan antara nilai kalor *tar* daun tembakau dan batang tembakau, dari grafik menunjukkan bahwa nilai kalor *tar* hasil pirolisis daun tembakau lebih tinggi dibandingkan nilai kalor *tar* hasil pirolisis batang tembakau. Hal ini disebabkan karena dekomposisi pada daun tembakau lebih mudah dibandingkan batang tembakau sehingga semakin tinggi temperatur menyebabkan pemecahan hidrokarbon rantai panjang menjadi hidrokarbon rantai pendek dan menghasilkan lebih banyak senyawa yang lebih sederhana pada daun tembakau dibandingkan batang tembakau.

4.2.9 Hubungan Temperatur terhadap Pirolisis Terhadap Kandungan unsur *Char*

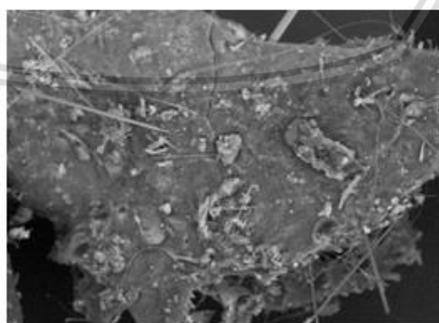
Berikut merupakan analisa kandungan unsur pada *char* menggunakan perangkat *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX). Dengan perangkat EDX dapat kita menganalisa kandungan unsur pada residu padat berdasarkan hasil foto SEM.



(a)



(b)



(c)

Keterangan: perbesaran 1000x

Gambar 4.9 Hasil pengujian SEM-EDX *char* (a) Daun sebelum pirolisis, (b) 350°C daun tembakau, (c) 650°C daun tembakau

Dari gambar yang ditunjukkan diatas menunjukkan bahwa pada Gambar 4.9 (a) merupakan gambar residu padat yang dihasilkan dari pengujian SEM-EDX sebelum

dipirolisis dimana dari gambar tersebut masih belum terlihat pembentukan rongga yang terjadi dan juga bintik-bintik putih yang dihasilkan juga masih sedikit yang mana bintik putih tersebut merupakan struktur karbon yang terbentuk, pada gambar 4.9 (b) mulai terbentuk rongga setelah dilakukan pirolisis pada temperatur 350°C begitu juga dengan bintik putih yang dihasilkan lebih banyak dibanding sebelum pirolisis (c) pada temperatur 650°C rongga yang dihasilkan semakin besar dan bintik putih yang dihasilkan juga semakin banyak begitu juga dengan dimensi setelah dilakukan pirolisis pada temperatur ini akan mengurangi dimensi awal yang terdekomposisi. Hal ini menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya temperatur maka rongga-rongga, bintik putih dan juga penguraian biomassa akibat dekomposisi juga semakin meningkat.

Tabel 4.1
Kadar Unsur Residu Padat Pada Setiap Variasi Temperatur

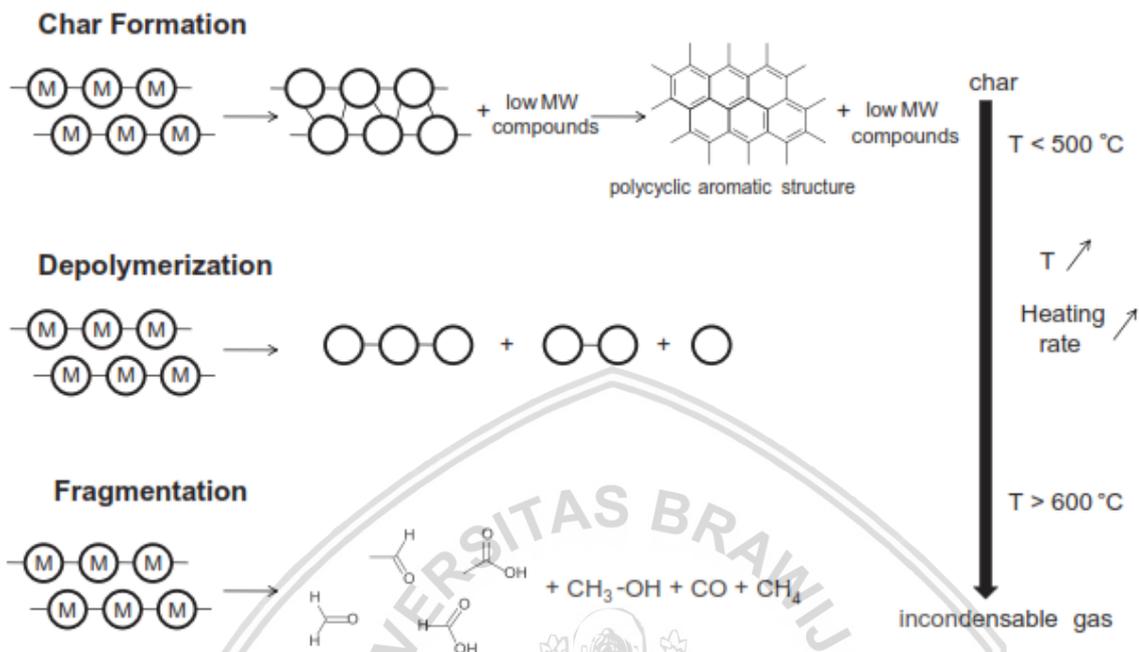
Keterangan	Temperatur	Kandungan unsur (%)				
		C	O	Si	S	Ca
Daun Tembakau	Sebelum Pirolisis	51,782	45,196	0,135	0,144	0,795
Daun Tembakau	350	62,874	29,672	0,305	0,167	2,249
Batang tembakau	650	68,449	25,545	0,294	0,227	1,736
Batang tembakau	350	66,308	26,429	0,574	0,107	0,585
Batang tembakau	650	73,059	22,899	0,144	0,128	0,733

Sumber: Institut Bio-Sains Universitas Brawijaya

Pada Tabel 4.1 merupakan kandungan unsur dari residu padat pada setiap variasi temperatur sebelum dan sesudah dipirolisis pada daun tembakau dan batang tembakau, dimana pada tabel tersebut terdapat perbandingan nilai kandungan unsur sebelum dan sesudah dipirolisis pada daun tembakau dan juga nilai kandungan batang tembakau setelah dipirolisis pada temperatur 350°C dan 650°C. Pada proses pirolisis yang terjadi pada temperatur 350°C sampai 650°C terdapat peningkatan kandungan unsur silicon begitu juga dengan sebelum di pirolisis dimana silicon merupakan kandungan yang berkaitan dengan terbentuknya abu. Untuk kandungan karbon dan oksigen merupakan kandungan unsur yang digunakan untuk menganalisa karakteristik dari pembentukan *char* (Jindo, K et al, 2014).

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan temperatur akan meningkatkan jumlah nilai karbon pada *char* sedangkan untuk nilai oksigennya mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena selama pemanasan biomassa ikatan kimia yang berbeda di dalam polimer rusak, yang menghasilkan pelepasan senyawa volatil dan dalam reaksi penataan ulang dalam matriks residu. Reaksi-reaksi ini dianggap sebagai

mekanisme primer. Kemudian, setelah pembentukannya, beberapa senyawa volatil tidak stabil dan dapat mengalami konversi tambahan yang disebut reaksi sekunder.



Gambar 4.10 formasi *char*, depolimerisasi, dan fragmentasi pada mekanisme primer
Sumber: Collard and blind (2014)

Pembentukan *char* terdiri dari konversi biomassa dalam residu padat bernama *char* yang menyajikan struktur polisiklik aromatik. Jalur ini umumnya disukai oleh reaksi penataan ulang intra dan intermolekular, yang menghasilkan lebih tinggi tingkat retikulasi dan stabilitas termal yang lebih tinggi dari residu. Langkah-langkah utama dari jalur ini adalah pembentukan cincin benzena dan kombinasi cincin-cincin ini dalam struktur polisiklik. Semua reaksi penataan ulang ini umumnya disertai dengan pelepasan air atau gas yang tak terkondensasi. Depolimerisasi terdiri dari pemecahan ikatan antara unit monomer dari polimer. Setelah setiap pecah, reaksi stabilisasi dari dua ujung rantai baru terjadi. Hasil polimerisasi dalam penurunan tingkat polimerisasi rantai sampai molekul yang dihasilkan menjadi mudah menguap sehingga pada kenaikan temperatur nilai oksigennya semakin menurun. Untuk fragmentasi terdiri dari hubungan banyak ikatan kovalen polimer, bahkan di dalam unit monomer, dan menghasilkan pembentukan gas tak terkondensasi dan keragaman senyawa organik rantai kecil yang dapat dikondensasikan pada temperatur kamar (Collard and Blin. 2014).



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil data dan pembahasan grafik serta tabel yaitu:

1. Semakin tinggi temperatur akan meningkatkan produk massa *tar* dan *char* sedangkan volumenya akan semakin turun seiring dengan penambahan temperatur.
2. *Thermal cracking* mengakibatkan penurunan massa jenis, viskositas dan *flashpoint* pirolisis daun dan batang tembakau.
3. Variasi temperatur menyebabkan pembentukan nilai karbon yang semakin meningkat dan oksigen semakin menurun sehingga akan meningkatkan produksi nilai kalor akibatnya sifat fisik yang diperoleh juga meningkat.
4. Penambahan temperatur menyebabkan pembentukan rongga-rongga dan bintik putih semakin banyak begitu juga dimensi yang terdekomposisi akan semakin banyak

5.2 Saran

Sebaiknya untuk penelitian pirolisis tembakau berikutnya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai jenis tembakau sehingga dapat diketahui tembakau jenis apa yang dapat dimanfaatkan sebagai substansi bahan bakar yang lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrade. 1934. XLI. A Theory of The Viscosity Of Liquids.—Part I , The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science: Series 7, 17:112, 497-511, DOI:10.1080/14786443409462409
- Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Elsevier
- Billah, Mutasin. 2007. Peningkatan Nilai Kalor Batubara Peringkat Rendah Dengan Menggunakan Minyak Tanah Dan Minyak Residu. UPN Press
- Brownsort, P.A. 2009, *Biomass Pyrolysis Processes : Performance Parameters and Their Influence On Biochar System Benefits*, A dissertation presented for the degree of Master of Science University of Edinburgh
- Collard, François-Xavier, and Joël Blin. “A Review On Pyrolysis Of Biomass Constituents: Mechanisms And Composition Of The Products Obtained From The Conversion Of Cellulose, Hemicelluloses And Lignin.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (2014) 594–608
- Dewan Energi Nasional Republik Indonesia. 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014*.
- Dhyani, Vaibhav, and Thallada Bhaskar. “A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass.” *Renewable Energy* xxx (2017) 1-22
- Jindo, K et al, 2014. *Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues*. . *Biogeosciences*, 11, 6613–6621, 2014
- Lailunnazar, Lutfi Widya Wijayanti, & Mega Nur Sasongko. 2013. Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Kualitas Tar Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Mahoni. *Jurnal Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya*
- Mohammad I. Jahirul, Mohammad G. Rasul, Ashfaqe Ahmed Chowdhury & Nanjappa Ashwath. 2012. *Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review*. *Energies*, 5, 4952-5001; doi:10.3390/en5124952
- Rosendahl, Lasse. 2018. *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*. Elsevier
- Saideghbeige, Reza, 2012. *Fluid Catalytic Cracking*, Handbook, Elsevier, USA
- S.D. Anuar Sharuddin et al. “A review on pyrolysis of plastic wastes” *Energy Conversion and Management* 115 (2016) 308–326
- Tripathi, Manoj , J.N. Sahu, and P. Ganesan. “Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016) 467-481
- Wang, Shurong, et al. “Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review.” *Progress in Energy and Combustion Science* 62 (2017) 33-86
- Yang, H, et al. “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.” *Fuel* 86 (2007) 1781–1788

Zajec, L., 2009. *Slow Pyrolysis In A Rotary Kiln Reactor: Optimization And Experiments*,
Tesis, School for Renewable Energy Science, Akureyri, Iceland;

