



TUGAS AKHIR - RE 141581

PIROLISIS SAMPAH DENGAN VARIASI JENIS RANTING DAN KANTONG PLASTIK HDPE

EKA KRISTALIA KURYANI

3313100038

Dosen Pembimbing

Welly Herumurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - RE 141581

PIROLISIS SAMPAH DENGAN VARIASI JENIS RANTING DAN KANTONG PLASTIK HDPE

EKA KRISTALIA KURYANI

3313100038

Dosen Pembimbing

Welly Herumurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2017



FINAL PROJECT - RE 141581

**PYROLYSIS OF SOLID WASTE WITH
VARIATION OF BRANCH AND HDPE
PLASTIC BAG**

EKA KRISTALIA KURYANI

3313100038

Supervisor

Welly Herumurti, S.T., M.Sc

ENVIRONMENTAL ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Civil Engineering and Planning

Institute of Technology Sepuluh Nopember

Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

PIROLISIS SAMPAH DENGAN VARIASI JENIS RANTING DAN KANTONG PLASTIK HDPE

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

EKA KRISTALIA KURYANI

NRP: 3313100038

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Welly Herumurti, S.T., M.Sc

NIP: 198112232006041001



PIROLISIS SAMPAH DENGAN VARIASI JENIS RANTING DAN KANTONG PLASTIK HDPE

Nama Mahasiswa : Eka Kristalia Kuryani
NRP : 3313100038
Jurusan : Jurusan Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Welly Herumurti, S.T., M.Sc

ABSTRAK

Sampah basah seperti ranting pohon merupakan biomassa yang dapat dikonversi menjadi bahan bakar (arang, minyak, dan gas) melalui proses pirolisis. Dalam aplikasinya, produk pirolisis biomassa perlu di-*upgrade* karena mengandung kadar oksigen yang tinggi sehingga nilai kalornya rendah, korosi, dan ketidak stabilan. *Co-pyrolysis* menawarkan teknik yang lebih sederhana dan efektif untuk menghasilkan produk pirolisis yang berkualitas tinggi. *Co-pyrolysis* merupakan proses yang melibatkan dua atau lebih material sebagai bahan baku pembakaran.

Dalam penelitian ini, pirolisis yang digunakan merupakan jenis pirolisis lambat sistem *batch* pada temperatur 500°C selama 60 menit. Dua jenis variabel yang digunakan yaitu bahan baku pirolisis, tiga jenis variasi ranting (angsana, trembesi, dan waru) yang didapat dari Rumah Kompos Bratang Surabaya serta rasio campuran ranting dan kantong plastik HDPE. Variasi campuran sampah yaitu ranting 25% : kantong plastik HDPE 75%; ranting 50% : kantong plastik HDPE 50%; ranting 75% : kantong plastik HDPE 25%. Massa bahan baku pirolisis sebesar 100 gram. Parameter yang diukur adalah persentase komposisi produk, proksimat arang, nilai kalor arang, dan GC-MS minyak.

Energy recovery massa pirolisis bahan baku ranting mencapai 87% - 91%, sedangkan *co-pyrolysis* campuran bahan ranting dan plastik HDPE mencapai 73% - 86%. Persentase arang optimum diperoleh dari pirolisis ranting angsana sebesar 38,46%, sedangkan *wax* optimum dari pirolisis bahan plastik HDPE sebesar 81%. Hasil minyak optimum diperoleh dari pirolisis ranting waru sebesar 38,08%. Persentase gas optimum didapat dari pirolisis bahan ranting trembesi yaitu 23,78%. Variasi jenis bahan baku

ranting tidak memberikan pengaruh secara signifikan terhadap produk pirolisis. Rasio bahan baku ranting memberikan pengaruh secara signifikan terhadap produk pirolisis. *Co-pyrolysis* menunjukkan kenaikan kualitas produk arang yaitu peningkatan nilai kalor. Nilai kalor produk arang dari pirolisis ranting sebesar 6600 – 7500 Kkal/Kg, sedangkan produk arang *co-pyrolysis* ranting – kantong plastik HDPE bernilai di atas 8330 – 11000 Kkal/Kg.

Kata Kunci : *Co-pyrolysis*, Kantong Plastik HDPE, Pirolisis, Ranting, *Recovery*.

PYROLYSIS OF SOLID WASTE WITH VARIATION OF BRANCH AND HDPE PLASTIC BAG

Name of Student : Eka Kristalia Kuryani
NRP : 3313100038
Study Program : Environmental Engineering
Supervisor : Welly Herumurti, S.T., M.Sc

ABSTRACT

Organic waste such as tree branch were one of the biomass that can be converted to fuel (char, bio-oil, and gas) by using pyrolysis process. However, the pyrolysis product was needed to be upgraded since it contained high levels of oxygen, which caused low caloric value, corrosion problem, and instability. Co-pyrolysis technique offered simplicity and effectiveness in order to produce a high-grade pyrolysis product. Co-pyrolysis was a process which involves two or more materials as feedstock.

In this research, slow pyrolysis with batch system was used in temperature 500°C for 60 minutes. Two variables used are pyrolysis feedstock, three tree banches (angsana, trembesi, waru) from Rumah Kompos Bratang Surabaya and mixture ratio of tree branches and HDPE plastic bag. The variation of waste mixture between tree branch and HDPE plastic bag was 25:75; 50:50; 75:25. Mass of feedstock was 100 gram. Parameters measured were percentage of product composition, char proximate, char calorific value, and GC-MS of trembesi oil.

The energy recovery pyrolysis of tree branch raw material reached 87% - 91%, while the co-pyrolysis of HDPE and branch mixture reached 73% - 86%. The optimum percentage of char obtained from angšana branch pyrolysis was 38.46%, while the optimum wax from HDPE plastic pyrolysis was 81%. The optimum oil yield was obtained from waru branch reached 38,08%. The optimum gas percentage obtained from trembesi branch pyrolysis was 23,78%. The variation of feedstock had no influence significantly on the pyrolysis product. While, the composition ratio of feedstock had significant effect on pyrolysis product. Co-pyrolysis showed the improving quality of char yield by increasing caloric value. The caloric value of branch pyrolysis char was 6600

– 7500 Kkal/Kg, while the caloric value of co-pyrolysis branch – HDPE plastic bag was 8330 – 11000 Kkal/Kg.

Keywords : **Branch**, **Co-pyrolysis**, **HDPE Plastic Bag**, **Pyrolysis**, **Recovery**.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas limpahan rahmat dan karunia Allah Subhana Wa Ta'la kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan lancar dan tepat waktu. Laporan penelitian berjudul "Pirolisis Sampah dengan Variasi Jenis Ranting dan Kantong Plastik HDPE" dibuat dalam rangka memenuhi mata kuliah Tugas Akhir. Dalam penyusunan laporan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Welly Herumurti, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang diberikan.
2. Ibu Prof. Yulinah Trihadiningrum, M.App, Sc., Ibu Dr. Ir. Ellina Pandebesie, M.T., Ibu IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., PhD., dan Ibu Harmin Sulistyani Titah, S.T., M.T., PhD sebagai dosen penguji atas saran dan ilmu yang diberikan.
3. Pegawai Rumah Kompos Surabaya atas bantuan data dan jasa yang diberikan di lapangan.
4. Teman – teman angkatan 2013 atas kebersamaan serta motivasi bersama.
5. Kedua orang tua yang selalu memberikan doa terbaik dan dukungan moral maupun materil kepada saya.

Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 24 Juli 2017

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Karakteristik dan Komposisi Sampah Kecamatan Gubeng Kota Surabaya	5
2.2 Metode Pirolisis	6
2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Pirolisis.....	9
2.4 Produk Pirolisis.....	13
2.5 Kayu sebagai Sumber Bahan Bakar Alternatif.....	16
2.6 Faktor - Faktor yang Mempengaruhi Kayu sebagai Sumber Bahan Bakar Alternatif.....	17
2.7 Nilai Kalor Kayu dan Faktor yang Mempengaruhinya	19
2.8 Jenis-Jenis Kayu	24
2.9 Plastik HDPE.....	25
BAB 3 METODE PENELITIAN	27
3.1 Kerangka Penelitian.....	27
3.2 Deskripsi Kerangka Penelitian	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Analisis Karakteristik Fisik Sampah.....	39
4.2 Analisis Lignoselulosa.....	45
4.3 Penentuan Temperatur Optimum	47
4.4 Komposisi Produk Pirolisis.....	49
a. Komposisi Produk Pirolisis Normal	51
b. Komposisi Produk <i>Co-pyrolysis</i>	56
4.5 Analisis Statistik ANOVA <i>One-Way</i>	60

4.6 Karakteristik Produk Pirolisis.....	61
a. <i>Char</i> / Arang	61
b. Minyak.....	69
c. Gas	76
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	79
Daftar Pustaka.....	81
LAMPIRAN	91
BIOGRAFI PENULIS	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konversi Thermal Biomassa	14
Gambar 2.2 Hubungan antara Berat Jenis Kayu dengan Nilai Kalor	20
Gambar 2.3 Hubungan Antara Kadar Air dengan Nilai Kalor	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Kerangka Penelitian	27
Gambar 3.2 Reaktor Pirolisis (A)Termocouple (B)Kondensor 40 cm (C)Tungku Pembakar	30
Gambar 3.3 Rangkaian Reaktor Pirolisis	31
Gambar 3.4 Skema Penelitian Utama	33
Gambar 4.1 Material Bahan Baku Ranting dari Rumah Kompos Bratang, Surabaya	43
Gambar 4.2 Temperatur Optimum Pirolisis Bahan Ranting dan Plastik HDPE pada Variasi Temperatur	48
Gambar 4.3 Persentase Padatan Tersisa pada Penelitian Pendahuluan	49
Gambar 4.4 Proses Pirolisis di dalam Partikel Biomassa	50
Gambar 4.5 Komposisi Produk Pirolisis Ranting Trembesi (500°C)	54
Gambar 4.6 Komposisi Produk Pirolisis Ranting Angsana (500°C)	54
Gambar 4.7 Komposisi Produk Pirolisis Ranting Waru (500°C)..	55
Gambar 4.8 Komposisi Produk Pirolisis Plastik HDPE (500°C) .	55
Gambar 4.9 Diagram Persentase Produk Arang pada Pirolisis Normal dan <i>Co-pyrolysis</i>	62
Gambar 4.10 Produk Arang dari Pirolisis.....	63
Gambar 4.11 Diagram Persentase Produk Minyak pada Pirolisis Normal dan <i>Co-pyrolysis</i>	70
Gambar 4.12 Produk Minyak <i>Co-Pyrolisis</i> Bahan Baku Ranting Trembesi – Plastik HDPE (25:75)	69
Gambar 4.13 Hasil Uji GC-MS Minyak Pirolisis Bahan Ranting Trembesi.....	72
Gambar 4.14 Diagram Persentase Produk Gas pada Pirolisis Normal dan <i>Co-pyrolysis</i>	77

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Sampah Setiap TPS di Kecamatan Gubeng Surabaya.....	5
Tabel 2.2 Parameter Operasi untuk Proses Pirolisis	9
Tabel 2.3 Hasil Pirolisis Parameter Temperatur dan Jenis / Komposisi Bahan.....	9
Tabel 2.4 Data Nilai Kalor Arang Kayu dan Batubara	18
Tabel 2.5 Kandungan Lignoselulosa Beberapa Biomassa	23
Tabel 2.6 Kandungan Kimia dalam Kayu.....	24
Tabel 3.1 Variabel Penelitian Utama	34
Tabel 3.2 Detail Massa Bahan Baku Variasi Penelitian Utama...	35
Tabel 4.1 Analisis Fisik Bahan Pirolisis.....	40
Tabel 4.2 Ukuran Ranting	43
Tabel 4.3 Kadar Lignoselulosa Bahan Bahan Baku Ranting	46
Tabel 4.4 Nilai <i>Volatile Solid</i> pada Penelitian Pendahuluan	47
Tabel 4.5 Persentase Padatan Tersisa pada Penelitian Pendahuluan	48
Tabel 4.6 Komposisi Produk Pirolisis Normal	51
Tabel 4.7 Komposisi Massa Produk <i>Co-pyrolysis</i>	57
Tabel 4.8 Hasil Uji Anova <i>One-Way</i> terhadap Produk Pirolisis ..	60
Tabel 4.9 Nilai Kalor Bahan Baku dan Produk Arang Pirolisis....	64
Tabel 4.10 Karakteristik Fisik Produk Arang Pirolisis	66
Tabel 4.11 Identifikasi Senyawa dalam Minyak Pirolisis Bahan Ranting Trembesi	73

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Undang-Undang Nomor 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah mengamanatkan perlunya perubahan paradigma yang mendasar dalam pengelolaan sampah. Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 juga mendasari perubahan paradigma kumpul – angkut – buang menjadi pengolahan yang bertumpu pada pengurangan sampah dan pengelolaan sampah. Di lapangan, kegiatan pengelolaan ini masih menghadapi kendala utama, yaitu rendahnya kesadaran masyarakat untuk memilah sampah. Surabaya sebagai salah satu kota besar di Indonesia memiliki timbulan sampah yang tergolong tinggi. Pada tahun 2011, jumlah timbulan sampah mencapai 1146,9 ton/hari. Kecamatan Gubeng merupakan salah satu kecamatan dengan jumlah penduduk terbanyak di Surabaya. Jumlah penduduk mencapai 152.653 jiwa (BPS Kota Surabaya, 2013). Volume sampah yang masuk di 9 LPS Kecamatan Gubeng adalah sebesar 172 m³/hari (DKP Surabaya, 2010). Persentase sampah di TPS Bratang didominasi oleh sampah basah sebesar 60,96% dan sampah plastik sebesar 11,13% (Agustia, 2013). Volume sampah tidak sebanding dengan kemampuan masyarakat Surabaya mendaur ulang sampah, yang hanya sebesar 15% (Ostojic *et al.*, 2013).

Salah satu alternatif untuk mengolah sampah adalah metode pirolisis. Metode pirolisis dapat memicu keinginan masyarakat untuk mendaur ulang sampah karena adanya *energy recovery* dari proses ini. *Energy recovery* yang didapat dari pirolisis yaitu produk gas, minyak, dan arang. Proporsi hasil tergantung dari metode pirolisis, karakteristik biomassa dan parameter reaksi. Lee *et al.* (2003) meneliti tentang laju degradasi konversi plastik *polyethylene* menjadi hidrokarbon cair. Struktur kimia yang dimiliki hidrokarbon cair tersebut memungkinkannya untuk diolah menjadi minyak pelumas berkualitas tinggi. Miller *et al.* (2005) telah membuktikan bahwa plastik *polyethylene* dapat dirubah menjadi minyak pelumas dengan metode pirolisis. Plastik tersebut dipanaskan pada suhu tinggi sebesar 800-1000°C.

Dalam penelitian ini, proses pirolisis digunakan karena memiliki beberapa kelebihan sebagai metode pengolahan sampah

perkotaan. Pirolisis dikenal metode ramah lingkungan karena tidak dihasilkan limbah selama proses berlangsung (Abnisa *et al.*, 2013). *Bio-oil* yang dihasilkan dari pirolisis biomassa dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar fosil (Abnisa dan Wan, 2014). Diskusi dan penelitian membahas mengenai besarnya potensi pengembangan metode pirolisis untuk dikomersialkan. Tujuan utama dari teknologi ini adalah untuk menghasilkan *bio-fuel* dengan kadar tinggi untuk bersaing dan bahkan akhirnya menggantikan bahan bakar fosil (Jahirul *et al.*, 2012). Di antara konversi - konversi energi untuk biomassa melalui proses termokimia (seperti gasifikasi, pembakaran, pirolisis, hidrogenasi), pirolisis lebih dipilih dalam memproduksi produk bahan bakar cair. Hal tersebut dikarenakan kelebihan proses pirolisis pada penyimpanan, transportasi dan fleksibilitas dalam aplikasi alatnya, seperti mesin pembakaran, *boiler*, dan turbin. Kajian dan penelitian pirolisis masih terus dibutuhkan karena pirolisis masih mengalami kekurangan. Pengembangan pirolisis terus dibutuhkan untuk mengatasi sejumlah permasalahan teknis dan hambatan ekonomi agar produk pirolisis bisa bersaing dengan bahan bakar fosil konvensional (Czernik dan Bridgewater, 2004).

Parameter penting yang mempengaruhi proses pirolisis adalah suhu, laju pemanasan, durasi pembakaran di reaktor, jenis dan ukuran bahan baku (Chen *et al.*, 2014a; Bhattacharya *et al.*, 2009). Variasi bahan baku sampah yaitu sampah basah dan plastik akan diteliti. Sampah basah disebut juga biomassa karena termasuk bahan organik dan mengandung susunan polimer alam atau biopolimer (Caglar dan Aydinli, 2009; Van de Velden *et al.*, 2010). Sampah plastik berdampak negatif terhadap lingkungan karena tidak dapat terurai dengan cepat dan dapat menurunkan kesuburan tanah (Surono, 2013). Jumlah biomassa dan plastik dominan pada komposisi sampah Kota Surabaya. Kedua bahan ini juga mempunyai potensi besar untuk *energy recovery* dalam proses pirolisis (Islam *et al.*, 2013; Ermawati, 2011).

Potongan ranting pohon merupakan salah satu jenis sampah basah. Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Surabaya (2015) melakukan pemotongan dan perampingan dahan dan ranting pohon hampir tiap siang dan malam hari. Melihat potensi kuantitas ranting yang besar, ranting dapat digunakan sebagai bahan baku pirolisis untuk menambah sumber energi

alternatif. Kayu adalah bagian batang atau cabang serta ranting tumbuhan yang mengeras karena mengalami lignifikasi (pengayuan). Jenis spesies *hardwood* (kayu keras) dan *softwood* (kayu lunak) memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kualitas kayu sebagai sumber energi. Pohon yang tumbuh cepat dan memiliki banyak cabang cenderung memiliki energi yang tinggi. Ciri-ciri ini dapat ditemukan pada *softwood* (Prawirohatmodjo, 2004). Berat jenis juga berpengaruh terhadap nilai kalor yang dihasilkan oleh kayu sebagai sumber energi (Prayitno, 2007).

Noor (2011) telah meneliti pengaruh bahan baku serbuk gergaji kayu jati dan suhu terhadap rendemen bio-oil serta nilai kalor yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendemen bio-oil tertinggi dari limbah serbuk gergaji kayu jati dihasilkan pada temperatur 500°C yaitu sebesar 21,99% dan nilai kalor yang dihasilkan yaitu 7497,52 Kal/g. Nilai kalor ini lebih tinggi dibandingkan nilai kalor batubara yang sebesar 6058,62 Kal/g (Jamilatun, 2008). Penelitian Qiram *et al* (2015) menunjukkan bahwa nilai kalor maksimum pirolisis kayu mahoni terjadi pada persentase kehilangan massa 84,57% yaitu sebesar 7592,524 kJ/kg.

Plastik jenis HDPE memiliki persentase terbesar daripada jenis plastik HDPE lainnya dalam komposisi sampah Kecamatan Gubeng Surabaya (Agustia, 2013). Nilai kalor paling tinggi yaitu dari pirolisis plastik HDPE pembakaran 450°C sebesar 44,55 MJ/Kg (Manggali, 2015). Dengan penambahan material plastik kedalam proses pirolisis menghasilkan peningkatan kandungan hidrogen dalam produk dibandingkan proses pirolisis biomassa tanpa plastik (Bhattacharya *et al.*, 2009). Berdasarkan uraian di atas, topik mengenai pirolisis sampah kebun berupa variasi jenis ranting dan sampah plastik HDPE perlu diteliti sehingga diketahui keefektifan kerjanya.

1.2 Rumusan Masalah

Kuantitas dan ketersediaan bahan ranting di Surabaya sebagai salah satu sampah kebun cukup besar karena seringnya dilakukan pemotongan dan perampingan ranting oleh DKP Surabaya. Penambahan material plastik kedalam proses pirolisis menghasilkan peningkatan kandungan hidrogen dalam produk

minyak dibandingkan dengan proses pirolisis biomassa tanpa plastik. Maka dari itu, topik mengenai pirolisis sampah ranting dan kantong plastik HDPE perlu diteliti sehingga ditentukan *recovery massa* produknya. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaruh variasi jenis ranting dan sampah kantong plastik HDPE terhadap produk pirolisis.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan *energy recovery* produk pirolisis bahan baku ranting, plastik HDPE dan *co-pyrolysis* campuran ranting dan plastik HDPE
2. Menentukan pengaruh komposisi variasi jenis ranting dan sampah kantong plastik HDPE terhadap komposisi produk, nilai kalor arang produk, dan nilai signifikansi ANOVA.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup permasalahan pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian utama dilakukan selama 4 bulan, dari bulan September 2016 sampai Desember 2016.
2. Metode pirolisis yang digunakan adalah sistem *batch*.
3. Sampah yang digunakan adalah tiga jenis ranting di Rumah Kompos Bratang Surabaya dan plastik jenis HDPE yaitu kantong plastik.
4. Variasi campuran sampah ranting 25% : HDPE 75%; sampah ranting 50% : HDPE 50%; sampah ranting 75% : HDPE 25%.
5. Parameter uji pada penelitian ini adalah *proximate analysis* (kadar air, kandungan *volatile solid*, kadar abu), kadar lignin, kadar selulosa, kadar hemiselulosa, nilai kalor terhadap produk arang pirolisis, serta analisis GC-MS untuk produk cair.
6. Suhu maksimal operasional reaktor pirolisis sebesar 500°C.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah dihasilkannya informasi tentang pengaruh variasi jenis ranting terhadap hasil pirolisis. Penelitian ini juga memberikan kontribusi ilmiah tentang pengaruh penambahan plastik pada pirolisis bahan baku ranting.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik dan Komposisi Sampah Kecamatan Gubeng Kota Surabaya

Kecamatan Gubeng merupakan salah satu kecamatan dengan jumlah penduduk terbanyak di Surabaya. Luas wilayah Kecamatan Gubeng adalah sebesar 7,48 km² dan jumlah penduduk mencapai 152.653 jiwa (BPS Kota Surabaya, 2013). Volume sampah yang masuk di 9 LPS Kecamatan Gubeng adalah sebesar 172 m³/hari (DKP Surabaya, 2010). Agustia (2013) telah melakukan penelitian mengenai data komposisi sampah setiap TPS di Kecamatan Gubeng Surabaya yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Sampah dapat dikomposkan berupa sisa makanan dan sampah kebun mendominasi persentase sampah di Kecamatan Gubeng.

Tabel 2.1 Komposisi Sampah Setiap TPS di Kecamatan Gubeng Surabaya

Jenis sampah	Komposisi Sampah (%)				
	Bratang	Bakti Husada	Kangean	Kalibokor	Srikana
Dapat dikomposkan					
Sisa makanan	60,69	53,59	73,48	55,06	60,92
Sampah kebun	3,01	3,00	16,60	3,72	7,47
Plastik					
HDPE Plastik	2,12	1,81	0,30	2,41	1,16
HDPE Botol	0,26	0,46	0,03	0,37	0,00
HDPE AI	0,79	0,99	0,08	1,09	0,34
LDPE	7,96	7,57	3,29	8,33	4,77
PET					
-warna	0,13	0,12	0,01	0,08	0,57
-transparan	0,44	0,53	0,08	0,36	1,54
PS					
sterofom	0,21	0,19	0,11	0,21	0,64
PS gelas					
aqua	0,00	0,00	0,07	0,14	0

Jenis sampah	Komposisi Sampah (%)				
	Bratang	Bakti Husada	Kangean	Kalibokor	Srikana
PP bag	0,11	0,43	0,13	0,29	0,39
Kertas					
Koran	1,10	1,08	1,18	2,32	1,06
HVS/duplek	1,49	1,61	0,15	2,02	0,42
Tetra pack	0,20	0,22	0,02	0,23	0,17
Karton	2,07	2,38	0,63	2,88	4,01
Lainnya	2,75	4,43	0,55	3,48	0,38
Logam					
Besi	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kaleng baja	0,14	0,53	0,06	0,16	0,68
Kaleng cans	0,05	0,08	0,03	0,11	0,00
Non kaleng	0,14	0,48	0,09	0,19	0,34
Non besi	0,04	0,01	0,00	0,07	0,15
Tembaga	0,19	0,12	0,03	0,02	0,29
Kaca					
Botol kaca	0,76	1,03	0,09	0,40	0,66
Kaca lain	0,78	0,66	0,06	0,68	0,49
Kain	2,44	3,84	0,61	4,06	1,06
Karet	0,69	0,63	0,04	0,81	0,23
Kayu	0,86	1,49	1,15	0,78	0,54
Diapers					
Popok	7,49	9,24	0,32	6,03	9,43
Non popok	1,27	1,41	0,17	1,09	0,90
Lainnya	0,80	0,62	0,48	1,25	0,50
B3	0,25	0,75	0,02	0,50	0,29
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

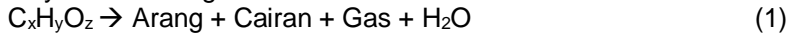
Sumber: Agustia (2013)

2.2 Metode Pirolisis

Sistem pengolahan, manajemen dan pembuangan sampah padat perkotaan menjadi masalah yang umum di setiap negara. Metode pengolahan sampah dengan pirolisis dianggap sebagai alternatif inovatif untuk mengolah sampah padat yang menghasilkan zat-zat kimia berbeda dan bahan bakar (Schaefer, 1975; Malkow, 2004). Energi yang diperoleh dari metode pirolisis lebih bersih atau ramah lingkungan dibandingkan dengan energi hasil dari insinerator sampah. Besarnya emisi nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur oksida (SO_2) juga lebih sedikit sebagai hasil dari

proses atmosfer inert dan pencucian syngas sebelum pembakaran. Selain emisi gas berkurang, kualitas residu padat dari pirolisis lebih baik daripada teknik pengolahan sampah perkotaan lain (Saffarzadeh *et al.*, 2006).

Reaksi yang berlangsung dalam proses pirolisis dapat dinyatakan sebagai:



dimana Q adalah panas yang perlu dimasukkan ke reaktor agar reaksi berjalan. Hal tersebut mencakup 3 komponen yaitu:

- Penguapan kelembaban Q_1

Selama pirolisis berlangsung, bahan baku tidak akan mengalami proses dekomposisi thermal sebelum terjadinya penguapan kelembaban (Q_1). Nilai Q_1 dapat dihitung sebagai:

$$Q_1 = W \times 2260, \text{ kJ kg}^{-1} \quad (2)$$

dimana W adalah kadar air bahan baku untuk reaktor (dalam %). Untuk mengurangi bagian dari energi ini, komponen sampah padat dengan kadar air tinggi seperti limbah makanan, biomassa disarankan untuk mengeringkan bahan baku terlebih dahulu (Chen *et al.*, 2014).

- Kebutuhan kalori dari pirolisis Q_2

Kebutuhan kalori pirolisis dihitung menggunakan persamaan (3) (Raveendran *et al.*, 1996):

$$Q_2 = C_{p,M} \int m_M dT + C_{p,ch} \int m_{ch} dT + C_p \int m_v dT + Q_p, \text{ kJ kg}^{-1} \quad (3)$$

dimana $C_{p,M}$, $C_{p,ch}$, $C_{p,v}$ adalah kapasitas panas spesifik dari bahan kering seperti arang dan kadar uap yang dihasilkan, $J \text{ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; m_M , m_{ch} , dan m_v adalah mass ratio dari bahan kering seperti arang dan kadar uap terhadap bahan baku (%). Ketiga item di sisi kanan persamaan (3) merupakan energi yang dibutuhkan untuk pemanasan bahan baku dan produk terhadap suhu pirolisis. Nilai Q_p adalah panas reaksi pirolisis dalam $J \text{ kg}^{-1}$. Q_2 dapat diperoleh melalui teknik pemindaian *calorimetry* (DSC) atau analisis termal diferensial (DTA) untuk komponen sampah padat yang berbeda (He *et al.*, 2006). Telah ditemukan bahwa untuk desain reaktor nilai Q_p dapat diabaikan dan nilai Q_2 terutama ditentukan oleh suhu pirolisis (Boukris *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2012). Semakin tinggi suhu pirolisis tidak hanya mengakibatkan kebutuhan energi yang lebih tinggi, tetapi juga menambah resiko keamanan reaktor.

- *Radiation loss* dari reaktor ke lingkungan Q_3

Dalam keadaan panas ditransfer dari luar ke bagian dalam reaktor, nilai Q_3 dapat diabaikan untuk desain permukaan perpindahan panas. Sebaliknya, jika reaktor dipanaskan sehingga terjadi transfer panas dari dalam ke luar, permukaan perpindahan panas harus menanggung sebagian energi untuk menjaga suhu reaktor. Sistem isolasi yang lebih baik akan mengurangi *radiation loss* Q_3 (Chen *et al.*, 2014).

Bahng *et al.* (2009) membagi metode pirolisis menjadi tiga variasi, yaitu:

1. Pirolisis lambat (*slow pyrolysis*)

Pirolisis lambat merupakan pirolisis konvensional dimana nilai laju pemanasannya dijaga agar tetap kecil (sekitar $0,1-1^\circ\text{Cs}^{-1}$). Laju pemanasan yang lambat menghasilkan produk char yang lebih tinggi daripada produk cair dan gas. Pirolisis lambat telah digunakan ratusan tahun, utamanya pada proses pembuatan batu bara. Pada pirolisis kayu, biomassa dibakar pada suhu sampai sekitar 500°C . Waktu tinggal gas bervariasi dari 5 sampai 30 menit. Durasi pembakaran yang lebih lama akan membuat produk gas bereaksi dengan produk lain membentuk *char*.

2. Pirolisis cepat (*fast pyrolysis*)

Pirolisis cepat terjadi hanya dalam beberapa detik sehingga reaksi kinetik, fase transisi, pemanasan dan transfer masa memegang peranan sangat penting. Sedangkan pirolisis lambat menurunkan hasil minyak tetapi banyak menghasilkan uap dalam bentuk gas dan arang (Van de Velden *et al.*, 2010). Pemberian waktu tinggal yang lama di dalam reaktor menyebabkan hasil fase gas berpotensi bereaksi dengan hasil pirolisis lain menjadi bentuk arang (Bahng *et al.*, 2009).

3. Pirolisis kilat (*flash pyrolysis*)

Pirolisis kilat merupakan peningkatan versi dari pirolisis cepat, dimana laju pemanasan sangat tinggi, yaitu di atas 1000°Cs^{-1} dengan waktu reaksi hanya beberapa detik. Reaktor yang bisa digunakan untuk pirolisis kilat adalah *fluidized bed reactors*, *vacuum pyrolysis reactor*, *rotating cone reactor*, *entrained flow reactor*, *ablative*, *vortex*, dan *twin screw reactors*. *Entrained flow reactor* dan *fluidized bed reactors* merupakan reaktor terbaik untuk proses pirolisis ini. Berdasarkan laju pemanasan dan durasi pembakaran yang cepat, pirolisis kilat membutuhkan bahan baku

dengan ukuran lebih kecil untuk mendapatkan produk pirolisis lebih bagus. Beberapa parameter pada operasi utama proses pirolisis pada beberapa tipe pirolisis disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Parameter Operasi untuk Proses Pirolisis

	Pirolisis Lambat (Slow Pyrolysis)	Pirolisis Cepat (Fast Pyrolysis)	Flash Pyrolysis
Temperatur pirolisis (°C)	300-700	600-1000	800-1000
Heating rate (Cs⁻¹)	0,1-1	10-200	>1000
Ukuran partikel (mm)	5-50	<1	<0,2
Solid residence time (s)	300-550	0,5-10	<0,5

Sumber: Bahng *et al.* (2009)

2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Pirolisis

Banyak penelitian telah dilakukan untuk menganalisis dampak bahan baku seperti kertas, plastik, kain, terhadap keefektifan proses pirolisis (Wu *et al.*, 2003.; Wu *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008; Zheng *et al.*, 2009.; Luo *et al.*, 2010a; Ates *et al.*, 2013; Zeaiter, 2014; Islam *et al.*, 2013). Beberapa penelitian tentang dampak komposisi beberapa jenis kayu terhadap produk pirolisis dapat diringkas pada Tabel 2.3. Dari penelitian yang ada, masih sedikit jurnal yang membandingkan bahan baku variasi jenis kayu terhadap kualitas produk pirolisis.

Tabel 2.3 Hasil Pirolisis Parameter Temperatur dan Jenis / Komposisi Bahan

Kondisi	Jenis Reaktor	Suhu Optimum (°C)	Berat Sampel (g)	Waktu Reaksi (menit)	Produk (% wt)	Sumber
Kayu kering campuran tanaman angšana, mahoni	<i>Fluidized Bed</i>	500	1000	60	Cair 24,3	Cahyono, 2013

dan mangga							
Serbuk kayu mahoni	<i>Rotary Kiln</i>	600	200	180	Arang 66,2	Qiram <i>et al.</i> , 2015	
Serbuk kayu jati	<i>Fluidized bed</i>	500	200	10	Minyak 21,99	Noor, 2011	
Kayu akasia	<i>Bed Reactor</i>	400	250	90	Arang 42,5 Minyak 32	Surest <i>et al.</i> , 2013	
Batang Cengkeh	-	410	4000	100	Minyak 45,75	Yusnaini dan Indah, 2014	
HDPE	<i>Tube Reactor</i>	450-470	0,996	45	Wax 78,7 Gas 17,8	Zeaiter, 2014	
Kayu Eucalyptus	-	500-650	1000	60	Minyak 60,5	Ellens <i>et al.</i> , 2014	
Kayu Ketapang	-	500	50	120	Minyak 77,85	Anggraeni, 2015	
Batang Bunga Matahari	<i>Bed Reactor</i>	500		30	Minyak 41	Akhtar <i>et al.</i> , 2012	
Serbuk Gergaji	<i>Bed Reactor</i>	440		65	Minyak 40 Arang 31,5	Islam <i>et al.</i> , 2013	
Batok Palem	<i>Fluidized bed</i>	500	150	60	Minyak 47,3 Gas 21,2	Abnisa <i>et al.</i> , 2011	
Bonggol Jagung	<i>Fluidized bed (fast pyrolysis)</i>	550	6	10	Arang 23,2 Cair 56,8 Gas 14	Zhang <i>et al.</i> , 2009	

Pinus : Plastik PS (50:50)	<i>Auger reactor (fast pyro- lysis)</i>	525	2000/h	10 s	Arang 12,1 Minyak 64,9 Gas 23	Bhattach arya et al., 2009
Pinus : HDPE (50:50)	<i>Auger reactor (fast pyro- lysis)</i>	450	2000/h	10 s	Arang 25,9 Minyak 38,9 Gas 35,2	Bhattach arya et al., 2009
Pinus	<i>Auger reactor (fast pyro- lysis)</i>	450	2000/h	10 s	Arang 19,1 Minyak 50,1 Gas 30,8	Bhattach arya et al., 2009

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses pirolisis adalah:

- Komposisi bahan / jenis bahan

Biomassa dan plastik dapat dibakar dengan kondisi termal seperti pirolisis (Caglar dan Aydinli, 2009). Penambahan material plastik kedalam proses pirolisis menghasilkan peningkatan kandungan hidrogen dalam produk minyak dibandingkan proses pirolisis biomassa tanpa plastik. Hal tersebut menunjukkan bahwa komposisi bahan yang berbeda pada proses pirolisis menghasilkan kandungan berbeda untuk minyaknya (Bhattacharya *et al.*, 2009).

- Temperatur

Temperatur memegang peranan penting terhadap hasil pirolisis. Pada temperatur yang lebih tinggi maka jumlah gas semakin banyak, tetapi terjadi penurunan terhadap jumlah padatan dan minyak (Encinar *et al.*, 2009). Peningkatan temperatur juga menyebabkan peningkatan komponen *fixed carbon*, penurunan persentasi bahan *volatile* dan terjadi kenaikan terhadap komponen abu. Peningkatan temperatur juga menyebabkan konsentrasi maksimum lebih besar dan waktu yang dibutuhkan untuk reaksi lebih pendek, sehingga produksi molar meningkat (Encinar *et al.*, 2009). Temperatur maksimum untuk menguraikan bahan organik adalah 450-650°C, tetapi proses penguraian menurun ketika temperatur diatas 750°C (Bahng *et al.*, 2009). Pada suhu yang lebih tinggi dari 700°C, *syngas* adalah produk yang penting.

Sebagian besar penelitian lebih memerhatikan produk cair dan *syngas* daripada *char* karena pada faktanya minyak dan *syngas* lebih berharga. Hasil komposisi minyak pirolisis dan *syngas* bergantung terhadap suhu saat pirolisis berlangsung. Variasi temperatur terhadap hasil pirolisis disajikan pada Tabel 2.3.

- Laju pemanasan (*heating rate*)

Laju pemanasan (*heating rate*) bervariasi dari sekitar $4^{\circ}\text{C min}^{-1}$ sampai $670^{\circ}\text{C s}^{-1}$. *Heating rate* tinggi berdampak pada lebih tingginya zat yang mudah menguap (*volatile matter* seperti tar dan gas) sehingga lebih sedikit residu yang dihasilkan (Yi, 2007; Velghe *et al*, 2011). Tingginya *heating rate* juga berdampak pada durasi pembakaran lebih lama dan tingginya *syngas* yang diperoleh karena terjadi proses pemecahan *tar*. Jika kandungan *volatile matter* secara langsung diekstrak, maka produk cair pirolisis dapat diperoleh lebih banyak (Font *et al.*, 1995a, b). Secara teoritis *heating rate* dapat dihitung dengan persamaan (4).

$$HR = \frac{\Delta T \cdot \alpha}{m \cdot C_p}, \text{ } ^{\circ}\text{C S}^{-1} \quad (4)$$

dimana ΔT adalah perbedaan temperatur antara dinding reaktor dan bahan baku ($^{\circ}\text{C}$); α adalah koefisien transfer panas di dalam reaktor ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); m adalah massa bahan baku setiap m^2 dari permukaan transfer panas (dinding reaktor) (kg m^{-2}); C_p adalah panas spesifik dari bahan baku ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

- Durasi pembakaran di reaktor (*detention time*)

Waktu tinggal bahan (*detention time*) dalam zona reaksi merupakan parameter penting; bervariasi antara beberapa detik sampai 2 jam (Chen *et al.*, 2014a). Waktu tinggal yang lebih lama akan meningkatkan pemecahan *tar* retak dan menghasilkan produk gas yang lebih tinggi. Pada saat yang sama, waktu tinggal yang lebih lama juga mengurangi kadar air dan *wax* dalam produk cair. Hal ini sejalan dengan peningkatan kualitas produk (Velghe *et al.*, 2011). Dampak kompleks dari waktu tinggal yang lama dapat disimpulkan dari Persamaan (1). Dalam waktu tinggal lebih lama, lebih banyak panas yang masuk ke reaktor sehingga kemampuan penguapan air bertambah. Proses pemecahan *tar* ke molekul kecil dan penguapan zat organik dari *char* lebih banyak akan menghasilkan hasil gas pirolisis yang lebih tinggi. Kerugian dari

waktu tinggal lebih lama adalah menyebabkan kapasitas pengolahan reaktor yang lebih sedikit.

- Ukuran bahan baku

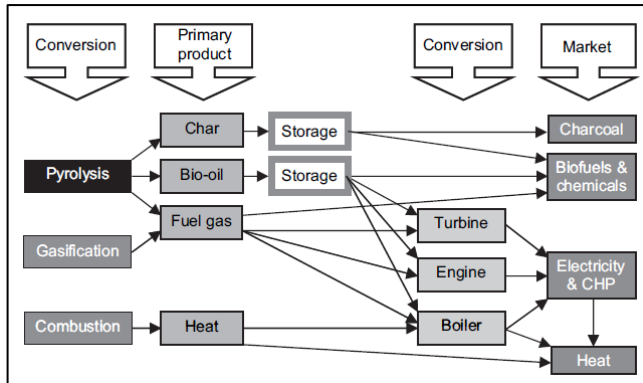
Pengaruh ukuran partikel tidak secara ekstensif diteliti, tetapi pada umumnya partikel lebih kecil menghasilkan luas permukaan lebih besar dan *heating rate* lebih cepat (Di Blasi, 1996). Ukuran partikel yang lebih kecil menghasilkan produk cairan dan gas pirolisis yang lebih tinggi. Bahan baku yang lebih besar menyebabkan *detention time* yang tinggi karena dengan *heating rate* yang lebih rendah. Pada penelitian Luo *et al.* (2010b), meskipun temperatur sudah cukup tinggi, hasil produk pirolisis lebih kecil. Hal ini disebabkan partikel bahan baku yang luas permukaannya kecil mengakibatkan *heating rate* lebih rendah dan tingkat radiasi perpindahan panas lebih tinggi. Pada dasarnya pengaruh ukuran partikel adalah kombinasi dari *heating rate* serta hubungan antara materi *volatile* dan *char*. Hal ini terjadi ketika *volatile matters* berdifusi dari partikel dalam ke luar.

- Kelembaban Bahan Bakar

Kandungan kadar air yang lebih tinggi menyebabkan penurunan jumlah produk gas dan memperpanjang waktu reaksi pirolisis. Konsentrasi H₂ dan jumlah minyak meningkat seiring dengan meningkatnya kadar air bahan. Selain itu, dengan meningkatnya kadar air bahan menyebabkan konsentrasi CO, CH₄ menurun tetapi konsentrasi CO₂ meningkat (Chen *et al.*, 2014b).

2.4 Produk Pirolisis

Skema konversi thermal biomassa serta produknya dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Konversi Thermal Biomassa
Sumber: Bridgwater (2012)

Metode pirolisis menghasilkan beberapa produk, antara lain:

- Arang

Arang (*char*) adalah hasil pirolisis padat. Arang terutama terbentuk dari karbon (~85%), tetapi juga mengandung oksigen dan hidrogen. Tidak seperti bahan bakar fosil, biomassa mengandung sedikit abu anorganik. Pada umumnya, *low heating value* (LHV) arang dari bahan baku biomassa adalah sekitar 32 MJ/kg (Diebold dan Bridgwater, 1997). Nilai ini jauh lebih tinggi daripada biomassa induk atau produk cairnya. Arang biomassa sangat reaktif. Arang ini bersifat sangat berpori dan mengeras saat kering. Sifatnya yang kering membuat arang mudah digunakan (Basu, 2010).

Terdapat beberapa penelitian yang membahas mengenai char yang dihasilkan dari proses pirolisis. William (2013) menyebutkan bahwa karakteristik char yang dihasilkan dari pirolisis dengan bahan baku ban bekas menghasilkan char 22%-49% dari total berat bahan baku. Pada penelitian tersebut, char yang dihasilkan mengandung karbon hingga 90%, sulfur 90%, dan abu dengan kadar 8,27%-15,33%. Cunliffe dan Williams (1998) menyatakan bahwa karakteristik dari char/residu dipengaruhi oleh temperatur, jenis reaktor, dan bahan baku. Penelitian dari Akhtar *et al* (2012) menyebutkan bahwa pirolisis dengan temperatur

rendah yaitu kurang dari 300°C akan menghasilkan produk char yang lebih tinggi.

- Gas

Gas dari pirolisis akan terbentuk pada temperatur >600°C. Biomassa terdiri dari komponen-komponen antara lain kandungan air (*moisture content*), zat yang mudah menguap (*volatile matter*), karbon terikat (*carbon fixed*), dan abu (*ash*). Pembakaran biomassa terdiri 3 tahapan yaitu pengeringan, devolatilisasi, dan pembakaran char/residu. Proses pengeringan bertujuan untuk menghilangkan kadar air. Devolatilisasi merupakan tahapan dari proses pirolisis yang bertujuan untuk menghilangkan zat mudah menguap (*volatile matter*). Pembakaran char/residu adalah proses dimana terdapatnya reaksi antara oksigen dan karbon yang melepaskan kalor. Karbon yang ada dalam char/residu bereaksi dengan oksigen pada permukaan membentuk karbon monoksida dengan reaksi sebagai berikut:



Permukaan karbon juga bereaksi dengan karbondioksida dan uap air dengan reaksi sebagai berikut:



Proses karbonisasi menghasilkan gas-gas yang mudah terbakar seperti CO, CH₄, H₂, formaldehid, metana, asam formiat, dan asam asetat serta gas-gas yang tidak mudah terbakar seperti CO₂ dan H₂O. Gas-gas yang dihasilkan memiliki nilai kalor tinggi. Pada temperatur 250°C, CO₂ dan CO dilepaskan lebih cepat dari pada gas yang lain. Pada peningkatan temperatur hingga diatas 350°C, CO₂ yang dilepaskan tidak mengalami perubahan. Pembentukan gas H₂ dan CH₄ terjadi ketika temperatur mencapai 550°C. Peningkatan temperatur menyebabkan proporsi dari gas H₂ dan CH₄ meningkat yang mana gas tersebut komponen utama yang mempengaruhi nilai kalor (Chen *et al.*, 2012).

Hasil gas dari pirolisis meningkat lebih dari 80% ketika temperatur pirolisis naik dari 600-1000°C sedangkan produk cair dan arang menurun. Jumlah CO₂, CO dan CH₄ dalam gas pirolisis lebih dari 86%. Kandungan CO dan CH₄ meningkat seiring peningkatan temperatur, tetapi kandungan CO₂ menurun. Hidroksil, alifatik, karbonil, olefin dan kelompok eter menghilang ketika temperatur diatas 800°C. *Syn-gas* terdiri dari CO₂, CO, C₂H₄

dan C_2H_6 yang semakin meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pirolisis tetapi kandungan H_2 dan CH_4 menurun. Ketika bagian *syngas* yaitu H_2 , CO dan CO_2 dikonversi menjadi *syn-fuel* akan mendatangkan keuntungan terhadap lingkungan karena tidak adanya kandungan sulfur dan rendah emisi CO (Fu *et al.*, 2012).

- Minyak

Minyak (*bio-oil*) merupakan produk pirolisis cair, mengandung 37% oksigen yang berpotensi ditingkatkan untuk menjadi bahan bakar transportasi. Untuk mengoptimalkan produksi *bio-oil* dan peningkatan proses dari *switchgrass* maka akan dilakukan pirolisis sampel pada temperatur $600^\circ C$ karena pada temperatur $400^\circ C$ massa yang hilang 78%, pada temperatur $500^\circ C$ masa yang hilang 80 % dan pada temperatur $600^\circ C$ masa yang hilang 88% (Imam dan Capareda, 2012). Produk minyak terdiri dari alifatik hidrokarbon sebagai komponen utama, tetapi jumlah senyawa aromatik meningkat pada temperatur yang lebih tinggi dan waktu tinggal yang lebih lama.

2.5 Kayu sebagai Sumber Bahan Bakar Alternatif

Kayu merupakan bagian batang (cabang, dahan, dan sebagainya) pokok yang keras, biasa dipakai untuk bahan bangunan, dan sebagainya (KBBI, 2016). Penggunaan kayu sebagai bahan bakar memberikan keuntungan yang lebih bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Keuntungan-keuntungan tersebut antara lain (USDA, 2004) :

1. Ketersediaannya kayu melimpah. Ketersediaan bahan ini pun bersifat relatif dan biasanya banyak terdapat di Indonesia karena kekayaan alamnya yang melimpah. Ini merupakan peluang bagi kita untuk mengembangkan kayu sebagai sumber energi lebih luas lagi. Sumber daya yang terbarukan (*renewable resources*).
2. Kadar CO_2 yang disisakan dari proses pembakaran 90% lebih sedikit daripada pembakaran dengan *fossil fuel*.
3. Kayu mengandung lebih sedikit sulfur dan *heavy metal*. Bahan kayu bukan merupakan penyebab hujan asam dan emisi partikulatnya bisa dikontrol.
4. Bahan bakar kayu lebih murah jika dibandingkan bahan bakar fosil.

2.6 Faktor - Faktor yang Mempengaruhi Kayu sebagai Sumber Bahan Bakar Alternatif

Sifat fisis kayu merupakan faktor intern dari struktur kayu yang menentukan kualitas kayu sebagai sumber bahan bakar alternatif, di samping peran lingkungan dimana kayu tersebut tumbuh. Beberapa sifat fisis kayu yang dianggap penting antara lain: kadar air kayu, kembang susut, berat jenis dan kerapatan kayu (Dumanauw, 1993). Menurut Suranto (2006) kualitas kayu sebagai sumber energi dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu sebagai berikut:

1. Jenis spesies

Jenis spesies *hardwood* (kayu keras) dan *softwood* (kayu lunak) memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kualitas kayu sebagai sumber energi. Nilai kalor yang dihasilkan oleh *softwood* cenderung lebih tinggi daripada *hardwood* (Baker, 1983). Nilai-nilai panas pembakaran ini sedikit hubungannya dengan jenis spesies kayu dan hanya bervariasi paling besar 5 – 8% (Prawirohatmodjo, 2004). Pohon yang tumbuh cepat dan memiliki banyak cabang cenderung memiliki energi yang tinggi. Ciri-ciri ini dapat ditemukan pada *softwood*.

2. Sistem silvikultur

Untuk meningkatkan nilai kalor pada kayu dapat ditempuh dengan menerapkan sistem silvikultur, yaitu:

a. Pola penanaman yang diterapkan sebaiknya bersifat murni, yaitu pola penanaman tegakan hutan dengan spesies – spesies pohon yang khusus ditujukan untuk sumber energi. Spesies – spesies pohon yang dapat diusahakan antara lain *Acacia vilosa*, *A. auriculiformis*, *A. mangium*, *A. oraria*, *Eucalyptus urophylla*, *E. alba*, *E. deglupta*, *Albizia procera*, melina (*Gmelina arborea*), soja (*Adenanthera spp.*). Selain itu, dapat juga digunakan jenis tanaman pagar seperti gamal (*Gliricidae immaculate*), angkana/sono kembang (*Dalbergia latifolia*), secang (*Caesalpinia sappan*), petai cina (*Leucaena glauca*), lamtoro (*L. leucocephala*) dan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). Tanaman pagar mampu tumbuh dari trubusan dan umumnya berdiameter kecil sehingga tidak layak untuk kayu pertukangan. Nilai kalor pada tiap-tiap spesies pohon dan batu bara disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.4 Data Nilai Kalor Arang Kayu dan Batubara

No.	Jenis spesies	Nilai kalor x 10 (kal/g)
1	Jati (<i>Tectona grandis</i>)	750 ± 7
2	Akasia (<i>Acacia spp.</i>)	740 ± 7
3	Trembesi (<i>Samanea saman</i>)	730 ± 7
4	Sono (<i>Dalbergia spp.</i>)	730 ± 7
5	Landep (<i>Barleria prionitis</i> L.)	715 ± 7
6	Mahoni (<i>Swietenia mahagoni</i>)	699 ± 7
7	Melinjo (<i>Gnetum gnemon</i>)	673 ± 6
8	Manding	666 ± 6
7	Kesambi (<i>Schleichera oleosa</i> Merr)	661 ± 6
8	Rembalo	644 ± 6
9	Tempurung kelapa (batok)	626 ± 6
10	Sengon (<i>Paraserianthes falcataria</i>)	595 ± 6
11	Batu bara hitam	550 ± 6
12	Batu bara cokelat	502 ± 6

Sumber : Jati dan Santoso (2005)

b. Untuk mendapatkan tegakan dengan percabangan yang banyak, maka jarak tanam harus diatur selebar mungkin. Biasanya digunakan jarak tanam 1 x 2 m.

c. Pola – pola pemeliharaan yang disarankan, adalah :

- Model trubus (cabang – cabang dipangkas dan disisakan pohon pentingnya saja)
- Tertuju pada perlindungan terhadap penyakit, hama, dan api yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman sumber energi biomassa.
- Penjarangan dilakukan apabila diperlukan dengan intensitas rendah.

3. Umur pemanenan

Umur pohon pada saat pemanenan menentukan kualitas kayu yang dipanen. Sebaiknya pemanenan pada pohon yang sudah berumur cukup tua dan secara kimiawi telah mengalami tahap penguatan dinding sel (lignifikasi).

4. Ekologi hutan tanaman

Ekologi hutan tanaman berhubungan dengan iklim, cuaca, curah hujan, tempat tumbuh, kesuburan tanah dan intensitas sinar matahari yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman energi.

5. Bagian pohon

Ada perbedaan antara kayu bagian akar dan bagian batang terhadap kualitas kayu sebagai sumber energi. Hal ini dipengaruhi oleh sifat-sifat dasar kayu seperti sifat anatomi, fisika, dan kimia kayu yang berbeda dalam satu pohon.

2.7 Nilai Kalor Kayu dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhinya

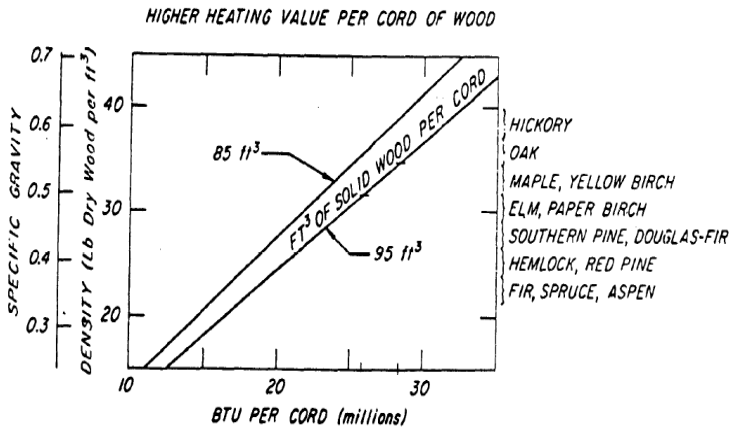
Nilai kalor atau nilai panas adalah ukuran kualitas bahan bakar dan biasanya dinyatakan dalam *British Thermal Unit* (BTU). Nilai kalor merupakan energi kimia terikat di dalam bahan dan dalam proses pembakaran nilai kalor akan dikonversi menjadi energi panas (Erol *et al.*, 2010). Nilai kalor yang dinyatakan dalam kalori berarti jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu 1 gram air sebesar 1°C. Nilai kalor kayu ditentukan oleh berat jenis kayu, kadar air, dan komposisi kimia kayu khususnya kadar lignin dan kadar ekstraktif.

a. Berat Jenis Kayu

Definisi berat jenis kayu adalah perbandingan antara kerapatan kayu yang diukur atas dasar berat kering tanur dan volume pada kandungan air yang telah ditentukan dengan kerapatan air pada suhu 4°C. Berat jenis kayu dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu dimensi serat, letak kayu awal dan kayu akhir, persentase selulosa dan lignin serta kandungan ekstraktif yang ada dalam kayu (Haygreen *et al.*, 2003).

Softwood dan *hardwood* bisa dibedakan secara nyata dengan melihat atau membandingkan struktur anatomi kayunya. *Softwood* tidak memperlihatkan pori atau pembuluh sedangkan *hardwood* menampilkan pori pada irisan atau bidang pengamatan kayu. *Softwood* terdiri atas lebih dari 90% trakeid sedangkan *hardwood* terdiri atas sel-sel yang lebih banyak dan kompleks, seperti pembuluh, parenkim, jari – jari, serat dan lainnya. Pada *softwood*, berat jenis kayu ditentukan oleh trakeid sedangkan pada kayu daun ditentukan oleh porsi sel yang terbanyak. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa *softwood* cenderung memiliki berat jenis kayu lebih tinggi daripada *hardwood*. Dalam kimia kayu, berat jenis menunjukkan jumlah lignoselulosa pada volume kayu tertentu (Prayitno, 2007). Grafik

hubungan antara berat jenis kayu dengan nilai kalor dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Hubungan antara Berat Jenis Kayu dengan Nilai Kalor
Sumber : Baker (1983)

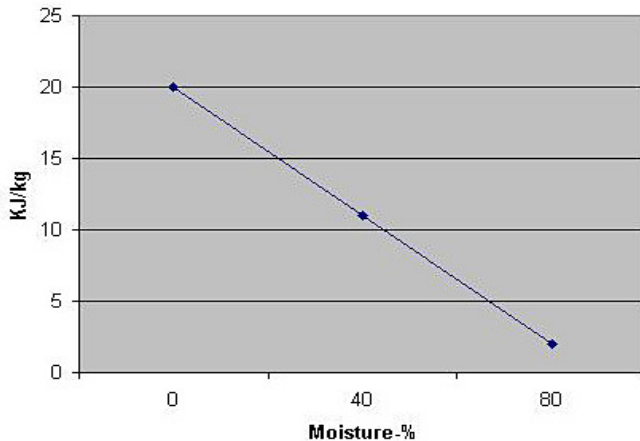
Berat jenis berpengaruh terhadap nilai kalor yang dihasilkan oleh kayu sebagai sumber energi. Dari Gambar 2.2, diketahui bahwa semakin tinggi berat jenis suatu biomassa, semakin tinggi pula nilai kalor yang dihasilkan. Dengan demikian, *softwood* cenderung memiliki nilai kalor lebih tinggi daripada *hardwood*.

b. Kadar Air

Menurut Prawirohatmodjo (2004), kadar air didefinisikan sebagai banyaknya air yang terdapat pada sepotong kayu yang dinyatakan dalam persentase dari berat kering tanurnya. Kadar air kayu antarjenis sangat bervariasi bahkan dalam satu jenis pun memiliki variasi yang bermacam-macam tergantung dari perlakuan yang diterima oleh kayu. Banyaknya kandungan kadar air pada kayu bervariasi tergantung jenis kayunya, kandungan tersebut berkisar antara 40 – 100%, dinyatakan dengan persentase dari berat kayu kering tanur. Berat kayu kering tanur dipakai sebagai dasar, karena berat ini merupakan petunjuk banyaknya zat pada

kayu. Berdasarkan penelitian Huhtinen (2005), kadar air berpengaruh signifikan terhadap nilai kalor bersih. Hubungan antara kadar air dengan nilai kalor dapat dilihat pada Gambar 2.3.

The effect of moisture content on the heating value of wood



Gambar 2.3 Hubungan antara Kadar Air dengan nilai kalor
Sumber: Huhtinen (2005)

Gambar 2.3 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar air dan nilai kalor berbanding terbalik. Semakin tinggi kadar air kayu maka semakin rendah nilai kalornya. Menurut Prawirohatmodjo (2004), kadar air kayu sangat menentukan kualitas arang yang dihasilkan. Arang dengan nilai kadar air rendah cenderung memiliki nilai kalor tinggi dan menunjukkan arang ini dihasilkan dari jenis kayu yang memiliki kadar air rendah. Dalam proses karbonisasi, makin tinggi kadar air kayu maka makin banyak pula kalor yang dibutuhkan untuk mengeluarkan air dalam kayu tersebut menjadi uap sehingga energi yang tersisa dalam arang menjadi lebih kecil.

c. Komposisi Kimia Kayu

Berdasarkan struktur kimia, kayu tersusun atas selulosa, lignin dan hemiselulosa. Selulosa sebagai kerangka, hemiselulosa sebagai matrik, dan lignin sebagai bahan pengikat sel-sel dan memberikan kekakuan kepada dinding sel. Selulosa adalah komponen utama dinding sel. Molekul selulosa dibentuk oleh ± 10.000 monomer glukosa yang diikat dengan ikatan 1,4- β -glukosida. Setiap monomer glukosa memiliki tiga gugus hidroksil (-OH). Sebanyak 36 molekul selulosa terikat bersama-sama oleh ikatan hidrogen membentuk seberkas fibril elementer. Fibril elementer bergabung membentuk mikrofibril, kemudian mikrofibril bergabung membentuk fibril dan akhirnya membentuk serat-serat selulosa (Sjostrom, 1993).

Hemiselulosa adalah heteropolimer dengan berbagai monomer gula, dan rantai molekul yang lebih pendek dari selulosa. Hemiselulosa merupakan senyawa amorf, karena banyak percabangan pada rantai molekulnya. Selain ketiga komponen tersebut terdapat zat-zat dalam kayu yang bukan penyusun struktur kayu yang dikelompokkan sebagai zat ekstraktif. Lignin adalah suatu polimer senyawa aromatik yang sebagian besar tidak larut dalam kebanyakan pelarut organik. Lignin tidak dapat diuraikan menjadi satuan monomer, karena bila dihidrolisis, monomer sangat cepat teroksidasi dan segera terjadi reaksi kondensasi. Lignin adalah senyawa tiga dimensi yang disusun dari monomer metoksifenil propana. Pada kayu, lignin umumnya terdapat di daerah lamela tengah dan berfungsi pengikat antar sel serta menguatkan dinding sel kayu. Lignin adalah senyawa amorf total (Danarto *et al.*, 2010)

Secara bertahap, pirolisis kayu akan mengalami peruraian komposisi kimia yang berbeda. Hemiselulosa terdegradasi pada 200-260°C. Selulosa terdegradasi pada 240-350°C. Lignin terdegradasi pada 280-500°C. Degradasi termal dapat dilakukan dengan adanya pelarut dalam jumlah rendah sehingga reaksi berjalan lebih cepat (Sjostrom, 1993). Menurut Tillman (1976), komponen penyusun kimia kayu memberikan nilai kalor yang berbeda, yaitu:

- Nilai kadar holoselulosa : 7.567 BTU/lb (17.600 J/kg)
- Nilai kadar lignin : 11.479 BTU/lb (26.700 J/kg)
- Nilai kadar ekstraktif : 11.500 BTU/lb (26.749 J/kg)

Holoselulosa, lignin, dan ekstraktif memberikan kontribusi yang berbeda-beda terhadap nilai kalor, khususnya lignin dan ekstraktif memberikan nilai kalor lebih besar daripada holoselulosa. Menurut Prawirohatmodjo (2004), pengaruh susunan kimia berasal dari lignin yang memiliki nilai kalor lebih tinggi (± 6.100 kkal/kg) dibandingkan dengan selulosa (4.150 – 4.350 kkal/kg). Untuk mendapatkan kayu dengan kadar lignin tinggi, dapat dilakukan upaya pemuliaan tanaman, rekayasa genetika, mengatur waktu pemanenan dimana pemanenan hanya dilakukan pada pohon yang telah mengalami tahapan pengerasan dinding sel. Kandungan lignoselulosa beberapa biomassa dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Sementara itu, adanya resin dalam kayu mempengaruhi nilai kalor yang dihasilkan. Kayu yang mengandung resin memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibanding dengan kayu yang tidak beresin. Sebagai contoh, oleoresin mempunyai nilai kalor tinggi (8.500 kkal/kg) (Haygreen *et al.*, 2003). Oleh karena itu, kayu jarum (pinus) yang mengandung resin mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi. Kandungan kimia dalam kayu disajikan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.5 Kandungan Lignoselulosa Beberapa Biomassa

Biomassa Padat	Selulosa	Hemi-selulosa	Lignin	Nilai kalor (MJ/kg)	Sumber
Kulit Kacang Tanah (%)	30-40	25-30	25-30	20,9	(Setiawan <i>et al.</i> , 2012)
Sabut Kelapa	32,5	-	37	16,6	(Rosa <i>et al.</i> , 2010; Rismayanai dan Ahmad, 2011)
Kayu Jati (%)	47,5	-	29,9	19,7 – 23,2	(Setiawan <i>et al.</i> , 2012)
Batok Kelapa	33,61	19,27	36,51	27 – 29,3	(Triono, 2006; Tirono dan Sabit, 2011)
Tongkol Jagung (%)	34,3	40,5	18,8	24,96	(Chen <i>et al.</i> , 2014)

Tabel 2.6 Kandungan Kimia dalam Kayu

Kandungan Kimia	Persentase Berat Kering (%)
Karbon	45 – 50 (11 – 15% padat, 35% <i>volatile</i>)
Hidrogen	6,0 – 6,5
Oksigen	38 – 42
Nitrogen	0,1 – 0,5
Sulfur	Maksimal. 0,05

Sumber : Huhtinen (2005)

d. Kadar Karbon Terikat dan Kadar Abu

Sudrajat dan Salim (1994) mengemukakan bahwa kadar karbon terikat berhubungan dengan nilai kalor. Semakin tinggi kadar karbon terikat maka nilai kalor semakin tinggi pula karena reaksi oksidasi akan menghasilkan kalori (reaksi eksotermis). Arang yang bermutu baik adalah arang dengan nilai kalor dan kadar karbon terikat yang tinggi namun kadar abu rendah. Kadar karbon terikat tinggi bila lebih dari 60%.

Abu berperan menurunkan mutu bahan bakar karena menurunkan nilai kalor. Salah satu unsur utama abu adalah silika, dan pengaruhnya kurang baik terhadap nilai kalor yang dihasilkan. Semakin rendah kadar abu, maka semakin baik briket arang tersebut. Kadar abu dikatakan kecil bila kurang dari 8%. Kadar abu yang terlalu tinggi akan menyebabkan kerak pada dasar alat-alat yang digunakan dan juga kotor (Sudrajat dan Salim, 1994).

2.8 Jenis-Jenis Kayu

Kayu dibedakan secara anatomis menjadi dua kelompok, yaitu kayu-keras dan kayu-lunak. Kayu keras adalah kayu yang memiliki pori atau pembuluh, sedangkan kayu-lunak adalah kayu yang tidak memiliki pembuluh. Pembuluh merupakan salah satu elemen anatomis kayu. Selain pembuluh, elemen kayu secara anatomis ini meliputi serabut, trakeid, parenkim, jari-jari, saluran damar. Kayu-keras merupakan kayu yang tersusun atas elemen-elemen: pembuluh, serabut, parenkim dan jari-jari. Pada kayu-keras tertentu, yakni kayu-kayu keras yang tercakup di dalam kelompok kelas *Dipeterocarpaceae*, maka kayu tersebut secara khusus juga tersusun oleh saluran damar sebagai tambahan atas ke-empat elemen penyusun kayu sebagaimana yang telah disebutkan (Suranto, 2012).

Kayu lunak merupakan kayu yang tersusun atas trakheid, jari-jari, parenkim, dan saluran damar. Di dalam konteks pengelompokan ini, maka kayu kulim, kayu nyatoh dan kayu putih serta kayu durian merupakan kayu-kayu yang termasuk di dalam kelompok kayu keras, karena keempat kayu itu memiliki pembuluh. Kayu pinus dan kayu agathis merupakan kayu yang termasuk di dalam kelompok kayu lunak karena keduanya tidak memiliki pembuluh (Suranto, 2012).

Pohon-pohon berkemampuan tinggi penyerap CO₂ banyak dikembangkan sebagai pohon perindang jalan. Tanaman tersebut diantaranya adalah akasia, kenanga, pingku, beringin, krey payung, matoa, mahoni, beringin, mangga, angšana, trembesi, bintaro, dan berbagai jenis tanaman lainnya (Dahlan, 2007). Di Surabaya, tanaman-tanaman tersebut ditanam sepanjang jalan dan diatur oleh pemerintah sesuai Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 19 Tahun 2014 tentang Perlindungan Pohon.

2.9 Plastik HDPE

Plastik adalah salah satu jenis makromolekul yang dibentuk dengan proses polimerisasi. Polimerisasi adalah proses penggabungan beberapa molekul sederhana (monomer) melalui proses kimia menjadi molekul besar (makromolekul atau polimer). Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah Karbon dan Hidrogen. Untuk membuat plastik, salah satu bahan baku yang sering digunakan adalah Naphta, yaitu bahan yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi atau gas alam (Kumar *et al.*, 2011). Berdasarkan Surono (2013), plastik terbagi menjadi 7 jenis yaitu PET (*polyethylene terephthalate*), HDPE (*High-density Polyethylene*), PVC (*Polyvinyl Chloride*), LDPE (*Low-density Polyethylene*), PP (*Polypropylene* atau *Polypropene*), PS (*Polystyrene*), dan *other* (O) atay jenis plastik lainnya.

Polyethylene merupakan bahan termoplastik yang diproduksi melalui polimerisasi ethylene (C₂H₄) dengan variabel proses seperti energi panas, tekanan, dan katalis Jenis kopolimernya diproduksi melalui polimerisasi ethylene dan sedikit penambahan monomer lain. *Polyethylene* itu sendiri merupakan polimer dari tipe *vinyl monomers*. Tidak seperti senyawa organik

monomer umumnya, polyethylene tidak dihasilkan dari molekul-molekul yang sama. *Polyethylene* dihasilkan dari berat molekul yang tidak sama dengan panjang molekul yang bervariasi.

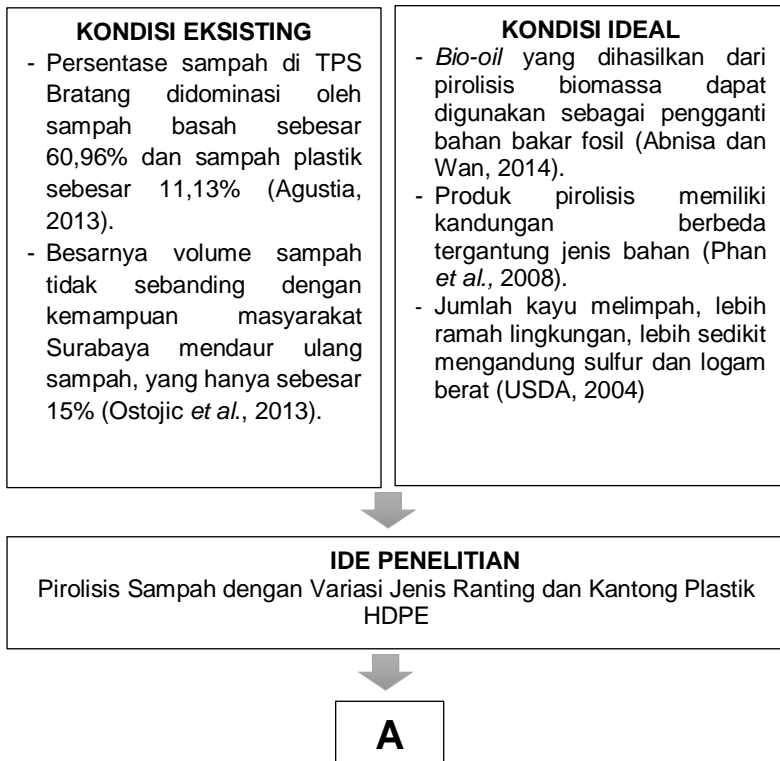
HDPE (*high density polyethylene*) diproduksi dengan proses reaksi bertekanan rendah antara 5-150 kg/cm² dengan temperatur berkisar antara 60-300°C menggunakan katalis *slurry* Ziegler-Natta dengan isobutana sebagai pelarut. Proses ini lebih dikenal dengan proses *slurry*. Selain proses fase gas maupun fase larutan untuk jenis-jenis *polyethylene* yang lain. Untuk mengontrol berat molekul yang berhubungan dengan sifat-sifat fisik polyethylene digunakan hidrogen sedang, komoner α -olefin dapat digunakan untuk mengatur densitasnya. Plastik HDPE digunakan pada botol obat, botol susu cair, jerigen pelumas, kantong plastik, dan botol kosmetik. Sifat-sifat HDPE adalah sebagai berikut:

- Kuat tarik (*tensile strength*) : 22-40 MPa
 - Modulus elastisitas : 0,4-1,3 Gpa
 - *Elongation at Failure* : 15-130%
 - Density : 960 kg/m³
 - Heat deflection : 85 (Temp. 68 psi (°C))
- (Young et al., 1993)

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran umum pelaksanaan penelitian yang disusun berdasarkan tahapan pelaksanaan penelitian untuk mencapai tujuan akhir yang diinginkan. Penyusunan kerangka penelitian didasarkan pada studi literatur yang dilakukan, baik dari jurnal ilmiah, buku teks, laporan tugas akhir, yang mendukung pada penelitian pengolahan biomassa padat dan plastik dengan konversi termal (pirolisis). Alur tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



A

RUMUSAN PENELITIAN

- Bagaimana *recovery* massa produk pirolisis bahan baku ranting?
- Bagaimana pengaruh komposisi variasi jenis ranting dan sampah kantong plastik HDPE terhadap produk pirolisis?

TUJUAN PENELITIAN

- Menentukan *recovery* massa produk pirolisis bahan baku ranting.
- Menentukan pengaruh komposisi variasi jenis ranting dan sampah kantong plastik HDPE terhadap produk pirolisis.

RUANG LINGKUP

- Pirolisis metode *batch* skala laboratorium dengan jenis sampah yaitu variasi jenis ranting dan kantong plastik HDPE
- Temperatur maksimal operasional reaktor pirolisis sebesar 500°C

PERSIAPAN ALAT DAN BAHAN UJI

Alat

Rangkaian reaktor pirolisis, peralatan uji *proximate* (kadar air, *volatile solid*, abu), peralatan uji kadar lignin, hemiselulosa, selulosa dengan Metode Chesson, kaleng, kuas, dan kain pembersih.

Bahan

Sampah kantong plastik (HDPE), dipotong menjadi berukuran (30x50) mm (Phan *et al.*, 2008), sampah ranting dipotong menjadi 10 cm (Cahyono, 2013). Kadar air diatur 8-10% (Bhattacharya *et al.*, 2009).

B

B

PENELITIAN PENDAHULUAN

Penelitian pendahuluan : pembakaran bahan baku pirolisis menggunakan *cawan crucible* 100 mL di reaktor pirolisis untuk menentukan temperatur optimum penelitian utama.

Variasi temperatur penelitian pendahuluan: 200°C, 300°C, 400°C, 500°C (Sjostrom, 1993; Islam *et al.*, 2013; Manggali, 2015). Temperatur yang menghasilkan *volatile solid* terbanyak akan digunakan untuk penelitian utama.

PELAKSANAAN PENELITIAN

- Pirolisis utama dilakukan selama 60 menit di reaktor pirolisis.dengan variasi 2 bahan baku.
- Jenis bahan :
 1. Sampah tidak tercampur (ranting 100%) yaitu 3 jenis sampah ranting di Rumah Kompos Bratang Surabaya dan sampah kantong plastik HDPE (Agustia, 2013; Zeaiter, 2014; Manggali, 2015)
 2. Sampah campuran: sampah ranting 25% : HDPE 75%; sampah ranting 50% : HDPE 50%; sampah ranting 75% : HDPE 25% (Bhattacharya *et al.*, 2009; Rachmawati, 2015)
- Pengujian
 - *Proximate analysis* (untuk produk arang dan wax)
 - Nilai kalor (untuk produk arang)
 - Uji kadar lignin, selulosa dan hemiselulosa (untuk bahan baku ranting)

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Mass balance dan ANOVA

KESIMPULAN

Gambar 3.1 Diagram Alir Kerangka Penelitian

3.2 Deskripsi Kerangka Penelitian

1. Ide Penelitian

Ide penelitian berasal dari gap antara kondisi ideal dengan kondisi kekinian yang berada di lapangan. Ide penelitian ini adalah “Pirólisis Sampah dengan Variasi Jenis Ranting dan Kantong Plastik HDPE”.

2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan informasi dan data yang menunjang penelitian. Studi literatur ini memuat informasi yang dapat mendukung perlakuan, analisis, dan pembahasan dari penelitian yang dilakukan. Studi literatur dilakukan dengan memanfaatkan jurnal ilmiah, buku teks, laporan tugas akhir dan sumber lain yang valid dan legal.

3. Persiapan Alat dan Bahan

a. Alat yang diperlukan

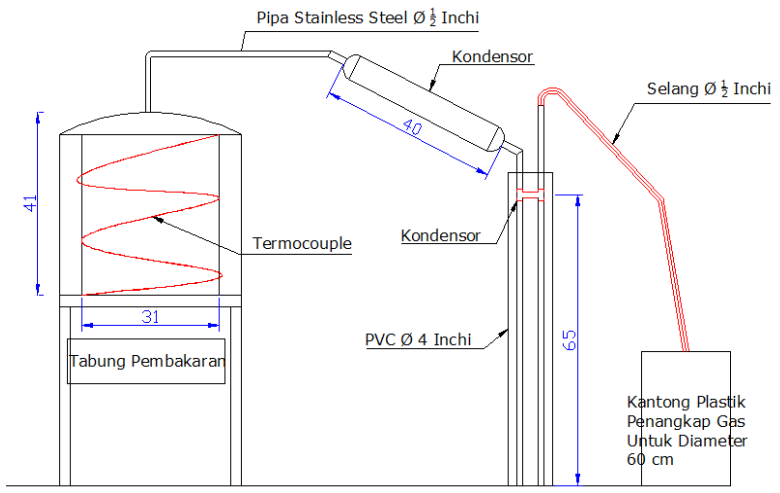
- Reaktor Pirólisis

Reaktor pirólisis berupa rangkaian dari tungku pembakar yang terbuat dari *stainless-steel*, pemanas, tungku dalam, kondensor untuk mengubah gas menjadi cair, *thermocouple* untuk mendeteksi temperatur pada reaktor, pengatur tekanan di dalam tungku pembakar, penangkap produk cair dan plastik penangkap gas (*gas bag*). Cara pengoperasian reaktor pirólisis dapat dilihat pada Lampiran B. Reaktor pirólisis yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Reaktor Pirólisis (A) *Termocouple* (B) Kondensor 40 cm (C) Tungku Pembakar (D) Reaktor Tampak Dalam

Skema rangkaian reaktor pirolisis dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Rangkaian Reaktor Pirolisis

- Peralatan uji *proximate*
Pengujian dilakukan untuk bahan baku pirolisis dan produk arang dan *wax* yang terbentuk dari pirolisis menggunakan oven, desikator, neraca analitik, dan cawan *crucible*. Prosedur pengujian *proximate* dapat dilihat pada Lampiran A.
- Peralatan uji nilai kalor
Pengujian dilakukan untuk bahan baku pirolisis produk arang dan cair menggunakan *bomb calorimeter* yang dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik Departemen Kimia, Universitas Negeri Malang.
- Peralatan uji kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa
Uji kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa dilakukan pada bahan baku kayu. Peralatan yang dibutuhkan yaitu *hotplate*, *furnace*, desikator, neraca analitik, kondensor, statif, *boiling flash* berleher, cawan *crucible* dan cawan porselin. Prosedur pengujian lignoselulosa dapat dilihat pada Lampiran C.

- Peralatan analisis hidrokarbon GC-MS

Pengujian GC-MS produk cair optimum dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Departemen Kimia, Universitas Gadjah Mada.

b. Bahan yang Diperlukan

- Bahan yang diperlukan antara lain:
 - Sampah tidak tercampur yaitu 3 jenis sampah ranting di Rumah Kompos Bratang Surabaya dan sampah HDPE kantong plastik (Agustia, 2013; Zeaiter, 2014; Manggali, 2015)
 - Sampah campuran sampah ranting 25% : HDPE 75%; sampah ranting 50% : HDPE 50%; sampah ranting 75% : HDPE 25% (Bhattacharya *et al.*, 2009; Rachmawati, 2015).
- Massa sampah yang digunakan untuk pirolisis sebesar 500 gram sesuai kapasitas reaktor.
- Sampah kantong plastik (HDPE) dipotong menjadi berukuran 30 x 50 mm (Phan *et al.*, 2008). Sampah ranting dipotong menjadi berukuran 10 cm (Cahyono, 2013). Kadar air diatur <10% (Bhattacharya *et al.*, 2009). Pengurangan kadar air terhadap bahan pirolisis dilakukan dengan cara dijemur di bawah sinar matahari dan dikeringkan menggunakan oven.

4. Penelitian Pendahuluan (Penentuan Waktu Optimum)

Penelitian pendahuluan dilakukan dengan pembakaran bahan baku pirolisis menggunakan *cawan crucible* 100 mL di reaktor pirolisis. Waktu dan temperatur optimum dari beberapa literatur akan dibuat dasar penentuan waktu dan temperatur selama penelitian pendahuluan. Waktu pirolisis ditentukan selama 60 menit (Ellens *et al.*, 2012; Cahyono, 2013; Manggali, 2015). Variasi temperatur yang digunakan adalah 200°C, 300°C, 400°C, 500°C (Sjostrom, 1993; Islam *et al.*, 2013; Manggali, 2015). Temperatur yang menghasilkan *volatile solid* terbanyak digunakan untuk penentuan temperatur optimum pada penelitian utama. Kandungan *volatile solid* menunjukkan potensi produk cair pirolisis karena pada pirolisis kandungan *volatile solid* akan dikonversi menjadi bentuk minyak melalui proses kondensasi (Asadullah *et al.*, 2008)

5. Penelitian Utama

Langkah – langkah kerja yang dilakukan pada penelitian utama dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Skema Penelitian Utama

- a. Pengujian kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa.
Uji kadar lignin, selulosa, dan hemiselulosa dilakukan dengan Metode Chesson (Datta *et al.*, 1981). Prosedur pengujian Metode Chesson ditunjukkan pada Lampiran C.
- b. Uji *proximate* awal pada semua bahan baku pirolisis
Proximate analysis digunakan untuk menguji kadar air, kandungan *volatile solid*, *fixed carbon* dan abu pada sampel. Uji *proximate* dilakukan pada awal dan akhir penelitian. Uji kadar air dilakukan berdasarkan SNI 13-3476-1994, kadar abu berdasarkan SNI 3478:2010, kadar *volatile solid* berdasarkan SNI 13-3999-1995, dan kadar *fixed carbon* berdasarkan SNI 13-3479-1994.
- c. Pirolisis bahan baku di reaktor selama 1 jam dengan temperatur yang didapat dari penelitian pendahuluan
Pirolisis yang dilakukan pada penelitian ini merupakan tipe pirolisis lambat. Bahan baku diletakkan dalam wadah seperti kaleng, lalu dibakar dalam reaktor pirolisis. Sebelum digunakan, kaleng dibakar dahulu di *furnace* dengan suhu 550°C sebagai perlakuan pendahuluan untuk menghilangkan kadar organik di dalamnya. Temperatur optimum pada penelitian pendahuluan akan dijadikan dasar. Variasi penelitian yang digunakan dalam penelitian utama dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi Penelitian Utama

Rasio Ranting : kantong plastik HDPE	Ranting Angsana	Ranting Trembesi	Ranting Waru
100% : 0%	A	T	W
75% : 25%	A/P 75:25	T/P 75:25	W/P 75:25
50% : 50%	A/P 50:50	T/P 50:50	W/P 50:50
25% : 75%	A/P 25:75	T/P 25:75	W/P 25:75
0% : 100%	P	-	-

Tabel 3.2 Detail Massa Bahan Baku Variasi Penelitian Utama

Jenis Pirolisis	No	Jenis Bahan Baku	Massa bahan baku (g)
Pirolisis Normal (Satu Bahan Baku)	1	Ranting A 100%	100
	2	Ranting T 100%	100
	3	Ranting W 100%	100
	4	Plastik HDPE 100%	100
Co-pyrolysis (dua bahan baku)	5	Ranting A 25% : HDPE 75%	33,33 : 66,66
	6	Ranting A 50% : HDPE 50%	50 : 50
	7	Ranting A 75% : HDPE 25%	66,66 : 33,33
	8	Ranting T 25% : HDPE 75%	33,33 : 66,66
	9	Ranting T 50% : HDPE 50%	50 : 50
	10	Ranting T 75% : HDPE 25%	66,66 : 33,33
	11	Ranting W 25% : HDPE 75%	33,33 : 66,66
	12	Ranting W 50% : HDPE 50%	50 : 50
	13	Ranting W 75% : HDPE 25%	66,66 : 33,33

Total massa satu jenis bahan baku kayu adalah 750 gram. Total massa plastik HDPE adalah 550 gram.

d. Uji *proximate* akhir pada semua bahan baku pirolisis (berdasarkan Standar Nasional Indonesia)

Uji *proximate* pada akhir penelitian untuk mengetahui kadar air, kandungan *volatile solid*, *fixed carbon* dan abu dari produk pirolisis berupa arang dan *wax*.

e. Uji nilai kalor dengan *bomb – calorimeter*

Uji nilai kalor dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik Departemen Kimia, Universitas Negeri Malang. Nilai kalor produk pirolisis dapat diuji menggunakan *bomb – calorimeter* berjenis

Ballistic Oxygen Bomb Calorimeter. Produk pirolisis yang diukur nilai kalornya adalah arang dari semua variasi, yaitu:

- Produk arang dari tiga jenis bahan baku ranting
- Produk arang dari bahan plastik HDPE
- Produk arang dari variasi ranting 1 : kantong plastik HDPE
- Produk arang dari variasi ranting 2 : kantong plastik HDPE
- Produk arang dari variasi ranting 3 : kantong plastik HDPE

Pada bab analisis dan pembahasan, nilai kalor produk pirolisis akan dibandingkan dengan nilai kalor batu bara yaitu 17,29-30,27 MJ/Kg (Munoz-Guillena et al., 1992). Perbandingan nilai kalor ini digunakan untuk analisis mengenai potensi variasi jenis ranting dan kantong plastik HDPE menjadi bahan bakar alternatif.

f. Analisis hidrokarbon GC-MS (untuk produk cair/minyak biomassa optimum)

Uji GC-MS produk cair dilakukan di Laboratorium Kimia Organik Departemen Kimia Universitas Gadjah Mada. Pengujian GC-MS diperlukan untuk mengetahui rantai karbon dan kandungan unsur hidrokarbon. Kombinasi GC dan MS memberikan hasil analisis yang lebih baik. Peneliti dapat menganalisis larutan organik, memasukkannya ke dalam instrument MS, memisahkannya menjadi komponen tinggal dan langsung mengidentifikasi larutan tersebut. Selanjutnya, peneliti dapat menghitung analisa kuantitatif dari masing-masing komponen.

Pada analisis GC-MS, sumbu z menyatakan kelimpahan senyawa, sumbu x menyatakan spektrum kromatografi, dan sumbu y menyatakan spektrum spektroskopi massa. Untuk menghitung masing-masing metode dapat divisualisasikan ke dalam grafik dua dimensi. Pada spektra GC, banyaknya senyawa yang terdapat dalam sampel terlihat dari banyaknya puncak (*peak*) dalam spektra GC tersebut. Berdasarkan data waktu retensi yang sudah diketahui dari literatur, bisa diketahui senyawa apa saja yang ada dalam sampel. Selanjutnya adalah dengan memasukkan senyawa tersebut ke dalam instrumen spektroskopi massa. Hal ini dapat dilakukan karena salah satu kegunaan dari kromatografi gas adalah untuk memisahkan senyawa-senyawa dari suatu sampel. Setelah itu, didapat hasil dari spektra spektroskopi massa pada grafik yang berbeda.

Uji GC-MS menggunakan QP2010S Shimadzu dari Jepang, kolom Agilent HP 1, panjang 30 m x 0,25 mm dengan ketebalan film 0,25 μm . Injeksi port dan detektor dioperasikan pada suhu 310°C. Oven GC dipanaskan pada suhu 50C selama 5 menit kemudian sampai suhu 280°C dengan laju pemanasan 5°C/menit. Aplikasi dari Agilent HP-1 adalah mendeteksi senyawa berikut *Amines, hydrocarbons, pesticides, PCBs, phenols, sulfur compounds, flavors* dan *fragrances*.

6. Analisis Data dan Pembahasan

Data yang terkumpul dari hasil penelitian dianalisis menggunakan analisis *mass balance* dan statistika uji anova (*analysis of variance*). Analisis *mass balance* dilakukan pada setiap berat produk pirolisis (padat, cair, gas dan *wax*). Uji ANOVA yang digunakan adalah tipe *one way*. ANOVA tipe *one way* digunakan pada pengamatan satu faktor yang menyebabkan variasi terhadap produk pirolisis. Pengaruh jenis ranting terhadap produk arang, cair, gas pirolisis dan pengaruh variasi komposisi bahan terhadap produk arang, cair, gas pirolisis. Pembahasan hasil penelitian ini dilakukan berdasarkan tujuan awal penelitian dan harus disesuaikan dengan studi literatur yang telah dilakukan sebagai pendukung maupun pembanding hasil yang diperoleh.

7. Kesimpulan

Penarikan kesimpulan dilakukan setelah melakukan analisis data dan pembahasan. Kesimpulan dibuat dari hasil analisis berdasarkan tujuan yang dirumuskan pada awal penelitian. Penarikan kesimpulan harus didasarkan pada fakta yang diperoleh selama penelitian. Pemberian saran dilakukan untuk perbaikan dan pengembangan penelitian mengenai pemanfaatan pirolisis untuk reduksi sampah ke depannya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Karakteristik Fisik Sampah

Ranting pohon angsana, trembesi, dan waru, serta kantong plastik HDPE digunakan sebagai bahan baku pirolisis pada penelitian ini. Biomassa berbahan dasar kayu bersifat higroskopis, yaitu ketika diletakkan di udara bebas, ranting akan mengeluarkan atau menyerap kelembaban sampai pada titik kesetimbangan kelembaban dan temperatur udara bebas. Hal ini dikarenakan kayu cenderung memiliki kadar kelembaban yang tinggi. Tidak seperti kayu, plastik tidak menyerap kelembaban. Kadar air plastik sangat rendah dibandingkan dengan kadar air kayu (Abnisa dan Daud, 2014).

Dalam penelitian ini, karakteristik fisik sampah meliputi analisis proksimat yaitu kadar air, *volatile solid*, *fixed carbon* dan abu. Kadar air merupakan faktor utama untuk dipertimbangkan ketika menggunakan biomassa terutama sebagai energi. Biomassa terdiri atas senyawa makromolekul alami seperti selulosa, lignin, dan protein. Berbagai jenis biomassa dengan kadar air yang tinggi disebabkan biomassa berasal dari organisme hidup. Kadar air sangat berbeda dan bergantung pada jenis biomassa itu sendiri. Untuk kebanyakan jenis biomassa, jika kadar airnya melebihi dua pertiga maka kalor tersedianya adalah negatif (-). Oleh karena itu, meskipun nilai kalor biomassa tinggi, jika ia memiliki kadar air yang tinggi, maka tidak sesuai untuk pembakaran (Japan Institute of Energy, 2008)

Kandungan *volatile solid* dan abu merupakan faktor utama yang berpengaruh terhadap pembentukan produk cair pirolisis (Abnisa dan Daud, 2014). Potensi produk cair dapat diketahui dari kandungan *volatile solid* karena pada pirolisis kandungan *volatile solid* akan dikonversi menjadi bentuk minyak melalui proses kondensasi (Asadullah *et al.*, 2008). Sedangkan penentuan kandungan abu untuk menentukan potensi arang yang terbentuk dari proses pirolisis. Data analisis fisik bahan pirolisis berupa analisis *proximate* meliputi kadar air, kandungan *volatile solid*, abu, dan *fixed carbon* disajikan pada Tabel 4.1. Prosedur analisis kadar air, kandungan *volatile solid*, *fixed carbon* dan kadar abu terdapat pada Lampiran A.

Tabel 4.1 Analisis Fisik Bahan Pirolisis

No	Jenis sampel	Kadar air (%)	Volatile solid (%)	Kadar abu (%)	Fixed Carbon (%)
1	Ranting Angsana Basah	19,70	76,12	2,04	1,54
2	Ranting Angsana Kering	12,52	84,86	1,61	1,01
3	Ranting Trembesi Basah	20,90	74,87	2,62	1,60
4	Ranting Trembesi Kering	12,27	85,08	1,41	1,24
5	Ranting Waru Basah	18,33	76,25	3,87	1,55
6	Ranting Waru Kering	11,71	85,34	2,08	1,06
7	Kantong Plastik HDPE	0,13	89,86	2,11	7,90

Ranting basah merupakan ranting yang diperoleh secara langsung dari Rumah Kompos Bratang Surabaya. Ranting kering adalah ranting yang dikeringkan dalam oven selama 24 jam. Ranting basah yaitu angšana, trembesi, dan waru memiliki nilai kadar air 19,70%; 20,90%; 18,33% secara berurutan. Kadar air ranting basah memiliki nilai yang tinggi, di atas 15%. Hal ini sesuai dengan teori bahwa ranting basah biasanya mengandung kadar air lebih dari 10%. Kadar air tinggi ini yang menjadi faktor penghambat dalam proses pirolisis (Asadullah *et al.*, 2009).

Ranting trembesi memiliki kadar air terbesar berarti ranting trembesi lebih bersifat higroskopis daripada angšana dan waru. Semakin besar kandungan air yang terdapat dalam bahan bakar padat, maka nilai kalornya semakin kecil. Kadar air dapat meningkatkan kehilangan panas karena penguapan dan pemanasan berlebih dari uap. Berdasarkan Hidayati dan Siagian (2011), kayu trembesi memiliki kadar air awal (saat kayu dibeli) sebesar 24,24% dan kadar air kering udaranya sebesar 16,01%. Besarnya kadar kering udara kayu tersebut masuk dalam kisaran besarnya nilai kadar air kering udara kayu untuk iklim di Indonesia yaitu sebesar 12-20%. Literatur tersebut menunjukkan kecocokan dengan penelitian ini.

Nilai kadar air yang tinggi dalam biomassa juga menurunkan kualitas produk dengan menghasilkan kadar air yang tinggi dalam *bio-oil*. Untuk menghasilkan produk pirolisis optimum,

bahan baku dikeringkan di dalam oven sampai nilai <10% (Bhattacharya *et al.*, 2009). Dari Tabel 4.1, terdapat penurunan kadar air setelah ranting dikeringkan dalam oven.

Kandungan *volatile solid* merupakan indeks dari kandungan bahan bakar bentuk gas di dalam suatu bahan bakar. Bahan *volatile solid* berbanding lurus dengan peningkatan panjang nyala api, membantu dalam memudahkan penyalaan bahan bakar. *Volatile matter* juga adalah kandungan bahan bakar yang terbebaskan pada temperatur tinggi tanpa keberadaan oksigen (misalnya C_xH_y , H_2 , SO_x , dan sebagainya). Kandungan *volatile* dari biomassa ketiga ranting kering berada pada kisaran 83,39% - 85,08%. Nilai *volatile solid* dari biomassa ranting basah lebih kecil dikarenakan kadar air sangat tinggi. Kadar air berpengaruh pada hasil penentuan *volatile matter* sehingga sampel yang dikeringkan dengan oven akan memberikan hasil yang berbeda dengan sampel yang dikeringkan di udara (Basu, 2010). Plastik HDPE yang memiliki kadar air terendah yaitu 0,13% memiliki nilai *volatile solid* sangat tinggi yaitu 89,86%.

Kandungan *volatile solid* yang tinggi berpotensi untuk menghasilkan produksi minyak yang tinggi melalui proses pirolisis. Untuk memaksimalkan produksi *volatile solid*, penting untuk mengatur parameter yang dikontrol dalam pirolisis. Berdasarkan Guldogan *et al.* (2000), temperatur dan laju pemanasan merupakan parameter pirolisis yang mempengaruhi kandungan *volatile solid* secara signifikan. Azeez *et al.* (2011) meneliti tentang pengaruh temperatur terhadap produk *volatile* pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) dari biomassa Afrika dan Eropa. Penelitian berjalan pada temperatur 300 – 700°C dengan interval 50°C. Hasil menunjukkan bahwa produk yang menghasilkan kandungan *volatile* terbanyak diperoleh pada suhu 450°C dan 500°C

Abu merupakan bagian dari sampel yang tidak akan terbakar. Parameter ini berguna untuk penentuan efisiensi pembakaran. Semakin tinggi kadar abu, maka akan mempengaruhi tingkat pengotoran (*fouling*), keausan, dan korosi peralatan yang dilalui. Dalam pembakaran batu bara, abu merupakan residu anorganik hasil pembakaran batubara, terdiri dari oksida-oksida logam seperti Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , dan sebagainya. Selain itu, abu mengandung logam oksida-oksida non logam seperti SiO_2 , P_2O_5 , dan lain-lain (Basu, 2010).

Kadar abu dari ranting angšana, trembesi, dan waru basah secara berurutan yaitu 2,04%; 2,62%; 3,87%. Setelah dikeringkan dalam oven, ketiga ranting tersebut memiliki kadar air yang lebih kecil sehingga menyebabkan kadar abu juga menurun. Ranting angšana kering memiliki kadar abu 1,61%. Ranting trembesi kering bernilai 1,41% untuk kadar abu, dan kadar abu ranting waru kering yaitu 3,84%.

Fixed carbon adalah karbon dalam keadaan bebas yang tidak terikat dengan elemen lain. *Fixed carbon* juga dapat diartikan sebagai kadar karbon tetap yang terdapat dalam batubara setelah *volatile matters* dipisahkan dari batubara. Kandungan *fixed carbon* dapat memberikan gambaran kasar atas nilai kalor batubara. Kadar *fixed carbon* berbeda dengan kadar karbon (C) dalam hasil analisis ultimat karena dalam analisis ultimat, sebagian karbon berikatan membentuk senyawa hidrokarbon *volatile* (Basu, 2010).

Analisa proksimat ini berguna untuk menentukan rank batubara dan rasio pembakaran (*fuel ratio*) (Basu, 2010). Ketiga jenis ranting kering memiliki nilai *fixed carbon* diantara 1,01%-1,60%. Nilai ini lebih kecil dengan literatur Asadullah (2009), Encinar et al. (2009), Abnisa dan Daud (2014). Dari Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa plastik HDPE memiliki kadar air sebesar 0,13%, *volatile solid* 89,86%, abu 2,11%, dan *fixed carbon* 7,90%. Nilai ini sesuai dengan Heikkien *et al.* (2004) yang menunjukkan nilai analisis *proximate* yaitu kadar air 0,61%, *volatile solid* 86,83%, abu 0,00%, dan *fixed carbon* 13,17%.

Bahan baku ranting didapat dari Rumah Kompos Bratang Surabaya, dapat dilihat pada Gambar 4.1. Jumlah sampah yang masuk ke dalam Rumah Kompos Bratang Surabaya pada Januari 2016 didominasi oleh sampah perantingan sebesar 426 m³ (Ardiansyah, 2016). Jumlah yang sangat besar dari sampah perantingan ini merupakan potensi besar sebagai bahan baku pirolisis untuk menghasilkan bahan bakar alternatif. Ranting dipotong untuk bahan baku dapat dilihat pada Lampiran E, Gambar A. Ukuran ranting selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.2.



Gambar 4.1 Material Bahan Baku Ranting dari Rumah Kompos Bratang, Surabaya

Tabel 4.2 Ukuran Ranting

Jenis Ranting	No	Diameter (cm)	Panjang (cm)
Angsana	1	2,8	110
	2	2,5	90
	3	2	124
	4	1,8	70
	5	2,5	110
	6	1	45
	7	1	56
	8	1,5	57
	9	1,2	43
	10	1,8	66
	11	1,5	54
	12	0,8	34
	13	2	76
	14	2,5	87
	15	0,9	25

Jenis Ranting	No	Diameter (cm)	Panjang (cm)
Waru	1	1,8	86
	2	1	55
	3	1,5	51
	4	2	80
	5	2	107
	6	1,5	52
	7	3	127
	8	4	113
	9	2	89
	10	2	88
	11	2,5	86
	12	2,5	76
	13	2,5	61
	14	2,4	60
	15	2,6	78
Trembesi	1	1,9	94
	2	2,8	107
	3	1,5	108
	4	1,5	129
	5	1,5	92
	6	2	124
	7	2,5	140
	8	1,8	110
	9	2	93
	10	1,5	76
	11	1	62
	12	2,8	103
	13	1,8	59

Jenis Ranting	No	Diameter (cm)	Panjang (cm)
	14	1,8	121
	15	2	128

Ukuran diameter ranting bervariasi, berada pada rentang 0,8 – 2,8 cm dan panjang 43 – 140 cm. Ranting angkana memiliki rata-rata diameter 1,72 cm dan panjang 69,8 cm. Ranting trembesi memiliki rata-rata diameter 1,9 cm dan panjang 103 cm. Sedangkan, rata – rata diameter ranting waru adalah 2,22 cm. Rata – rata panjang ranting waru yaitu 80,6 cm. Untuk menyeragamkan ukuran bahan baku, ranting dipotong sepanjang 10 cm sebagai perlakuan untuk *running* pirolisis (Cahyono, 2013),

4.2 Analisis Lignoselulosa

Biomassa tersusun dari selulosa, hemiselulosa dan lignin dengan persentase komponen yang beragam (Caglar dan Aydinli, 2009). Untuk biomassa berbahan dasar kayu, hasil dari analisis proksimat sangat bergantung terhadap kadar lignoselulosa. Senyawa lignoselulosa terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin sebagai komponen utama. Jenis-jenis biomassa berbahan dasar kayu yang berbeda memiliki persentase komponen lignoselulosa yang berbeda. Di antaranya, selulosa dan hemiselulosa berperan penting dalam *volatile matter* (Abnisa dan Daud, 2014).

Berdasarkan Qu *et al.* (2011), selulosa bersifat lebih *volatile* daripada hemiselulosa. Lignin, yang terdiri dari cincin aromatik dengan berbagai cabang, terdekomposisi pada rentang temperatur yang rendah sampai sangat tinggi dengan *mass loss rate* yang sangat rendah. Maka dari itu, biomassa berbahan dasar kayu yang memiliki kadar lignin tinggi akan menghasilkan produksi *char* tinggi. Pengaruh dari senyawa lignoselulosa terhadap produksi *volatile matter* telah dipelajari oleh banyak peneliti (Qu *et al.*, 2011, Wu *et al.*, 2013, Yu *et al.*, 2014)

Lignin terdekomposisi lebih lambat dan lebih luas dibandingkan selulosa dan hemiselulosa yaitu pada range temperatur 200-500 °C (Brebun *et al.*, 2010). Temperatur yang menghasilkan *volatile solid* terkonversi maksimum akan digunakan sebagai dasar untuk penentuan waktu optimum. Hal tersebut

dikarenakan pada pirolisis kandungan *volatile solid* akan dikonversi menjadi bentuk minyak melalui proses kondensasi (Asadullah *et al.*, 2008). Analisis lignoselulosa dilakukan pada bahan baku pirolisis untuk mengetahui hubungan kadar selulosa, hemiselulosa, dan lignin terhadap karakteristik produk pirolisis. Hasil analisis nilai lignoselulosa pada masing-masing ranting dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dokumentasi analisis lignoselulosa dapat dilihat pada Lampiran E, Gambar B.

Tabel 4.3 Kadar Lignoselulosa Bahan Bahan Baku Ranting

Bahan	Kadar Lignoselulosa (%)			Sumber
	Selulosa	Hemi-selulosa	Lignin	
Angsana	28,18	14,53	12,13	Analisis Laboratorium
Trembesi	26,81	20,14	10,82	Analisis Laboratorium
Waru	32,51	11,60	10,74	Analisis Laboratorium
Angsana	39,45	19,08	3,44	BPKI, 2017
Trembesi	36,88	17,60	2,86	BPKI, 2017
Waru	42,70	21,80	3,18	BPKI, 2017

Ranting angsana memiliki nilai selulosa, hemiselulosa, dan lignin yaitu 28,18%; 14,53%; 12,13%. Sedangkan trembesi memiliki nilai 26,81%; 20,14%; 10,82%. Ranting waru memiliki nilai 32,51%; 11,60%; 10,74%. Kandungan lignoselulosa pada ketiga jenis ranting ini tidak berbeda secara signifikan. Namun, dapat dilihat bahwa ranting angsana memiliki kandungan lignin tertinggi. Berdasarkan Basu (2010), kandungan lignin lebih menghasilkan produk arang. Kandungan selulosa paling tinggi dimiliki oleh ranting waru. Hal ini sesuai dengan ranting waru yang memiliki nilai *volatile solid* tinggi (Tabel 4.1). Biomassa berbahan dasar kayu yang memiliki kadar selulosa tinggi berpotensi menghasilkan *volatile matter* tinggi, yang memicu kenaikan pada produksi minyak (Qu *et al.*, 2011).

4.3 Penentuan Temperatur Optimum

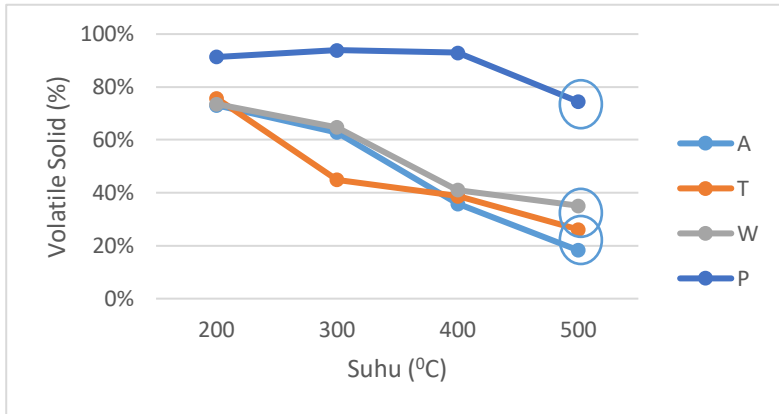
Penelitian pendahuluan dilakukan dengan memasukkan sampel bahan baku pirolisis ke dalam *cawan crucible* 100 mL yang dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Waktu dan temperatur optimum dari literatur dijadikan pedoman selama penelitian pendahuluan. Waktu reaksi pirolisis 60 menit (Abnisa *et al.*, 2011) dan temperatur 200°C, 300°C, 400°C, 500°C (Abnisa *et al.*, 2013; Islam *et al.*, 2013) digunakan sebagai perlakuan ketika membakar sampel untuk menentukan temperatur optimum. Variasi temperatur dilakukan pada penelitian pendahuluan karena sampah biomassa memiliki rentang temperatur pembakaran yang panjang. Nilai *volatile solid* pada penelitian pendahuluan dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa nilai *volatile solid* pada semua bahan baku pirolisis mengalami penurunan dari temperatur 200°C sampai 500°C. Produk pirolisis dengan *volatile solid* paling sedikit akan digunakan sebagai dasar untuk penentuan temperatur optimum. Hal tersebut dikarenakan pada pirolisis kandungan *volatile solid* dari bahan baku sudah terkonsversi menjadi bentuk minyak melalui proses kondensasi (Asadullah *et al.*, 2008), kemudian yang tertinggal merupakan *fixed carbon*.

Kandungan *volatile solid* ranting angšana, trembesi, waru, dan plastik HDPE pada suhu 500°C yaitu 18,29%; 26,17%; 35,13%; 74,49%. Temperatur 500°C dipilih sebagai perlakuan pada penelitian utama karena sebagian besar dari *volatile solid* telah berubah menjadi produk minyak atau gas. Hal tersebut sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa produk pirolisis optimum diperoleh pada suhu 500°C (Asadullah *et al.*, 2008).

Tabel 4.4 Nilai *Volatile solid* pada Penelitian Pendahuluan

Jenis Bahan	Nilai <i>Volatile solid</i> (%)			
	Suhu 200°C	Suhu 300°C	Suhu 400°C	Suhu 500°C
Ranting Angšana	73,11	62,89	35,82	18,29
Ranting Trembesi	75,81	44,92	38,77	26,17
Ranting Waru	73,56	64,75	41,07	35,13
Plastik HDPE	91,40	93,95	92,94	74,49

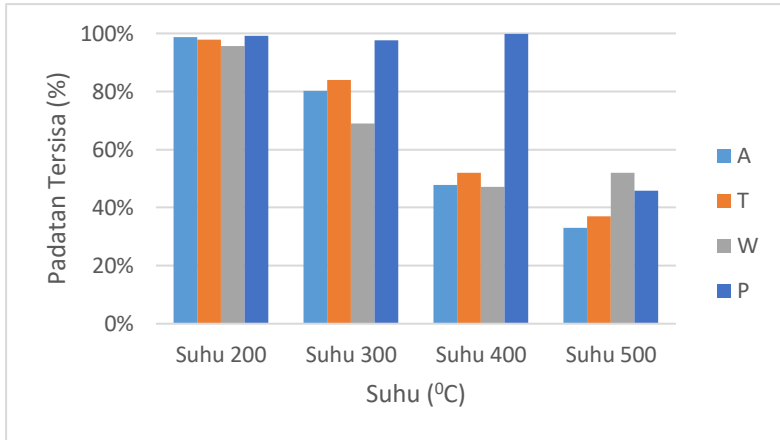


Gambar 4.2 Temperatur Optimum Pirolisis Bahan Ranting dan Plastik HDPE pada Variasi Temperatur

Persentase padatan tersisa juga menjadi faktor dalam penentuan temperatur optimum pirolisis. Berikut persentase padatan tersisa pada penelitian pendahuluan disajikan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.3. Persentase padatan tersisa minimum berada pada pirolisis suhu 500°C sehingga pembakaran lebih optimum.

Tabel 4.5 Persentase Padatan Tersisa pada Penelitian Pendahuluan

Jenis Bahan	Padatan Tersisa (%)			
	Suhu 200°C	Suhu 300°C	Suhu 400°C	Suhu 500°C
A	98,73%	80,28%	47,71%	33,10%
T	97,86%	83,99%	51,93%	37,08%
W	95,69%	69,00%	47,19%	51,93%
P	99,28%	97,63%	99,88%	45,86%



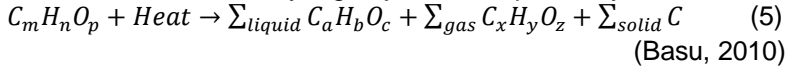
Gambar 4.3 Persentase Padatan Tersisa pada Penelitian Pendahuluan

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa persentase padatan tersisa/arang pada suhu 200°C sangat tinggi karena sulitnya proses pemecahan molekul dengan berat molekul tinggi. Ketika temperatur naik dari suhu 200°C – 500°C, nilai padatan tersisa/arang dari produk pirolisis ranting angkana, trembesi, dan plastik HDPE semakin menurun. Hal ini dikarenakan pada suhu rendah, pembentukan molekul organik sekunder dari biomassa dengan berat molekul tinggi sulit terjadi (Asadullah *et al.*, 2003). Literatur menunjukkan bahwa reaksi pemecahan dan pembentukan biasa terjadi pada suhu di atas 400°C (Tomishige *et al.*, 2003). Pemecahan sekunder dengan mudah terjadi pada suhu di atas 500°C.

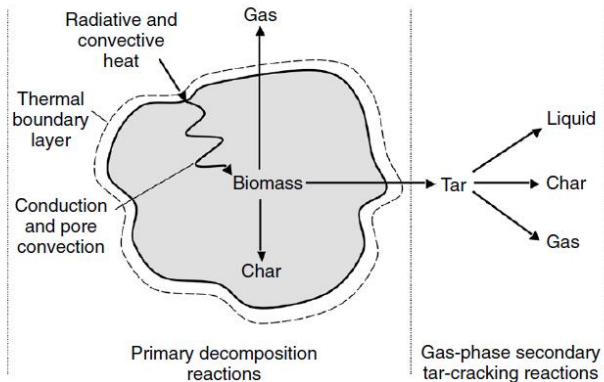
4.4 Komposisi Produk Pirolisis

Secara luas, biomassa telah menjadi sumber energi potensial dan satu-satunya sumber energi terbarukan yang dapat dikonversi menjadi beberapa jenis bahan bakar, termasuk minyak, arang, dan gas. Penggunaan biomassa sebagai bahan baku pembakaran menjanjikan fleksibilitas dalam produksi dan pemasaran. Pirolisis secara umum dipilih menjadi proses yang optimal untuk mencapai tujuan ini (Abnisa dan Daud, 2014).

Pirolisis adalah dekomposisi termokimia biomassa menjadi beberapa produk lain yang berguna, tanpa adanya zat pengoksidasi sehingga tidak memungkinkan gasifikasi terjadi. Selama pirolisis, molekul hidrokarbon kompleks dari biomassa terurai menjadi molekul gas, cair, dan arang yang relatif lebih kecil dan sederhana. Reaksi yang terjadi dalam pirolisis yaitu:



Tahapan yang terjadi selama pirolisis adalah didahului dengan penguapan kadar air bahan pirolisis kemudian secara berkelanjutan terjadi tahapan pirolisis primer yaitu pelepasan *volatile solid* primer. Secara keseluruhan tahapan pirolisis primer lengkap terjadi pada suhu rendah (<500°C). *Volatile solid* primer terbentuk dari pemotongan rantai kimia biomassa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) secara termal. Produk awal biomassa berupa gas terkondensasi dan arang (*solid char*). Gas terkondensasi dapat terpecah lebih jauh menjadi gas yang tidak dapat dikondensasi (CO, CO₂, H₂, dan CH₄), minyak, dan arang (Gambar 4.4). Dekomposisi ini terjadi sebagian melalui reaksi homogen fase gas dan sebagian melalui reaksi termal heterogen fase-padat-gas. Dalam reaksi fase gas, gas terkondensasi dipecah menjadi molekul kecil dari gas permanen tak terkondensasi seperti CO dan CO₂ (Basu, 2010; Neves *et al.*, 2011).



Gambar 4.4 Proses Pirolisis di dalam Partikel Biomassa (Basu, 2010)

Arang merupakan produk utama dari proses *slow pyrolysis* yang terjadi pada temperatur rendah, laju pemanasan rendah, dan waktu detensi lebih lama. Berkebalikan dari hal tersebut, minyak adalah produk utama *fast pyrolysis* yang diproduksi dengan laju pemanasan tinggi dan waktu detensi pendek. *Fast pyrolysis* menghasilkan produk minyak dengan kuantitas dan kualitas lebih tinggi daripada proses *slow pyrolysis* (Roy, 2017).

Rumus memperoleh komposisi produk pirolisis yaitu:

$$\%Produk = \frac{\text{Massa produk yang dapat ditimbang}}{\text{Massa bahan baku}} \times 100\% \quad (4)$$

Sebagai contoh:

Massa bahan baku angšana = 100,1 gram

Produk arang angšana = 38,5 gram

Produk minyak angšana = 34,9 gram

Produk gas angšana = 13,8 gram

$$\%Arang Angšana = \frac{38,5}{100,1} \times 100\% = 38,46\%$$

$$\%Minyak Angšana = \frac{34,9}{100,1} \times 100\% = 33,89\%$$

$$\%Gas Angšana = \frac{13,8}{100,1} \times 100\% = 13,79\%$$

a. Komposisi Produk Pirolisis Normal

Tabel 4.6 menunjukkan data komposisi produk dari pirolisis bahan baku ranting dan plastik HDPE.

Tabel 4.6 Komposisi Produk Pirolisis Normal

Bahan	Persentase Produk (%)			Energy Recovery (%)	Mass Loss (%)
	Arang atau Wax	Cair	Gas		
Angšana	38,46	34,87	13,79	87,12	12,88
Trembesi	33,47	33,89	23,78	91,14	8,86
Waru	34,37	38,08	18,78	91,22	8,78
Plastik HDPE	81,00	7,23	7,50	95,73	4,27

Hasil perhitungan komposisi produk pirolisis ranting angšana, trembesi, dan waru tidak menunjukkan perbedaan yang terlalu signifikan. Persentase hasil minyak optimum dihasilkan oleh pirolisis ranting waru yaitu 38,08% kemudian dilanjutkan oleh angšana sebesar 34,87% dan trembesi sebesar 33,89%. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa kandungan lignoselulosa bahan baku berkaitan dengan produk pirolisis (Asadullah *et al.*, 2008; Caglar dan Aydinli, 2009; Qu *et al.*, 2011; Abnisa dan Daud, 2014). Tidak jauhnya nilai lignoselulosa bahan baku membuat komposisi produk pirolisis tidak berbeda secara signifikan.

Kandungan lignin merupakan salah satu penghambat biokonversi lignoselulosa menjadi etanol. Lignin melindungi selulosa, sehingga selulosa sulit untuk dihidrolisis. Lignin membuat batang tanaman lebih keras dan dapat tegak berdiri. Kandungan lignin yang paling sedikit pada ranting waru (10,74%) membuat proses dekomposisi selulosa lebih mudah, sehingga menghasilkan produk minyak yang optimum (Abnisa dan Daud, 2014).

Secara umum, lignin memiliki kandungan oksigen lebih rendah dan karbon lebih tinggi dibandingkan dengan selulosa atau hemiselulosa. Pirolisis lignin menghasilkan lebih banyak senyawa aromatik dan arang daripada yang diproduksi oleh selulosa (Basu, 2010). Hal ini sesuai dengan penelitian ini dimana ranting angšana yang memiliki kandungan lignin paling banyak (12,13%) menghasilkan persentase arang terbesar (38,46%).

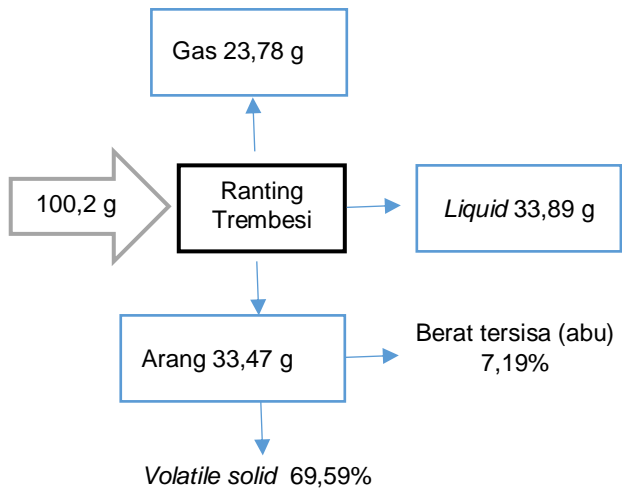
Ranting waru memiliki kandungan minyak tertinggi, sejalan dengan kandungan selulosa paling tinggi yaitu 32,51% dan hemiselulosa 11,60% (Tabel 4.5), serta kandungan *volatile solid* paling tinggi yaitu 85,34% (Tabel 4.1). Hal ini sesuai dengan literatur bahwa selulosa dan hemiselulosa berperan penting dalam *volatile matter* yang menghasilkan minyak setelah proses kondensasi (Abnisa dan Daud, 2014). Persentase minyak angšana menempati urutan kedua dengan kandungan total selulosa dan hemiselulosa 42,71%. Meskipun total persentase selulosa dan hemiselulosa ranting trembesi paling tinggi (46,91%) di antara yang lain, namun persentase minyaknya paling sedikit. Hal ini dikarenakan selulosa bersifat lebih *volatile* daripada hemiselulosa (Qu *et al.*, 2011). Kandungan selulosa yang lebih banyak pada pirolisis ranting waru dan angšana menghasilkan produk minyak lebih banyak daripada trembesi. Sementara kandungan *volatile*

solid trembesi sebesar 85,08% sedikit lebih tinggi daripada angkana yaitu 84,86%, disebabkan oleh total persentase selulosa dan hemiselulosa ranting trembesi yang lebih tinggi.

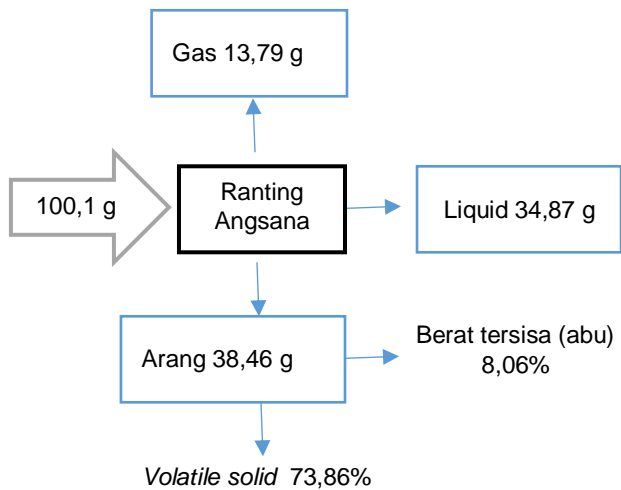
Pirolisis ranting trembesi menghasilkan persentase gas yang paling tinggi sebesar 23,11%. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa hemiselulosa lebih menghasilkan banyak gas dan sedikit *tar* daripada selulosa (Milne, 2002). Kandungan hemiselulosa ranting trembesi paling tinggi di antara bahan baku pirolisis lain, yaitu sebesar 20,11%.

Komposisi produk pada pirolisis bahan baku plastik HDPE menghasilkan produk *wax* terbanyak yaitu 81%. Produk pirolisis lain yaitu minyak sebesar 7,23% dan produk gas sebesar 7,50% dengan *recovery* massa sebesar 95,73%. Hal tersebut sesuai dengan literatur Zeaiter (2004) bahwa pirolisis plastik HDPE mencapai hasil optimum yaitu *liquid wax* 78,7% pada suhu 450°C - 470°C. Nilai *wax* merupakan potensi dari bahan baku untuk menghasilkan gas yang terkondensasi. Gas terkondensasi dapat terbentuk apabila gas melalui kondensor dan dapat berubah menjadi fase cair. Pada fase cair berwarna coklat kekuningan, memiliki nilai viskositas rendah, dan mengandung uap air (Cunliffe dan Williams, 1998). Gambar 4.7 menyajikan data komposisi produk plastik HDPE pada hasil pirolisis yang optimum.

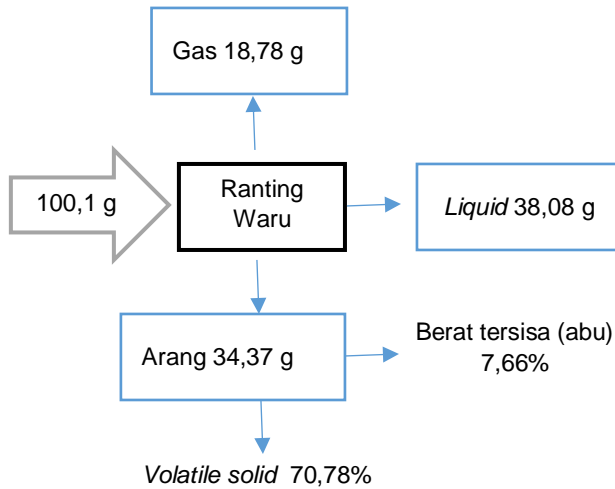
Potensi *energy recovery* dari keempat bahan tidak mencapai 100%. Pirolisis ranting angkana memiliki *energy recovery* sebesar 87,12%; ranting trembesi sebesar 91,14%; dan ranting waru sebesar 91,22%. Adanya *mass loss* yang menyebabkan ketidak lengkapan *recovery* produk bersumber dari produk minyak yang tertinggal di dalam kondensor pertama sehingga tidak bisa ditimbang massanya. Gambar 4.4 – 4.6 menunjukkan bagan kesetimbangan pirolisis normal bahan baku ranting pada suhu 500°C.



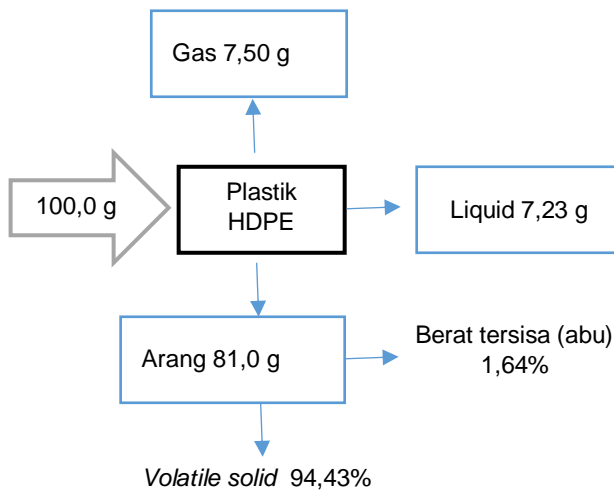
Gambar 4.5 Komposisi Produk Pirolisis Ranting Trembesi (500°C)



Gambar 4.6 Komposisi Produk Pirolisis Ranting Angsana (500°C)



Gambar 4.7 Komposisi Produk Pirolisis Ranting Waru (500°C)



Gambar 4.8 Komposisi Produk Pirolisis Plastik HDPE (500°C)

Pirolisis lambat menurunkan hasil minyak, tetapi banyak menghasilkan uap dalam bentuk gas dan arang (Van de Velden *et al.*, 2010). Hasil dari produk pirolisis dapat dioptimalkan dengan menyesuaikan parameter kondisi operasi pirolisis. Produk cair dari proses pirolisis biasa disebut dengan minyak pirolisis atau bio-oil dan berpotensi sebagai bahan bakar untuk berbagai keperluan. Dalam aspek bahan bakar, Bridgewater (2006) menyatakan bahwa tanpa proses *upgrade*, minyak pirolisis dapat secara langsung digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk *boiler*, *furnace*, mesin diesel dan turbin untuk menghasilkan tenaga listrik. Di samping itu, keuntungan terbesar dari minyak pirolisis dibandingkan dengan bahan bakar fosil adalah penggunaan minyak ini mendapat reaksi positif dan lebih ramah lingkungan. Minyak dari proses pirolisis berkontribusi paling sedikit dalam emisi gas rumah kaca (Abnisa dan Daud, 2014).

b. Komposisi Produk *Co-pyrolysis*

Meskipun bersifat lebih ramah lingkungan, kualitas minyak pirolisis masih di bawah dari bahan bakar fosil, terutama dalam aspek efisiensi pembakaran. Tingginya senyawa oksigen dalam minyak pirolisis menjadi akar dari permasalahan ini. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kadar oksigen dari minyak pirolisis yaitu sekitar 35-60%, mayoritas senyawa dalam bentuk air (Bridgewater, 2006; Guillan *et al.*, 2014; Parihar *et al.*, 2011). Maka dari itu, ide dari teknik *co-pyrolysis* memberikan suatu teknik pilihan untuk memproduksi minyak sintetis ideal. *Co-pyrolysis* merupakan proses yang melibatkan dua atau lebih material sebagai bahan baku pirolisis. Banyak studi telah dilakukan dan membuktikan bahwa *co-pyrolysis* dari biomassa dan plastik dapat meningkatkan kuantitas dan kualitas produk minyak tanpa peningkatan apapun dalam sistem proses pirolisis (Abnisa dan Daud, 2014).

Co-pyrolysis pada penelitian ini menggunakan campuran ranting pohon dan kantong plastik HDPE. Plastik merupakan material sintetis dan tidak terbarukan yang terbuat dari minyak bumi. Karena berasal dari minyak bumi, plastik memiliki kandungan hidrogen dan karbon sehingga dapat dipirolisis menjadi bahan bakar hidrokarbon. Pada pirolisis plastik, struktur makromolekul dari polimer dipecah menjadi molekul - molekul lebih

kecil atau oligomer dan terkadang menjadi satuan monomerik. Nilai kalor dari produk pirolisis plastik memiliki nilai kompetitif, yaitu 40 MJ/Kg. Maka dari itu, adanya plastik dalam pirolisis biomassa bisa menjadi kontribusi positif dalam proses pirolisis (Buekens dan Schoeters, 1998; Abnisa dan Daud, 2014).

Tabel 4.7 menunjukkan data komposisi produk *co-pyrolysis*. Menurut literatur, *flash co-pyrolysis* dengan plastik sebagai salah satu bahan bakunya dapat menaikkan kuantitas dan kualitas produk minyak (Abnisa *et al.*, 2014; Brebu *et al.*, 2010; Onal *et al.*, 2012). Dalam penelitian ini, proporsi produk *wax* lebih banyak dihasilkan, dimana *wax* merupakan potensi bahan untuk menghasilkan gas yang terkondensasi (Cunliffe dan Williams, 1998). Titik leleh dari UHMWPE (*Ultra-High Molecular Weight Polyethylene*) dimulai pada temperatur 141°C dan hingga temperatur 485°C UHMWPE tertinggal di dalam reaktor pirolisis dalam bentuk *wax* (Caglar dan Aydinli, 2009).

Tabel 4.7 Komposisi Produk *Co-pyrolysis*

Bahan	Persentase Produk (%)			Energy Recovery (%)	Mass Loss (%)
	Arang atau Wax	Cair	Gas		
A/P 25:75	69,93	12,18	2,38	84,48	15,52
A/P 50:50	55,89	19,14	4,69	79,72	20,28
A/P 75:25	45,54	23,06	4,64	73,25	26,75
T/P 25:75	64,06	16,06	3,67	83,78	16,22
T/P 50:50	61,29	19,43	2,65	83,37	16,63
T/P 75:25	58,93	21,32	6,15	86,40	13,60
W/P 25:75	70,67	9,51	1,60	81,78	18,22
W/P 50:50	58,92	15,54	0,35	74,81	25,19
W/P 75:25	45,28	19,95	13,79	79,02	20,98

Nilai *energy recovery* massa pada Tabel 4.7 menunjukkan hasil <90%. Hal ini terjadi karena adanya kehilangan massa yang berasal dari gas tidak terkondensasi atau dari ketidaklengkapan *recovery* produk cair selama pengumpulan. Faktor lain juga berpengaruh seperti adanya kehilangan massa di reaktor, ditemukan fase minyak di dinding reaktor dan pipa saluran menuju

kondensor. Penyumbatan ini menyebabkan proses kondensasi yang menjadi langkah penting dalam produksi minyak terhambat (Abnisa dan Daud, 2014). Hal tersebut sesuai dengan literatur yang menyebutkan kehilangan massa pada proses pirolisis berada pada rentang 19-26%, dimana sebagian besar massa yang hilang tertinggal dalam pipa pirolisis (Mullen *et al.*, 2010). Proses pirolisis lambat memiliki waktu operasi yang lama sehingga produk gas memiliki kesempatan untuk bereaksi dengan produk lain membentuk arang (Bahng *et al.*, 2009).

Berkebalikan dengan pirolisis normal, *co-pyrolysis* memiliki parameter khusus yang disebut rasio bahan baku. Dari tiga parameter (suhu, rasio bahan baku, dan waktu reaksi), rasio bahan baku merupakan parameter yang paling mempengaruhi produksi minyak (Syarypov *et al.*, 2002; Abnisa *et al.*, 2013). Hasil optimum disini memiliki arti persentase produk terbesar yang dihasilkan oleh proses pirolisis.

Hasil optimum produk arang dihasilkan oleh *co-pyrolysis* W/P 25:75 dengan nilai 70,67%. Persentase arang *co-pyrolysis* waru ini tidak jauh berbeda dengan arang dari pirolisis A/P 25:75 sebesar 69,93%. Kecenderungan ini sama dengan hasil komposisi produk pirolisis normal dimana produk padat optimum dihasilkan oleh pirolisis plastik berupa *wax*. Semakin banyak penambahan plastik dalam *co-pyrolysis* Persentase arang yang lebih banyak pada *co-pyrolysis* waru menunjukkan bahwa reaksi sinergis antara waru dan plastik lebih unggul dalam menghasilkan produk arang. biomassa maka akan menambah kuantitas produk arang. Persentase arang yang tinggi dari A/P 25:75 menunjukkan bahwa kandungan lignin yang lebih banyak dikandung oleh ranting angkana masih berpengaruh tinggi terhadap produksi arang.

Di sisi lain, hasil optimum produk minyak dihasilkan oleh *co-pyrolysis* A/P 75:25. Hasil ini tidak sama dengan pirolisis normal (Tabel 4.6) dimana minyak optimum berasal dari pirolisis ranting waru. Sedangkan, hasil optimum produk *co-pyrolysis* gas juga menunjukkan ketidak samaan dengan pirolisis normal yaitu berasal dari bahan baku ranting trembesi. Gas optimum dihasilkan oleh *co-pyrolysis* W/P 75:25. Faktor penyebab ketidak sesuaian ini yaitu (1) *mass loss* yang lebih dari 10% menyebabkan adanya minyak yang tidak tertimbang sehingga energy recovery tidak lengkap (2) adanya *mass loss* yang berasal dari keluarnya gas dari

penampungan gas bag pada saat *running* alat pirolisis. Namun secara garis besar, penambahan persentase biomassa dalam *co-pyrolysis* dengan plastik menambah kuantitas produk minyak dan gas.

Proses pembakaran pada *slow pyrolysis* dan *flash pyrolysis* sangat berbeda. Pirolisis lambat (*slow pyrolysis*) menghasilkan produk ke arah kandungan karbon melalui pembentukan arang. Pirolisis lambat menurunkan hasil minyak, tetapi banyak menghasilkan uap dalam bentuk gas dan arang (Van de Velden *et al.*, 2010). Pirolisis cepat (*flash pyrolysis*) menggerakkan produk ke arah hidrogen dan menjauh dari oksigen, sehingga menghasilkan produk cair (minyak) yang lebih tinggi. Gasifikasi oksigen menggerakkan produk gas ke arah oksigen, sementara gasifikasi uap menjauh dari karbon. Proses hidrogenasi meningkatkan kandungan hidrogen dan dengan demikian menggerakkan produk ke arah hidrogen (Basu, 2010).

Caglar dan Aydinli (2009) meneliti mengenai *flash pyrolysis* antara *Hazelnut shell-UHMWPE*. Produk cair optimum dihasilkan pada pirolisis pada pembakaran 500°C dengan komposisi 0,5:1,5 (25%:75%) sebesar 70-75%. Sistem ini menggunakan waktu reaksi 15 menit. Persentase produk cair jauh lebih besar karena Caglar dan Aydinli (2009) menggunakan *flash* pirolisis, dimana laju pemanasan sangat tinggi, di atas 100°Cs⁻¹ dan waktu reaksi hanya beberapa detik. Tinggi dan cepatnya laju pemanasan menyebabkan terjadi konversi dari bahan yang tidak stabil menjadi bentuk *liquid* sebelum menjadi bentuk arang (Bahng *et al.*, 2009).

Efek sinergis dalam *co-pyrolysis* adalah faktor utama yang mempengaruhi kenaikan kualitas dan kuantitas minyak. Efek sinergis dapat dicapai melalui interaksi radikal dalam reaksi *co-pyrolysis*. Biomassa dan plastik memiliki mekanisme dekomposisi berbeda dalam proses pirolisis termal. Pirolisis biomassa melibatkan reaksi eksotermik dan endotermik (Demirbas, 2009). Pirolisis plastik terjadi dengan mekanisme radikal melalui proses inisiasi, propagasi, dan terminasi (Onal *et al.*, 2014). Jakab *et al.* (2001) menyebutkan bahwa biomassa memiliki stabilitas termal lebih rendah daripada plastik, yang dapat mempengaruhi mekanisme degradasi radikal dengan mengembangkan degradasi makromolekul sintesis.

Berdasarkan beberapa literatur, reaksi radikal dapat dibentuk selama proses *co-pyrolysis* bahan HDPE dan biomassa. Reaksi tersebut termasuk inisiasi, pembentukan monomer, reaksi transfer hidrogen menguntungkan dan tidak menguntungkan, transfer hidrogen intermolekular (pembentukan parafin dan diena), dan isomerasi melalui kelompok vinil, serta penghentian oleh disproporsionasi atau rekombinasi radikal (Onal *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2013).

4.5 Analisis Statistik ANOVA One-Way

Anova merupakan singkatan dari “analysis of varian“. *Analysis of Varian* adalah salah satu uji komparatif yang digunakan untuk menguji perbedaan mean (rata-rata) data lebih dari dua kelompok. Prinsip pengujiannya adalah menganalisis variabilitas atau keragaman data menjadi dua sumber variasi, yaitu variasi dalam kelompok (*within*) dan variasi antar kelompok (*between*). *Anova one way* digunakan untuk menguji hipotesis komparatif rata-rata sampel, dengan setiap sampel hanya terdiri atas satu kategori. Analisis *anova one way* digunakan untuk menentukan pengaruh variasi (jenis bahan dan temperatur) terhadap produk pirolisis (cair, arang, wax dan gas). Hasil nilai signifikansi *Anova one way* dapat dilihat pada Tabel 4.8. Prosedur analisis *Anova one way* menggunakan aplikasi SPSS 16 ditunjukkan pada Lampiran F.

Tabel 4.8 Hasil Uji Anova *One-Way* terhadap Produk Pirolisis

Produk	Nilai Signifikansi		
	Produk Arang atau Wax	Produk Minyak	Produk Gas
Jenis Bahan Baku	0,986	0,973	0,881
Rasio Bahan Baku	0,000	0,000	0,001

Pada kolom signifikansi, nilai $\leq 0,05$ menunjukkan hasil tersebut signifikan (ada pengaruh). Nilai signifikansi antara jenis bahan dan produk arang/wax, minyak, dan gas menunjukkan nilai $> 0,05$. Jenis bahan terhadap produk arang/wax memiliki nilai signifikansi 0,986. Nilai signifikansi jenis bahan terhadap produk minyak yaitu 0,973, sedangkan produk gas bernilai 0,881.

Kuantitas produk cair dan gas yang dihasilkan oleh proses pirolisis dipengaruhi oleh kandungan selulosa dan hemiselulosa yang berbeda dari tiap bahan baku biomassa. Sedangkan produk arang dipengaruhi oleh kandungan lignin dari setiap jenis bahan baku biomassa (Bhattacharya *et al.*, 2009). Nilai signifikansi $>0,05$ menunjukkan bahwa jenis bahan baku ranting (angsana, trembesi, waru) tidak terlalu berpengaruh terhadap kuantitas produk pirolisis. Hal ini dikarenakan perbedaan nilai kandungan lignoselulosa dari ketiga jenis ranting tidak signifikan dan hampir sama. Angsana memiliki nilai selulosa, hemiselulosa, dan lignin yaitu 28,18%; 14,53%; 12,13%. Ranting trembesi yaitu 26,81%; 20,14%; 10,82%, dan waru yaitu 32,51%; 11,60%; 10,74%. Nilai lignoselulosa yang hampir sama tidak memberikan pengaruh secara signifikan terhadap komposisi produk pirolisis.

Di sisi lain, nilai signifikansi rasio bahan terhadap produk pirolisis menunjukkan nilai $\leq 0,05$. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh rasio bahan baku terhadap kuantitas produk arang/*wax*, minyak, dan gas pirolisis. Pernyataan ini sesuai dengan literatur Syarypov *et al.* (2002) dan Abnisa *et al.* (2013). Dari tiga parameter (suhu, rasio bahan baku, dan waktu reaksi), rasio bahan baku merupakan parameter yang paling mempengaruhi produk pirolisis.

4.6 Karakteristik Produk Pirolisis

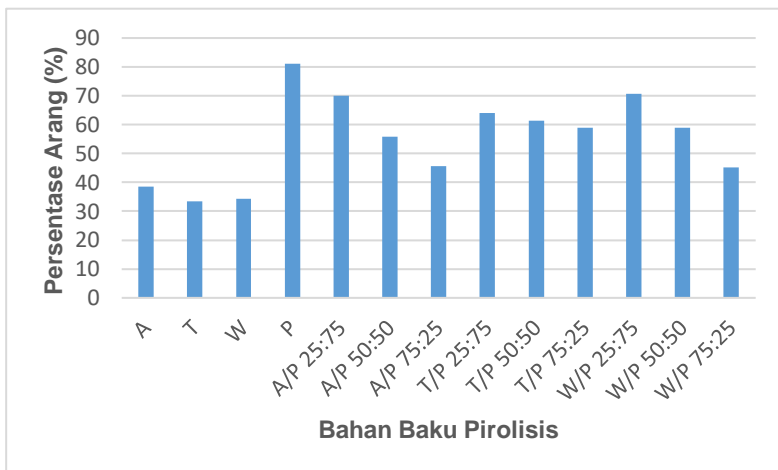
Produk pirolisis terdiri dari arang, minyak, dan gas.. Produk tersebut dapat diaplikasikan untuk berbagai kegunaan. Arang dari biomassa mengalami kenaikan nilai kalor daripada biomassa induknya. Gas dari pirolisis biomassa memiliki nilai kalor lebih sedikit daripada gas alam atau gas pirolisis bahan ban bekas. Namun, *co-pyrolysis* dapat menaikkan nilai kalor produk tersebut (Abnisa dan Daud, 2014). Informasi mengenai karakteristik produk arang, minyak, dan gas pirolisis dijelaskan pada subbab berikut.

a. Char / Arang

Char (arang) merupakan produk padat dari proses pirolisis. Arang sebagian besar terdiri dari karbon ($\sim 85\%$), tetapi juga mengandung oksigen dan hidrogen. Tidak seperti bahan bakar fosil pada umumnya, biomassa mengandung sangat sedikit abu anorganik. *Low heating value* (LHV) arang adalah sekitar 32

MJ / kg (Diebold dan Bridgwater, 1997), nilai ini jauh lebih tinggi daripada LHV biomassa induk atau produk cairnya.

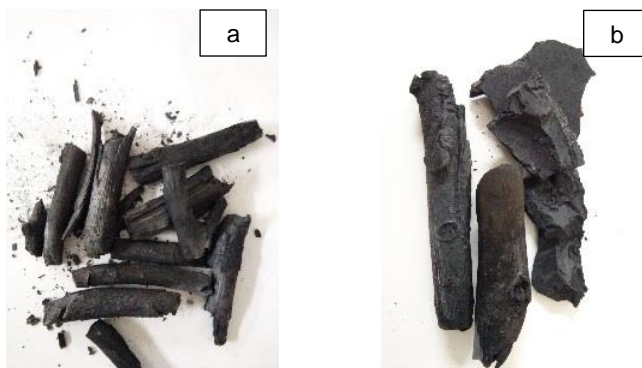
Pada penelitian ini, terjadi kenaikan persentase produk arang pada proses *co-pyrolysis* antara ranting pohon dan plastik HDPE. Gambar 4.8 menunjukkan diagram persentase produk arang pada pirolisis normal dan *co-pyrolysis*. Produk arang pada pirolisis ranting angšana mencapai 38,46%. Produk arang pada *co-pyrolysis* ranting angšana dan plastik HDPE dengan rasio 25:75, 50:50, dan 75:25 yaitu 69,93%; 55,89%; 45,54%.



Gambar 4.9 Diagram Persentase Produk Arang pada Pirolisis Normal dan *Co-pyrolysis*

Produk arang pada pirolisis ranting trembesi yaitu sebesar 33,47%. Produk arang pada *co-pyrolysis* ranting trembesi dan plastik HDPE dengan rasio 25:75, 50:50, dan 75:25 yaitu 64,06%; 61,29%; 58,93%. Produk arang pada pirolisis ranting angšana mencapai 38,46%. Produk arang pada *co-pyrolysis* ranting angšana dan plastik HDPE dengan rasio 25:75, 50:50, dan 75:25 yaitu 69,93%; 55,89%; 45,54%. Produk arang pada pirolisis ranting waru mencapai 34,37%. Produk arang pada *co-pyrolysis* ranting waru dan plastik HDPE dengan rasio 25:75, 50:50, dan 75:25 yaitu 70,67%; 58,92%; 45,28%. Secara garis besar, persentase produk

char / arang naik seiring dengan naiknya rasio penambahan plastik. Hal ini sejalan dengan komposisi produk pirolisis normal, dimana *wax* tertinggi dihasilkan oleh plastik HDPE. Gambar 4.9 menunjukkan foto produk arang paling optimum yaitu dari bahan baku angšana (a) dan *co-pyrolysis* waru-plastik (25:75) (b). Foto produk arang pirolisis dari bahan baku lain dapat dilihat pada Lampiran E, Gambar D.



Gambar 4.10 Produk Arang dari Pirolisis (a) Arang Ranting Angšana; (b) Arang *Co-pyrolysis* Waru-Plastik HDPE (25:75)

Persentase produk *char* proses *slow co-pyrolysis* berbeda dengan *fast co-pyrolysis*. Bernardo *et al.* (2012) mempelajari sifat fisik-kimia dari *char* yang diperoleh dalam proses *fast co-pyrolysis*. Penambahan ban ke dalam campuran limbah dapat meningkatkan produk *char* secara signifikan. Kecenderungan yang sama juga ditemukan oleh Lopez *et al.* (2011) dalam sebuah studi tentang deklorinasi bahan bakar dalam pirolisis PVC, hanya sejumlah kecil arang (0,6-1,3%) yang diperoleh dari pirolisis plastik atau campuran plastik. Sedangkan dalam penelitian ini, kuantitas produk arang lebih banyak diperoleh. Hal ini dikarenakan proses *slow co-pyrolysis* memiliki waktu operasi yang lama sehingga produk gas memiliki kesempatan untuk bereaksi dengan produk lain membentuk arang (Bahng *et al.*, 2009).

Di samping itu, *co-pyrolysis* menunjukkan kenaikan kualitas produk arang yaitu peningkatan nilai kalor. Perbandingan nilai kalor bahan baku ranting dan produk arang pirolisis dapat

dilihat pada Tabel 4.9. Jika dibandingkan, nilai kalor bahan baku ranting selalu lebih kecil daripada nilai kalor produk arang pirolisis ranting itu sendiri. Selain itu, nilai kalor *co-pyrolysis* ranting - plastik memiliki nilai lebih besar daripada bahan ranting saja. Nilai kalor produk arang dari biomassa saja sebesar 6600-7500 Kkal/Kg, sedangkan produk arang *co-pyrolysis* ranting-plastik bernilai di atas 8330 Kkal/Kg.

Tabel 4.9 Nilai Kalor Bahan Baku dan Produk Arang Pirolisis

Jenis Bahan	Nilai Kalor Ranting (Kkal/Kg)	Nilai Kalor Arang (Kkal/Kg)	Nilai Kalor Arang Literatur (Kkal/Kg)
A	5115	6606	737 ± 7 x 10 (Jati dan Santoso, 2005)
T	5078	7348	730 ± 7 x 10 (Jati dan Santoso, 2005)
W	5051	7444	-
P	11440	11845	11058 (Das, 2007)
A/P 25:75	-	10762	-
A/P 50:50	-	8339	-
A/P 75:25	-	8357	-
T/P 25:75	-	7203	-
T/P 50:50	-	10586	9420 for sugarcane:LDPE (50:50) (Dewangan, 2014)
T/P 75:25	-	9912	-
W/P 25:75	-	10823	-
W/P 50:50	-	10135	-
W/P 75:25	-	9907	-

Jika dibandingkan dengan nilai kalor bahan bakar yaitu batu bara dengan nilai kalor sebesar 4129,645 - 7119,865 Kkal/Kg (Munoz-Guillena *et al.*, 1992), produk arang pirolisis sangat berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif menggantikan batu bara karena nilai kalor dari produk pirolisis berada pada rentang nilai kalor batu bara yaitu arang trembesi,

waru, plastik, serta campuran ranting dan plastik di atas 7000 Kkal/Kg. Hal ini sesuai dengan literatur Paradela *et al.* (2009) yang menyebutkan bahwa produk padat yang dihasilkan dari *co-pyrolysis* campuran biomassa dan limbah plastik memiliki nilai kalor lebih tinggi daripada beberapa jenis batu bara.

Jika dibandingkan dengan beberapa literatur, nilai kalor arang dari penelitian ini tidak jauh berbeda. Menurut Jati dan Santoso (2005), nilai kalor arang kayu angkana dan waru $737 \pm 7 \times 10$ Kkal/Kg. Nilai kalor arang ranting angkana sebesar 6606 Kkal/Kg, sedangkan nilai kalor ranting trembesi 7348 Kkal/Kg. Berdasarkan penelitian dari Das (2007), nilai kalor *polyethylene* mencapai 11058 Kkal/Kg, hampir sama dengan nilai kalor kantong plastik HDPE sebesar 11845 Kkal/Kg.

Brebu *et al.* (2010) juga menyatakan bahwa produk arang yang dihasilkan dari biomassa pinus saja memiliki nilai kalor lebih rendah daripada produk arang dari proses *co-pyrolysis*. Hal ini dikarenakan tingginya kadar oksigen yang berada dalam pohon pinus saja. Perbedaan komposisi unsur arang dari polimer sintesis yang dicampur dengan biomassa pinus dan selulosa berhubungan dengan adanya lignin dari biomassa pinus. Dengan penambahan material plastik kedalam proses pirolisis menghasilkan peningkatan kandungan hidrogen dalam produk dibandingkan proses pirolisis biomassa tanpa plastik (Bhattacharya *et al.*, 2009). Selanjutnya, Bhattacharya *et al.* (2009) juga menjelaskan bahwa kandungan sulfur yang sangat rendah ditemukan pada produk arang pirolisis, membuatnya menarik untuk digunakan dalam insinerasi. Hal ini membuat produk arang sesuai untuk digunakan sebagai bahan bakar, misalnya pembakaran dengan batu bara atau limbah jenis lain.

Aplikasi lain dari produk arang adalah penggunaannya sebagai adsorben dalam pengolahan air limbah untuk menghilangkan logam berat. Arang yang terbentuk dari *co-pyrolysis* juga dapat berpotensi digunakan sebagai adsorben melalui proses lanjutan. Bernardo *et al.* (2012) melakukan penelitian mengenai peningkatan kualitas produk arang *co-pyrolysis* dari limbah plastik PE, PP dan PS, biomassa pinus dan ban bekas. Sifat tekstur dan adsorpsi dari arang yang telah dievaluasi menunjukkan bahwa arang merupakan bahan *mesoporous dan makroporous*, dengan kapasitas adsorpsi untuk

pewarna biru metilen pada kisaran 3,59-22,2 mg/g. Perlakuan lanjutan pada arang dapat membuat material berkarbon dengan kualitas memadai untuk digunakan kembali sebagai pelakuan pendahuluan agar memperoleh adsorben. Karakteristik fisik dari produk arang pirolisis dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Karakteristik Fisik Produk Arang Pirolisis

Jenis Pirolisis	No	Jenis bahan	Kadar air (%)	Volatile solid (%)	Kadar abu (%)	Fixed Carbon (%)
Pirolisis Normal (satu bahan baku)	1	A	3,13	73,86	8,06	14,95
	2	T	3,66	69,59	7,19	19,56
	3	W	1,56	70,78	7,66	20,01
	4	P	0,05	94,43	1,64	3,88
	5	A/P 25:75	0,56	87,47	6,89	5,09
	6	A/P 50:50	0,76	52,03	7,52	39,70
Co-pyrolisis (dua bahan baku)	7	A/P 75:25	0,81	69,56	5,61	24,02
	8	T/P 25:75	2,31	33,15	8,46	56,07
	9	T/P 50:50	1,38	58,71	6,83	33,08
	10	T/P 75:25	1,13	48,64	5,74	44,49
	11	W/P 25:75	0,42	79,09	5,24	15,26
	12	W/P 50:50	0,50	71,37	6,78	21,35
	13	W/P 75:25	1,72	51,31	7,75	39,23

Nilai kadar air dari produk arang biomassa ranting angšana, trembesi, dan waru secara berurutan adalah 3,13%; 3,66%; dan 1,56%. Hasil ini lebih kecil daripada kadar air *bio-char* dari beberapa biomassa lain yaitu *palm shell* sebesar 6,5%, tandan kosong kelapa sawit sebesar 5,4%, dan serat mesokarp sebesar 12,1% (Abnisa, 2015). Kadar air paling kecil diperoleh dari pirolisis plastik sebesar 0,05%. Produk arang *co-pyrolisis* biomassa ranting angšana dan plastik HDPE berada pada rentang 0,56% - 0,80%. Kadar air produk arang *co-pyrolisis* biomassa ranting trembesi dan plastik HDPE berada pada rentang 1,13% - 2,31%, sedangkan *co-pyrolisis* ranting waru dan plastik HDPE menghasilkan nilai 0,42% - 1,72%.

Nilai kadar air produk arang pada *co-pyrolysis* terbesar terdapat pada bahan ranting trembesi dan plastik HDPE. Hal ini sesuai dengan analisis karakteristik pendahuluan bahan baku trembesi yang menunjukkan bahwa trembesi lebih higroskopis daripada angkana dan waru (Tabel 4.1). Jika dibandingkan dengan Standar Mutu Briket Arang Kayu (SNI No. 1/6235/2000), semua produk arang dari proses pirolisis bahan ranting serta *co-pyrolysis* ranting dan HDPE memiliki kadar air $\leq 8\%$ sehingga masuk dalam kriteria briket arang kayu.

Nilai kadar abu dari arang pirolisis ranting angkana, trembesi, waru, dan plastik HDPE yaitu 8,06%; 8,04%, 8,91%; dan 1,64%. Nilai ini lebih besar daripada kadar abu *bio-char* beberapa biomassa yaitu *palm shell* sebesar 2% dan tandan kosong kelapa sawit sebesar dan 4,3%; namun lebih kecil daripada serat mesokarp yaitu 12,8% (Abnisa, 2015). Berdasarkan Standar Mutu Briket Arang Kayu (SNI No. 1/6235/2000), baku mutu kadar abu adalah $< 8\%$, sehingga semua produk arang masuk dalam kriteria briket arang kayu, kecuali arang angkana dan T/P 50:50.

Suhu pengapian (*ignition temperature*) merupakan karakteristik penting dari bahan bakar karena reaksi pembakaran menjadi stabil ketika telah mencapai suhu tersebut. Secara umum, suhu pengapian lebih rendah untuk bahan bakar yang memiliki *volatile solid* tinggi. Karena partikel memiliki nilai *volatile solid* yang tinggi daripada batu bara, sehingga biomassa memiliki suhu pengapian yang lebih kecil secara signifikan (Basu, 2010).

Volatile solid dan *fixed carbon* memiliki keterkaitan. *Volatile solid* diperoleh dari pemanasan sampel pada suhu 950°C selama 7 menit (Lampiran A). Nilai *fixed carbon* bergantung pada jumlah *volatile solid*, maka nilainya tidak ditentukan secara langsung (Basu, 2011). Nilai *fixed carbon* ditentukan dari rumus pengurangan = $100 - (\text{kadar air} + \text{kadar abu} + \text{kadar } \textit{volatile solid})$ yang dilampirkan dalam Lampiran A. *Volatile solid* dari bahan bakar adalah uap yang dapat dikondensasi dan tidak dapat dikondensasi, dilepaskan saat bahan bakar dipanaskan. Jumlahnya tergantung pada tingkat pemanasan dan suhu yang dipanaskan (Basu, 2010).

Nilai *fixed carbon* mewakili karbon padat yang tertinggal dalam biomassa setelah devolatilisasi di dalam proses pirolisis. Unsur karbon juga termasuk ke dalam nilai *fixed carbon* bahan

bakar, ditambah dengan residu karbon yang terbentuk saat pemanasan terjadi, dalam penentuan *volatile solid* (standar D-3175). Karbon biomassa berasal dari proses fiksasi fotosintesis CO₂ sehingga semuanya bersifat organik. Selama penentuan *volatile solid*, sebagian karbon organik diubah menjadi bahan karbon yang disebut karbon pirolitik. *Volatile solid* juga bervariasi karna parameter laju pemanasan. Dalam arti sebenarnya, *fixed carbon* bukan kuantitas tetap, namun nilainya, yang diukur dalam kondisi standar, memberikan evaluasi parameter yang berguna untuk bahan bakar (Basu, 2010).

Nilai *volatile solid* dari produk arang pirolisis angkana, trembesi, waru yaitu 73,86%; 69,59%; 70,78% secara berurutan. Sebagai perbandingan, dalam Abnisa (2015) nilai *volatile solid bio-char* dari bahan baku *palm shell* adalah 18%, tandan kosong kelapa sawit 40,1%, dan serat mesokarp 52%. Sedangkan keseluruhan produk arang dari *co-pyrolysis* ranting dan plastik HDPE memiliki nilai *volatile solid* beragam. Nilai *volatile solid* dari produk arang pirolisis satu bahan baku saja lebih besar daripada arang bahan *co-pyrolysis* ranting dan plastik HDPE. Nilai *volatile solid* yang lebih rendah pada produk arang *co-pyrolysis* membuat nilai *fixed carbon*-nya lebih tinggi.

Dalam Abnisa (2015), kadar *fixed carbon bio-char* dari bahan baku *palm shell* yaitu 72,5%, tandan kosong kelapa sawit sebesar 41,7%, dan serat mesokarp sebesar 30,6%. Dalam penelitian ini, *fixed carbon* produk arang ranting angkana yaitu 19,96%; trembesi 15,46%; waru 21,81%. Secara umum, nilai *fixed carbon* dari produk *co-pyrolysis* mengalami kenaikan. Hal ini dikarenakan arang banyak mengandung karbon. Produk arang disusun terutama oleh matriks kaya karbon yang mengandung hampir semua senyawa anorganik yang ada dalam bahan baku dan sejumlah produk sampingan terkondensasi yang terbentuk selama proses pirolisis, tersebar di seluruh struktur pori arang (Basu, 2010).

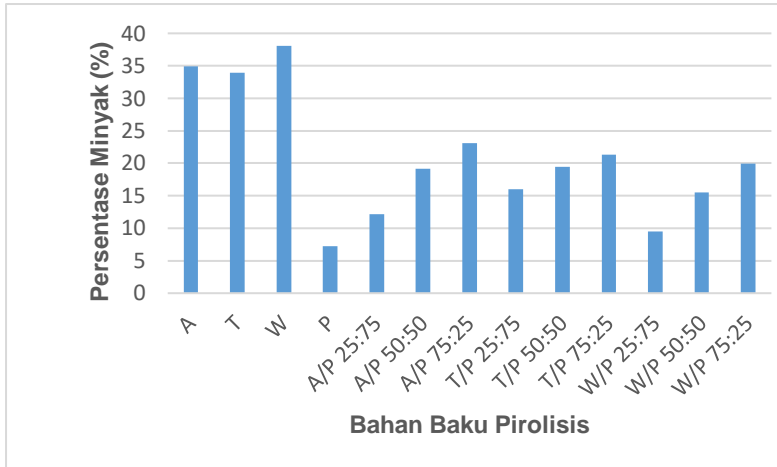
Nilai karbon sebagai unsur utama dalam arang (*bio-char*) (49-72%) lebih besar secara signifikan daripada yang terdapat dalam biomassa kering (Basu, 2010). Nilai *fixed carbon* dari produk arang penelitian ini tidak sesuai dalam rentang 49-72% sesuai literatur Basu (2010). Hal ini dimungkinkan karena beberapa faktor yaitu (1) ukuran bahan baku pirolisis terlalu besar; (2) *residence*

time slow pyrolysis kurang lama; (3) temperatur reaksi perlu lebih tinggi lagi. Menurut Bahng *et al.* (2009), dalam *slow pyrolysis* hendaknya ukuran bahan baku berkisar diantara 5-50 mm dan temperatur dapat mencapai 700°C. Berdasarkan Ellen *et al.* (2012), proses pirolisis dapat mencapai waktu detensi 120 menit.

b. Minyak

Produk cair, dikenal sebagai *tar*, *bio-oil*, atau *biocrude*, adalah cairan hitam dihasilkan oleh proses pirolisis yang mengandung 20% air. Produk ini terutama terdiri dari senyawa fenolik homolog. *Bio-oil* adalah campuran hidrokarbon kompleks dengan kandungan oksigen dan air yang besar. Jika biomassa induk (asal) memiliki *low heating value* (LHV) pada kisaran 19,5 - 21 MJ/kg basis kering, produk cairnya memiliki LHV lebih rendah, yaitu pada kisaran 13 - 18 MJ/kg basis basah (Diebold *et al.*, 1997).

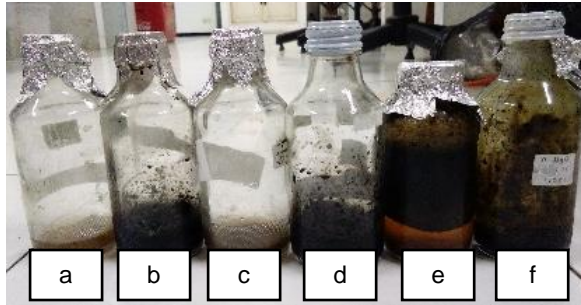
Bio-oil diproduksi secara cepat dan simultan dengan cara depolimerisasi dan *fragmenting* komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin dari biomassa. Dalam proses pirolisis, biomassa mengalami peningkatan suhu secara cepat, kemudian mengalami pendinginan secara cepat untuk "membekukan" produk pirolisis *intermediate*. Proses pendinginan cepat penting karena proses tersebut mencegah degradasi, pembelahan, atau reaksi lebih lanjut dengan molekul lain. *Bio-oil* adalah mikroemulsi, yang merupakan fase lanjutan dari larutan cair produk dekomposisi selulosa, hemiselulosa, dan molekul-molekul kecil dari dekomposisi lignin. Fase diskontinu sebagian besar tersusun dari makromolekul lignin pirolitik (Piskorz *et al.*, 1988). Gambar 4.10 menunjukkan persentase produk minyak. Hasil minyak optimum diperoleh oleh minyak pirolisis biomassa ranting dengan persentase >30%.



Gambar 4.11 Diagram Persentase Produk Minyak pada Pirolisis Normal dan *Co-pyrolysis*

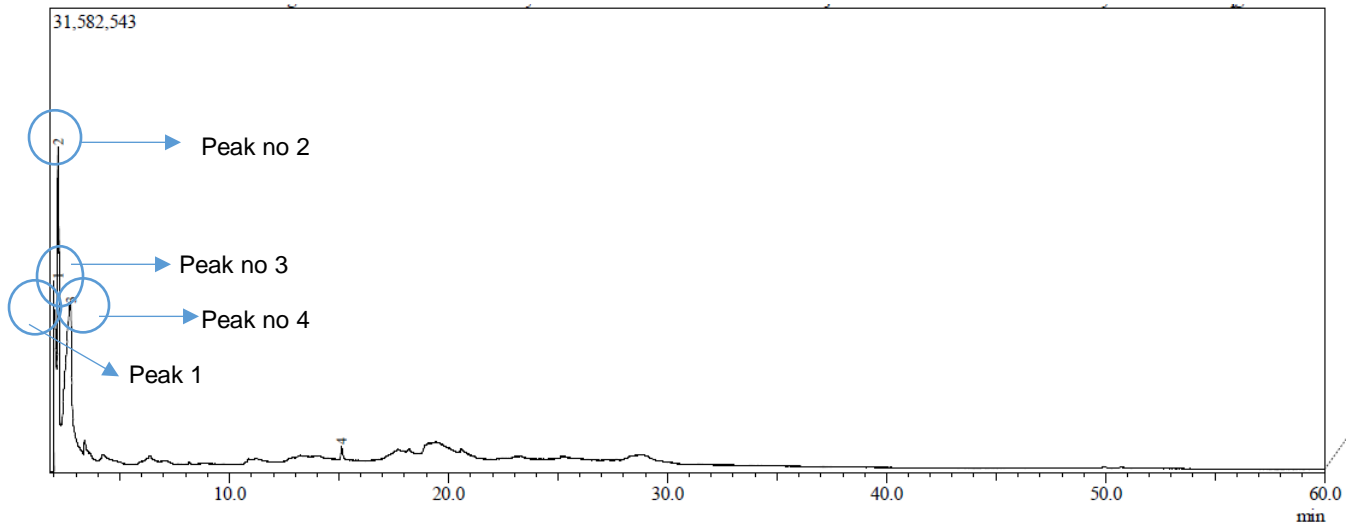
Secara umum, senyawa utama dalam minyak yang dihasilkan oleh pirolisis biomassa bahan berbasis kayu adalah alkohol, aldehyd, fenol, asam, ester, keton, guaiacol, syringol dan furan (Zhang *et al.*, 2007). Di antara senyawa – senyawa tersebut, fenol ditemukan dominan dalam minyak (sampai 55%) (Diebold, 2000). Menurut Samanya *et al.* (2012), senyawa fenol dengan kadar tinggi dapat menyebabkan peningkatan keasaman dan ketidakstabilan dalam minyak.

Martínez *et al.* (2013) menyatakan bahwa senyawa fenolik berasal dari dekomposisi lignin yang terkandung di dalam biomassa kayu. Martínez *et al.* (2013) juga menyebutkan bahwa produk yang berasal dari lignin memegang peranan penting atas minyak pirolisis dengan berat molekul dan viskositas tinggi. Maka dari itu, salah satu cara untuk meningkatkan kualitas dari minyak pirolisis adalah menghilangkan senyawa lignin. Foto dari salah satu produk minyak pirolisis yaitu minyak *co-pyrolysis* trembesi-plastik HDPE (25:75) ditunjukkan oleh Gambar 4.11. Hasil dari uji GC-MS minyak trembesi dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Tabel 4.11. Foto produk minyak pirolisis dari bahan baku lain dapat dilihat pada Lampiran E, Gambar E.



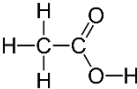
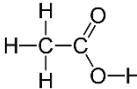
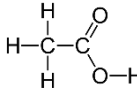
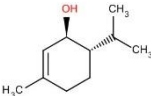
Gambar 4.12 Produk Minyak *Co-pyrolysis* Bahan Baku Ranting Trembesi – Plastik HDPE (a) T/P 75:25 Kondensor 2; (b) T/P 75:25 Kondensor 1; (c) T/P 50:50 Kondensor 2; (d) T/P 50:50 Kondensor 1; (e) T/P 25:75 Kondensor 2; (f) T/P 25:75 Kondensor 1

Pengujian nilai kalor terhadap minyak hasil pirolisis juga dilakukan. Namun, pengujian ini tidak mendapatkan hasil yang diharapkan. Nilai kalor untuk minyak pirolisis ranting trembesi bernilai 43 Kkal/Kg, sedangkan nilai kalor minyak ranting ansana sebesar 34 Kkal/Kg (Lampiran H). Besarnya nilai kalor minyak tidak sesuai dengan literatur dimana nilai kalornya sebesar 3105 - 4300 Kkal/Kg (Basu, 2010). Hal ini dapat disebabkan adanya kadar air dan mineral yang besar terdapat pada minyak pirolisis ranting sehingga tidak dapat terbakar sempurna di dalam *bomb-calorimeter*. Cara agar nilai kalor minyak dapat diuji dengan baik adalah memisahkan fase air (*water*) dari minyak saat proses pirolisis berlangsung. Perlakuan *recovery* minyak dapat dilakukan dalam dicloromethane untuk analisis lebih lanjut (Onal *et al.*, 2014).



Gambar 4.13 Hasil Uji GC-MS Minyak Pirolisis Bahan Ranting Trembesi

Tabel 4.11 Identifikasi Senyawa Minyak Pirolisis Ranting Trembesi

No. Peak	Senyawa Kimia	Rumus Kima	Struktur	Peak Area (%)
1	Asam Asetat	$C_2H_4O_2$		15,58
2	Asam Asetat	$C_2H_4O_2$		24,67
3	Asam Asetat	$C_2H_4O_2$		58,51
4	Fenchol	$C_{10}H_{18}O$		1,24

Uji GC-MS ini menghasilkan 4 peak. Peak menunjukkan banyaknya senyawa yang teridentifikasi dalam suatu zat. Peak 1, 2, dan 3 menunjukkan senyawa asam asetat dengan persentase total 98,76%. Peak 4 menunjukkan senyawa fenchol dengan persentase 1,24%. Asam asetat adalah senyawa kimia asam organik yang dikenal sebagai pemberi rasa asam dan aroma dalam makanan. $C_{10}H_{18}O$ memiliki beberapa isomer, diantaranya fenchol dan terpineol. Fenchol digunakan secara luas dalam industri perasa pinus, herman, lemon atau bau bunga. Senyawa tersebut juga bisa digunakan dalam bahan kimia sehari-hari seperti antiperspirant, pelembut tekstil, dan detergen cair. Fenchol dapat juga diesterifikasi dengan berbagai macam asam organik untuk memperluas penggunaannya dalam perasa dan pembau.

Senyawa asam asetat dan fenchol menandakan kadar asam dan oksigen masih sangat tinggi dalam minyak hasil pirolisis ranting trembesi. Kandungan oksigen yang tinggi tidak bagus

untuk produksi bahan bakar transportasi karena menurunkan nilai kalor. Kadar oksigen tinggi dari komponen organik dan kadar air perlu dihilangkan dari minyak dengan menggunakan metode seperti proses *hydrotreating-hydrocracking*. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan nilai kalor dan mengurangi sifat korosi saat digunakan sebagai bahan bakar (Abnisa dan Daud, 2014).

Kromatogram GC-MS minyak biomassa ranting trembesi pada penelitian ini kurang sesuai dengan literatur Bhattarcaya *et al.* (2009); Abnisa *et al.* (2011); Sun *et al.* (2013). Senyawa yang bisa teridentifikasi pada penelitian ini hanya 2 macam yaitu asam asetat dan fenol, sedangkan pada literatur-literatur terdapat senyawa-senyawa lain seperti fenol, 2,6-dimethoxy phenol, trimethylamine, 4-hydroxy benzoic acid, acids, aldehyde (furfural). Referensi detail mengenai kandungan senyawa yang terdapat dalam minyak pirolisis bahan biomassa kayu serta *co-pyrolysis* kayu dan plastik dapat dilihat pada Lampiran G.

Asam asetat dan fenol yang teridentifikasi merupakan senyawa sekunder, bukan senyawa primer yang biasa terdapat dalam minyak pirolisis bahan biomassa (Bhattarcaya *et al.*, 2009; Abnisa *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2013). Perbedaan dengan literatur ini dimungkinkan karena beberapa hal seperti: (1) ketidakcocokan penggunaan kolom GC-MS; (2) perlunya perlakuan lanjutan terhadap sampel minyak (derivatisasi) sebelum pengujian GC-MS; (3) adanya zat pengotor dalam sampel minyak; (4) alat kondensor tidak sesuai; (5) *solvent* (pelarut) sampel minyak tidak sesuai.

Kolom yang digunakan pada uji GC-MS ini adalah Agilent HP-1 yang dikhususkan untuk senyawa non polar. Aplikasi HP-1 mencakup analisis hidrokarbon, pestisida, *polychlorinated biphenyls* (PCB), dan senyawa sulfur (agilent.com). Senyawa fenol yang merupakan senyawa primer merupakan senyawa semipolar, sehingga tidak bisa teridentifikasi dengan kolom Agilent HP-1. Kolom yang dapat digunakan untuk menganalisis senyawa polar seperti fenol, alkohol, atau amino adalah HP-20M, DB-WAX, CP-WAX, dan Carbowax-30M. Senyawa hidrokarbon yang merupakan senyawa non polar seharusnya dapat terdeteksi. Tidak terdeteksinya senyawa hidrokarbon dimungkinkan karena perlunya proses derivatisasi dalam sampel minyak pirolisis.

Derivatisasi merupakan proses kimiawi untuk mengubah suatu senyawa menjadi senyawa lain yang mempunyai sifat-sifat

yang sesuai untuk dilakukan analisis menggunakan GC-MS. Derivatisasi terhadap sampel minyak pirolisis bisa dilakukan dengan 2 cara yaitu asilasi dan alkilasi. Pada umumnya, asilasi dilakukan menggunakan perfluoroanhidrida yang murni atau dalam pelarut, misalnya asetronitril dan etil asetat. Alkilasi digunakan menderivatisasi alkohol, fenol, amina primer dan sekunder, imida, dan sulfhidril. Derivat dapat dibuat dengan sintesis Wiliamson, yaitu alkohol atau fenol ditambah alkil atau benzil halida dengan adanya basa. Percobaan *solvent* yang sesuai juga seharusnya dilakukan berulang - ulang agar kromatogram GC-MS mendapatkan hasil terbaik.

Zat pengotor dalam minyak pirolisis trembesi dapat menjadi penghalang detektor GC-MS sehingga tidak bisa membaca senyawa dalam minyak tersebut. Oleh karena itu, minyak pirolisis harus terbebas dari zat padat pengotor. Modifikasi terhadap kondensor juga perlu dilakukan untuk mendapatkan kualitas produk minyak yang optimum. Modifikasi ini dapat berupa pengaliran air pada kondensor bersuhu 0,5°C, perubahan material menjadi besi, dan pembersihan kondensor setiap melakukan *running* pirolisis baru (Abnisa dan Daud, 2013).

Pada penelitian Sun *et al.* (2013), *co-pyrolysis* kayu polar dan HDPE tidak menghasilkan produk reaksi silang yang nyata diantara produk - produk pirolisis kayu poplar dan HDPE. Hal ini menunjukkan bahwa degradasi termal *co-pyrolysis* kayu poplar dan HDPE terdiri dari pirolisis bahan kayu dan HDPE secara individual (masing-masing). Namun, degradasi termal dari pirolisis kayu memiliki efek nyata terhadap dekomposisi HDPE. Hasil memperlihatkan bahwa senyawa radikal bebas dibentuk oleh dekomposisi kayu poplar yang dimulai dengan pemecahan rantai polietilena dan mendorong pembentukan *light paraffins*

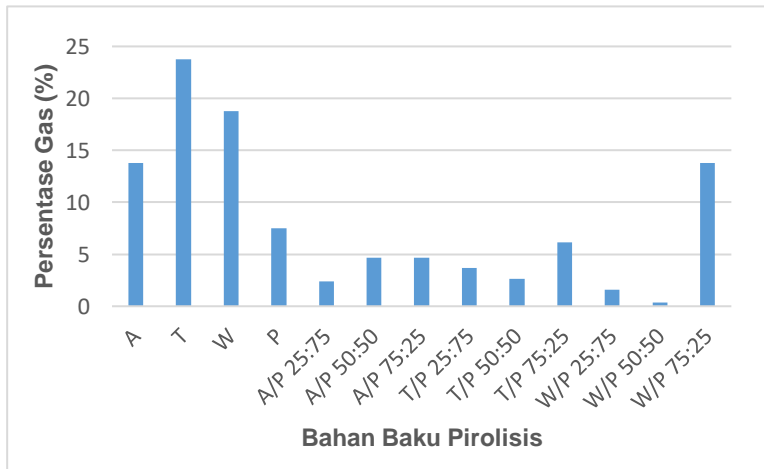
Berkenaan dengan senyawa yang teridentifikasi pada produk *co-pyrolysis* kayu poplar dan HDPE, anhydrosugars terutama levoglucosans, kebanyakan berasal dari depolimerasi selulosa. Furans, light aldehydes, dan ketones berasal dari dekomposisi selulosa, hemiselulosa, dan turunan anhydrosugars. Di antara senyawa tersebut, cyclopentanone dan cyclopentenone terutama berasal dari hemiselulosa. Sebagai produk dominan dari carboxylic acids, asam asetat terutama diproduksi dari hemiselulosa. Fenol merupakan produk dominan dari pirolisis

lignin, sedangkan hidrokarbon dihasilkan dari dekomposisi termal bahan HDPE (Sun *et al.*, 2013).

Berdasarkan Bhattacharya *et al.* (2009), senyawa yang berlimpah dalam minyak *co-pyrolysis* HDPE/pinus 50:50 merupakan 2-hydroxy-2-propanone, isopropyl acetate, furfural, 2-hydroxy-2-cyclopenten-1-onephenol, 2- and 4-methyphenols, 2-methoxyphenol, eugenol, catechol dan senyawa fenol lainnya. Beberapa rantai panjang hidrokarbon juga teridentifikasi, misal 1-undecene, dodecane, 1-tridecane, 1-tetradecene, tetradecane, 1-pentadecene, pentadecane, 1-hexadecene, hexadecane, heptadecane, nonadecane, dan senyawa lain yang terbentuk saat dekomposisi termal HDPE. Sekali lagi, tidak ada produk reaksi silang yang teridentifikasi. Semua produk yang teridentifikasi sebelumnya telah muncul dalam pirolisis bahan kayu pinus atau HDPE secara individual.

c. Gas

Dekomposisi primer biomassa menghasilkan gas yang dapat dikondensasi (uap) dan gas yang tidak dapat dikondensasi (gas primer). Uap, yang terbuat dari molekul - molekul lebih berat, mengembun karena pendinginan, berubah menjadi produk pirolisis cair. Campuran gas yang tidak dapat terkondensasi mengandung gas dengan berat molekul rendah seperti karbon dioksida, karbon monoksida, metana, etana, dan etilen. Gas ini tidak mengembun terhadap proses pendinginan. Gas-gas lain tidak dapat terkondensasi yang dihasilkan melalui *secondary cracking* uap disebut gas sekunder. Dengan demikian, produk gas akhir yang tidak dapat terkondensasi adalah campuran dari gas primer dan sekunder (Basu, 2010). *Low heating value* (LHV) gas primer biasanya bernilai 11 MJ/Nm³, tetapi LHV gas pirolisis yang terbentuk setelah proses *secondary cracking* jauh lebih tinggi, yaitu 20 MJ / Nm³ (Diebold dan Bridgwater, 1997). Persentase produk gas pirolisis pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 4.13.



Gambar 4.14 Diagram Persentase Produk Gas pada Pirolisis Normal dan Co-pyrolysis

Persentase gas pirolisis bahan baku ranting angšana, trembesi, dan waru adalah sebesar 13,79%; 23,78%; 18,78% secara berurutan. Persentase ini sesuai dengan literatur Bridgewater (2006). Pada pirolisis, gas yang dihasilkan biasanya rendah. Secara umum, gas yang dihasilkan oleh proses pirolisis berada pada kisaran 13-25% berat biomassa (Bridgewater, 2006). William (2013) menyatakan bahwa tingginya persentase produk gas dikarenakan proses pirolisis berada pada temperatur yang tinggi dan laju pemanasan rendah.

Co-pyrolysis ranting dan plastik HDPE menghasilkan produk gas dalam rentang 0,35 – 13,79%. Persentase gas pada proses co-pyrolysis juga diteliti oleh Bernardo *et al.* (2010). Komposisi bahan baku pirolisis 50% pinus dan 50% plastik menghasilkan gas sebesar 12%, minyak 54%, dan char 22% dengan mass loss sebesar 5%. Komposisi bahan baku pirolisis 50% plastik dan 50% ban menghasilkan gas sebesar 2% serta char 97% dengan mass loss sebesar 1%. Selanjutnya komposisi bahan 30% pinus, 30% ban, dan 40% plastik menghasilkan 10% gas, 60% minyak, 25% arang dengan mass loss 5%. Hal ini menunjukkan bahwa persentase gas menurun seiring

penambahan jumlah bahan baku plastik. Jumlah persentase gas yang kecil pada penelitian ini dikarenakan adanya *mass loss* saat proses pirolisis berlangsung (Bernardo *et al.*, 2012).

Komposisi gas yang dihasilkan dari proses *co-pyrolysis* bergantung pada komposisi bahan baku yang digunakan. Secara umum, produk gas yang dilepaskan selama pirolisis berbahan kayu mengandung CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, C₃H₆, dan sejumlah kecil hidrokarbon lainnya (Mohan, 2006). Di sisi lain, komposisi gas yang dihasilkan oleh plastik berbeda tergantung dari jenis plastiknya. Williams dan Williams (1998) melaporkan bahwa gas utama yang dihasilkan dari masing-masing plastik adalah H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈, C₃H₆, C₄H₁₀, dan C₄H₈.

Gas yang dihasilkan dari proses pirolisis memiliki nilai kalor yang signifikan. Oleh karena itu, gas tersebut dapat digunakan untuk mengisi kebutuhan energi total dari proses pirolisis. Salah satu faktor yang dapat meningkatkan nilai kalor gas adalah konsentrasi hidrogen dan hidrokarbon lainnya (Abnisa dan Daud, 2014). Dalam studi *co-pyrolysis* biomassa dan limbah plastik, Paradela *et al.* (2009) menyimpulkan bahwa meningkatnya kandungan biomassa dalam bahan baku campuran limbah secara signifikan dapat menurunkan nilai kalor gas, karena terjadi penurunan formasi hidrokarbon.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian pirolisis sampah plastik dan biomassa sampah rumah tangga kota Surabaya dapat diambil beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

1. *Energy recovery* massa pirolisis bahan baku ranting mencapai 87% - 91%, sedangkan *co-pyrolysis* campuran bahan ranting dan plastik HDPE mencapai 73% - 86%. Persentase arang optimum diperoleh dari pirolisis ranting angkana sebesar 38,46%, sedangkan *wax* optimum diperoleh dari pirolisis bahan plastik HDPE sebesar 81%. Hasil minyak optimum diperoleh dari pirolisis ranting waru sebesar 38,08%. Persentase gas optimum didapat dari pirolisis bahan ranting trembesi yaitu 23,78%.
2. Rasio komposisi *co-pyrolysis* antara jenis ranting dan plastik HDPE berpengaruh terhadap produk pirolisis arang, cair, dan gas. Sedangkan jenis bahan baku ranting tidak berpengaruh terhadap kuantitas produk pirolisis.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Meminimalisasi *mass loss* saat proses pirolisis berlangsung sehingga *energy recovery* dapat mencapai 100% dengan melakukan modifikasi terhadap kondensor yaitu pengaliran air bersuhu 0,5°C, perubahan material menjadi besi, dan pembersihan kondensor setiap melakukan perlakuan baru.
2. Analisis variasi jenis biomassa dengan perbedaan kandungan lignoselulosa sebagai bahan baku pirolisis perlu dilakukan untuk menentukan hubungan lignoselulosa bahan baku dengan komposisi produk pirolisis.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Daftar Pustaka

- Abnisa, F., Wan Daud, W.M.A., Ramalingam, S., Azemi, M.N.B.M., Sahu, J.N. (2013). *Co-Pyrolysis of Palm Shell and Polystyrene Waste Mixtures to Synthesis Liquid Fuel*. Fuel 108: 311–318.
- Abnisa, F., dan Wan Daud, W.M.A. (2014). *A Review on Co-Pyrolysis of Biomass: An Optional Technique to Obtain a High-Grade Pyrolysis Oil*. Fuel, 87: 71-85.
- Akhtar, J., Amin, S. (2012). *A Review on Operating Parameters Optimum Liquid Oil Yield in Biomass Pyrolysis*. Fuel, 16: 5109-5017.
- Anggreini, A., Syaiful, B., Khaira. (2015). *Pirolisis Kayu Ketapang (Terminalia Catappa L.) Menjadi Bio-Oil Menggunakan Katalis Nimo/Lempung*. JOM FTeknik, 2 (2): 1-7.
- Asadullah, M., Rahman, M.A., Ali, M.M., Motin, M.A., Sultan, M.B., Alam, M.R., Rahman, S. (2008). *Jute Stick Pyrolysis for Bio-Oil Production in Fluidized Bed Reactor*. Bioresour. Technol. 99: 44–50.
- Ates, F., Miskolczi, N., Borsodi, N. (2013). *Comparision of Real Waste (MSW And MPW) Pyrolysis in Batch Reactor Over Different Catalysts. Part I: Product Yields, Gas And Pyrolysis Oil Properties*. Bioresource Technology, 133: 443–454.
- Bhattacharya, P., Steele, P.H., Hassan, E.B.M., Mitchell, B., Ingram, L., Pittman Jr., C.U. (2009). *Wood/Plastic Copyrolysis in an Auger Reactor: Chemical and Physical Analysis of the Products*. Fuel 88: 1251–1260.
- Baker, A. J. (1983). *Wood Fuel Properties and Fuel Products From Woods*. In: Fuelwood management and utilization seminar: Proceedings. East Lansing. East Lansing. MI: Michigan State University. <http://www.fpl.fs.fef.us> (diunduh pada 1 Agustus 2016).
- Basu, P. (2010). *Biomassa Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Burlington, USA.
- Bahng, M.-K., Mukarakate, C., Robichaud, D.J., Nimlos, M.R. (2009). *A Review: Current Technologies for Analysis of Biomass Thermochemical Processing*. Analytica Chimica Acta, 651: 117–138.

- Bernardo M, Lapa N, Gonçalves M, Mendes B, Pinto F, Fonseca I. (2012). *Physicochemical Properties of Chars Obtained in the Co-Pyrolysis of Waste Mixtures*. J. Hazard Mater, 219–220: 196–202.
- BLH. (2010). *Status Lingkungan Hidup Daerah Surabaya*. www.lh.surabaya.go.id (diunduh 8 Agustus 2016).
- Boukis, I.Ph., Bezerianni, S., Grammelis, P. (2007). *CFB Air-Blown Flash Pyrolysis*. Part II: Operation and Experimental Results. Fuel, 86: 1387–1395.
- Brebu M, Ucar S, Vasile C, Yanik J. (2010). *Co-Pyrolysis of Pine Cone with Synthetic Polymers*. Fuel. 89: 1911–1918.
- Bridgewater, T. (2006). *Biomass for Energy*. J Sci Food Agric, 86: 1755–1768.
- Bridgewater, A. V. (2012). *Review of Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading*. Biomassa and Energy, 38: 68-94.
- Caglar, A., dan Aydinli, B. (2009). *Isothermal Co-Pyrolysis of Hazelnut Shell and Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: The Effect of Temperature and Composition on the Amount of Pyrolysis Products*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 86 (2): 304–309.
- Cahyono, M. S. (2013). *Pengaruh Jenis Bahan pada Proses Pirolysis Sampah Organik menjadi Bio-Oil sebagai Sumber Energi Terbarukan*. Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan, 5 (2): 67-76.
- Chen, C., Jin, Y., Chi, Y. (2014a). *Effects of Moisture Content and Cao on Municipal Solid Waste Pyrolysis in a Fixed Bed Reactor*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 110: 108-112.
- Chen, D., Lijie, Y., Huan, Wang., Pinjing He. (2014b). *A Review: Pyrolysis Technologies For Municipal Solid Waste*. Journal Waste Management 34 (1): 2466–2486.
- Cunliffe, A.M dan William, P. T. (1998). *Composition of Oils Derived From the Batch Pyrolysis of Tyres*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 44: 131-152.
- Czernik, S dan Bridgewater, V. (2004). *Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil*. Energy Fuels, 18 (2): 590–598.
- Dahlan, E. N. (2007). *Analisis Kebutuhan Luasan Hutan Kota Sebagai Sink Gas CO₂ Antropogenik Dari Bahan Bakar Minyak dan Gas Di Kota Bogor Dengan Pendekatan Sistem*

- Dinamik*. Disertasi. Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor.
- Danarto, Y. C., Prasetyo, B. U, Ferry, S. (2010). *Pirolisis Limbah Serbuk Kayu dengan Katalisator Zeolit*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia. ISSN 1693 – 4393.
- Datta, A., A. Betterman, T.K. Kirk. (1981). *Identification of Specific Manganese Peroxidase Among Lignolytic Enzym Secreted by Phanerochaete Chrysosporium During Wood Decay*. Appl. Environ. Microbiol. 57: 1453 –1460
- Demirbas A. (2009). *Pyrolysis Mechanisms of Biomass Materials*. Energy Source Part A, 31: 1186–1193.
- Diebold JP. (2000). *A Review of the Chemical and Physical Mechanisms of The Storage Stability of Fast Pyrolysis Bio-Oils*. NREL/SR-570-27613; Colorado, USA.
- Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Surabaya. (2015). *DKP Surabaya Maksimalkan Kegiatan Potong Dahan Siang – Malam*. www.surabaya.tribunnews.com (diunduh 10 Agustus 2016).
- Di Blasi, C. (1996). *Kinetic and Heat Transfer Control in the Slow and Flash Pyrolysis of Solids*. Ind. Eng. Chem. Res. 35 (1): 37-46.
- Dumanauw, J. F. (1993). *Mengenal Kayu*. Kanisius, Yogyakarta.
- Encinar, J.M., Gonza´lez, J.F., Mart´nez, G., Roma´n, S. (2009). *Jerusalem artichoke Pyrolysis: Energetic Evaluation*. Journal Analytical and Applied Pyrolysis, 85: 294–300.
- Ermawati, R. (2011). *Konversi Limbah Plastik sebagai Sumber Energi Alternatif*. Jurnal Riset Industri, 5 (3): 257-263.
- Erol, M., Haykiri-Acma, H., Ku¨cu¨ kbayrak, S. (2010). *Calorific Value Estimation of Biomass from Their Proximate Analyses Data*. Renewable Energy 35: 170–173.
- Font, R., Marcilla, A., Garc´a, A.N., Caballero, J.A., Conesa, J.A. (1995a). *Kinetic Models for the Thermal Degradation of Heterogeneous Materials*. Journal Analytical and Applied Pyrolysis, 32: 29–39.
- Font, R., Marcilla, A., Garcia, A.N., Caballero, J.A., Conesa, J.A. (1995b). *Comparison Between The Pyrolysis Products Obtained From Different Organic Wastes At High*

- Temperatures*. Journal Analytical and Applied Pyrolysis, 32:41–49.
- Fu, P., Hu, S., Xiang, J., Sun, L., Su, S., An, S. (2012). *Study on the Gas Evolution and Char Structural Change during Pyrolysis of Cotton Stalk*. Journal Analytical and Applied Pyrolysis, 97: 130–136.
- Guillain M, Fairouz K, Mar SR, Monique F, Jacques LD. (2009). *Attrition-Free Pyrolysis to Produce Bio-Oil and Char*. Bioresour Technol, 100: 6069–6075.
- Haygreen, J. G., Bowyer, J. L., Schmulsky, R. (2003). *Forest Product and Wood Sciences an Intoduction*. Ames : IOWA State University Press.
- He, F., Yi, W.M., Bai, X.Y. (2006). *Investigation on Caloric Requirement of Biomass Pyrolysis Using TG–DSC Analyzer*. Energy Convers. Manage. 47: 2461–2469.
- Huhtinen, M. (2005). *Wood Energy Basic Information Pages, Wood As a Fuel*. <http://www.ncp.fi> (diunduh pada 7 Juli 2016).
- Islam, M.N., Joardder, M.U.H., Hoque, S.N., Uddin, M.S. (2013). *A Comparative Study on Pyrolysis for Liquid Oil from Different Biomass Solid Wastes*. 5th BSME Int. Conf. Therm. Eng 56: 643–649.
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Choudhury, A. A., Ashwath, N. (2012). *Biofuels Production through Biomass Pyrolysis-A Technological Review*. Energies 5: 4952-5001.
- Jakab E, Blazsó M, Faix O. (2001). *Thermal Decomposition of Mixtures of Vinyl Polymers and Lignocellulosic Materials*. J Anal Appl Pyrol, 58–59: 49–62.
- Jati, B. M. E dan Santoso, A.B. (2005). *Penentuan Kalor Bakar Arang dari Sejumlah Jenis Kayu dan Lama Pirolisis*. Jurnal Fisika Indonesia, 9 (28) : 165 – 174.
- Kumar S., Panda, A.K., dan Singh, R.K. (2011). *A Review on Tertiary Recycling of High-Density Polyethylene to Fuel*. Resources Conservation and Recycling, 55: 893-910.
- Lee, K. H., Jeon, S. G., Kim, K. H., Noh, N. S., Shin, D. H., Park, J., Seo, Y. H., Yee, J. J., Kim, G. T. (2003). *Thermal and Catalytic Degradation of Waste High-Density Polyethylene Using Spent FCC Catalyst*. Korean Journal of Chemical Engineering, 20 (4): 693-697.

- López A, de Marco I, Caballero BM, Laresgoiti MF, Adrados A. (2011). *Dechlorination of Fuels in Pyrolysis of PVC Containing Plastic Wastes*. Fuel Process Technol., 92 : 253–260.
- Luo, S.Y., Xiao, B., Hu, Z.Q., Liu, S.M. (2010a). *Effect of Particle Size on Pyrolysis of Single-Component Municipal Solid Waste in Fixed Bed Reactor*. Int. J. Hydrogen Energy 35: 93–97.
- Luo, S.Y., Xiao, B., Hu, Z.Q., Liu, S.M., Guan, Y.W., Cai, L. (2010b). *Influence of Particle Size on Pyrolysis and Gasification Performance of Municipal Solid Waste in a Fixed Bed Reactor*. Bioresource Technology, 101: 6517–6520.
- Malkow, T. (2004). *Novel and Innovative Pyrolysis and Gasification Technologies for Energy Efficient and Environmentally Sound MSW Disposal*. Waste Manage, 24: 53–79.
- Manggali, I. R. (2015). *Pengolahan Sampah Biomassa Padat Dan Plastik Dengan Konversi Thermal (Pirolisis)*. Tugas Akhir Teknik Lingkungan ITS.
- Martínez JD, Veses A, Mastral AM, Murillo R, Navarro MV, Puy N. (2014). *Co-pyrolysis of Biomass with Waste Tyres: Upgrading of Liquid Bio-Fuel*. Fuel Process Technol. 119: 263–271.
- Miller, S. J, Shah, N., Huffman, G. P. (2005). *Conversion of Waste Plastic to Lubricating Base Oil Energy*. Fuels 19 (4):1580–1586.
- Milne, T. (2002). *Pyrolysis: the Thermal Behaviour of Biomass Below 600°C (Chapter 5)*. In: Reed, T.B. (Ed.), Encyclopedia of Biomass Thermal Conversion, 3rd ed. Biomass Energy Foundation Press, pp. 11-96–131.
- Mohan D, Pittman CU, Steele PH. (2006). *Pyrolysis of Wood/biomass for Bio-oil: A Critical Review*. Energy Fuel, 20: 848–889.
- Mullen, C.A.; Boateng, A.A.; Goldberg, N.M.; Lima, I.M.; Laird, D.A.; Hicks, K.B. (2010). *Bio-oil and Biochar Production From Corn Cobs and Stover by Fast Pyrolysis*. Biomass and Bio-energy 34: 67-74
- Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., Gómez-Barea, A., (2011). *Characterization and Prediction of Biomass*

- Pyrolysis Products*. Prog. Energy Combust. Sci., 37: 611–630.
- Nikmah, L. dan Warmadewanthi, I.D.A.A. (2013). *Prediksi Potensi Pencemaran Pengolahan Sampah dengan Metode Gasifikasi Fluidized Bed (Studi Kasus: TPA Benowo, Surabaya)*. Jurnal Teknik POMITS 2 (1): 1-3.
- Noor, I. (2011). *Optimasi Suhu Operasi pada Produksi Bio-Oil dari Limbah Serbuk Gergaji Kayu Jati (Tectona Grandits Linn F)*. Tesis Teknologi Industri Kecil dan Menengah (TIKM) Magister Sistem Teknik (MST). <http://etd.repository.ugm.ac.id/> (diunduh 1 Agustus 2016).
- Önal E, Uzun BB, Pütün AE. (2014). *Bio-Oil Production via Co-Pyrolysis of Almond Shell as Biomass and High Density Polyethylene*. Energy Convers Manage, 78: 704–710.
- Ostojic, D.R., Ranjan, K.B., Holly, K., Jeannette, L., Yabei, Z. (2013). *Energizing Green Cities in Southeast Asia: Applying Sustainable Urban Energy and Emissions Planning*. World Bank Publications.
- Paradela F, Pinto F, Gulyurtlu I, Cabrita I, Lapa N. (2009). *Study of the Co-Pyrolysis of Biomass and Plastic Wastes*. Clean Technol Environ, 11: 115–122.
- Parihar MF, Kamil M, Goyal HB, Gupta AK, Bhatnagar AK. (2007) *An Experimental Study on Pyrolysis of Biomass*. Process Saf Environ Prot, 85: 458–465.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah No. 81 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*. Jakarta.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2012). *Undang-Undang Nomor 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah*. Jakarta.
- Prawirohatmodjo, S. (2004). *Sifat-sifat Fisika Kayu*. Bagian Penerbitan Fakultas Kehutanan UGM, Yogyakarta.
- Prayitno, T. A. (2007). *Pertumbuhan Pohon dan Kualitas Kayu*. Program Studi Ilmu Kehutanan. Fakultas Kehutanan UGM, Yogyakarta.
- Qiram, I., Denny, W., Widya, W. (2015). *Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Kuantitas Char Hasil Pirolysis Serbuk Kayu Mahoni (Switenia Macrophylla) Pada Rotary Kiln*. Jurnal Rekayasa Mesin, 6 (1): 39-44.

- Qu T, Guo W, Shen L, Xiao J, Zhao K. (2011). *Experimental Study of Biomass Pyrolysis based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose, and Lignin*. *Ind Eng Chem Res* 50: 10424–10433.
- Rachmawati, Q. (2015). *Pengolahan Sampah secara Pirolisis dengan Variasi Rasio Komposisi Sampah dan Jenis Plastik*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS.
- Raveendran, K, dan Anuradda, G. (1996). *Heating Value of Biomass and Biomass Pyrolysis Products*. *Fuel* 75: 1715-1720.
- Samanya J, Hornung A, Apfelbacher A, Vale P. (2012) *Characteristics of The Upper Phase of Bio-Oil Obtained from Co-Pyrolysis of Sewage Sludge With Wood, Rapeseed And Straw*. *J Anal Appl Pyrol*, 94: 120–125.
- Saffarzadeh, A., Shimaoka, T., Motomura, Y., Watanabe, K. (2006). *Chemical and Mineralogical Evaluation of Slag Products Derived from the Pyrolysis/Melting Treatment of MSW*. *Waste Manage*, 26: 1443–1452.
- Schaefer, W.D. (1975). *Disposing of Solid Wastes by Pyrolysis*. *Environmental Science Technology*, 9: 98–98.
- Sjostroom, E. (1993). *Wood Chemistry, Fundamentals and Applications 2nd*. Academic Press Inc., Orlando, USA.
- Sudradjat dan Salim. (1994). *Petunjuk Teknis Pembuatan Arang Aktif*. Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Bogor.
- Sun J-P, Sui S-J, Zhang Z-J, Tan S, Wang Q-W. (2013). *Study on the Pyrolytic Behavior of Wood-Plastic Composites using Py-GC/MS*. *BioResources*, 8: 6196–6210.
- Suranto, Y. (2006). *Bahan Ajar Kuliah Energi Biomassa*. Fakultas Kehutanan UGM, Yogyakarta.
- Suranto, Y. (2012). *Aspek Kualitas Kayu Dalam Konservasi dan Pemugaran Cagar Budaya Berbahan Kayu*. *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, 6 (1): 87-93.
- Surest, A. H., Mayang, S. R., Debby, P. (2013). *Pembuatan Asap Cair Dari Kayu Akasia Dan Uji Awal Kemampuannya Sebagai Bahan Bakar Cair*. *Jurnal Teknik Kimia*, 4 (19): 38-44.
- Surono, U. B. (2013). *Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak*. *Jurnal Teknik*, 3 (1): 32-40.

- Tomishige, K., Miyazawa, T., Asadullah, M., Ito, S.I., Kunimori, K., (2003). *Catalyst Development for Low Temperature Gasification of Biomass: Function of Char Removal in Fluidized Bed Reactor*. *Studies Surface Science and Catalysis*, 145: 307–310.
- USDA. (2004). *Wood Biomass for Energy*. Techline. Forest Products Laboratory. <http://www.fpl.fs.fed.us> (diunduh pada 10 Agustus 2016).
- Van de Velden, M., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B., Dewil, R. (2010). *Fundamentals, Kinetics and Endothermicity of the Biomass Pyrolysis Reaction*. *Renewable Energy*, 35: 232–242.
- Velghe, I., Carleer, R., Yperman, J., Schreurs, S. (2011). *Study of the Pyrolysis of Municipal Solid Waste for the Production of Valuable Products*. *Journal Analytical and Applied Pyrolysis*, 92: 366–375.
- Walikota Surabaya Provinsi Jawa Timur. (2014). *Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 19 Tahun 2014 tentang Perlindungan Pohon*. Surabaya.
- Walker J.C.F. (1993). *Dimensional Instability of Timbers*. Chapman & Hall, London.
- Wang, Z.H., Chen, D.Z., Song, X.D., Zhao, L. (2012). *Study on Combined Sewage Sludge Pyrolysis and Gasification Process: Mass & Energy Balance*. *Environmental Technology*, 33: 2481–2488.
- William, P. T. (2013). *Pyrolysis of Waste Tyres: A Review*. *Waste Management*, 33: 1714-1728.
- Wu, C.H., Chang, C.Y., Tseng, C.H., lin, J.P. (2003). *Pyrolysis Product Distribution of Waste Newspaper in MSW*. *Journal Analytical and Applied Pyrolysis*, 67: 41–53.
- Wu, W.M., Yan, J.H., Wen, J.M., Chi, Y., Cen, K.F. (2005). *Experimental Study on Mixed Pyrolysis Characteristics of Typical MSW Components*. *Environ. Sci. Technol*, 28: 21–22.
- Yi, R.J. (2007). *An Experimental Research on Catalytic Pyrolysis of Municipal Solid Waste*. Master thesis, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan: 32–36.
- Yusnaini dan Indah, R. (2014). *Produksi dan Kualitas Asap Cair dari Berbagai Jenis Bahan Baku*. Prosiding Seminar

- Nasional Penelitian dan PKM Sains, Teknologi dan Kesehatan, 4 (1): 253-260.
- Yu H, Zhang Z, Li Z, Chen D. (2014). *Characteristics of Tar Formation during Cellulose, Hemicellulose and Lignin Gasification*. Fuel 118: 250–256.
- Zeaiter, J. (2014). *A Process Study on the Pyrolysis of Waste Polyethylene*. Fuel, 133: 276–282.
- Zhang, H., Xiao, R., Huang, H., Xiao, G. (2009). *Comparison of Non-Catalytic and Catalytic Fast Pyrolysis of Corncob in a Fluidized Bed Reactor*. Bioresour. Technol., 100: 1428–1434.
- Zheng, J., Jin, Y.Q., Chi, Y., Wen, J.M., Jiang, X.G., Ni, M.J. (2009). *Pyrolysis Characteristics of Organic Components of Municipal Solid Waste at High Heating Rates*. Waste Manage, 29: 1089–1094.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A

Analisis Proximate

A. Kadar Air (SNI 13 – 3476 – 1994)

Prosedur :

1. Dilakukan penimbangan cawan porselen kosong
2. Cawan dipanaskan ke dalam oven 105° C selama 1 jam
3. Cawan dimasukkan ke dalam desikator selama 15 menit
4. Dilakukan penimbangan terhadap cawan menggunakan neraca analitik
5. Dilakukan penimbangan terhadap sampel dan cawan
6. Sampel dipanaskan ke dalam oven 105° C sampai beratnya tetap.
7. Sampel dimasukkan ke dalam desikator selama 15 menit
8. Dilakukan penimbangan terhadap cawan menggunakan neraca analitik

Perhitungan:

$$M_{ar} = \frac{(A-B)}{A} \times 100\%$$

Dimana

M_{ar} = kadar air dari batu bara

A = massa sampel yang digunakan

B = massa sampel setelah proses pengeringan

B. Kadar Abu (SNI 3478:2010)

Prosedur :

1. Cawan kosong dimasukkan ke dalam furnace bertemperatur 815 ± 10°C selama 15 menit, dinginkan dan kemudian timbang (sebagai bobot cawan kosong)
2. Timbang kurang lebih 1 gram contoh batu bara ke dalam cawan yang telah diketahui bobotnya.
3. Masukkan cawan yang berisi contoh tersebut ke dalam furnace pada suhu kamar, kemudian naikkah suhu furnace sampai ± 500°C dalam waktu 60 menit dan biarkan pada suhu tersebut selama 30 menit. Untuk contoh batu bara peringkat rendah, biarkan pada suhu ± 500°C sampai 60 menit.

4. Teruskan pemanasan dan naikan suhu furnace sampai $815 \pm 10^\circ\text{C}$ dan biarkan pada suhu ini selama 60 menit atay sampai semua contoh sempurna menjadi abu.
5. Angkat cawan dari dalam furnace, letakkan di atas lempengan logam selama kurang lebih dari 10 menit, kemudian masukkan ke dalam desikator.
6. Timbang cawan yang berisi abu tersebut
7. Hitung kadar abu

Perhitungan:

$$\% \text{ Abu} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\%$$

Dimana:

m_1 = massa cawan kosong (gram)

m_2 = massa cawan dan sampel (gram)

m_3 = massa cawan dan abu (gram)

geringan

C. Kadar Volatile Solid (SNI 13-3999-1995)

Prosedur :

1. Letakkan cawan dan tutupnya di atas piringan asbes dalam dudukan kawat baja, lalu panaskan pada suhu selama 7 menit
2. Angkat dudukan dan cawan dari dalam furnace lalu dinginkan di atas lempengan logam selama 5 menit, kemudian masukkan ke dalam desikator
3. Setelah dingin timbang cawan dan tutupnya
4. Timbang 1,000 gram sampel bau bara dalam cawan tersebut
5. Ratakan permukaan contoh dengan cara menggoyang-goyangkan cawan secara perlahan
6. Letakkan cawan dalam keadaan tertutup di atas dudukan
7. Masukkan dudukan tadi ke dalam muffle furnace, panaskan selama tepat 7 menit.
8. Angkat dudukan dari furnace,dinginkan di atas lempengan logam selama 5 menit dan dilanjutkan dalam desikator
9. Timbang cawan bila sudah dingin.

Perhitungan:

$$\% VS = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% - M_{ar}$$

Dimana:

m_1 = massa cawan kosong (gram)

m_2 = massa cawan dan sampel sebelum pemanasan (gram)

m_3 = massa cawan dan sampel setelah pemanasan (gram)

M_{ar} = kadar air dari batu bara

D. Kadar *Fixed Carbon* (SNI 13-3479-1994)

Kadar karbon padat (*fixed carbon*) contoh batu bara ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\%FC = 100 - (\%Kadar Air + \%Abu + \%Volatile Solid)$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN B

Pirolisis

A. Tahap Persiapan Bahan Baku

Bahan baku pirolisis yaitu sampah ranting dan kantong plastik HDPE dikeringkan hingga kadar airnya 8-10% (Bhattacharya *et al.*, 2009). Sampah kantong plastik (HDPE) dipotong menjadi berukuran 30x50 mm (Phan *et al.*, 2008) dan sampah ranting dipotong menjadi 10 cm (Cahyono, 2013).

B. Tahap Pirolisis

1. Mempersiapkan alat pirolisis
2. Memasukkan sampel sampah
3. Merangkai alat-alat pirolisis, agar alat terpasang dengan baik
4. Menghidupkan alat dengan sesuai dengan temperatur yang ditentukan
5. Mematikan reaktor sesuai dengan waktu yang ditentukan
6. Mendinginkan reaktor dan mengeluarkan produk pirolisis
7. Mengulang langkah 1 – 7 untuk variabel jenis ranting serta komposisi ranting dan kantong plastik HDPE.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C

Analisis Kandungan Komponen Lignoselulosa dengan Fraksinasi Sequensial Berdasarkan Metode Chesson (Datta,1981)

1. Reflux 1 gram sampel selama 2 jam dengan 150 mL H₂O pada suhu 100°C.
2. Residu sampel yang telah dikeringkan direflux selama 2 jam dengan 150 ml 0,5 M H₂SO₄ pada suhu 100°C
3. Residu sampel yang telah dikeringkan direndam dalam 10 mL 72% (v/v) H₂SO₄ pada suhu kamar selama 4 jam, kemudian diencerkan menjadi 0,5 M H₂SO₄, dan direflux pada suhu 100°C selama 2 jam
4. Residu sampel yang telah dikeringkan kemudian diabukan dengan furnace pada suhu 575±25°C hingga beratnya konstan.

Perhitungan kandungan komponen lignoselulosa adalah sebagai berikut:

$$\text{Hot Water Soluble (HWS)(\%)} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{Hemiselulosa (\%)} = \frac{b-c}{a} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{Selulosa (\%)} = \frac{c-d}{a} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{Lignin (\%)} = \frac{d-e}{a} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{Abu (\%)} = \frac{e}{a} \times 100\% \quad (10)$$

dimana:

a = *Oven dry weight* awal sampel biomassa lignoselulosa

b = *Oven dry weight* residu sampel direflux dengan air panas

c = *Oven dry weight* residu sampel setelah direflux dengan 0,5 M H₂SO₄

d = *Oven dry weight* residu sampel setelah diperlakukan dengan 72% H₂SO₄ dan kemudian diencerkan menjadi 4% H₂SO₄

e = Abu dari residu sampel.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”.

LAMPIRAN D

Hasil Penelitian Laboratorium

Tabel D.1 Analisis Kadar Air Bahan Baku Pirolisis

No	Jenis bahan	Massa cawan kosong (gram)	Massa cawan dan sampel (gram)	Massa sampel (gram)	Massa cawan setelah oven (gram)	Massa sampel setelah oven (gram)	Kadar air (%)
1	Ranting Angsana Basah	83,12	88,18	5,07	87,18	4,07	19,70
2	Ranting Angsana Kering	76,92	80,64	3,73	80,18	3,26	12,52
3	Ranting Trembesi Basah	79,36	82,30	2,94	81,69	2,33	20,90
4	Ranting Trembesi Kering	79,97	82,87	2,90	82,51	2,54	12,27
5	Ranting Waru Basah	79,36	84,46	5,10	83,53	4,17	18,33
6	Ranting Waru Kering	80,53	84,28	3,75	83,85	3,31	11,71
7	Kantong Plastik HDPE	80,77	83,21	2,44	83,20	2,44	0,13

Tabel D.2 Analisis Kadar Abu Bahan Baku Pirolisis

No	Jenis sampel	Massa cawan kosong (gram)	Massa cawan dan sampel (gram)	Massa sampel (gram)	Massa cawan setelah furnace 750°C (gram)	Massa sampel setelah 750°C (gram)	Kadar abu (%)
1	Ranting Angsana Basah	77,86	78,87	1,01	77,99	0,13	12,60
2	Ranting Angsana Kering	80,14	81,23	1,09	80,25	0,11	10,02
3	Ranting Trembesi Basah	81,35	82,41	1,06	81,47	0,12	11,54
4	Ranting Trembesi Kering	78,24	79,27	1,04	78,33	0,09	8,96
5	Ranting Waru Basah	77,34	78,36	1,01	77,46	0,11	11,34
6	Ranting Waru Kering	79,64	80,69	1,04	77,61	0,09	8,40
7	Kantong Plastik HDPE	79,35	80,36	1,02	79,38	0,04	3,60

Tabel D.3 Analisis Kadar *Volatile Solid* dan *Fixed Carbon* Bahan Baku Pirolisis

No	Jenis sampel	Massa cawan kosong (gram)	Massa cawan dan sampel (gram)	Massa sampel (gram)	Cawan setelah furnace 950°C (gram)	Massa sampel setelah furnace 950°C (gram)	Kehilangan massa (gram)	<i>Volatile solid</i> (%)	<i>Fixed Carbon</i> (%)
1	A Basah	79,48	80,58	1,10	79,52	0,04	96,42	76,72	1,54
2	A Kering	81,35	82,48	1,13	81,38	0,03	97,38	84,86	0,00
3	T Basah	79,92	80,97	1,05	79,97	0,04	95,78	74,87	1,60
4	T Kering	79,55	80,59	1,03	79,58	0,03	97,35	85,08	1,24
5	W Basah	77,99	79,02	1,03	78,04	0,06	94,58	76,25	1,55
6	W Kering	84,23	85,25	1,02	84,26	0,05	95,09	85,34	1,06
7	HDPE	81,69	82,73	1,04	81,79	0,10	89,99	89,86	7,90

Tabel D.4 Keseimbangan Massa Bahan Pirolisis

Bahan	Massa Bahan (g)	Massa Produk (g)			Persentase Produk (%)			Total (%)
		Arang atau Wax	Cair	Gas	Arang atau Wax	Cair	Gas	
A	100,10	38,50	34,91	13,80	38,46	34,87	13,79	87,12
T	100,20	33,50	33,93	23,80	33,47	33,89	23,78	91,14
W	100,10	34,40	38,11	18,80	34,37	38,08	18,78	91,22
P	100,00	81,00	7,23	7,50	81,00	7,23	7,50	95,73
A/P 25:75	100,00	69,93	12,18	2,38	69,93	12,18	2,38	84,48
A/P 50:50	100,20	56,00	19,18	4,70	55,89	19,14	4,69	79,72
A/P 75:25	100,00	45,54	23,06	4,64	45,54	23,06	4,64	73,25
T/P 25:75	100,10	32,80	47,35	3,68	64,06	16,05	3,67	83,78
T/P 50:50	100,10	61,35	19,45	2,65	61,29	19,43	2,65	83,37
T/P 75:25	100,80	59,40	21,49	6,20	58,93	21,32	6,15	86,40
W/P 25:75	100,10	70,73	9,52	1,60	70,67	9,51	1,60	81,78
W/P 50:50	100,10	58,95	15,55	0,35	58,92	15,54	0,35	74,81
W/P 75:25	100,10	45,28	19,95	13,79	45,28	19,95	13,79	79,02

Tabel D.5 Analisis Kadar Air Produk Arang Pirolisis

No	Jenis sampel	Massa cawan kosong (gram)	Massa cawan dan sampel (gram)	Massa sampel (gram)	Massa cawan setelah oven (gram)	Massa sampel setelah oven (gram)	Kadar air (%)
1	A	79,15	84,17	5,03	84,02	4,87	3,13
2	T	79,16	84,20	5,04	84,01	4,86	3,66
3	W	81,26	86,30	5,04	86,22	4,96	1,56
4	P	78,62	83,97	5,35	83,97	5,35	0,05
5	A/P 25:75	77,30	82,63	5,33	82,60	5,30	0,56
6	A/P 50:50	79,08	84,28	5,21	84,25	5,17	0,76
7	A/P 75:25	80,25	85,26	5,01	85,22	4,97	0,81
8	T/P 25:75	85,92	91,05	5,13	90,93	5,01	2,31
9	T/P 50:50	77,52	82,58	5,06	82,51	4,99	1,38
10	T/P 75:25	80,94	86,09	5,15	86,03	5,09	1,13
11	W/P 25:75	81,67	86,74	5,07	86,72	5,05	0,42
12	W/P 50:50	80,21	85,25	5,04	85,22	5,02	0,50
13	W/P 75:25	80,03	85,06	5,03	84,97	4,95	1,72

Tabel D.6 Analisis Kadar Abu Produk Arang Pirolisis

No	Jenis sampel	Massa cawan kosong (gram)	Massa cawan dan sampel (gram)	Massa sampel (gram)	Massa cawan setelah furnace 750°C (gram)	Massa sampel setelah 750°C (gram)	Kadar abu (%)
1	A	78,32	79,35	1,04	78,40	0,08	8,06
2	T	81,12	82,29	1,18	81,20	0,08	7,19
3	W	81,82	82,86	1,04	81,90	0,08	7,66
4	P	79,83	80,89	1,06	79,85	0,02	1,64
5	A/P 25:75	80,45	81,55	1,10	80,53	0,08	6,89
6	A/P 50:50	80,68	81,71	1,03	80,76	0,08	7,52
7	A/P 75:25	78,09	79,16	1,06	78,15	0,06	5,61
8	T/P 25:75	79,41	80,55	1,14	79,50	0,10	8,46
9	T/P 50:50	80,25	81,45	1,20	80,33	0,08	6,83
10	T/P 75:25	80,89	82,08	1,19	80,96	0,07	5,74
11	W/P 25:75	81,62	82,67	1,05	81,68	0,05	5,24
12	W/P 50:50	81,85	82,85	1,01	81,91	0,07	6,78
13	W/P 75:25	77,09	78,17	1,08	77,17	0,08	7,75

Tabel D.7 Analisis Kadar *Volatile Solid* Produk Arang Pirolisis

No	Jenis bahan	Massa cawan kosong (gram)	Massa cawan dan sampel (gram)	Massa sampel (gram)	Cawan setelah furnace 950°C (gram)	Massa sampel setelah furnace 950°C (gram)	Kehilangan massa (gram)	<i>Volatile solid</i> (%)	<i>Fixed Carbon</i> (%)
1	A	80,79	81,85	1,06	81,03	0,24	76,99	73,86	14,95
2	T	83,18	84,24	1,06	83,46	0,28	73,25	69,59	19,56
3	W	77,65	78,66	1,01	77,93	0,28	72,34	70,78	20,01
4	P	76,87	78,15	1,28	76,94	0,07	94,48	94,43	3,88
5	A/P 25:75	81,87	82,95	1,08	82,00	0,13	88,03	87,47	5,09
6	A/P 50:50	79,77	80,81	1,04	80,26	0,49	52,78	52,03	39,70
7	A/P 75:25	82,40	83,41	1,00	82,70	0,30	70,37	69,56	24,02
8	T/P 25:75	80,42	81,53	1,11	81,13	0,71	35,46	33,15	56,07
9	T/P 50:50	79,90	80,81	0,92	80,26	0,37	60,10	58,71	33,08
10	T/P 75:25	79,55	80,70	1,15	80,13	0,58	49,77	48,64	44,49
11	W/P 25:75	79,08	80,49	1,41	79,37	0,29	79,50	79,09	15,26
12	W/P 50:50	78,14	79,33	1,18	78,48	0,33	71,87	71,37	21,35
13	W/P 75:25	81,76	82,88	1,12	82,29	0,53	53,02	51,31	39,23

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN E

Dokumentasi Penelitian

A. Persapan Bahan Baku Pirolysis

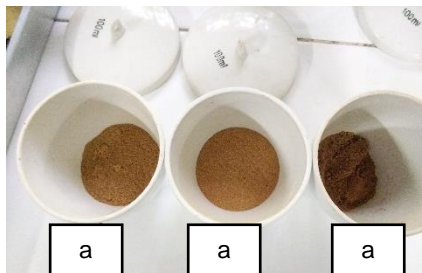


Ranting Angsana yang
Telah Dipotong 10 cm



Ranting Trembesi yang
Telah Dipotong 10 cm

B. Analisis Lignoselulosa



Serbuk Ranting (a) Waru; (b) Angsana, (c) Trembesi



Reflux Sampel



Penyaringan Residu Sampel

C. Proses Pirolisis Pendahuluan



Bahan Baku Diletakkan di Cawan Crucible



Arang Hasil Penelitian Pirolisis Pendahuluan

C. Proses Pirolisis Utama



Reaktor Pirolisis

D. Produk Arang



Arang Ranting Trembesi



Arang Ranting Waru



Wax Plastik HDPE



Arang S/P 25:75



Arang S/P 50:50



Arang S/P 75:25



Arang T/P 25:75



Arang T/P 50:50



Arang T/P 75:25



Arang W/P 25:75

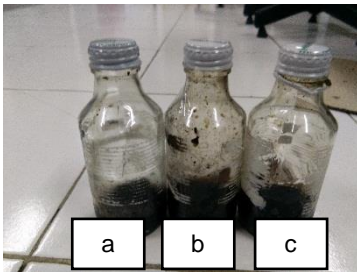


Arang W/P 50:50

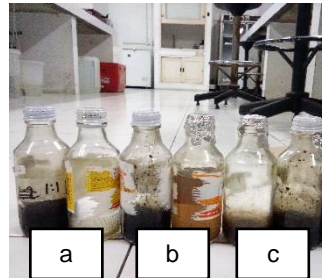


Arang W/P 75:25

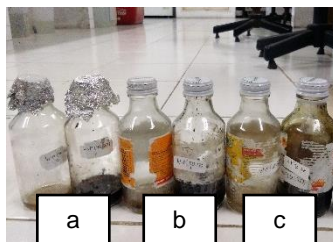
E. Produk Minyak



Minyak Pirolisis (a) Plastik
HDPE; (b) Waru; (c)
Angsana



Minyak Co-pyrolysis (a)
A/P 25:75; (b) A/P 50:50;
(c) A/P 75:25



Minyak Co-pyrolysis (a)
W/P 25:75; (b) W/P 50:50;
(c) W/P 75:25

LAMPIRAN F

Analisis One Way Anova dengan SPSS 16

A. Prosedur Analisis

1. Buka tab *variable view* dan buat 3 variabel dengan ketentuan sebagai berikut
2. Buka tab *data view*, lakukan pengisian data
3. Pilih menu Analyze, Compare Means, One Way ANOVA. Masukkan “arang”, “minyak”, “gas” ke kotak *dependent variable*, sedangkan “bahan” masuk ke kotak *factors*.
4. Klik Post Hoc, masukkan “rasio” ke kotak Post Hoc Tests, dipilih “Turkey
5. Klik Options, pilih kotak Descriptive Statistics dan Homogeneity test, klik continue, klik OK
6. Lakukan prosedur yang sama untuk menentukan pengaruh variabel “rasio” terhadap “produk arang, minyak dan gas pirolisis”.

B. Hasil Analisis One Way ANOVA Jenis Bahan terhadap Produk Arang/Wax, Minyak dan Gas

Tabel F.1 Descriptive

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
Arang	Angsana	5	58.1640	17.41196	7.78687	36.5442	79.7838	38.46	81.00
	Trembesi	5	59.7500	17.05741	7.62831	38.5704	80.9296	33.47	81.00
	Waru	5	58.0680	18.74708	8.38395	34.7904	81.3456	34.47	81.00
	Total	15	58.6607	16.45613	4.24896	49.5476	67.7738	33.47	81.00
Minyak	Angsana	5	19.2960	10.64151	4.75903	6.0828	32.5092	7.23	34.87
	Trembesi	5	19.5840	9.65414	4.31746	7.5968	31.5712	7.23	33.89
	Waru	5	18.0620	12.25882	5.48231	2.8407	33.2833	7.23	38.08
	Total	15	18.9807	10.11868	2.61263	13.3771	24.5842	7.23	38.08
Gas	Angsana	5	6.6000	4.41033	1.97236	1.1238	12.0762	2.38	13.79
	Trembesi	5	8.7500	8.62032	3.85513	-1.9535	19.4535	2.65	23.78
	Waru	5	8.4040	7.88430	3.52587	-1.3857	18.1937	.35	18.78
	Total	15	7.9180	6.74548	1.74167	4.1825	11.6535	.35	23.78

Tabel F.2 Test Homogeneity of Variances

	Lavene Statistic	df1	df2	Sig
Arang	0,198	2	12	0,823.
Minyak	0,154	2	12	0,859
Gas	0,897	2	12	0,433

Tabel F.3 ANOVA

		Type II Sum of Squares	df	Mean Squares	F	Sig.
Arang	Between Groups	8,923	2	4,461	0,14	0,986
	Within Groups	3782,338	12	315,195		
	Total	3791,261	4			
Minyak	Between Groups	6,537	2	3,268	0,027	0,973
	Within Groups	1426,891	12	118,908		
	Total	1433,428	4			
Gas	Between Groups	13,328	2	6,664	0,128	0,981
	Within Groups	623,693	12	51,974		
	Total	637,021	4			

Tabel F.4 Multiple Comparison

Tukey HSD

Dependent Variable	(i) Bahan	(j) Bahan	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Arang	Angsana	Trembesi	-1.58600	11.22844	.989	-31.5420	28.3700
		Waru	.09600	11.22844	1.000	-29.8600	30.0520
	Trembesi	Angsana	1.58600	11.22844	.989	-28.3700	31.5420
		Waru	1.68200	11.22844	.988	-28.2740	31.6380
	Waru	Angsana	-.09600	11.22844	1.000	-30.0520	29.8600
		Trembesi	-1.68200	11.22844	.988	-31.6380	28.2740
Minyak	Angsana	Trembesi	-.28800	6.89660	.999	-18.6872	18.1112
		Waru	1.23400	6.89660	.983	-17.1652	19.6332
	Trembesi	Angsana	.28800	6.89660	.999	-18.1112	18.6872
		Waru	1.52200	6.89660	.974	-16.8772	19.9212
	Waru	Angsana	-1.23400	6.89660	.983	-19.6332	17.1652
		Trembesi	-1.52200	6.89660	.974	-19.9212	16.8772
Gas	Angsana	Trembesi	-2.15000	4.55958	.886	-14.3143	10.0143
		Waru	-1.80400	4.55958	.918	-13.9683	10.3603
	Trembesi	Angsana	2.15000	4.55958	.886	-10.0143	14.3143
		Waru	.34600	4.55958	.997	-11.8183	12.5103
	Waru	Angsana	1.80400	4.55958	.918	-10.3603	13.9683
		Trembesi	-.34600	4.55958	.997	-12.5103	11.8183

Tabel F.5 Homogeneous Arang
Turkey HSD

Bahan	N	Subset for alpha = 0,05
		1
Waru	5	58,0680
Angsana	5	58,1640
Trembesi	5	59,700
Sig		0,988

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,000

Tabel F.6 Homogeneous Minyak
Turkey HSD

Bahan	N	Subset for alpha = 0,05
		1
Waru	5	18,0620
Angsana	5	19,2960
Trembesi	5	19,5840
Sig		0,974

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,000

Tabel F.7 Homogeneous Gas
Turkey HSD

Bahan	N	Subset for alpha = 0,05
		1
Angsana	5	6,6000
Waru	5	8,4040
Trembesi	5	8,7500
Sig		0,886

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,000

B. Hasil Analisis One Way ANOVA Rasio Bahan Baku terhadap Produk Arang/Wax, Minyak dan Gas

Tabel F.1 Descriptive

		Descriptives							
		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
Arang	0:100	3	81.0000	.00000	.00000	81.0000	81.0000	81.00	81.00
	25:75	3	68.2200	3.62162	2.09094	59.2234	77.2166	64.06	70.67
	50:50	3	58.7000	2.70671	1.56272	51.9761	65.4239	55.89	61.29
	75:25	3	49.9167	7.80686	4.50729	30.5234	69.3100	45.28	58.93
	100:0	3	35.4667	2.64008	1.52425	28.9083	42.0250	33.47	38.46
	Total	15	58.6607	16.45613	4.24896	49.5476	67.7738	33.47	81.00
Minyak	0:100	3	7.2300	.00000	.00000	7.2300	7.2300	7.23	7.23
	25:75	3	12.5800	3.28830	1.89850	4.4114	20.7486	9.51	16.05
	50:50	3	18.0367	2.16703	1.25114	12.6535	23.4199	15.54	19.43
	75:25	3	21.4433	1.56866	.89990	17.5714	25.3153	19.95	23.06
	100:0	3	35.6133	2.19167	1.26536	30.1689	41.0578	33.89	38.08
	Total	15	18.9807	10.11868	2.61263	13.3771	24.5842	7.23	38.08
Gas	0:100	3	7.5000	.00000	.00000	7.5000	7.5000	7.50	7.50
	25:75	3	2.5500	1.04542	.60357	-.0470	5.1470	1.60	3.67
	50:50	3	2.5633	2.17130	1.25360	-2.8305	7.9571	.35	4.69
	75:25	3	8.1933	4.90531	2.83208	-3.9921	20.3788	4.64	13.79
	100:0	3	18.7833	4.99500	2.88387	6.3751	31.1916	13.79	23.78
	Total	15	7.9180	6.74548	1.74167	4.1825	11.6535	.35	23.78

Tabel F.2 Test Homogeneity of Variances

	Lavene Statistic	df1	df2	Sig
Arang	6,328	4	10	0,008
Minyak	2,371	4	10	0,122
Gas	2,988	4	10	0,073

Tabel F.3 ANOVA

		Type II Sum of Squares	df	Mean Squares	F	Sig
Arang	Between Groups	3614,542	4	903,836	51,134	0,000
	Within Groups	176,719	10	17,672		
	Total	3791,261	14			
Minyak	Between Groups	1387,944	4	346,986	76,288	0,000
	Within Groups	45,484	10	4,548		
	Total					

	Total	1433,428				
Gas	Between Groups	527,382	4	131,845	12,025	0,001
	Within Groups	109,639	10	10,984		
	Total	637,021	14			

Tabel F.4 Multiple Comparison

Tukey HSD

Dependent Variable	(I) Rasio	(J) Rasio	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Arang	0:100	25:75	12.78000'	3.43238	.026	1.4837	24.0763
		50:50	22.30000'	3.43238	.001	11.0037	33.5963
		75:25	31.08333'	3.43238	.000	19.7871	42.3796
		100:0	45.53333'	3.43238	.000	34.2371	56.8296
	25:75	0:100	-12.78000'	3.43238	.026	-24.0763	-1.4837
		50:50	9.52000	3.43238	.111	-1.7763	20.8163
		75:25	18.30333'	3.43238	.002	7.0071	29.5996
		100:0	32.75333'	3.43238	.000	21.4571	44.0496
	50:50	0:100	-22.30000'	3.43238	.001	-33.5963	-11.0037
		25:75	-9.52000	3.43238	.111	-20.8163	1.7763
		75:25	8.78333	3.43238	.153	-2.5129	20.0796
		100:0	23.23333'	3.43238	.000	11.9371	34.5296
	75:25	0:100	-31.08333'	3.43238	.000	-42.3796	-19.7871
		25:75	-18.30333'	3.43238	.002	-29.5996	-7.0071
		50:50	-8.78333	3.43238	.153	-20.0796	2.5129
		100:0	14.45000'	3.43238	.012	3.1537	25.7463
	100:0	0:100	-45.53333'	3.43238	.000	-56.8296	-34.2371
		25:75	-32.75333'	3.43238	.000	-44.0496	-21.4571
		50:50	-23.23333'	3.43238	.000	-34.5296	-11.9371
		75:25	-14.45000'	3.43238	.012	-25.7463	-3.1537

Minyak	0:100	25:75	-5.35000	1.74133	.070	-11.0809	.3809	
		50:50	-10.80667	1.74133	.001	-16.5375	-5.0758	
		75:25	-14.21333	1.74133	.000	-19.9442	-8.4825	
		100:0	-28.38333	1.74133	.000	-34.1142	-22.6525	
		25:75	0:100	5.35000	1.74133	.070	-.3809	11.0809
	25:75	50:50	-5.45667	1.74133	.064	-11.1875	.2742	
		75:25	-8.86333	1.74133	.003	-14.5942	-3.1325	
		100:0	-23.03333	1.74133	.000	-28.7642	-17.3025	
		50:50	0:100	10.80667	1.74133	.001	5.0758	16.5375
		25:75	5.45667	1.74133	.064	-.2742	11.1875	
	50:50	75:25	-3.40667	1.74133	.351	-9.1375	2.3242	
		100:0	-17.57667	1.74133	.000	-23.3075	-11.8458	
		75:25	0:100	14.21333	1.74133	.000	8.4825	19.9442
		25:75	8.86333	1.74133	.003	3.1325	14.5942	
		50:50	3.40667	1.74133	.351	-2.3242	9.1375	
	75:25	100:0	-14.17000	1.74133	.000	-19.9009	-8.4391	
		100:0	0:100	28.38333	1.74133	.000	22.6525	34.1142
		25:75	23.03333	1.74133	.000	17.3025	28.7642	
		50:50	17.57667	1.74133	.000	11.8458	23.3075	
		75:25	14.17000	1.74133	.000	8.4391	19.9009	
Gas	0:100	25:75	4.95000	2.70357	.409	-3.9477	13.8477	
		50:50	4.93667	2.70357	.411	-3.9610	13.8343	
		75:25	-.69333	2.70357	.999	-9.5910	8.2043	
		100:0	-11.28333	2.70357	.013	-20.1810	-2.3857	
		25:75	0:100	-4.95000	2.70357	.409	-13.8477	3.9477
	25:75	50:50	-.01333	2.70357	1.000	-8.9110	8.8843	
		75:25	-5.64333	2.70357	.296	-14.5410	3.2543	
		100:0	-16.23333	2.70357	.001	-25.1310	-7.3357	
		50:50	0:100	-4.93667	2.70357	.411	-13.8343	3.9610
		25:75	.01333	2.70357	1.000	-8.8843	8.9110	
	50:50	75:25	-5.63000	2.70357	.298	-14.5277	3.2677	
		100:0	-16.22000	2.70357	.001	-25.1177	-7.3223	
		75:25	0:100	.69333	2.70357	.999	-8.2043	9.5910
		25:75	5.64333	2.70357	.296	-3.2543	14.5410	
		50:50	5.63000	2.70357	.298	-3.2677	14.5277	
	75:25	100:0	-10.59000	2.70357	.019	-19.4877	-1.6923	
		100:0	0:100	11.28333	2.70357	.013	2.3857	20.1810
		25:75	16.23333	2.70357	.001	7.3357	25.1310	
		50:50	16.22000	2.70357	.001	7.3223	25.1177	
		75:25	10.59000	2.70357	.019	1.6923	19.4877	

Tabel F.5 Homogeneous Arang
Turkey HSD

Bahan	N	Subset for alpha = 0,05			
		1	2	3	4
100:0	3	35,4667			
75:25	3		49,9167		
50:50	3		58,7000	58,7000	
25:75	3			68,2200	
0:100	3				81,000
Sig		1,000	0,153	0,111	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Tabel F.6 Homogeneous Minyak
Turkey HSD

Bahan	N	Subset for alpha = 0,05			
		1	2	3	4
100:0	3	7,2300			
75:25	3	12,5800	12,5800		
50:50	3		18,0367	18,0367	
25:75	3			21,4433	
0:100	3				35,6133
Sig		0,070	0,064	0,351	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Tabel F.7 Homogeneous Gas
Turkey HSD

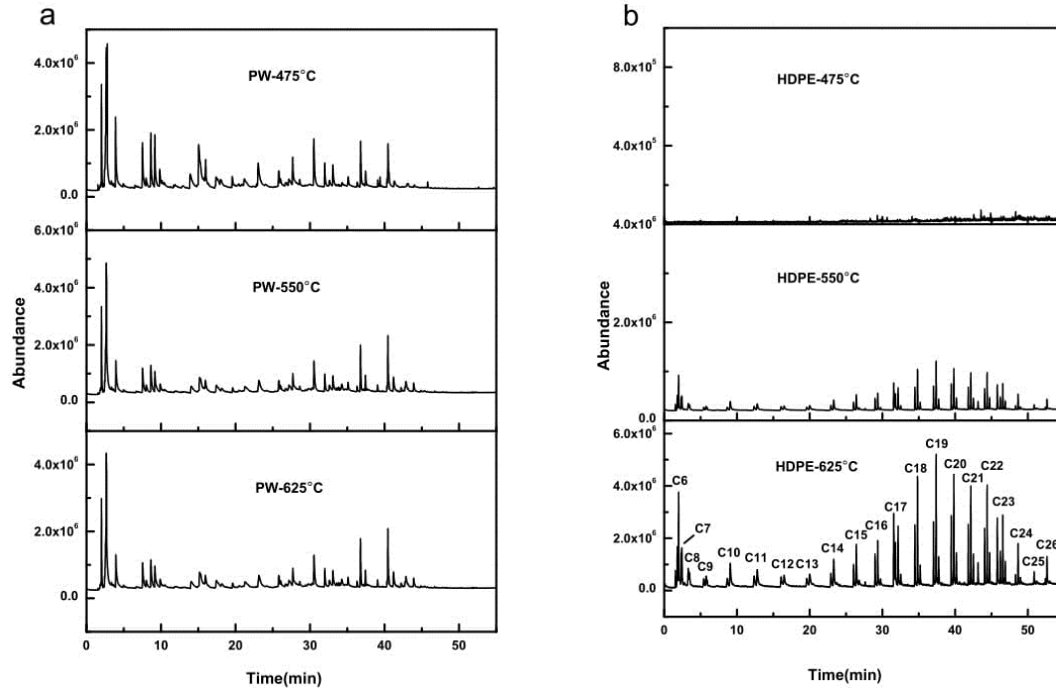
Bahan	N	Subset for alpha = 0,05	
		1	2
100:0	3	2,5500	
75:25	3	2,5633	
50:50	3	7,500	
25:75	3	8,1933	
0:100	3		18,7833
Sig		0,296	1,000

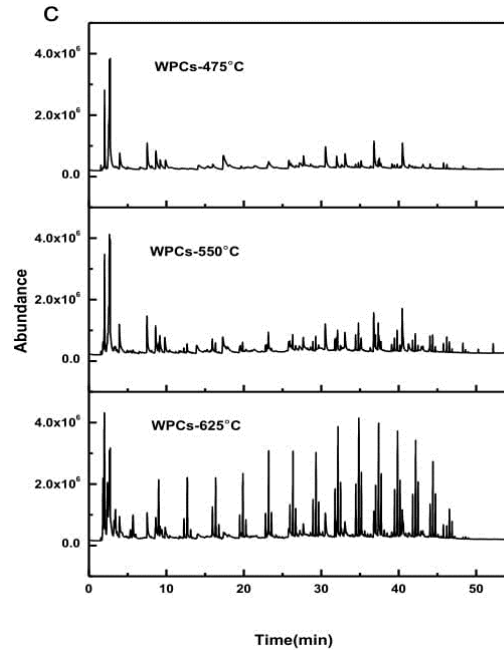
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN G

Referensi Kromatogram GC-MS Produk Minyak Pirolysis Biomassa dan *Co-Pyrolysis* Biomassa-Plastik





Gambar G.1 Kromatografi GC/MS dari minyak pirolisis bahan
(a) Kayu polar; (b) HDPE; (c) Poplar-HDPE.
Sumber: Sun *et al.* (2013)

Tabel G.1 Referensi Identifikasi Senyawa dalam Minyak Pirolisis pada Suhu 475°C, 550°C, 625°C

Kelompok	Senyawa Kimia	Rumus Kimia	Peak Area (%)		
			475°C	550°C	625°C
Anhydrosugars			6,01	4,40	-
	1,4:3,6-Dianhydro-alpha-d-glucopyranose	C ₆ H ₈ O ₄	0,48	0,33	-
	2,3-Anhydro-d-mannosan	C ₆ H ₈ O ₄	0,76	0,47	-
Aldehydes	levoglucosan	C ₆ H ₁₀ O ₅	4,77	3,60	-
	Acetaldehyde, hydroxy-	C ₂ H ₄ O ₂	9,09	3,19	5,77
	2-Butenal, 2-methyl-	C ₅ H ₈ O	5,20	1,10	5,16
	Butanedial	C ₄ H ₆ O ₂	0,89	0,11	-
Ketones			3,00	1,98	0,61
			14,02	11,17	4,10
	Acetone	C ₃ H ₆ O	6,01	5,20	2,71
	2-Propanone, 1-hydroxy-	C ₃ H ₆ O ₂	4,55	3,76	1,16
	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O	0,30	-	0,13
Furans	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy	C ₅ H ₆ O ₂	2,11	1,58	0,10
	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl	C ₆ H ₈ O ₂	1,05	0,63	-
			3,80	4,09	0,85
	Furan	C ₄ H ₄ O	0,40	-	-
Furans	Furan, 2-methyl-	C ₅ H ₆ O	0,16	-	-
	Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	2,06	1,63	0,85
	2(5H)-Furaone	C ₄ H ₄ O ₂	0,89	1,13	-
	2-Fuarancarbo				
	Xaldehyde,5-(hydroxymethyl)	C ₆ H ₆ O ₃	0,29	1,33	-

Kelompok	Senyawa Kimia	Rumus Kima	Peak Area (%)		
			475°C	550°C	625°C
Acids			17,28	15,22	3,69
	Acetic Acid	C ₂ H ₄ O ₂	17,28	13,83	3,69
Phenols	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	-	0,61	-
			24,87	25,62	5,77
	Phenol	C ₆ H ₆ O	4,58	2,10	-
	Phenol,3-methyl-	C ₇ H ₈ O	-	0,05	-
	Guaiacol	C ₇ H ₈ O ₂	1,23	1,15	0,31
	2,3-Dihydroxybenzaldehyde	C ₇ H ₆ O ₃	-	0,14	-
	p-Methylguaiacol	C ₈ H ₁₀ O ₂	1,05	0,85	0,22
	1,2-Benzenediol	C ₆ H ₆ O ₂	-	0,46	-
	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃	-	1,28	-
	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₃	1,66	1,33	0,53
	Hydroquinone	C ₆ H ₆ O ₂	-	0,31	-
	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	0,42	0,98	0,20
	Syringol	C ₈ H ₁₀ O ₃	4,51	2,06	1,51
	3-allyl-6-methoxyphenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	-	0,21	-
	1,2,3-Benzenetriol	C ₆ H ₆ O ₃	-	1,03	-
	Isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1,52	1,34	0,56
	Vanilin	C ₈ H ₈ O ₃	0,68	1,12	0,32
Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy	C ₈ H ₈ O ₄	1,97	1,47	-	
Phenol, 2-methoxy-4-propyl	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	0,50	0,54	-	

Kelompok	Senyawa Kimia	Rumus Kimia	Peak Area (%)		
			475°C	550°C	625°C
	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)	C ₉ H ₁₀ O ₃	0,90	0,39	-
	Benzoic acid, 4-hydroxy	C ₇ H ₆ O ₃			-
	3-Hydroxy-4-methoxycinnamic acid	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	1,36	2,35	-
	Methoxy eugenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	2,57	0,66	0,22
	Syringaldehyde	C ₉ H ₁₀ O ₄	0,51	2,38	1,67
	4-Hydroxy-2-methoxycinnamaldehyde	C ₁₀ H ₁₀ O ₃	0,51	1,57	0,13
	Acetosyringone	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	0,73	1,03	-
	3,5-Dimethoxy-4-hydroxycinnamaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	0,17	0,66	0,10
Hydrocarbon			3,22	0,16	-
	1-Pentene	C ₅ H ₁₀	-	25,35	64,80
	Pentane	C ₅ H ₁₂	-	0,83	1,73
	1-Hexane	C ₆ H ₁₂	-	6,42	-
	Heptane	C ₇ H ₁₆	-	-	6,28
	1-Heptene	C ₇ H ₁₄	-	0,51	-
	Octane	C ₈ H ₁₈	-	-	3,31
	1-Octene	C ₈ H ₁₆	-	0,17	0,89
	Nonane	C ₉ H ₂₀	-	-	1,63
	1-Nonene	C ₉ H ₁₈	-	-	0,52
	1,8-Nonadiene	C ₉ H ₁₆	-	-	1,33
	1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	-	-	0,24
	1,9-Decadiene	C ₁₀ H ₁₈	-	0,91	2,52
	Undecane	C ₁₁ H ₂₄	-	-	0,40
	1-Undecane	C ₁₁ H ₂₂	-	0,34	0,74
	1,10-Undecadiene	C ₁₁ H ₂₀	-	0,56	2,16
	Dodecane	C ₁₂ H ₂₆	-	-	0,34

Kelompok	Senyawa Kimia	Rumus Kima	Peak Area (%)		
			475°C	550°C	625°C
	1-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	-	-	1,05
	1,11-Dodecadiene	C ₁₂ H ₂₂	-	0,54	1,57
	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	-	-	0,37
	1-Tridecane	C ₁₃ H ₂₆	-	-	0,57
	1,12-Tridecadiene	C ₁₃ H ₂₄	-	0,50	1,64
	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	-	-	0,44
	1-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	-	0,33	0,61
	1,13-Tetradecadiene	C ₁₄ H ₂₆	-	1,61	2,56
	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	-	-	0,60
	1-Pentadecane	C ₁₅ H ₃₀	-	0,55	0,84
	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	-	0,93	2,27
	1-Hexadecane	C ₁₆ H ₃₂	-	0,43	0,91
	1,15-Hexadecadiene	C ₁₆ H ₃₀	-	0,60	2,13
	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	-	-	0,78
	1-Heptadecane	C ₁₇ H ₃₄	0,38	0,52	1,17
	Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	0,23	0,94	3,04
	1-Octadecane	C ₁₈ H ₃₆	0,36	0,72	1,20
	Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	0,63	1,16	3,39
	1-Nonadecane	C ₁₉ H ₃₈	0,56	-	1,30
	Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	0,33	1,24	3,56
	1-Eicosane	C ₂₀ H ₄₀	-	0,80	1,25
	1,19-Eicosane	C ₂₁ H ₄₄	0,17	1,06	2,88
	Heneicosane	C ₂₁ H ₄₂	-	0,30	1,38
	1-Heneicosane	C ₂₂ H ₄₆	-	0,46	0,96
	Docosane	C ₂₂ H ₄₄	0,56	0,71	2,43
	1-Docosane	C ₂₂ H ₄₂	-	0,79	0,88
	1,21-Docosadiene	C ₂₂ H ₄₂	-	0,72	1,96
	1-Tricosane	C ₂₃ H ₄₀	-	0,23	0,97

Sumber: Sun *et al.* (2013)

Tabel G.2 Identifikasi Senyawa dalam Minyak Pirolisis dan Co-pyrolisis

RT (min)	Senyawa Kimia	Pine/HDPE 50:50		Pine	
		Area (%)	Wt (%)	Area (%)	Wt (%)
1,76	1-Hydroxy-2-propanone	1,96		2,65	
2,11	Formic acid, 1-Methylethyl ester	0,37		0	
2,33	Isopropylacetate	0,61		0,68	
4,21	Furfural	0,59	0,04	0,88	0,09
4,86	2-Furanmethanol	0,15	0,11	2,3	0,16
6,42	2-Methyl-2-Cyclopenten-1-one	0,09	0,07	0,31	0,07
6,70	2-(5H)-Furanone	0,90	0,42	0,78	0,5
7,17	2-Hydroxy-2-Cyclopenten-1-one	0,92		1,52	
8,36	5-Methyl-2-furancarboxaldehyde	0,31	0,08	0,28	0,04
8,39	3-Methyl-2-cyclopenten-1-one	0,58	0,09	1,56	0,47
9,29	Phenol	1,57	0,46	2,64	0,57
10,60	3-Methyl-1,2-cyclopentanedione	1,06	0,38	1,23	0,47
11,65	2-Methylphenol	0,48	0,21	1,62	0,25
12,36	3-Methylphenol	1,22	0,38	3,03	0,49
12,50	2-Methoxyphenol	0,92	0,22	1,52	0,19
12,65	1-Undecene	1,6		0	
13,03	2,6-Dimethylphenol	0,13	0,02	0,12	0,02
14,52	2,4-Dimethylphenol	1,06	0,17	2,02	0,22
15,13	3-Ethylphenol	0,36	0,06	0,51	0,09
15,28	2,3-Dimethylphenol	0,07	0,02	2,02	0,03
15,30	Napthalene	1,6	0,24	2,67	0,06
15,71	2-Methoxy-4-methylphenol	2,99	0,33	2,74	0,31
15,97	Dodecane	0,45	0,26	0	
16,28	1,2-Benzenediol (Catechol)	1,63	1,36	4,30	1,29
16,84	5-(Hydroxymethyl furfural)	0,31		1,06	0,21

RT (min)	Senyawa Kimia	<i>Pine</i> /HDPE 50:50		<i>Pine</i>	
		Area (%)	Wt (%)	Area (%)	Wt (%)
17,14	3,4,5-Trimethylfurfural	0,35		0	
18,17	4-Ethyl-2-methoxyphenol	0,82	0,09	1,06	0,08
18,59	1-Tridecene	1,57		0	
18,70	3-Methyl-1,2-benzenediol	2,37	0,92	1,38	0,85
18,80	4-Methyl-1,2-benzenediol	2,48	0,31	4,15	0,32
19,14	2-Methyl-4-vinylphenol	1,17		1,51	
20,32	Eugenol	0,62	0,11	1,64	0,11
20,55	2-Methoxy-4-propylphenol	0,18	0,02		0,03
21,28	1-Tetradecene	2,49		0	
21,45	Vanilin	1,02	0,14	0,11	0,10
21,48	Tetradecane	0,93	0,54	0	
21,64	Cis-isoeugenol	0,33	0,57	0,89	0,60
21,83	3,4-Dimethylbenzoic acid	0,07	0,04	0,11	0,04
22,68	Trans-isoeugenol	2,13	2,36	2,68	2,14
22,71	2-Methoxy-4-(1-propenyl)phenol	2,49		3,11	
23,81	1-Pentadecene	2,04		0	
23,53	Levoglucosan	0,98	1,29	12,7	0,41
23,64	Acetovanillone	0,61	0,11	1,65	0,08
24,00	Pentadecane	0,46	0,19	0	
24,73	1-(4-Hydroxy-3-methoxy)-2-propanone	4,77		0	
26,20	1-Hexadecane	1,86		0	
26,38	Hexadecane	0,62	0,33	0	
28,46	1-Nonadecane	1,69		0	
28,62	Heptadecane	0,56	0,16	0	
30,76	2-Methyl-dodecane	0,71		0	
32,67	1-Nonadecene	1,66		0	

RT (min)	Senyawa Kimia	<i>Pine</i> /HDPE 50:50		<i>Pine</i>	
		Area (%)	Wt (%)	Area (%)	Wt (%)
32,79	Nonadecene	0,51		0	
37,45	Oleic acid	0,94	0,32	1,09	0,36
41,72	Tetracosane	0,44	0,14	0	

Sumber: Bhattacharya *et al.* (2009)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN H HASIL ANALISIS LABORATORIUM

**BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR**




REPORT

Certificate of Analysis

No : 06579/KI/IV-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Hhs. TL ITS Surabaya
 Sample Name : Kayu - Arang
 Test : Selulosa-Liqnin-Kalori
 Sample Brand :
 Sample Identity : Padatan
 Sample Accepted : 5 April 2017


Chemical laboratory test result is :

Kode	Selulosa, %	H. Selulosa, %	Liqnin, %	Kalori, kal/kg
Tromboni	36,88	17,60	2,86	
Waru	42,70	21,80	3,18	
Sono	39,45	19,08	3,44	
Arang				2871,50
Kayu Tromb				2194,60

Surabaya, 11 April 2017
 Head of Chemical Laboratory Researcher

 M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
 Surabaya

Gambar H.1 Hasil Analisis Lignoselulosa di BPKI

	KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM) FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM LABORATORIUM KIMIA Jalan Semarang 5, Malang 65145 Telepon: 0341-562180 Laman: www.um.ac.id	FPO 5.10-1
	FORMULIR Tgl. Terbit / Revisi : 8 Maret 2017	JUDUL LAPORAN HASIL PENGUJIAN Halaman : 1-1 File : Eka Kristalia Kuryani

Nomor : 006/UN.32.3.7.3/LT/2017
 Nama Pemilik : Eka Kristalia Kuryani
 NIM : 3313100038
 Alamat Pemilik : Jl. Arief Rahman Hakim Gg Makam, No. 1
 Jenis contoh : Padatan dan Cair
 Kondisi khusus dari contoh : tidak ada
 Metode Uji : Bomb Kalorimeter
 Tanggal terima contoh uji : 27 Februari 2017
 Tanggal pengujian : 7 Maret 2017
 Hasil Pengujian : Kadar Kalor

No	Kode Sampel	Kadar Kalor (kal/gram)	Keterangan
1	Arang Kayu Trembesi	7,348	• Sampel No. 3 pembakarannya tidak sempurna (ada sebagian zat yang tak terbakar).
2	Kayu Trembesi	5,078	
3	Larutan Arang Trembesi	43	

Malang, 7 Maret 2017
 Kepala Laboratorium Kimia,

Dr. H. Yudhi Utomo, M. Si
NIP 196705011996031002

Gambar H.2 Hasil Analisis Nilai Kalor A di Departemen Kimia UNM

	KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM) FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM LABORATORIUM KIMIA Jalan Semarang 5, Malang 65145 Telepon: 0341- 562180 Laman: www.um.ac.id	FPO 5.10-1
	FORMULIR	
LAPORAN HASIL PENGUJIAN		Halaman : 1-1 File : Eka Kristalia K.

Nomor : 009/UN.32.3.7.3/LT/2017
 Nama Pemilik : Eka Kristalia Kuryani
 NIM : 3313100038
 Alamat Pemilik : Jl. Arief Rahman Hakim Gg Makam, No. 1
 Jenis contoh : Padatan
 Tanggal terima contoh uji : 13 April 2017
 Tanggal pengujian : 18 April 2017
 Metode Uji : Bomb Kalorimeter
 Hasil Pengujian : Kadar Kalor

No	Kode Sampel	Kadar Kalor (kal/gram)	Keterangan
1	Sono (A)	6.606	
2	Waru (B)	7.444	
3	Plastik (C)	11.845	
4	S/P 25:75 (D)	10.762	
5	S/P 50:50 (E)	8.339	
6	S/P 75:25 (F)	8.357	
7	G T/P 25:75 (I)	7.203	
8	T/P 50:50 (H)	10.586	
9	T/P 75:25 (I)	9.912	
10	W/P 25:75 (J)	10.283	
11	W/P 50:50 (K)	10.135	
12	W/P 75:25 (L)	9.907	
13	X Sono	5.115	
14	Y Waru	5.051	
15	Z Plastik	11.440	
16	Sono A	34	

18 April 2017
Kepala Laboratorium Kimia,

Dr. Yudi Utomo, M. Si
NIP-196705011996031002

Gambar H.3 Hasil Analisis Nilai Kalor B di Departemen Kimia UNM

C:\GCMSsolution\Data\Project\1\HP\1\Eka Kristalia Pirolysis Minyak
Trembes001.qgd

3/20/2017

Lab Kimia Organik FMIPA - UGM

GCMS-QP2010S SHIMADZU
Kolom : AGILENT HP 1
Panjang : 30 meter
ID : 0,25 mm
Film : 0,25 um
Gas pembawa : Helium
Pengionan : EI
70 Ev

Method

[Comment]

==== Analytical Line 1 =====

[GC-2010]

Column Oven Temp. : 50.0 °C
Injection Temp. : 310.00 °C
Injection Mode : Split
Flow Control Mode : Pressure
Pressure : 12.0 kPa
Total Flow : 29.8 mL/min
Column Flow : 0.54 mL/min
Linear Velocity : 26.6 cm/sec
Purge Flow : 3.0 mL/min
Split Ratio : 49.0
High Pressure Injection : OFF
Carrier Gas Saver : OFF
Splitter Hold : OFF

Oven Temp. Program	Temperature(°C)	Hold Time(min)
Rate		
-	50.0	5.00
5.00	280.0	19.00

< Ready Check Heat Unit >

Column Oven : Yes
SPL1 : Yes
MS : No

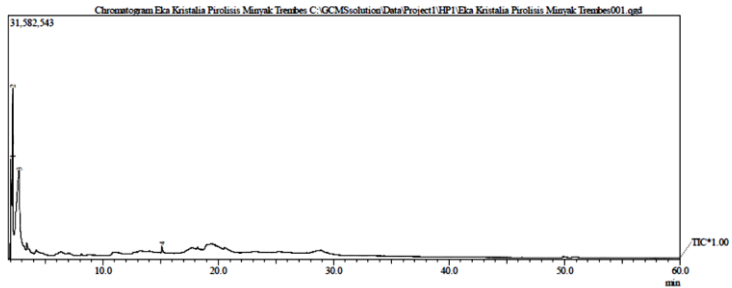
Gambar H.4 Detail Alat GC-MS di Departemen Kimia UGM



Lab. Kimia Organik FMIPA-UGM

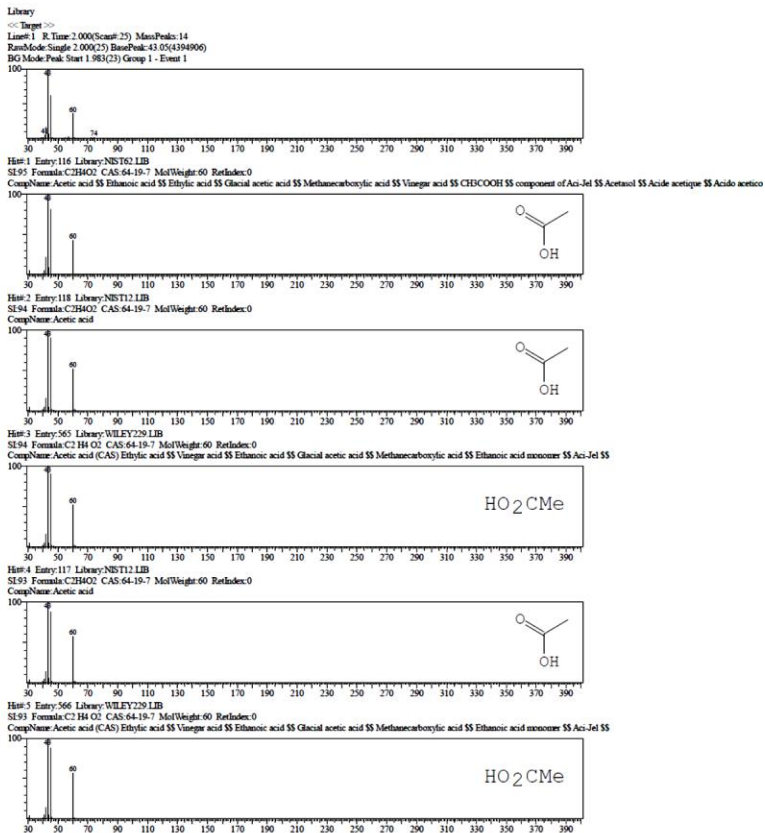
Sample Information

Analyzed by : Admin
Sample Name : Eka Kristalia Pirolysis Minyak Trembesi
Sample ID :
Data File : C:\GCMSolution\Data\Project1\HP1\Eka Kristalia Pirolysis Minyak Trembesi001.gdt
Method File : C:\GCMSolution\Data\Project1\HP1\brocma HP1.gm
Tuning File : C:\GCMSolution\System1\Tune1\DECEMBER 16 2016.gdt



Peak#	R. Time	I. Time	F. Time	Peak Report TIC		
				Area	Area%	Height
1	2.001	1.983	2.108	69308723	15.58	12973086
2	2.170	2.108	2.258	109752520	24.67	21977237
3	2.753	2.258	3.342	260299751	58.51	10793845
4	15.110	14.992	15.325	5531841	1.24	945640
				444892855	100.00	46689608

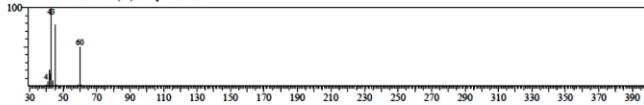
Gambar H.5 Kromatogram GC-MS Minyak Hasil Pirolysis Trembesi



Gambar H.6 *Library* Senyawa Peak 1 Minyak Hasil Pirolisis Trembesi

<< Target >>

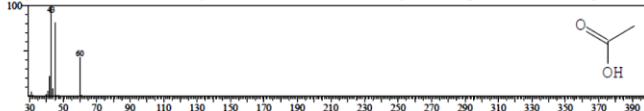
Line#2 R_Time:2.167(Scan#45) MassPeak:10
RawMode:Single 2.167(45) BasePeak:43.00(4679053)
BG Mode:Peak Start 2.108(38) Group 1 - Event 1



Hit#1 Entry:116 Library:NIST62.LIB

SI:98 Formula:C2H4O2 CAS:64-19-7 MolWeight:60 RetIndex:0

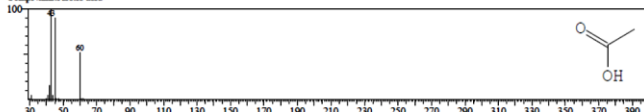
CompName:Acetic acid \$\$ Ethanoic acid \$\$ Ethylic acid \$\$ Glacial acetic acid \$\$ Methanecarboxylic acid \$\$ Vinegar acid \$\$ CH3COOH \$\$ component of Aci-Jel \$\$ Acetasol \$\$ Acide acetique \$\$ Acido acetico



Hit#2 Entry:118 Library:NIST12.LIB

SI:98 Formula:C2H4O2 CAS:64-19-7 MolWeight:60 RetIndex:0

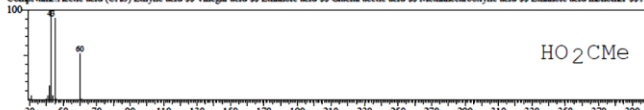
CompName:Acetic acid



Hit#3 Entry:565 Library:WILEY229.LIB

SI:98 Formula:C2H4O2 CAS:64-19-7 MolWeight:60 RetIndex:0

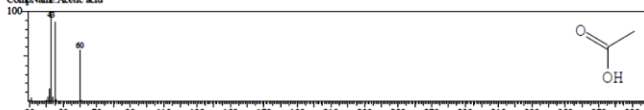
CompName:Acetic acid (CAS) Ethylic acid \$\$ Vinegar acid \$\$ Ethanoic acid \$\$ Glacial acetic acid \$\$ Methanecarboxylic acid \$\$ Ethanoic acid monomer \$\$ Aci-Jel \$\$



Hit#4 Entry:117 Library:NIST12.LIB

SI:97 Formula:C2H4O2 CAS:64-19-7 MolWeight:60 RetIndex:0

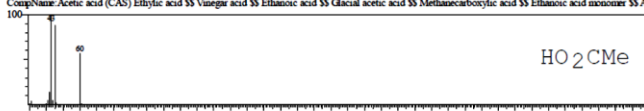
CompName:Acetic acid



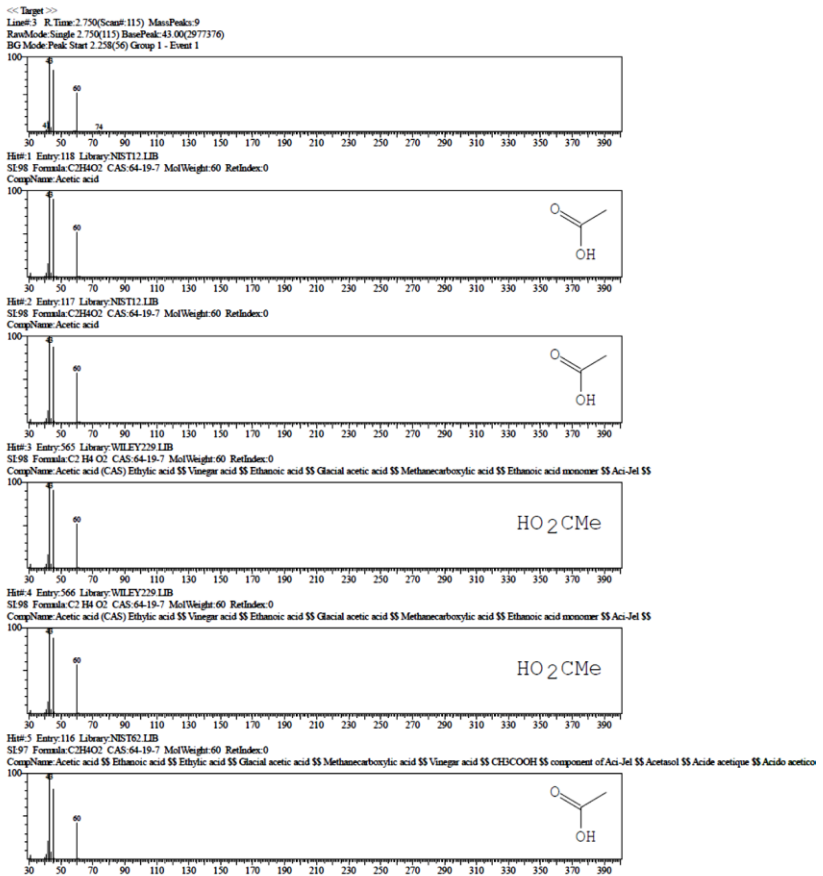
Hit#5 Entry:566 Library:WILEY229.LIB

SI:97 Formula:C2H4O2 CAS:64-19-7 MolWeight:60 RetIndex:0

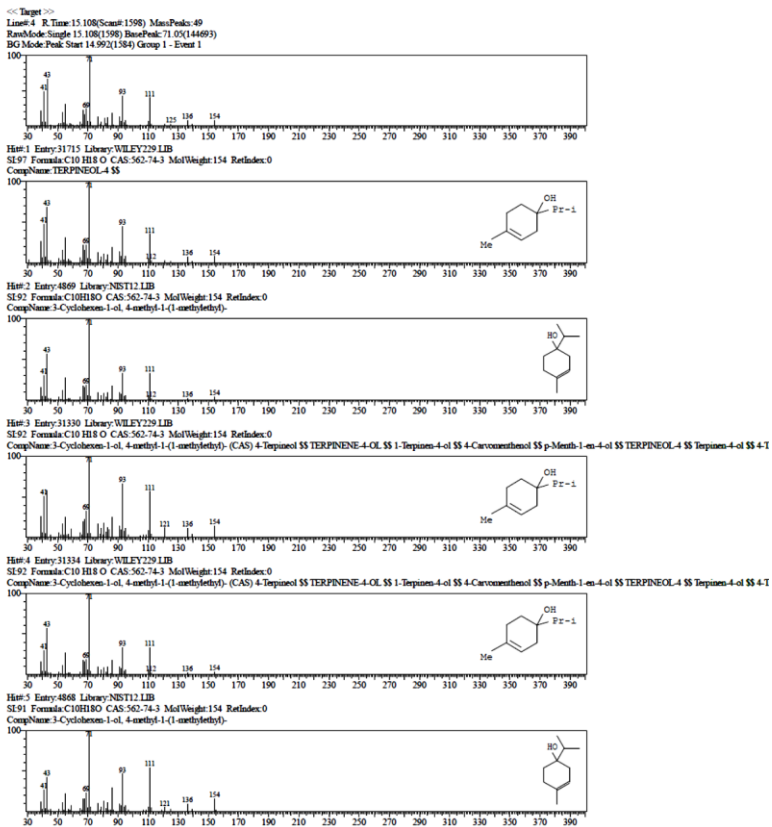
CompName:Acetic acid (CAS) Ethylic acid \$\$ Vinegar acid \$\$ Ethanoic acid \$\$ Glacial acetic acid \$\$ Methanecarboxylic acid \$\$ Ethanoic acid monomer \$\$ Aci-Jel \$\$



Gambar H.7 Library Senyawa Peak 2 Minyak Hasil Pirolysis Trembesi



Gambar H.8 *Library Senyawa Peak 3* Minyak Hasil Pirolisis Trembesi



Gambar H.9 Library Senyawa Peak 4 Minyak Hasil Pirolysis Trembesi

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Eka Kristalia Kuryani, lahir di Kota Probolinggo, 1 November 1994. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal diantaranya SMA Negeri 1 Kota Probolinggo, kemudian melanjutkan kuliah di Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif berorganisasi sebagai staff Kementerian Inovasi Karya di Badan Eksekutif Mahasiswa ITS (2014 – 2015), kepala bidang keilmiahan Departemen Riset dan Teknologi di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan ITS (2015 – 2016), dan pernah menjadi asisten dosen mata kuliah Wawasan dan Teknologi Ilmiah (2016). Menulis ilmiah adalah salah satu minat dari penulis. Penulis pernah menjadi juara 3 dalam *Water Innovation Technology Competition* yang diselenggarakan UII (2014), penyaji PKM-GT tingkat nasional (2015), dan meraih pendanaan Program Kreativitas Mahasiswa (2014-2016). Penulis juga mengembangkan prestasi di kancah internasional dengan mengikuti *Asia Pacific Youth Parliament for Water* di Korea Selatan (2014), *International Student Energy Summit* di Bali (2014), dan *Tomsk State University Winter IT School* di Tomsk, Rusia (2016). Segala kritik dan saran yang membangun dapat dikirimkan melalui e-mail ekakristalia@gmail.com.