



TUGAS AKHIR – RE 141324

**PENGOLAHAN SAMPAH SECARA PIROLISIS
DENGAN VARIASI RASIO KOMPOSISI SAMPAH
DAN JENIS PLASTIK**

**QONITA RACHMAWATI
3311100117**

Dosen Pembimbing
Welly Herumurti S.T., M.Sc

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



TUGAS AKHIR – RE 141324

**PYROLYSIS OF SOLID WASTE WITH VARIATION
OF BIOMASS COMPOSITION AND TYPE OF
PLASTIC**

**QONITA RACHMAWATI
3311100117**

Supervisor
Welly Herumurti S.T., M.Sc

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGOLAHAN SAMPAH SECARA PIROLISIS
DENGAN VARIASI RASIO KOMPOSISI SAMPAH DAN
JENIS PLASTIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana
Pada
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
QONITA RACHMAWATI
NRP 3311 100 117

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Welly Herumurti S.T., M.Sc.
NIP. 19811223 2006041 001

SURABAYA, JANUARI 2015



ABSTRAK

PENGOLAHAN SAMPAH SECARA PIROLISIS DENGAN VARIASI RASIO KOMPOSISI SAMPAH DAN JENIS PLASTIK

Nama Mahasiswa : Qonita Rachmawati
NRP : 3311 100 117
Jurusan : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Welly Herumurti, ST.,M.Sc.

Pada tahun 2012, sampah yang dihasilkan sebesar 1200 ton/hari. Jika permasalahan sampah di Kota Surabaya tidak ditangani dengan baik maka akan menimbulkan beberapa masalah antara lain: masalah kesehatan dan masalah kebersihan. Oleh karena itu, diperlukan metode yang dapat mengolah sampah namun tidak menimbulkan masalah baru lainnya. Salah satu metode pengolahan sampah yang telah dikembangkan, yaitu metode pirolisis. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh jenis plastik dan komposisi terhadap produk hasil pirolisis.

Pada penelitian ini digunakan reaktor dengan kapasitas 500 g yang berbahan *stainless steel*. Variabel yang digunakan yaitu jenis sampah plastik dan komposisi sampah. Jenis sampah yang digunakan yaitu sampah plastik HDPE (*High Density Polyethylene*), PET (*Poly Ethylene Terephthalate*), dan PS (*Poly Styrene*). Komposisi sampah yang digunakan antara lain: 100:0, 75:25, dan 50:50. Temperatur yang digunakan pada reaktor yaitu 500°C dengan waktu 30 menit. Penelitian dimulai dari persiapan bahan uji, persiapan reaktor, percobaan pendahuluan, dan penelitian dengan reaktor pirolisis. Selanjutnya dilakukan analisis untuk masing-masing hasil produk.

Penelitian ini jenis sampah plastik yang menghasilkan gas tertinggi yaitu jenis plastik PET sebesar 45,40% dan jenis plastik yang menghasilkan wax tertinggi yaitu jenis plastik HDPE sebesar 69,91%. Sedangkan komposisi yang menghasilkan gas tertinggi yaitu komposisi dengan ranting 25% dan PET 75%

sebesar 71,24% dan komposisi yang menghasilkan wax tertinggi yaitu komposisi dengan ranting 25% dan PS 75% sebesar 61,36%.

Kata Kunci: gas, komposisi, minyak, padatan, pirolisis, plastik.



ABSTRACT

PYROLYSIS OF SOLID WASTE WITH VARIATION OF BIOMASS COMPOSITION AND TYPE OF PLASTIC

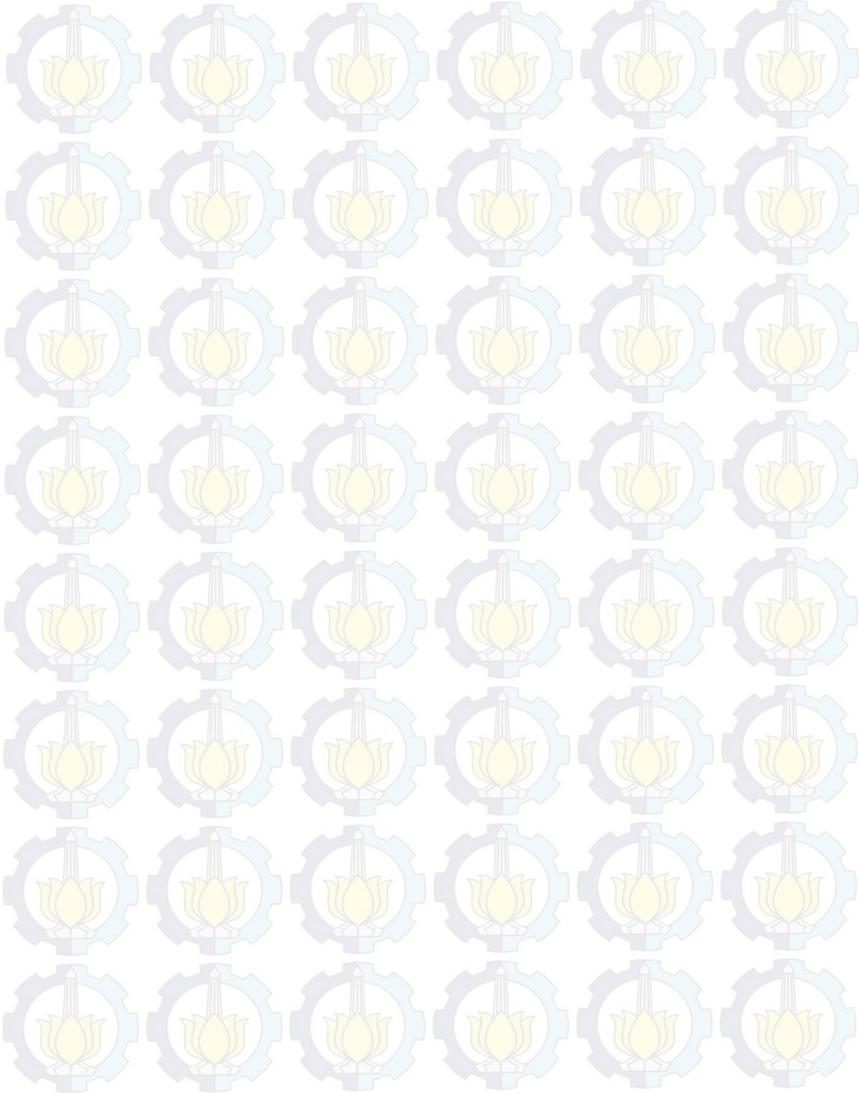
Name of student : Qonita Rachmawati
ID Number : 3311 100 117
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Welly Herumurti, ST.,M.Sc.

In 2012, solid waste generate was 1200 tonnes/day. If the solid waste problem in Surabaya is not handled properly, it will cause some problems such as; health, hygiene, and environmental problems. Therefore, a method reduce of solid waste treatment is required but does not create new problems. One method of solid waste treatment had been developed was pyrolysis. The aims of this study was to determine the influence of composition and plastic type of the pyrolysis products.

This study used a reactor with 500 g of capacity that was made from stainless steel. The variables were the type of plastic wastes and waste compositions. Variable of solid wastes were HDPE (High Density Polyethylene), PET (Poly Ethylene Terephthalate), PS (Poly Styrene) and wood. Variable of solid waste composition were 100: 0, 75:25, and 50:50. The temperature applied in the reactor was 500°C and operate in 30 minutes. The research was preparation of test material, preparation of reactor, preliminary experiments, and research with the pyrolysis reactor. Further, proximate analysis were conducted for each product results.

Based on the research, the highest gas of 45,40% was produced from PET, whereas the highest wax of 69,91% was produced from HDPE. Furthermore, the highest gas of 71,24% and the highest wax of 61,36% were produced from solid waste compositions of wood 25% : PET 75% and wood 25% : PET 75% respectively.

Keywords: char, composition, gas, plastic, pyrolysis, wax.



KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Penelitian yang berjudul ***“Pengolahan Sampah Secara Pirolisis dengan Variasi Rasio Komposisi Sampah dan Jenis Plastik”***.

1. Bapak Welly Herumurti ST., M.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberi ilmu, masukan, dan pengarahan dalam membimbing tugas akhir.
2. Ibu Prof. Dr Yulinah Trihadiningrum M.App.Sc selaku dosen penguji dan dosen yang telah memberikan ide serta masukan terhadap penelitian tugas akhir.
3. Ibu Dr . Ir. Ellina Pandebesie MT., selaku dosen penguji yang memberikan masukan dan saran terhadap perbaikan tugas akhir.
4. Ketua Jurusan Teknik Lingkungan dan Sekretariat Jurusan Teknik Lingkungan ITS yang telah memfasilitasi pelaksanaan tugas akhir.
5. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Lingkungan ITS yang telah memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis.
6. Keluarga yang selalu memberi doa dan dukungan.
7. Teman-teman Teknik Lingkungan ITS 2011, 2012, dan 2013 atas kerja sama dan dukungannya.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya.

Surabaya, Januari 2014
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Ruang Lingkup.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Karakteristik dan Komposisi Sampah Kota Surabaya.....	5
2.1.1 Komposisi Sampah Kecamatan Gubeng.....	5
2.2 Pengolahan Sampah.....	6
2.3 Metode Pirolisis.....	7
2.4 Pengolahan Sampah dengan Pirolisis.....	7
2.4.1 Asap Cair dari Pirolisis.....	10
2.4.2 Gas dari Pirolisis.....	11
2.4.3 Char/residu dari Pirolisis.....	12
2.5 Faktor-faktor Operasi Pirolisis.....	12
2.5.1 Temperatur.....	13
2.5.2 Waktu Tinggal Uap.....	13
2.5.3 Ukuran Partikel.....	13
2.5.4 Pengaruh Jenis Bahan.....	14
2.5.5 Pengaruh Kelembapan Jenis Bahan.....	14
2.6 Pengaruh Jenis Plastik.....	15
2.6.1 Plastik HDPE.....	15
2.6.2 Plastik PET.....	16
2.6.3 Plastik PS.....	16
2.7 Rumus Reaktor Bejana.....	20
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Umum.....	21
3.2 Kerangka Penelitian.....	21
3.3 Persiapan Penelitian.....	23
3.4 Analisis Karakteristik Sampah.....	25
3.5 Persiapan Alat Laboratorium.....	25
3.6 Persiapan Bahan Uji.....	26

3.7 Penelitian Tahap 1.....	26
3.8 Penelitian Tahap 2.....	27
3.9 Analisis dan Pembahasan.....	28
3.10 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.11 Kesimpulan.....	28
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Analisis Karakteristik Awal Fisik Sampah.....	29
4.2 Persiapan Bahan Uji.....	33
4.3 Percobaan Pendahuluan.....	33
4.4 Penelitian Pirolisis Bahan Plastik	38
4.5 Penelitian Pirolisis Variasi Komposisi Ranting dan Plastik ...	47
4.6 Karakteristik Fisik Sampel Setelah Pirolisis	53
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	60



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Sampah Kecamatan Gubeng	6
Tabel 2.2 Produk dari Pirolisis.....	9
Tabel 2.3 Pengaruh Temperatur terhadap Produk Pirolisis	17
Tabel 2.4 Lanjutan Pengaruh Temperatur terhadap Produk Pirolisis	18
Tabel 2.6 Lanjutan Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Produk Pirolisis	19
Tabel 3.1 Pengukuran Densitas Jenis Plastik.....	26
Tabel 3.2 Variabel Penelitian	27
Tabel 4.1 Hasil Analisis Karakteristik Jenis Sampah	31
Tabel 4.2 Penelitian Pirolisis Jenis Plastik dan Komposisi	51
Tabel 4.3 Penelitian Pirolisis Jenis Plastik Massa 500 g	52

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Status Lingkungan Hidup Daerah (SLHD) Kota Surabaya (2013), volume sampah yang masuk ke TPA sebesar 10.000 m³/hari. Timbulan sampah kota Surabaya tahun 2011 dengan jumlah rumah tangga 806.794 yaitu 1200 ton/hari. Komposisi sampah di Surabaya antara lain: sampah organik 79,19%, sampah kertas 8,6%, sampah plastik 1,64 % logam 1,11% kayu dan 9,46% lain-lain (SLHD, 2012).

Berdasarkan data tersebut, sampah yang dihasilkan bukan dalam jumlah yang sedikit. Sampah tersebut harus dapat ditangani dengan baik dan benar. Sampah merupakan salah satu sumber penyakit. Secara langsung/terbuka sampah adalah tempat bersarangnya parasit, bakteri, dan patogen. Secara tidak langsung sampah merupakan tempat vektor pembawa penyakit seperti kecoa, nyamuk, dan lalat. Penyakit yang dapat ditimbulkan antara lain: diare, disentri, cacing, dan demam berdarah.

Salah satu metode pengolahan sampah yang dapat digunakan untuk mereduksi sampah adalah metode pirolisis. Metode pirolisis dapat digunakan untuk mengolah sampah yang berasal dari rumah tangga, seperti: sampah campuran/makanan, sampah buah dan sayur, sampah kertas, sampah plastik, dan sampah tekstil. Pengolahan sampah dengan pirolisis rata-rata menghasilkan 52,2% wax, 25,2% char/residu, 22,6% gas. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa metode pirolisis dapat merubah sampah menjadi bahan bakar (Ojolo dan Bangboye, 2005). Cairan yang dihasilkan dari proses pirolisis merupakan campuran kompleks senyawa organik antara lain stirena, etil-benzena, toluena, dan lain-lain. Proses pirolisis menghasilkan padatan yang mengandung char/residu dan bahan anorganik yang terkandung dalam bahan baku. Selain itu, pirolisis

menghasilkan gas yang terdiri dari hidrokarbon, CO dan CO₂ yang memiliki nilai kalor yang tinggi (López dkk, 2010).

Bridgwater (1980) menyebutkan bahwa, pirolisis merupakan salah satu pengolahan sampah yang dapat mengurangi berat dan volume sampah, serta menghasilkan produk yang lain, antara lain: (I) gas yang mengandung nilai kalori rendah hingga sedang, sehingga dapat digunakan untuk bahan bakar alternatif; (II) char/residu hasil pembakaran sampah yang mengandung nilai kalori tinggi, dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif; (III) wax yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif dan merupakan sumber dari bahan kimia, selain itu juga proses tersebut akan menghasilkan air yang mengandung bahan-bahan organik.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh jenis sampah plastik terhadap hasil gas dan wax setelah pirolisis?
2. Bagaimana pengaruh komposisi sampah terhadap hasil gas dan wax setelah pirolisis?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan pengaruh jenis plastik terhadap hasil gas dan wax pirolisis dilakukan dengan variasi jenis plastik.
2. Menentukan pengaruh komposisi sampah terhadap hasil gas dan wax pirolisis dilakukan dengan variasi komposisi plastik dan biomassa.

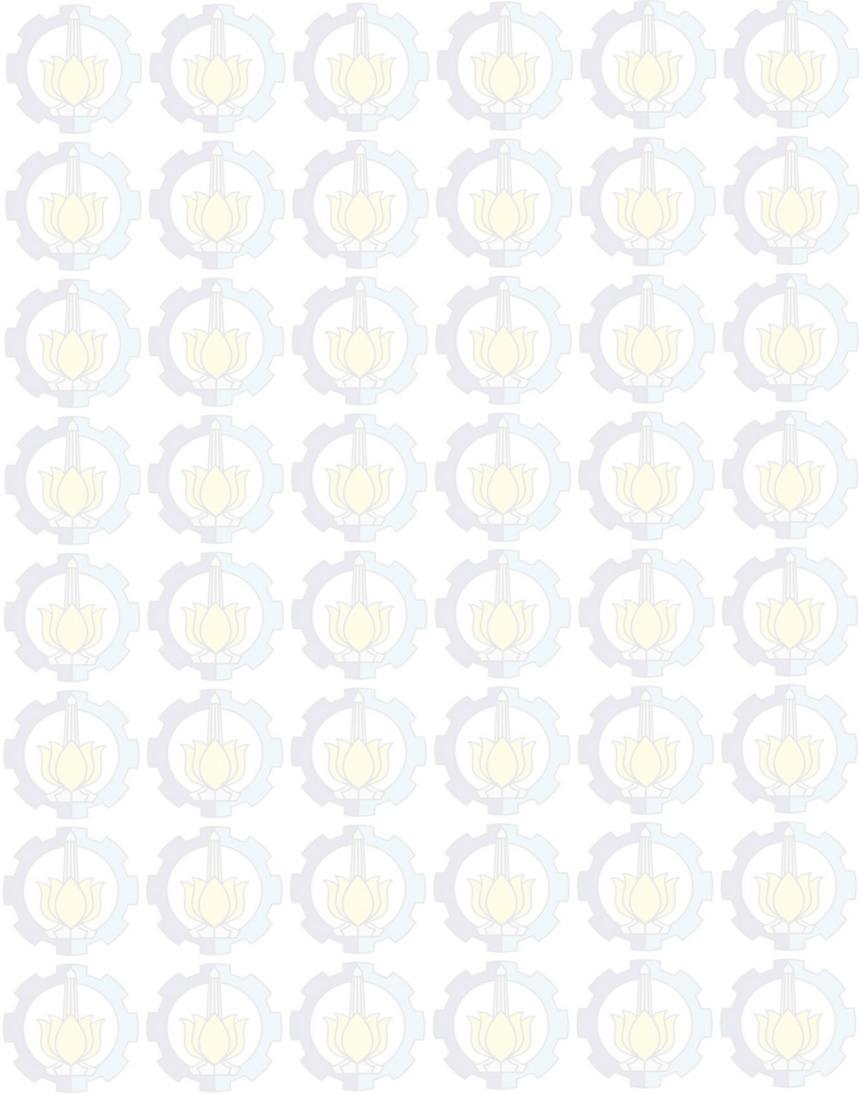
1.4 Manfaat Penelitian

1. Memberikan kontribusi ilmiah tentang aplikasi pirolisis untuk mengatasi masalah sampah di perkotaan.

1.5 Ruang Lingkup

1. Penelitian dilakukan skala laboratorium di Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
2. Jenis sampah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sampah yang dihasilkan dari aktifitas domestik di Surabaya yaitu sampah kebun dan sampah plastik.
3. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu jenis sampah plastik dan komposisi sampah.
4. Parameter yang diukur yaitu karakteristik sampah, char/residu padat hasil pembakaran, dan tar hasil pembakaran.

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik dan Komposisi Sampah Kota Surabaya

Berdasarkan SLHD 2012, komposisi sampah yang ada di Surabaya antara lain: sampah organik, sampah plastik, sampah logam, sampah kayu, dan lain-lain. Jenis sumber sampah yang berkaitan dengan penggunaan lahan dan jenis sampah yang ditimbulkan, antara lain:

- Pemukiman, jenis sampah yang ditimbulkan antara lain kertas, kardus, makanan, kebun, kaca, kayu, logam, dan sebagainya.
- Komersial, jenis sampah yang ditimbulkan plastik, kayu, makanan, kaca, logam, dan sebagainya.
- Insitusi, jenis sampah yang ditimbulkan plastik, kayu, makanan, kaca, logam, dan sebagainya.
- Konstruksi dan sisa pembongkaran bangunan, jenis sampah yang ditimbulkan kayu, baja, beton, debu, dan sebagainya.
- Fasilitas umum, jenis sampah yang ditimbulkan daun, ranting, sampah taman, dan sebagainya.
- Industri, jenis sampah yang ditimbulkan sampah sisa produksi, domestik, dan sebagainya.
- Pertanian, jenis sampah yang ditimbulkan sampah sisa pertanian dan sampah makanan yang telah membusuk (Tchobanoglous dkk., 1993).

2.1.1 Komposisi Sampah Kecamatan Gubeng

Berdasarkan SLHD 2012 di Kota Surabaya, sampah yang paling banyak dihasilkan merupakan sampah organik. Hal tersebut dibuktikan pada penelitian Agustia (2013) yang melakukan perhitungan terhadap komposisi sampah pada Kecamatan Gubeng Kota Surabaya. Penelitian tersebut dilakukan di TPS yang terdapat pada 4 lokasi. Tabel 2.1 merupakan komposisi sampah Kecamatan Gubeng.

Tabel 2.1 Komposisi Sampah Kecamatan Gubeng

Komposisi Sampah	Komposisi Sampah (%)
Plastik	12,65
HDPE Plastik	1,89
HDPE botol	0,37
HDPE aluminium	0,81
LDPE	7,20
PET warna	0,22
PET transparan	0,70
PS sterefoam	0,30
PS gelas	0,13
PP bag	0,30
Others	0,72
Dapat dikomposkan	61,62
Kertas	8,59
Logam	0,95
Kaca	1,37
Kain	2,88
Karet	0,60
Kayu	0,93
Diapers	9,18
B3	0,45
Lainnya	0,79
Total	100

Sumber : Agustia, 2013

2.2 Pengolahan Sampah

Pengolahan sampah merupakan bagian dari pengelolaan sampah. Beberapa metode pengolahan sampah dengan metode pembakaran antara lain:

2.3 Metode Pirolisis

Metode pirolisis menggunakan sumber panas eksternal untuk mendorong terjadinya reaksi endotermal pada keadaan yang tidak ada oksigen. Tiga komponen utama yang dihasilkan pada pirolisis antara lain:

- Gas yang mengandung hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, dan gas yang lain yang mengandung bahan-bahan organik.
- Fraksi cair yang mengandung tar terdiri dari aseton, methanol, dan kompleks hidrokarbon.
- Fraksi padatan yang terdiri dari karbon murni berasal dari bahan baku (Tchobanoglous dkk, 1993).

2.4 Pengolahan Sampah dengan Pirolisis

Pirolisis merupakan proses degradasi termal menggunakan bahan bakar yang berbentuk padat pada kondisi dengan oksigen terbatas (Di Blasi, 2008). Pengolahan sampah dengan metode pirolisis dapat mereduksi berat dan volume sampah, selain itu juga menghasilkan: (I) gas yang mengandung nilai kalori rendah hingga sedang, sehingga dapat digunakan untuk bahan bakar alternatif; (II) char/residu hasil pembakaran sampah yang mengandung nilai kalori tinggi, dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif; (III) wax yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif dan merupakan sumber dari bahan kimia, selain itu juga proses tersebut akan menghasilkan air yang mengandung bahan-bahan organik (Bridgwater, 1980). Penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa, pirolisis yang berasal dari plastik dan biomassa menghasilkan produk pirolisis yang mengandung nilai kalori tinggi (Caglar dan Aydinli, 2009).

Menurut Ratnasari (2011), metode pirolisis dibedakan menjadi 2 metode yaitu pirolisis batch dan pirolisis kontinyu. Selain itu berdasarkan tingkat kecepatan reaksi, pirolisis dibedakan menjadi dua tipe yaitu pirolisis lambat dengan temperatur pembakaran 150°C – 300°C pada temperatur ini proses pirolisis akan lebih banyak menghasilkan char/residu. Sedangkan untuk pirolisis

cepat terjadi pada temperatur 300°C – 700°C, produk yang dihasilkan antara lain wax, gas, dan char/residu.

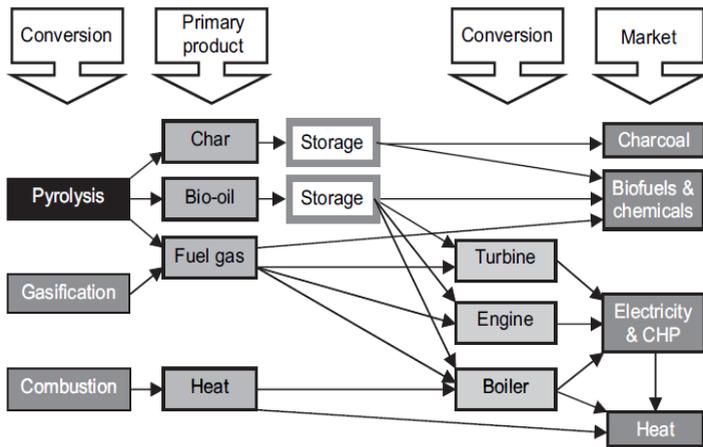
Penelitian yang dilakukan Akhtar (2012) menyebutkan bahwa, temperatur yang digunakan pada proses pirolisis yaitu antara 500°C-800°C. Dekomposisi biomassa terjadi pada temperatur (400°C-550°C) dengan waktu tinggal uap yang pendek akan menghasilkan produk pirolisis berupa wax. Penelitian ini menyebutkan bahwa pirolisis terbagi menjadi 3 tipe yaitu pirolisis cepat ($\geq 500^{\circ}\text{C}$), pirolisis lambat dengan temperatur rendah, dan karbonisasi dengan temperatur rendah ($\leq 400^{\circ}\text{C}$). Pada temperatur $< 300^{\circ}\text{C}$ akan menghasilkan char/residu yang tinggi, pada temperatur $> 550^{\circ}\text{C}$ akan menghasilkan wax yang tinggi sedangkan pirolisis pada temperatur $> 600^{\circ}\text{C}$ produk yang banyak dihasilkan berupa gas.

Bridgwater (2012) menyebutkan, pirolisis merupakan proses dekomposisi dengan panas yang terjadi tanpa adanya oksigen. Pemanasan pada temperatur rendah dengan waktu tinggal uap yang lama akan menghasilkan char/residu dari pembakaran biomassa tersebut. Pada pembakaran yang menggunakan temperatur tinggi dengan waktu tinggal uap lama akan menghasilkan gas, serta pada temperatur dan waktu tinggal uap yang cepat akan menghasilkan wax. Gambar 2.1 merupakan skema dari konversi biomassa yang menggunakan proses pembakaran.

Pada prinsipnya pirolisis cepat merupakan dekomposisi biomassa secara cepat menjadi uap, aerosol, char/residu, dan gas. Setelah melewati kondensor, uap cair yang berwarna coklat terbentuk dari proses pembakaran yang memiliki nilai kalori tinggi. Pada pirolisis ini wax yang dihasilkan cukup banyak dan menghasilkan sedikit abu. Beberapa parameter yang mempengaruhi produk wax yang dihasilkan dari proses pirolisis cepat antara lain:

- Perpindahan panas yang cepat pada reaksi antar permukaan biomassa terjadi pada biomassa dengan ukuran kurang dari 3 mm, karena biomassa memiliki konduktivitas termal yang rendah.

- Reaktor pirolisis harus selalu terkontrol dengan temperatur 500°C untuk menghasilkan wax dengan volume maksimal.
- Waktu tinggal uap kurang dari 2 detik untuk mencegah adanya reaksi berikutnya.
- Rapid removal dari char/residu untuk mencegah uap *cracking*
- Rapid pendingin uap pirolisis untuk mengasilkan bio oil.



Gambar 2.1 Skema Konversi Biomassa

Sumber : Bridgwater, 2012

Tabel 2.2 merupakan tabel dari penelitian yang telah dilakukan oleh Bridgwater (2012) terhadap hasil dari pirolisis pada beberapa jenis produk pirolisis.

Tabel 2.2 Produk dari Pirolisis

Jenis Pirolisis	Bahan	Temperatur (°C)	Waktu Tinggal Uap	Asap Cair (%)	Char (%)	Gas (%)
Cepat	Kayu	500	1 detik	75	12	13
Intermediet	Kayu	500	10 - 30 detik	50 (2 fase)	25	25

Jenis Pirolisis	Bahan	Temperatur (°C)	Waktu Tinggal Uap	Asap Cair (%)	Char (%)	Gas (%)
Lambat (karbonisasi)	Kayu	400	beberapa jam (1 hari)	30	35	35
Lambat (torrefaction)	Kayu	290	10 - 60 menit	0	80	20

Sumber : Bridgwater, 2012

2.4.1 Asap Cair dari Pirolisis

Asap cair akan terbentuk pada temperatur 400°C-550°C (Akhtar dkk, 2012). Menurut Bridgwater (2012), hasil dari asap cair dipengaruhi oleh jenis biomassa yang digunakan dalam penelitian, temperatur, waktu tinggal uap panas, pemisahan char/residu, dan kandungan abu. Kandungan abu dan pemisah char/residu memiliki efek katalis pada pemecahan uap. Asap cair yang dihasilkan dari proses pirolisis berwarna coklat gelap, hal tersebut dipengaruhi oleh bahan baku dan proses pirolisis cepat. Asap cair juga dapat berwarna merah kecolaktan atau hijau gelap tergantung dari adanya mikro karbon pada cairan dan komposisi kimianya. Kandungan nitrogen yang tinggi memberikan warna hijau gelap pada asap cair.

Penelitian mengenai asap cair pertama kali dilakukan oleh pabrik farmasi yang terletak di Kansas, dengan menggunakan metode pirolisis dari bahan baku kayu (Pszczola, 1995). Menurut Girard (1992), karakteristik asap cair telah diteliti pada tahun 1940. Pada penelitian tersebut menyebutkan sekitar 1000 macam senyawa kimia telah teridentifikasi, antara lain: 85 fenolik, 45 karbonil, 35 asam, 11 furan, 15 alkohol dan ester, 13 lakton, dan 21 hidrokarbon alifatik. Dari penelitian yang telah dilakukan disebutkan bahwa, komposisi asap cair dari bahan baku kayu antara lain 11-92% air, 0,2-2,9% fenolik, 2,8-4,5% asam organik, dan 2,6-4,6% karbonil (Maga, 1998). Pada penelitian karakteristik cair hasil pirolisis sampah organik padat, menggunakan analisis GCMS menyimpulkan terdapat 61 senyawa yang teridentifikasi antara lain 17 senyawa keton, 14 senyawa fenolik, 8 senyawa

asam karboksilat, 7 senyawa alkohol, 4 senyawa ester, 3 senyawa aldehida, dan 1 senyawa lain-lain (Haji dkk, 2006).

2.4.2 Gas dari Pirolisis

Gas dari pirolisis akan terbentuk pada temperatur $>600^{\circ}\text{C}$ (Akhtar dkk., 2012). Biomassa terdiri dari komponen-komponen antara lain kandungan air (*moisture content*), zat yang mudah menguap (*volatile matter*), karbon terikat (*fixed carbon*), dan abu (*ash*). Pada pembakaran biomassa terdiri dari 3 tahapan yaitu pengeringan, devolatilisasi, dan pembakaran char/residu. Pada proses pengeringan akan menghilangkan kadar air, devolatilisasi merupakan tahapan dari pirolisis akan menghilangkan zat yang mudah menguap, dan pembakaran char/residu merupakan tahapan reaksi antara oksigen dan karbon akan melepas kalor. Reaksi permukaan terutama membuat CO. CO akan bereaksi lebih lanjut membentuk CO_2 apabila di luar partikel. Karbon yang ada di 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:



Pada proses karbonisasi menghasilkan gas-gas yang mudah terbakar seperti CO, CH_4 , H_2 , formaldehid, metana, asam formiat, dan asam asetat serta gas-gas yang tidak bisa terbakar seperti CO_2 , H_2O , dan tar cair. Gas-gas yang dihasilkan memiliki nilai kalor tinggi (Borman dan Ragland, 1998).

2.4.3 Char/residu dari Pirolisis

Williams (2013) menyebutkan, karakteristik char/residu yang dihasilkan dari pirolisis dengan bahan baku ban bekas, menghasilkan 22%-49% dari total berat bahan baku. Pada penelitian tersebut, char/residu yang dihasilkan dari proses pirolisis mengandung karbon hingga 90% dan kandungan sulfur tinggi 1,9%-2,7%, namun char/residu tersebut mengandung abu dengan kadar 8,27%-15,33% sesuai dengan adanya kandungan logam seperti seng yang berasal dari bahan baku. Penelitian yang dilakukan oleh Cunliffe dan Williams (1998) menyebutkan juga bahwa, karakteristik dari char/residu dipengaruhi oleh temperatur yang antara 450°C – 600°C dengan berat 1,5 kg yang menggunakan *fixed bed reactor*, kandungan volatil dan hidrogen dapat berkurang kandungan volatil dan hidrogen dapat berkurang seiring dengan adanya peningkatan kecil permukaan dan volume yang menyebabkan peningkatan temperatur namun, untuk kandungan sulfur dan logam tidak dapat menurun secara signifikan. Penelitian Akhtar (2012) menyebutkan temperatur <300°C akan menghasilkan produk tinggi berupa char/residu.

Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya terhadap kandungan char/residu, bahwa variabel temperatur pirolisis, ukuran partikel char yang menggunakan bahan baku tempurung kelapa dan kadar perekat berpengaruh terhadap kadar air, kadar zat terbang, kadar abu, kadar karbon tetap, dan nilai kalor (Amilia dan Yusindra, 2011).

2.5 Faktor-faktor Operasi Pirolisis

Beberapa parameter operasi yang penting dalam menentukan produk dari pirolisis menurut Akhtar (2012) antara lain: temperatur, waktu tinggal uap, ukuran partikel, pengaruh jenis bahan, dan pengaruh kelembapan jenis bahan.

2.5.1 Temperatur

Komposisi yang dihasilkan dari pirolisis bergantung pada temperatur yang dapat mendekomposisi biomassa. Pada temperatur rendah $<300^{\circ}\text{C}$ dekomposisi terjadi pada heteroatom yang menyebabkan produksi char/residu tinggi. Pada temperatur tersebut efisiensi konversi biomassa 0-20% dari berat yang terdekomposisi sedangkan pada temperatur $>600^{\circ}\text{C}$ akan menghasilkan produksi gas tinggi dibandingkan dengan char/residu dan wax. Temperatur akhir pirolisis akan menghasilkan wax dengan karakteristik yang berbeda. Pada umumnya temperatur dengan rentang 400°C - 550°C akan menghasilkan produksi wax tinggi. Tabel 2.3 merupakan penelitian dari pengaruh temperatur terhadap hasil pirolisis.

2.5.2 Waktu Tinggal Uap

Pada pirolisis temperatur rendah dan waktu tinggal uap mempengaruhi produksi gas terkondensasi. Waktu tinggal uap yang dilakukan hanya beberapa menit. Waktu untuk mendekomposisi biomassa harus lebih lama dibandingkan waktu tinggal uap agar produksi gas terkondensasi yang dihasilkan lebih tinggi. Optimalisasi dari waktu tinggal uap dapat dipertimbangkan dari variabel lainnya untuk menghasilkan kualitas gas terkondensasi yang lebih baik. Beberapa hal yang dapat menjadi pertimbangan untuk mendapatkan waktu tinggal uap yang optimum antara lain: ukuran partikel dari biomassa, karakteristik gas terkondensasi yang diharapkan, temperatur, optimum, dan laju pemanasan.

2.5.3 Ukuran Partikel

Biomassa merupakan pengantar panas yang buruk, hal tersebut menghambat transfer panas yang terjadi selama pirolisis. Pengaruh dari ukuran partikel sampah sangat penting terhadap hasil wax dari pirolisis dan meminimisasi permasalahan transfer panas. Pada umumnya, ukuran partikel yang kecil digunakan dalam pirolisis cepat, karena ukuran partikel tersebut dapat

mengantar panas secara merata. Beberapa spesifikasi ukuran partikel yang digunakan antara lain ukuran partikel <200 mm untuk *rotating cone pyrolysis*, <2 mm untuk *fluid bed system*, <6 mm untuk *circulating fluid bed*. Selain itu, pada sampah rumah tangga ukuran partikel >1-2 cm menggunakan *fixed bed pyrolysis*. Selain hal tersebut densitas sampah dan kandungan oksigen dari biomassa mempengaruhi mekanisme transfer panas pada proses pirolisis. Tabel 2.4 merupakan penelitian dari pengaruh temperatur terhadap hasil pirolisis.

2.5.4 Pengaruh Jenis Bahan

Biomassa terdiri dari komponen lignin, hemiselulosa, selulosa, sedikit bahan anorganik. Ratio dari masing-masing komponen tergantung dari jenis biomassa. Dekomposisi yang terjadi selama pirolisis tergantung dari komponen biomasanya. Pirolisis dengan bahan selulosa dan hemiselulosa menghasilkan wax lebih banyak dibanding dengan bahan lignin. Penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa, reduksi berat yang terjadi pada selulosa sebesar 94,5% dan hemiselulosa sebesar 80% pada temperatur masing-masing 400°C dan 268°C, sedangkan pada lignin hanya 54,3% pada temperatur 900°C.

2.5.5 Pengaruh Kelembapan Jenis Bahan

Pada umumnya biomassa memiliki kelembapan 50-60%. Oleh sebab itu, pada proses pirolisis kelembapan pada biomassa harus <30%. Pada pengeringan menggunakan matahari dan udara dapat mengurangi kelembapan 3-12%, oleh karena itu dilakukan pengeringan menggunakan mesin. Kelembapan berpengaruh selama proses pirolisis dan kandungan kimia wax dari produk pirolisis. Adanya kelembapan yang tinggi menyebabkan adanya energi tinggi untuk mengeringkan biomassa dan meningkatkan temperatur pirolisis. Kadar air yang tinggi pada biomassa menyebabkan meningkatnya kandungan air pada wax hasil pirolisis.

2.6 Pengaruh Jenis Plastik

Masing-masing jenis plastik dapat terdekomposisi pada temperatur antara lain: PS 420°C, PET 480°C, PE 495°C, dan PP 480°C (Caglar dkk, 2009). Pada penelitian pirolisis sebelumnya, sampel yang digunakan masing-masing 100 gram plastik jenis PE, PP, PS, dan PET dengan volume reaktor 3,5 dm³ serta aliran nitrogen 1 dm³/menit dengan temperatur 500°C lama pembakaran 30 menit menghasilkan 40,9% wax, gas 25,6% dan 53,5% padatan (Adrados dkk, 2014).

Penelitian pirolisis sebelumnya menggunakan jenis plastik LDPE, PP, PS dengan campuran bunga pohon cemara (1:1). Reaktor yang digunakan dengan diameter 8 cm dan tinggi 16 cm. Temperatur yang digunakan yaitu 450°C dengan waktu 15 menit. Massa yang dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 10 g dan telah dicacah. Pada penelitian ini dihasilkan 100% padatan (Obeid dkk, 2014).

2.6.1 Plastik HDPE

Polyethylene adalah polimer termoplastik yang sering digunakan pada kehidupan sehari-hari. Plastik ini memiliki sifat kimia dan fisika. Salah satu sifat kimia yang dimiliki yaitu polimer jenis ini tahan terhadap pelarut asam maupun basa. *Polyethylene* tersusun dari monomer yaitu etana (*ethylene*). Plastik HDPE tidak tahan terhadap cahaya dan oksigen. Apabila dilakukan pemanasan tinggi akan membentuk sambung secara silang dan diikuti dengan pembelahan ikatan acak, tetapi tidak terjadi di polimerisasi.

Plastik HDPE memiliki titik leleh pada suhu 200°C – 280°C. Jenis plastik ini terdekomposisi pada suhu 495°C pada fase gas, cair, dan padat. Pada pirolisis suhu rendah plastik HDPE menghasilkan padatan yang cukup tinggi, sedangkan pada pirolisis suhu tinggi menghasilkan gas yang tinggi. Plastik jenis HDPE memiliki berat molekul 10.000 – 1000.000 g/mol (Caglar dkk, 2009).

2.6.2 Plastik PET

Plastik PET memiliki titik leleh pada suhu 250°C – 260°C dan terdekomposisi pada suhu 480°C. Plastik PET dapat terdekomposisi menjadi fase gas, cair, dan padat. Densitas PET yaitu 0,9 g/cm³. Pada pirolisis suhu 600 °C dengan bahan PET didominasi gas dengan kandungan CO₂, *benzene*, *vinyl benzoate*, *benzoic acid*, dan *divinyl terephthalate*.

Plastik PET pada temperatur rendah didominasi oleh TPA (Terephthalic Acid), pada kondisi temperatur tinggi TPA akan terdekomposisi menjadi benzene, CO₂, dan *benzoic acid*. TPA merupakan molekul yang terdiri dari benzene (CH) dan gugus karboksilat (COOH). Oleh karena itu, kandungan gas PET terdiri dari zat tersebut Berdasarkan penelitian tersebut, TPA yang terkandung dari PET bersifat menyublim, artinya molekul TPA secara cepat akan membentuk gas CO₂, CO, dan CH₄ (Scheirs, 2006).

2.6.3 Plastik PS

Plastik PS memiliki titik leleh pada suhu 180°C – 260°C. Densitas PS sebesar 0,960 g/cm³. PS terdekomposisi pada suhu 420°C menjadi fase padat, cair, dan gas. PS merupakan polimer vinil dengan monomer stiren. Stiren merupakan hidrokarbon cair yang dibuat berasal dari minyak bumi. Pada suhu ruangan, polistirena berbentuk padat. Struktur PS yaitu rantai panjang karbon dengan gugus fenil yang terikat pada atom-atom karbon tertentu. PS memiliki sifat termal yang baik namun menjadi getas pada suhu dibawah 100°C. PS bersifat inert terhadap zat kimiawi, tahan terhadap basa, asam halida, reduktor, oksidator, namun masih dapat mengalami reaksi nitration dan sulfonasi (Caglar dkk, 2009).

Tabel 2.3 Pengaruh Temperatur terhadap Produk Pirolisis

Metode	Bahan Baku	Berat Awal	Temperatur	Asap Cair	Char	Padatan	Sumber
Pirolisis Cepat	Kayu	100%	500 (VRT 1s)	75%	12%	13%	Bridgwater, 2012
Pirolisis intermediet	Kayu	100%	500 (VRT 10-30 s)	50% (in 2 phase)	25%	25%	
Pirolisis lambat (karbonisasi)	Kayu	100%	400 (1 day)	30%	35%	35%	
Gasifikasi	kayu	100%	750-900	5%	10%	85%	
Pirolisis Lambat (torrefaction)	Kayu	100%	290 (VRT 10-60 m)	0%	80%	20%	
Pirolisis	Ban bekas	50 gram	720	58.80%	26.40%	14.80%	Williams, 2013

Tabel 2.4 Lanjutan Pengaruh Temperatur terhadap Produk Pirolisis

Metode	Bahan Baku	Berat Awal	Temperatur	Asap Cair	Char	Padatan	Sumber
Pirolisis cepat	Serbuk gergaji	100%	428	51%	48%		Yang dkk, 2014
	Biji Kopi	100%	428	48%	40%		
	Jerami	100%	428	28%	60%		

Tabel 2.5 Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Produk Pirolisis

Metode	Bahan Baku	Berat Awal	Ukuran Partikel	Asap Cair	Sumber
Pirolisis	<i>Red Oak Biomass/kayu</i>	2 kg/jam	< 0.3 mm	70%	Ellens dkk, 2012
	<i>Apricot pit</i>	100%	0.45-0.9 mm	66%	
	Tempurung Kelapa Sawit	150 gram	2 mm	46.40%	
	<i>Kayu eucalyptus</i>	20 gram	2-5 mm	60.5%	

Tabel 2.6 Lanjutan Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Produk Pirolisis

Metode	Bahan Baku	Berat Awal	Ukuran Partikel	Asap Cair	Sumber
Pirolisis Cepat	Batang bunga matahari	100%	2-3 mm	41%	Akhtar dkk, 2012
	Kayu	100%	2-3 mm	67%	
Pirolisis cepat	Serbuk gergaji		0.5 -1 mm	51%	Yang dkk, 2014
	Biji Kopi	1 kg/jam	0.3-0.9 mm	48%	
	Jerami		2-5 mm	28%	

2.7 Rumus Reaktor Bejana

Berdasarkan Brownell (1979), perhitungan bejana yang digunakan sebagai reaktor dapat dicari menggunakan rumus berikut:

$$\begin{aligned} \text{Volume Reaktor} &= \\ &= \text{Vol tutup atas} + \text{Vol tutup bawah} + \text{Vol silinder} \\ &= \frac{\pi d^3}{24 \tan \frac{1}{2} \alpha} + 0,0487 d^3 + 0,0487 d^3 \end{aligned} \quad \dots(2.4)$$

Dimana:

- Π = 3,14
- α = sudut luar 60°
- d = diameter dalam

Tebal silinder dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T_s = \frac{P_1 d_0}{2 (fE + 0,4 Pi)} + C \quad \dots(2.5)$$

Dimana:

- d_0 = diameter dalam (in)
- pi = tekanan atmosfer (lb/in^2)
- f_e = tegangan yang diizinkan (lb/in^2)
- E = faktor penyambungan untuk *double welded* (0,8)
- C = faktor korosi

Tebal tutup silinder dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T_h = \frac{0,885 P_1 r}{2 (fE - 0,1 Pi)} + C \quad \dots(2.6)$$

- r = diameter dalam (in)
- pi = tekanan atmosfer (lb/in^2)
- f_e = tegangan yang diizinkan (lb/in^2)
- E = faktor penyambungan untuk *double welded* (0,8)
- C = faktor korosi

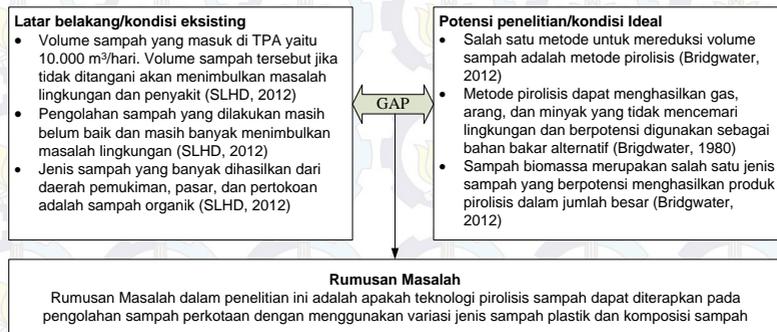
BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Umum

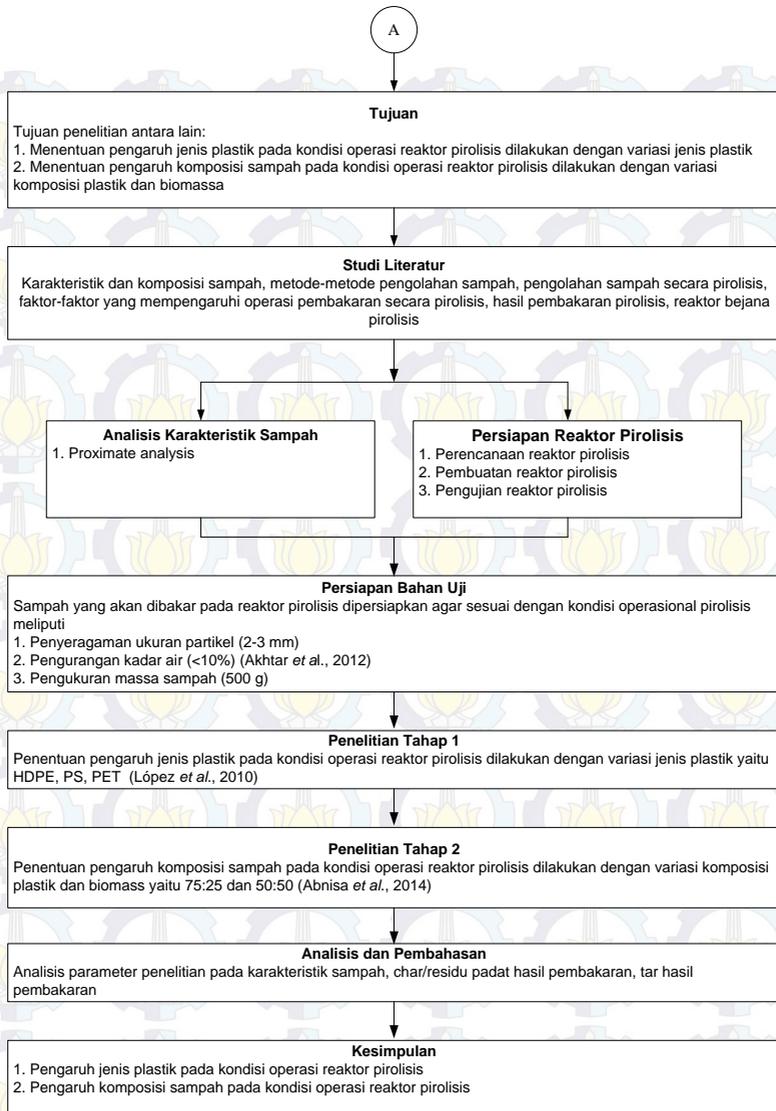
Metode penelitian ini digunakan sebagai acuan dasar dalam melaksanakan penelitian. Penelitian ini merupakan pengolahan sampah dengan metode pirolisis. Pada metode pirolisis produk yang dihasilkan berupa asap cair, char/residu, dan gas. Pada penelitian ini digunakan dua variasi yaitu jenis sampah plastik dan biomassa kemudian variasi terhadap komposisi sampah. Temperatur yang digunakan pada percobaan ini 500 °C.

3.2 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian ini sebagai gambaran awal tahapan penelitian untuk memudahkan dalam penelitian dan penulisan laporan. Selain itu, untuk mengetahui agar tujuan penelitian dapat dicapai. Berikut kerangka penelitian yang diuraikan ke diagram alir.



A



3.3 Persiapan Penelitian

Persiapan Reaktor

Berat jenis sampah lepas	= 90 – 150 kg/m ³
Berat jenis sampah HDPE	= 858 kg/m ³
Berat jenis sampah PET	= 900 kg/m ³
Berat jenis sampah PS	= 960 kg/m ³
Massa sampah	= 0,5 kg = 500 g
Volume sampah HDPE	= 0,5 kg/858 kg /m ³ = 0,00058 m ³ = 0,58 L
Volume sampah PET	= 0,5 kg/900 kg /m ³ = 0,00055 m ³ = 0,55 L
Volume sampah PS	= 0,5 kg/ kg /m ³ = 0,00052 m ³ = 0,52 L

Berikut merupakan perhitungan reaktor berdasarkan Browneel (1979) pada persamaan 2.1:

V reaktor = V tutup atas + V tutup bawah + V silinder

$$= \frac{\pi d^3}{24 \tan \frac{1}{2} \alpha} + 0,0487 d^3 + 0,0487 d^3$$

$$= \frac{\pi d^3}{24 \tan 60^0} + 0,0974 d^3$$

$$0,176573 \text{ ft}^3 = \frac{3,14 d^3}{41,6} + 0,0974 d^3$$

$$0,176573 \text{ ft}^3 = 0,17289 d^3$$

$$1,0213 \text{ ft} = d$$

$$30,5 \text{ cm} = d$$

Tebal Bagian Silinder (SA 240 Grade C type 347)

Berikut merupakan perhitungan tebal bagian silinder berdasarkan persamaan 2.2:

$$1 \text{ atm} = 14,7 \text{ lb/in}^2$$

$$T_s = \frac{P_1 d_0}{2 (fE + 0,4 Pi)} + C$$

$$= \frac{14,7 \times 12}{2 (14.800 \times 0,8 + 0,4 \times 14,7)} + 1/16$$

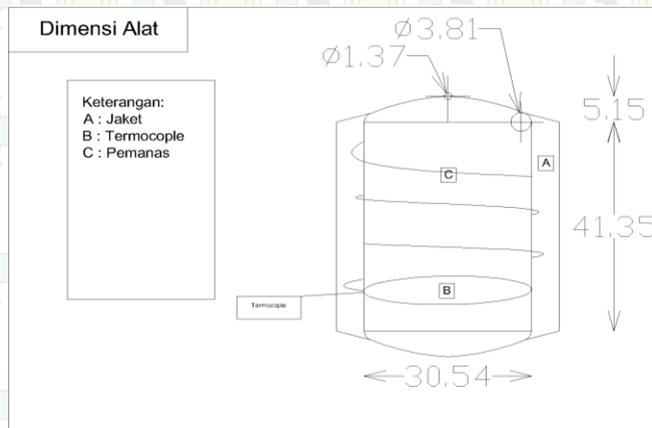
$$= 0,007739 \text{ in} = 0,124 / 16 \text{ in} = 0,2/16 \text{ in} = 0,2 \text{ mm}$$

Tebal Bagian Tutup Bagian Atas dan Bagian Bawah

Berikut merupakan perhitungan tebal bagian silinder berdasarkan persamaan 2.3:

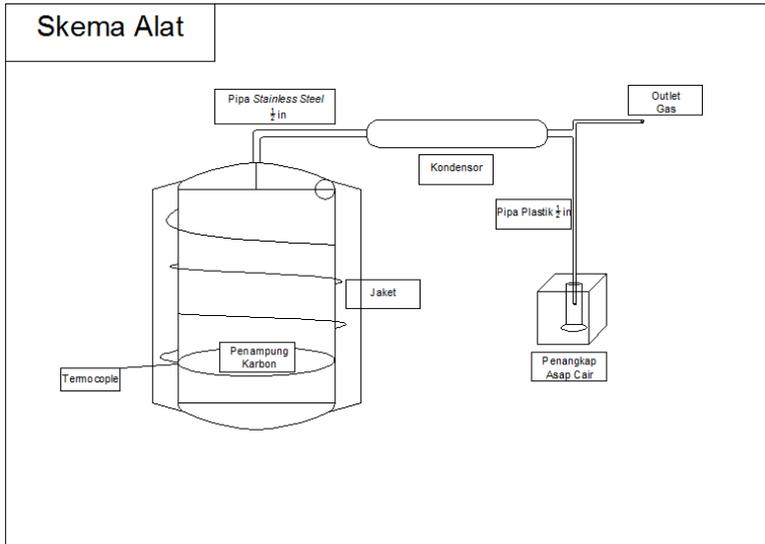
$$\begin{aligned}Th &= \frac{0,885 P_1 r}{2 (fE - 0,1 Pt)} + C \\ &= \frac{0,885 \times 14,7 \times 12}{2 (14.800 \times 0,8 - 0,1 \times 14,7)} + 1/16 \\ &= 0,069 \text{ in} = 1,1055/16 \text{ in} = 2/16 \text{ in} = 2 \text{ mm} \\ Icr &= 1 \frac{1}{2} \text{ in} = 3,81 \text{ cm} \\ Sf &= 2,5 \text{ in} = 6,35 \text{ cm} \\ Ha &= 0,169 d = 2,028 \text{ in} = 5,15 \text{ cm} \\ Ls &= 35 \text{ cm}\end{aligned}$$

Gambar 3.1 merupakan skema tabung dan dimensi.



Gambar 3.1 Skema Tabung

Gambar 3.2 merupakan skema alat yang akan digunakan pembakaran dengan metode pirolisis.



Gambar 3.2 Skema Alat Pirolisis

3.4 Analisis Karakteristik Sampah

Pada penelitian pendahuluan untuk mengetahui karakteristik sampah yang akan digunakan yang dilakukan dengan *proximate*. Analisis *proximate* dilakukan dengan menghitung kadar air, abu, *volatile solid* dengan metode gravimetri. Analisis *proximate* dilakukan di Laboratorium Pemulihan Air Jurusan Teknik Lingkungan, ITS.

3.5 Persiapan Alat Laboratorium

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Reaktor Pirolisis yang terdiri dari: tabung pirolisis, pemanas, kondensor pendingin, penampung tar, dan penangkap gas.
- Termometer

- Gelas Ukur

3.6 Persiapan Bahan Uji

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Sampah plastik HDPE, PET, dan PS.
- Sampah kebun berupa ranting-ranting pohon.

Pada penelitian ini ukuran partikel sampah yang akan digunakan sekitar 2-5 mm, dengan kadar air <10%. Pengurangan kadar air terhadap bahan baku sampah yang akan digunakan dapat dilakukan dengan cara pengeringan menggunakan sinar matahari. Selanjutnya dilakukan uji kadar air menggunakan analisis *proximate*. Berat sampah yang digunakan pada penelitian ini sebesar 500 g sesuai dengan kapasitas reaktor setiap sekali proses pirolisis. Prosedur persiapan bahan baku dapat dilihat pada Lampiran A. Pada persiapan penelitian data densitas masing-masing jenis sampel plastik terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Pengukuran Densitas Jenis Plastik

Jenis Plastik	Densitas (g/cm ³)
HDPE	0,858
PET	0,9
PS	0,960

Sumber : Scheirs, 2006

3.7 Penelitian Tahap 1

Dalam penelitian ini akan digunakan dua variabel yaitu jenis sampah plastik dan sampah kebun yang akan digunakan, yaitu:

- Sampah plastik HDPE (*High Density Polyethylene*), PET (*Poly Ethylene Terephthalate*), PS (*Poly Styrene*).
- Sampah kebun yang digunakan berupa sampah ranting.

Sampah plastik yang digunakan memiliki kandungan hemiselulosa dan selulosa yang dapat terdekomposisi pada temperatur antara 300°C-500°C. Pada perbandingan 100:0

sampah plastik yang digunakan sebesar 500 g. Pada tahap ini akan dilakukan pirolisis pada jenis plastik.

Pada penelitian ini dilakukan percobaan pendahuluan pada temperatur 400°C, 500°C, dan 550°C dengan beberapa variasi waktu. Percobaan dilakukan dari waktu 30 menit hingga 75 menit.

3.8 Penelitian Tahap 2

Variabel kedua yang digunakan pada penelitian ini merupakan komposisi sampah yang digunakan pada pirolisis. Komposisi yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Sampah plastik HDPE dan sampah kebun dengan perbandingan 75:25, dan 50:50.
- b. Sampah plastik PET dan sampah kebun dengan perbandingan 75:25, dan 50:50.
- c. Sampah plastik PS dan sampah kebun dengan perbandingan 75:25, dan 50:50.

Pada penelitian ini kapasitas reaktor yang digunakan 500 g. Oleh karena itu, untuk perbandingan 75:25 berat masing-masing sampah yaitu 375 g sampah plastik HDPE dan 125 g sampah kebun. Selanjutnya untuk perbandingan 50:50 masing-masing berat sampah plastik HDPE sebesar 250 g dan untuk sampah kebun 250 g. Setelah dilakukan perbandingan berat kemudian bahan-bahan tersebut dikeringkan hingga kadar air <10%, dengan ukuran partikel sekitar 2-5 mm. Prosedur analisis untuk penelitian tahap 1 dan 2 terdapat pada lampiran C. Tabel 3.2 merupakan variabel-variabel penelitian yang akan digunakan.

Tabel 3.2 Variabel Penelitian

Sampah Kebun (%)	Sampah Plastik (%)		
	HDPE	PET	PS
0	100	100	100
25	75	75	75
50	50	50	50

3.9 Analisis dan Pembahasan

Data yang didapatkan dari penelitian ini adalah nilai dari parameter-parameter yang diukur. Parameter yang diukur meliputi nilai kadar air, abu, dan *volatile solid* pada awal penelitian menggunakan analisis *proximate* prosedur analisis terdapat pada lampiran A. Produk pirolisis berupa char/residu dilakukan metode gravimetri kemudian hasilnya dibandingkan dengan analisis awalnya. Hasil dari pirolisis berupa asap cair, residu/char, dan tar dilakukan analisis terhadap berat awal dan produk yang dihasilkan.

3.10 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Pemulihan Air Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya. Reaktor akan diletakkan di dalam Laboratorium Pemulihan Air karena pada pelaksanaannya membutuhkan energi listrik yang cukup.

3.11 Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil suatu kesimpulan yang menyatakan ringkasan dari hasil penelitian dan menjawab perumusan masalah. Saran diberikan untuk perbaikan dan pelaksanaan penelitian lebih lanjut.

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Karakteristik Awal Fisik Sampah

Analisis fisik sampah yang dilakukan pada penelitian ini yaitu analisis *proximate* meliputi kadar air, *volatile solid*, abu dan nilai kalori. Tujuan analisis kadar air yaitu untuk mengetahui kandungan air yang terdapat pada bahan baku. Selain itu, sebelum pirolisis syarat kadar air bahan baku <10%. Prosedur analisis kadar air, *volatile solid*, dan kadar abu terdapat pada lampiran A.

Analisis *volatile solid* untuk menentukan kandungan bahan organik pada sampah serta mengetahui potensi hasil gas maupun *wax* dari proses pirolisis. Pada analisis *volatile solid*, sampel dimasukkan ke dalam furnace 550°C. Gambar 4.2 merupakan hubungan antara *volatile solid* dengan hasil pirolisis. Sedangkan analisis kadar abu untuk mengetahui potensi berat arang yang dihasilkan dari proses pirolisis. Analisis *proximate* dilakukan pada masing-masing jenis sampah yang dilakukan pirolisis. Gambar 4.1 merupakan hubungan antara kadar abu dengan hasil pirolisis.

Nilai kalor yang diukur merupakan nilai kalori awal setiap jenis plastik. Pengukuran nilai kalori ini bertujuan untuk mengetahui potensi pembakaran pada setiap jenis sampel yang dipirolisis. Analisis nilai kalori dilakukan dengan alat *bomb calorimeter*. Prosedur analisis nilai kalori terdapat pada lampiran C.

Tabel 4.1 merupakan hasil analisis karakteristik fisik sampah yang terdiri dari hasil pengukuran kadar air, *volatile solid*, kadar abu, dan nilai kalori. Pada tabel tersebut terlihat nilai kadar air sampel HDPE sebesar 0,52% yang diperoleh dari perhitungan berat kering dengan persamaan 2.8.

Sebagai contoh sampel HDPE:

$$a = 35,37 \text{ g}$$

b = 35,753 g

c = 35,751 g

dengan perhitungan tersebut diperoleh nilai berat kering =

$$\frac{35,751-35,37}{35,753-35,37} \times 100\% = 99,48\%$$

Maka diperoleh kadar air = 0,52%. Perhitungan ini dilakukan untuk semua sampel.

Nilai *volatile solid* diperoleh dari *proximate analysis* dengan prosedur lampiran A. Nilai VS merupakan bahan organik yang mudah menguap. Perhitungan nilai VS diperoleh dari perhitungan dengan rumus 2.9.

Sebagai contoh sampel HDPE:

a = 35,0548

b = 35,2027

c = 35,0811

dengan perhitungan tersebut diperoleh nilai *volatile solid* sebesar:

% VS =

$$\left[\frac{(35,2027 - 35,0548) - (35,0811 - 35,0548)}{(35,2027 - 35,0548)} \times 100\% \right]$$

= 82,22%

Perhitungan ini dilakukan untuk semua sampel.

Pada penelitian sebelumnya kadar *volatile solid* jenis plastik HDPE yaitu sebesar 99,5%. Hal tersebut menunjukkan bahwa HDPE memiliki potensi yang cukup besar untuk menghasilkan gas dan *wax* saat proses pirolisis dilakukan, karena *volatile solid* merupakan salah satu parameter sampel tersebut dapat menghasilkan gas dan *wax* dalam jumlah besar (Abnisa dkk, 2014).

Analisis kadar abu bertujuan untuk mengetahui massa yang tertinggal pada saat dilakukan pembakaran sempurna. Kadar abu diperoleh dari analisis *proximate* dengan prosedur yang sama dengan kadar *volatile solid*, namun dengan perhitungan akhir yang berbeda. Perhitungan kadar abu diperoleh dari rumus 3.1.

Sebagai contoh sampel HDPE:

a = 35,0548 g

b = 35,2027 g

c = 35,0811 g

Dari rumus tersebut diperoleh kadar abu:

$$\% \text{ Abu} = \frac{35,0811 - 35,0548}{35,2027 - 35,0548} \times 100\% \\ = 17,78\%$$

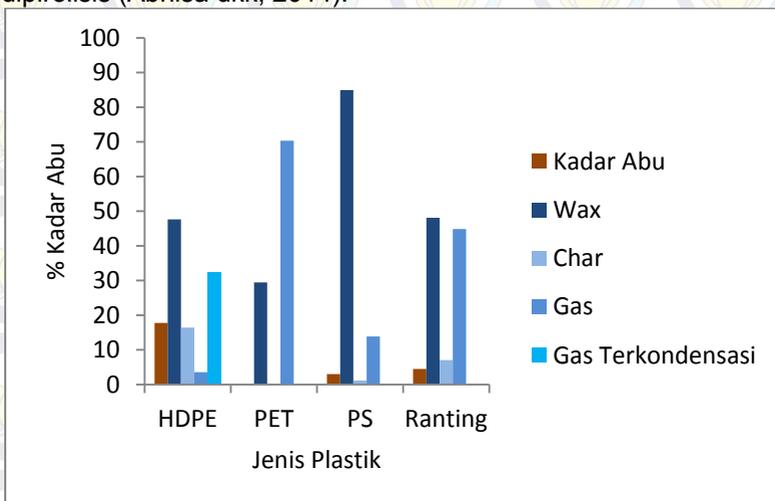
Perhitungan ini dilakukan untuk semua sampel.

Tabel 4.1 Hasil Analisis Karakteristik Jenis Sampah

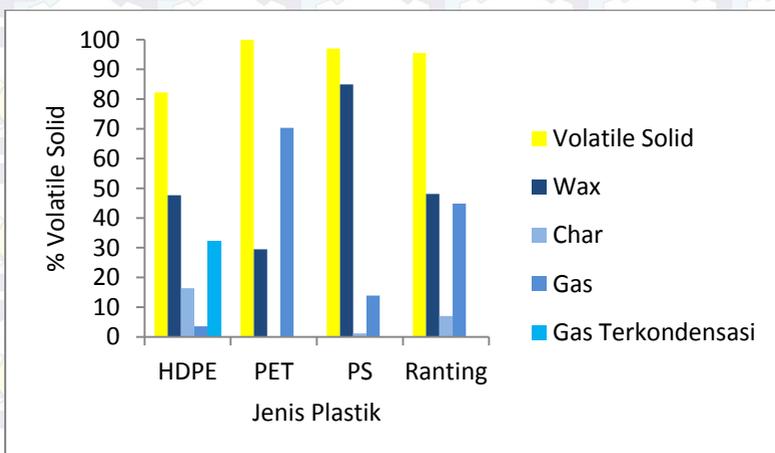
Jenis Analisis	Jenis Sampah	Parameter	Satuan (w/w)	Nilai
Proximate Analysis	HDPE	Kadar Air	%	0,52
		<i>Volatile Solid</i>	%	82,22
		Kadar Abu	%	17,78
		Nilai Kalor	kal/g	9.192
	PET	Kadar Air	%	0,35
		<i>Volatile Solid</i>	%	99,93
		Kadar Abu	%	0,07
		Nilai Kalor	kal/g	5.399
	PS	Kadar Air	%	0,47
		<i>Volatile Solid</i>	%	96,99
		Kadar Abu	%	3,01
		Nilai Kalor	kal/g	10.847
Ranting	Kadar Air	%	9,95	
	<i>Volatile Solid</i>	%	95,50	
	Kadar Abu	%	4,50	

Pada penelitian sebelumnya jenis HDPE memiliki kadar air 0,61%; kadar abu 0,18%; dan *volatile solid* 86,83%. Nilai kalori jenis HDPE yaitu sebesar 12.020 kal/g. PS memiliki kadar air 0,25%; kadar abu 0,09%; dan *volatile solid* 98,87%. PS memiliki nilai kalori sebesar 11.584 kal/g. PET memiliki kadar air 0,46%;

kadar abu 0,02%; dan *volatile solid* 99,98%. Pada penelitian karakteristik fisik awal tidak berbeda jauh dengan literatur. Pada penelitian karakteristik fisik awal bertujuan untuk mengetahui potensi hasil produk dari masing-masing bahan baku yang akan dipirolisis (Abnisa dkk, 2014).



Gambar 4.1 Hubungan Kadar Abu Terhadap Hasil Pirolisis



Gambar 4.2 Hubungan Volatile Solid Terhadap Hasil Pirolisis

4.2 Persiapan Bahan Uji

Pada penelitian ini dilakukan persiapan bahan uji antara lain: dilakukan pencacahan, dilakukan pengukuran kadar air pada masing-masing sampel hingga mencapai <10%, dan dilakukan analisis *proximate* diawal untuk masing-masing jenis sampah. Sampel ranting yang belum mengandung kadar air <10% dilakukan pengeringan secara fisik dengan sinar matahari dan selanjutnya disimpan di dalam oven 105°C hingga 48 hari. Sampel plastik HDPE, PET, dan PS nilai kadar air telah memenuhi kriteria sesuai pada Tabel 4.1.

4.3 Percobaan Pendahuluan

Percobaan pendahuluan dilakukan dengan memasukkan sampel ke dalam furnace pada beberapa temperatur dan waktu yang berbeda. Tujuan dilakukan percobaan pendahuluan ini untuk mengetahui temperatur yang digunakan pada percobaan menggunakan reaktor.

Persiapan bahan uji pada percobaan pendahuluan ini dengan ketentuan kadar air <10% dan dilakukan pencacahan pada masing-masing jenis sampel. Temperatur yang digunakan pada percobaan pendahuluan antara lain 400°C, 500°C, dan 550°C. Kemudian, dilakukan beberapa variasi waktu antara lain 30 menit, 60 menit, dan percobaan setiap 15 menit hingga 75 menit. Setelah dilakukan beberapa variasi temperatur pembakaran kemudian dibandingkan dari hasil masing-masing temperatur dan waktu. Gambar 4.3 merupakan hasil dari percobaan pendahuluan yang dilakukan pada temperatur 400°C dengan lama waktu 30 menit.

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat terlihat bahwa hasil dari percobaan pendahuluan pada temperatur 400°C dengan waktu 30 menit, sampel dengan bahan ranting yang memiliki nilai berat tersisa paling kecil yaitu sebesar 56,47% berbeda dengan sampel plastik HDPE, PET, dan PS yang menunjukkan berat tersisanya masih tinggi. Hal ini juga dipengaruhi oleh lama waktu

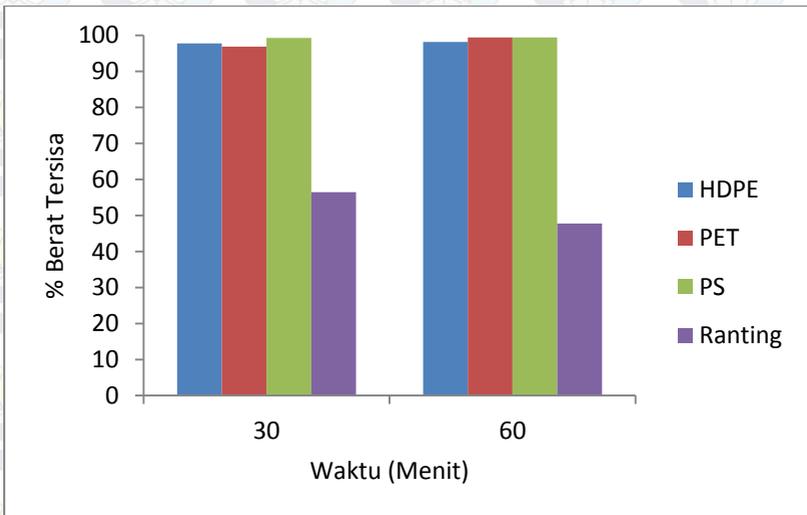
pembakaran. Pada penelitian sebelumnya menyatakan bahwa pembakaran dengan bahan kayu pada temperatur 400°C dengan waktu 1 hari menghasilkan berat tersisa sebesar 30% (Bridgwater, 2012). Hal tersebut dapat terjadi karena ranting merupakan biomassa yang mengandung kadar selulosa tinggi. Selulosa dapat terdekomposisi pada temperatur 300°C sampai 400°C dengan temperatur optimum 350°C sehingga pada saat dilakukan pirolisis pada temperatur 500°C sudah terjadi pengurangan berat yang cukup tinggi (Caglar dkk, 2009).

Selanjutnya dilakukan percobaan pendahuluan kedua dengan temperatur yang sama dan waktu pembakaran yang berbeda. Gambar 4.3 merupakan hasil dari percobaan pendahuluan kedua yang dilakukan. Sesuai dengan hasil Gambar 4.3 sampel ranting mengalami penurunan jumlah berat yang tersisa menjadi 47,78% pada percobaan pendahuluan kedua ini lama waktu memiliki pengaruh terhadap peningkatan berat tersisa. Namun, untuk sampel plastik HDPE, PET, dan PS tidak mengalami penurunan berat tersisa yang signifikan.

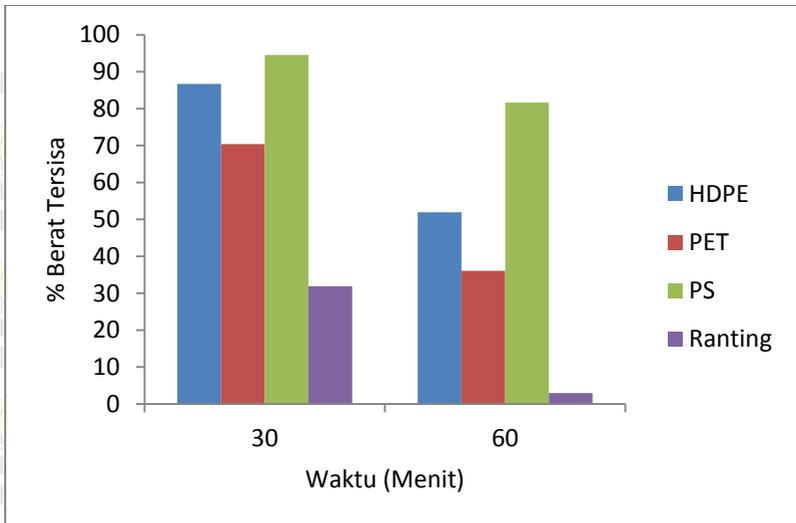
Pada percobaan pendahuluan selanjutnya dilakukan dengan temperatur 500°C untuk mengetahui perubahan yang terjadi jika dilakukan pembakaran pada plastik. Sesuai dengan penelitian sebelumnya, sampel plastik PE, PP, PS, PET, dan PVC dilakukan pembakaran pada temperatur 500°C dengan waktu 30 menit menghasilkan berat tersisa sebesar 33,5 % (Adrados dkk, 2012).

Gambar 4.4 merupakan hasil percobaan pendahuluan pada temperatur 500°C dengan lama waktu pembakaran 30 menit. Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa masing-masing sampel mengalami penurunan terhadap berat tersisa. Sampel ranting mengalami penurunan dari percobaan pendahuluan sebelumnya hingga mencapai 31,87%. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.4 bahwa sampah plastik mengalami penurunan berat tersisa, sebagai contoh penurunan yang cukup tinggi pada sampel PET yaitu sebesar 70,42%. Sampel HDPE dan PS berat tersisa sebesar 92,7% dan 98,25%. Dibandingkan dengan ketiga sampel plastik lainnya, PET menghasilkan produk samping gas tertinggi.

Pada percobaan pendahuluan selanjutnya, dilakukan pembakaran pada temperatur 500°C dengan waktu 1 jam. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.4 bahwa setiap sampel mengalami penurunan berat tersisa. Jenis sampel HDPE dan PET mengalami penurunan berat tersisa cukup signifikan. Hal tersebut dapat disebabkan oleh titik lebur masing-masing jenis plastik HDPE dan PET, yaitu 495°C, 480°C sehingga pada saat dilakukan percobaan pendahuluan telah terjadi pengurangan berat tersisa cukup tinggi (Caglar dkk, 2009).



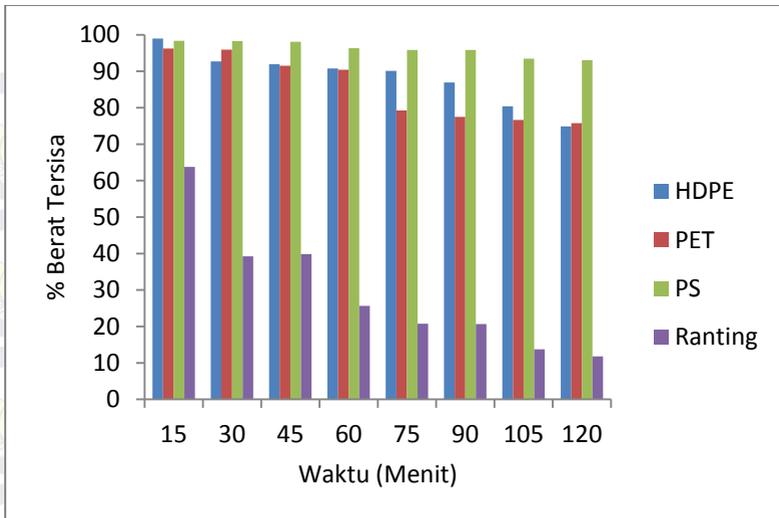
Gambar 4.3 Pembakaran Furnace 400°C



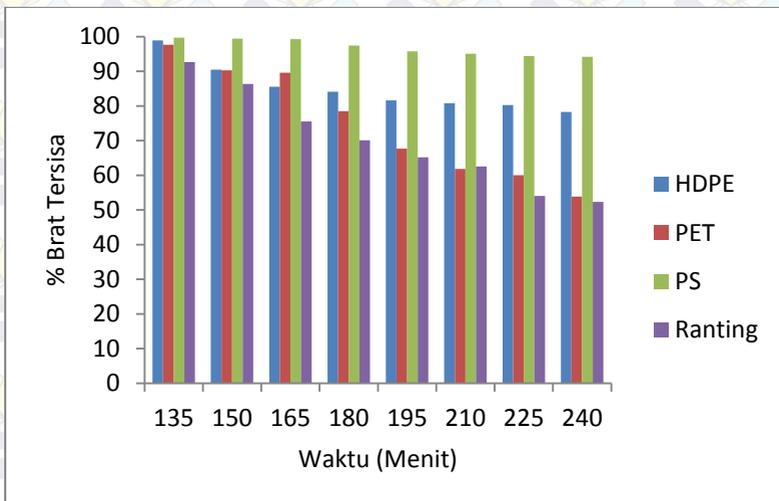
Gambar 4.4 Pembakaran Furnace 500°C

Berdasarkan percobaan pendahuluan dengan beberapa variasi temperatur dan waktu, terlihat bahwa pada percobaan pendahuluan pada temperatur 500°C dengan waktu 1 jam dapat membakar sampel lebih banyak dibandingkan dengan percobaan pendahuluan dengan variasi yang lainnya.

Oleh karena itu, dilakukan percobaan pendahuluan dengan temperatur 500°C selama 120 menit hingga 240 menit. Pada percobaan pendahuluan ini sampel diambil setiap 5 menit bertujuan untuk mendapatkan hasil pengurangan berat tersisa. Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 merupakan hasil pengurangan berat yang terjadi. Sampel HDPE, PET, dan ranting mengalami penurunan yang cukup tinggi pada rentang waktu 240 menit. Berdasarkan hal tersebut, HDPE, PET, dan ranting menghasilkan *wax* dan gas tinggi. Pada percobaan pendahuluan ini sampel PS tidak mengalami perubahan yang signifikan, oleh karena itu sampel PS menghasilkan *char* yang tinggi.



Gambar 4.5 Pembakaran Furnace 500°C waktu 120 menit



Gambar 4.6 Penelitian Pirolisis Bahan Plastik

4.4 Penelitian Pirolisis Bahan Plastik

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan terhadap hasil pirolisis dengan beberapa variasi sampel plastik. Perhitungan massa masing-masing sampel dilakukan di awal untuk menentukan massa yang dilakukan pirolisis dan perhitungan dilakukan di akhir untuk menentukan jumlah produk samping yang dihasilkan dari masing-masing jenis plastik.

Penimbangan dilakukan dengan menggunakan neraca analitik. Sampel dimasukkan ke dalam cawan 150 mL yang dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Pada penelitian ini dilakukan dengan kondisi operasi pada temperatur 500°C dengan waktu 30 menit. Pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 merupakan alat yang digunakan untuk pirolisis. Setelah 30 menit sampel dikeluarkan dari reaktor pirolisis dan dilakukan penimbangan pada hasil padatan. Kemudian dilakukan analisis kadar air, kadar abu, dan *volatile solid*.



Gambar 4.7 Gambar Reaktor Pirolisis



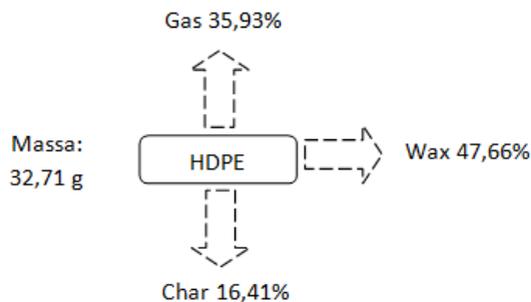
Gambar 4.8 Dalam Reaktor Pirolisis

Pirolisis dilakukan pada temperatur 500°C karena masing-masing jenis plastik HDPE, PET, dan PS dapat terdekomposisi yaitu 495°C, 480°C, dan 420°C (Caglar dkk, 2009). Kondisi ini sesuai dengan penelitian sebelumnya menggunakan bahan plastik dengan jenis PP dan PET dilakukan pirolisis pada temperatur 500°C dengan waktu 30 menit menghasilkan *wax* sebanyak 40,9%, gas 25,6%, dan padatan 53,5% (Adrados dkk, 2012).

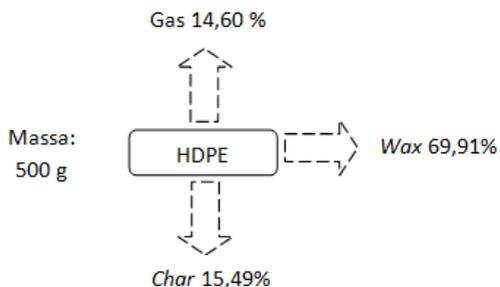
Plastik HDPE memiliki titik leleh 200°C-280°C dan dapat terdekomposisi pada suhu 495°C. Sampel plastik HDPE yang telah dipirolisis menghasilkan *char* yang mengandung *paraffins* dan *1-olefins*. *Paraffins* mengandung hidrokarbon rantai panjang yang biasanya terdapat pada bahan bakar. *Paraffins* berbentuk seperti lilin yang berwujud pada temperatur ruangan dan memiliki titik leleh >370°C. Padatan hasil HDPE apabila dilakukan pengolahan lanjutan dapat digunakan sebagai bahan bakar padat alternatif (Scheirs, 2006). Jenis plastik HDPE menghasilkan gas tinggi pada saat temperatur tinggi dan menghasilkan *wax* tinggi apabila temperatur rendah. Komposisi gas yang terbentuk yaitu metana, etilen, etana, dan propana. Pada temperatur tinggi kandungan propana akan menurun dan gas metana serta etilen akan meningkat. Gas metana tertinggi terbentuk pada temperatur 650°C dan 790°C sekitar 45%-55%. Pada fase cair, kandungan zat kimia terdiri dari benzena, toluena, naphthalena, dan zat aromatik lainnya (Jung dkk, 2006).

Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian pirolisis padatan yang dihasilkan memiliki sifat *paraffins*. Gambar 4.11 merupakan hasil pirolisis jenis plastik HDPE. Sampel HDPE yang telah dipirolisis menggunakan massa 32,71 g menghasilkan gas 35,93%; *wax* 47,66%; dan *char* 16,41%. Sedangkan pirolisis menggunakan massa 500 gram menghasilkan gas 14,60%; *wax* 69,91%; dan *char* 15,49%. Literatur menyebutkan pirolisis dengan bahan HDPE yang dilakukan pada suhu 500°C menghasilkan gas 0,9%; *wax* 97,7%; dan *char* 0,8% (Scheirs, 2006). Pada hasil tersebut terlihat bahwa HDPE menghasilkan *wax* tinggi apabila pada suhu 500°C dibandingkan dengan menghasilkan produk samping lainnya. Pada penelitian HDPE, hasil produk gas dan *wax* pada massa rendah dan tinggi tidak menunjukkan angka sama, hal

tersebut dapat dipengaruhi oleh perpindahan panas yang terjadi pada reaktor. Pada massa rendah perpindahan panas yang terjadi lebih mudah menyebar sehingga dapat menghasilkan gas cukup tinggi berbeda dengan pada massa tinggi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian pirolisis dengan waktu yang lebih lama agar dapat terjadi perpindahan panas yang sempurna. Temperatur merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi hasil pirolisis, selain menyebabkan itu kondisi tersebut menyebabkan produksi *char* yang cukup tinggi dibandingkan dengan literatur. Berikut merupakan skema pirolisis HDPE:



Gambar 4.9 Skema Hasil Pirolisis Bahan HDPE massa 32,71 g



Gambar 4.10 Skema Hasil Pirolisis Bahan HDPE massa 500 g

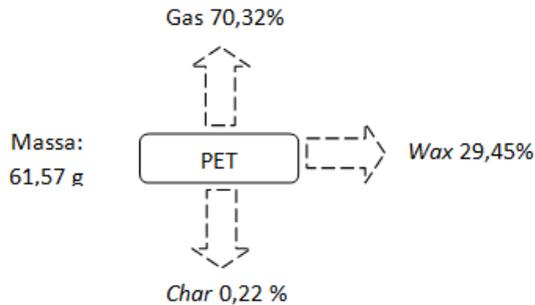


**Gambar 4.11 Hasil Pirolisis
Bahan HDPE**

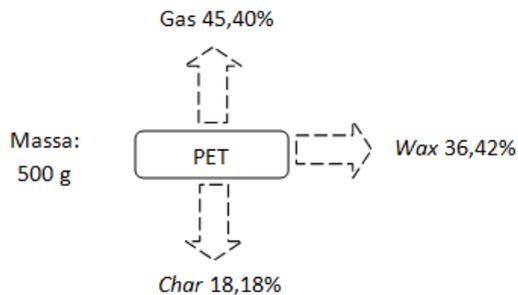
Plastik PET memiliki titik leleh pada temperatur 250°C - 260°C dan terdekomposisi pada temperatur 480°C . Sampel plastik PET pada temperatur rendah didominasi oleh TPA (Terephthalic Acid), pada kondisi temperatur tinggi TPA akan terdekomposisi menjadi benzene, CO_2 , dan *benzoic acid*. TPA merupakan molekul yang terdiri dari benzene (C_6H_6) dan gugus karboksilat (COOH). Oleh karena itu, kandungan gas PET terdiri dari zat tersebut. Berdasarkan penelitian tersebut, TPA yang terkandung dari PET bersifat menyublim, artinya molekul TPA secara cepat akan membentuk gas CO_2 , CO , dan CH_4 (Scheirs, 2006). Penelitian Jung dkk (2006), menyebutkan bahwa pirolisis dengan bahan PET pada temperatur 550°C menghasilkan gas H_2 2,1%; CH_4 1,8%; CO_2 37,8%; CO 52,6%. Penelitian pirolisis yang dilakukan tidak menghasilkan gas yang terkondensasi karena PET memiliki sifat dasar mudah menyublim. Pada *char* hasil pirolisis PET mengandung karbon sekitar 84,9%. Gambar 4.14 merupakan hasil pirolisis PET.

Pada penelitian pirolisis dengan massa 61,57 g menghasilkan gas 70,32%; *wax* 29,45%; dan *char* 0,22%. Sedangkan pada massa 500 g menghasilkan gas 45,40%; *wax* 36,42%; dan *char* 18,18%. Berdasarkan penelitian sebelumnya, pirolisis dengan plastik PET menghasilkan gas 49,1%; *wax* 39,4%; dan *char* 12,8%. Pirolisis dengan bahan PET didominasi hasil gas karena sifat dasar kimia PET yang mudah menyublim. Pada massa rendah pirolisis dengan bahan PET menghasilkan fase gas yang cukup tinggi, hal tersebut disebabkan oleh perpindahan panas yang terjadi dapat berjalan cepat karena massa yang rendah dibandingkan dengan massa yang tinggi. Selain itu, pada massa

500 g menghasilkan *char* yang cukup tinggi dibandingkan dengan massa rendah. Hasil pirolisis tersebut tidak berbeda jauh dengan hasil penelitian sebelumnya, bahwa PET menghasilkan gas yang tinggi. Berikut merupakan skema pirolisis PET:



Gambar 4.12 Skema Hasil Pirolisis Bahan PET 61,57 g



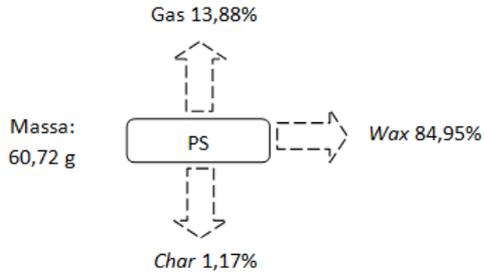
Gambar 4.13 Skema Hasil Pirolisis Bahan PET 500 g



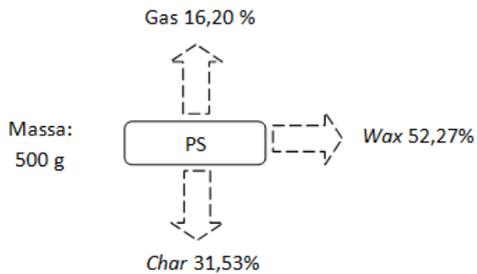
Gambar 4.14 Hasil Pirolisis Bahan PET

PS memiliki titik leleh pada suhu 180°C – 260°C dan dapat terdekomposisi pada temperatur 420°C. Sampel plastik PS pada kandungan bahan bakunya didominasi oleh stirena. Dekomposisi PS terjadi pada temperatur tersebut yang menghasilkan gas terkondensasi cukup tinggi dan mengandung stirena, benzena, toluena, dan trimethylbenzena. Produk bahan bakar yang berasal dari PS mengandung zat aromatik tinggi dan nilai kalori tinggi (Scheirs, 2006). Pada suhu pirolisis >700°C PS akan menghasilkan gas tinggi dibandingkan dengan hasil wax. Pada hasil gas mengandung monomer, dimers, dan trimers stirena. Pada penelitian PS menghasilkan dengan massa 60,72 g menghasilkan gas 13,88%; wax 84,95%; dan char 1,17%. Sedangkan pirolisis dengan massa 500 g menghasilkan gas 16,20%; wax 52,27%; dan char 31,53%. Pada kedua penelitian tersebut PS menghasilkan nilai wax yang tinggi sesuai dengan literatur. Pada penelitian sebelumnya pirolisis dengan bahan baku PS menghasilkan gas 0,02%; wax 99%; dan char 18,5% (Jung dkk, 2006). Oleh karena itu, pirolisis dengan bahan baku PS menghasilkan nilai wax tinggi yang dapat diolah menjadi bahan bakar alternatif.

Pada penelitian tersebut terlihat pirolisis dengan massa 500°C menghasilkan produk char yang tinggi, hal tersebut dipengaruhi oleh temperatur. Pada massa yang tinggi temperatur panas yang terjadi tidak dapat merata seperti pada suhu rendah. Oleh karena itu, pirolisis dengan bahan PS pada temperatur yang rendah menghasilkan kandungan char yang tinggi. Nilai wax merupakan potensi dari bahan baku tersebut 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 (Williams, 1998). Berikut merupakan skema pirolisis PS dan Gambar 4.17 merupakan hasil pirolisis PS.



Gambar 4.15 Skema Hasil Pirolisis Bahan PS massa 60,72 g



Gambar 4.16 Skema Hasil Pirolisis Bahan PS massa 500 g



Gambar 4.17 Hasil Pirolisis Bahan PS

Tabel 4.3 merupakan hasil penelitian menggunakan reaktor pirolisis dan didapatkan nilai *char* dan *wax* yang dihitung menggunakan analisis gravimetri. Pada tabel tersebut dapat terlihat bahwa sampel dengan jenis PET dapat menghasilkan gas lebih banyak dari jenis plastik dan komposisi yang lain. Kandungan gas yang terkandung pada hasil pirolisis pada bahan PET yaitu CO₂, acetaldehyde, benzoic acid, dan 4-vinyloxyarbon (Dimitrov dkk, 2013). Jenis plastik yang menghasilkan *wax*

tertinggi merupakan jenis plastik dengan PS sebesar 52,27%. Kandungan wax PS antara lain: stirena, benzena, toluena, dan trimethylbenzena. Berdasarkan penelitian sebelumnya, jenis plastik yang menghasilkan gas dan wax tertinggi yaitu jenis plastik PET dan PS dengan nilai 73,4% dan 99,7% (Scheirs, 2006).

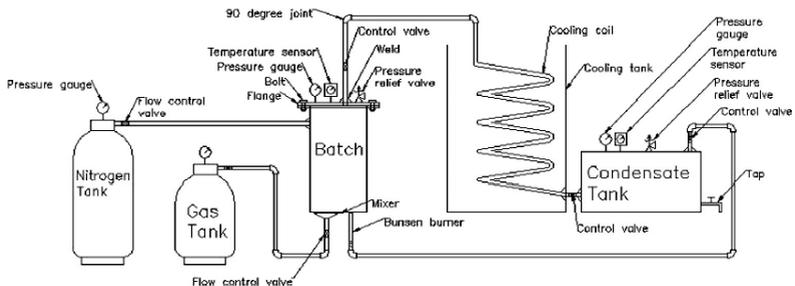
Pada penelitian ini reaktor yang digunakan belum sesuai dengan kapasitasnya. Kapasitas reaktor dapat menampung masing-masing jenis plastik hingga mencapai 1 kg. Pada penelitian pirolisis ini tidak menggunakan kapasitas penuh, karena bentuk reaktor yang kurang sempurna sehingga padatan/*char* yang dihasilkan setelah proses pirolisis tidak dapat diukur beratnya. Oleh karena itu, diperlukan penyempurnaan reaktor dengan menambahkan reaktor dalam agar padatan/*char* setelah pirolisis dapat diukur beratnya.

Pada penelitian ini dilakukan pirolisis kedua menggunakan reaktor dalam sementara dan menggunakan massa 500 gram. Pada saat pirolisis berlangsung, reaktor ini diletakkan di dalam ruangan dan menghasilkan gas cukup tinggi. Selain itu, kondensor yang digunakan belum dapat mendinginkan secara maksimal pada saat proses pirolisis sehingga dapat menjadi salah satu penyebab produk gas menjadi tinggi.

Beberapa parameter yang mempengaruhi penelitian ini yaitu temperatur, waktu pirolisis, dan rangkaian reaktor yang digunakan (Bridgwater, 2012). Pada penelitian sebelumnya keadaan kolom destilasi (kondensor) dapat mempengaruhi produk yang dihasilkan pada saat pirolisis, karena kondensor berfungsi sebagai alat yang dapat mengkonversi gas menjadi fase cair. Sehingga diperlukan penyempurnaan terhadap kondensor agar dapat menghasilkan gas terkondensasi dalam jumlah yang tinggi (Scheirs, 2006).

Dalam penelitian ini, digunakan kondensor dengan panjang 40 cm dengan penggunaan kondensor tersebut banyak dihasilkan gas yang tidak dapat terkondensasi. Oleh karena itu, perlu digunakan kondensor lebih panjang sebagaimana penelitian

Obeid dkk (2014), kondensor memiliki panjang sekitar 104 cm dan diameter $\frac{1}{4}$ inc dengan bentuk bertingkat, hal tersebut bertujuan agar waktu tinggal uap cukup lama dan dapat menghasilkan fase cair. Dimensi reaktor panjang 16 cm dengan lebar 8 cm. Pada percobaan tersebut rangkaian alat terdiri dari; tabung pirolisis berbahan *stainless steel*, tabung gas nitrogen dengan debit 0,2 L/detik, tabung penangkap uap terkondensasi sebesar 2 L, dan gas bertekanan. Pada penelitian tersebut sampah diletakkan pada reaktor kemudian dialirkan gas nitrogen, temperatur yang digunakan 450°C dengan waktu 45 menit. Kemudian gas yang terbentuk akan melewati kondensor dan ditangkap pada tabung kondensat, kemudian gas temperatur tinggi dan tidak menjadi gas yang terkondensasi seperti CH_4 akan dialirkan pada pemanas reaktor sebagai sumber energi. Berikut merupakan skema alat dan kondensor yang digunakan:

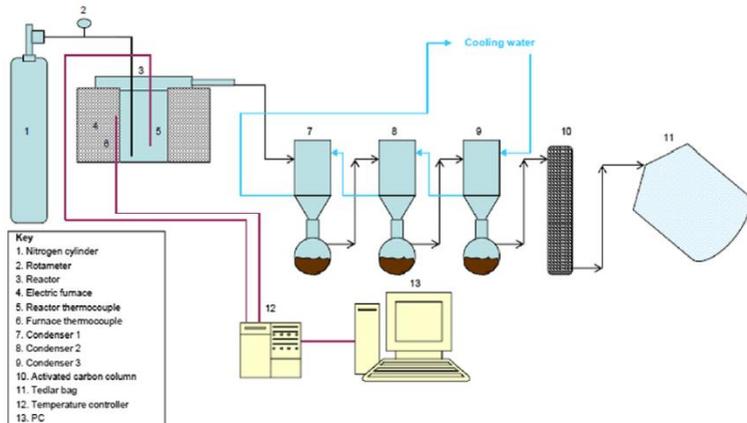


Gambar 4.18 Skema Alat Pirolisis A

Sumber : Obeid, 2014

Kondensor yang digunakan dapat lebih dari satu dengan adanya *trap* pada masing-masing kondensor. Sesuai dengan penelitian Lopez dkk (2011), alat yang digunakan terdiri dari: tabung reaktor, tabung gas nitrogen, rotameter, kondensor 1-3, dan tedlar bag. Pada penelitian tersebut suhu yang digunakan yaitu 440°C selama 30 menit. Volume reaktor yaitu sebesar $3,5 \text{ dm}^3$. Selama uap pirolisis melalui kondensor, uap mengalami pendinginan pada masing-masing kondensor. Uap yang tidak mengalami pendinginan sempurna akan melalui kondensor

selanjutnya untuk pendinginan hingga kondensor 3, setelah fase menjadi cair maka akan ditangkap pada masing-masing kondensor. Uap yang tidak terkondensasi akan melalui tabung karbon aktif dan ditangkap oleh plastik *Tedlar*. Berikut merupakan skema alat yang digunakan:



Gambar 4.19 Skema Alat Pirolisis B

Sumber: Lopez dkk, 2011

4.5 Penelitian Pirolisis Variasi Komposisi Ranting dan Plastik

Pada penelitian variasi komposisi ranting dan plastik dilakukan 6 variasi komposisi sampah. Hasil penelitian menggunakan variasi komposisi dijelaskan pada Tabel 4.2. Kondisi operasi reaktor yang digunakan yaitu temperatur 500°C dengan waktu 30 menit. Kondisi operasi reaktor diperoleh dari penelitian yang pernah dilakukan terdahulu. Selulosa dapat terdekomposisi pada temperatur 300°C sampai 400°C dengan temperatur optimum 350°C (Caglar dkk, 2009). Pada persiapan bahan uji, sampel ranting dan plastik yang dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis harus memiliki kandungan kadar air <10% dan setelah dilakukan pencacahan. Hal ini dilakukan agar perpindahan panas yang

terjadi pada reaktor segera merata ke seluruh permukaan sampel. Setelah dilakukan pirolisis selama 30 menit, dilakukan *proximate analysis* terhadap hasil.

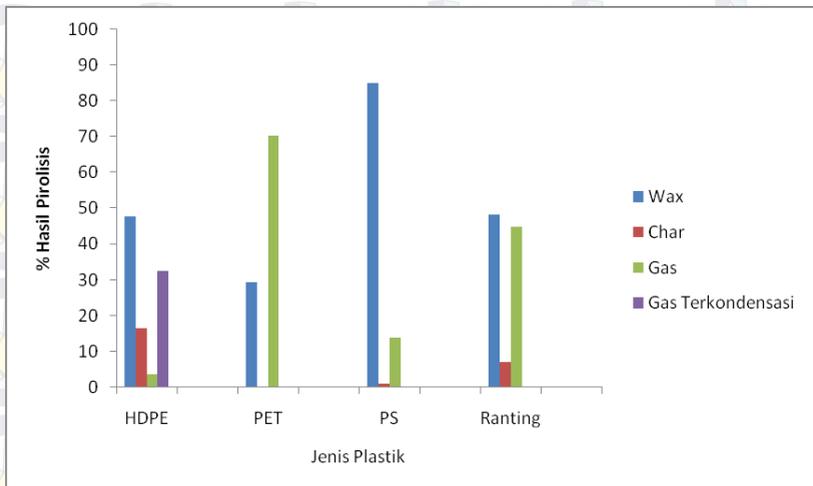
Sesuai dengan Tabel 4.2 terlihat bahwa sampel dengan bahan HDPE 50% dan ranting 50% menghasilkan *wax* sebesar 47,25%; *char* 7,58%; dan gas 45,17%. Sedangkan hasil pirolisis dengan komposisi ranting 25% dan HDPE 75% menghasilkan *wax* sebesar 52,31%; *char* 10,42%; dan gas 37,28%. Pada pirolisis dengan komposisi bahan plastik HDPE dan ranting terlihat bahwa hasil *wax* yang tinggi dibandingkan dengan produk yang lainnya. Hal tersebut sesuai dengan penelitian sebelumnya, bahwa pirolisis dengan jenis plastik HDPE menghasilkan *wax* yang tinggi yaitu sebesar 97,7%. Namun, pada penelitian ini terlihat bahwa gas yang dihasilkan juga cukup tinggi karena dipengaruhi oleh adanya ranting yang mengandung selulosa terdekomposisi pada suhu 350°C.

Komposisi dengan bahan PET 50% dan ranting 50% menghasilkan gas 66,63%, sedangkan untuk komposisi PET 75% dan ranting 25% menghasilkan gas 71,24%. Hal tersebut sesuai dengan sampel yang digunakan yaitu PET. Sampel PET menghasilkan produksi gas tertinggi. Kandungan gas yaitu CO, CO₂ dan CH₄. Gas CO dan CO₂ dihasilkan pada temperatur rendah. Pada pirolisis hal tersebut disebabkan oleh dekomposisi selulosa dan hemiselulosa pada temperatur 400°C. kemudian terjadi dekomposisi lignin yang menghasilkan H₂ dan CH₄ pada temperatur tinggi (Park dkk, 2014).

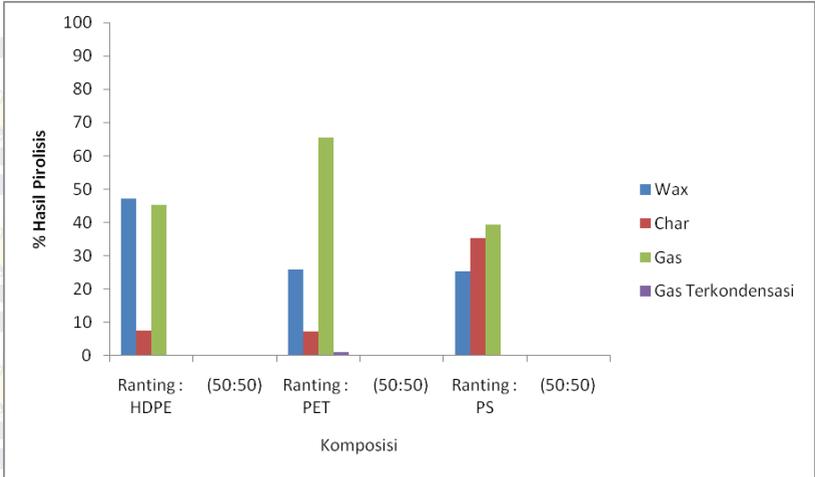
Pirolisis dengan bahan baku yang digunakan merupakan PS dan ranting 50:50 menghasilkan *wax* 25,4%; *char* 35,36%; dan gas 39,23%. Sedangkan dengan komposisi ranting dan PS 25:75 menghasilkan *wax* 61,36%; *char* 4,63%; dan gas 34,01%. Pada penelitian tersebut terlihat bahwa produk yang dihasilkan cukup tinggi berupa *wax*. Berdasarkan penelitian sebelumnya, bahan baku selulosa dan PS menghasilkan *wax* 58,80%. Namun, pada penelitian dengan komposisi 50:50 menghasilkan gas cukup tinggi hal tersebut dapat dipengaruhi adanya dekomposisi ranting yang mengandung selulosa dan dapat terdekomposisi pada suhu

350°C dan menghasilkan gas tinggi. Selain itu, komposisi tersebut menghasilkan *char* yang cukup tinggi, hal tersebut dapat terjadi salah satunya disebabkan oleh kurang sempurnanya perpindahan panas yang terjadi pada reaktor sehingga temperatur belum mencapai optimum untuk bahan tersebut dan menghasilkan *char* cukup tinggi (Akhtar, 2012).

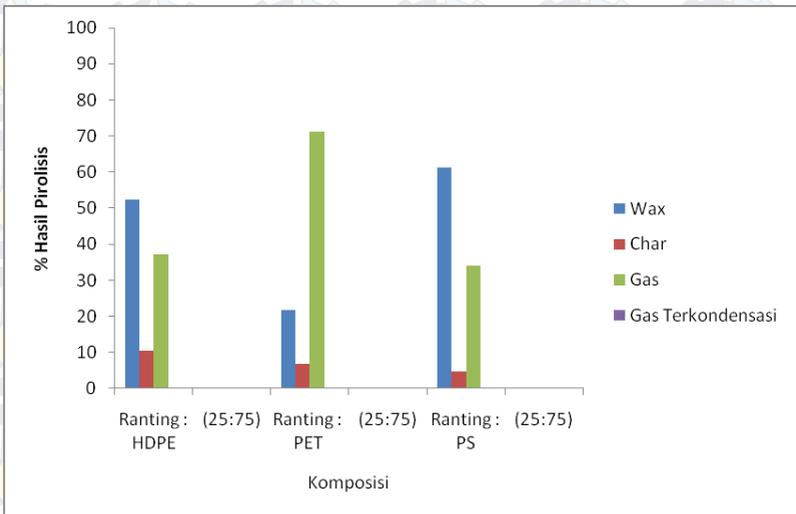
Berdasarkan penelitian tersebut terlihat bahwa pirolisis dengan komposisi 25% ranting dan 75% plastik bahan PET menghasilkan gas yang tinggi yaitu sebesar 71,24%. Sedangkan pirolisis dengan komposisi 25% ranting dan 75% plastik bahan PS menghasilkan *wax* tertinggi yaitu sebesar 61,36%. Berdasarkan penelitian Scheirs (2006) menyebutkan bahwa, jenis plastik dengan bahan PET menghasilkan gas sebesar 73,4%, sedangkan HDPE menghasilkan *wax* sebesar 97,7% dan PS menghasilkan *wax* 99,7%. Oleh karena itu, dapat terlihat bahwa potensi jenis plastik yang menghasilkan gas tinggi yaitu jenis plastik PET sedangkan jenis plastik yang berpotensi menghasilkan *wax* tertinggi yaitu jenis plastik PS dan HDPE.



Gambar 4.20 Hasil Pirolisis Jenis Plastik



Gambar 4.21 Hasil Pirolisis Komposisi 50:50



Gambar 4.22 Hasil Pirolisis Komposisi 25:75

Tabel 4.2 Penelitian Pirolisis Jenis Plastik dan Komposisi

No	Jenis Bahan	Kode	Padatan Tersisa (%)	Rata-rata Padatan Tersisa (%)	Hasil Padatan (%)		Hasil Gas (%)	
					Wax	Char	Gas	Gas Terkondensasi
1	HDPE	HDPE	69,63	64,07	47,66	16,41	3,55	32,38
		HDPE	60,27					
2	PET	PET	28,61	29,68	29,45	0,22	70,32	-
		PET	30,79					
3	PS	PS	87,28	86,12	84,95	1,17	13,88	-
		PS	85,07					
4	Ranting	Ranting	36,73	55,14	48,09	7,05	44,86	-
		Ranting	69,19					
5	Ranting : HDPE (50:50)	Ranting	34,03	54,83	47,25	7,58	45,17	-
		HDPE	76,11					
6	Ranting : PET (50:50)	Ranting	37,53	33,37	26,00	7,36	65,45	1,18
		PET	29,52					
7	Ranting : PS (50:50)	Ranting	35,56	60,77	25,40	35,36	39,23	-
		PS	84,55					

No	Jenis Bahan	Kode	Padatan Tersisa (%)	Rata-rata Padatan Tersisa (%)	Hasil Padatan (%)		Hasil Gas (%)	
					Wax	Char	Gas	Gas Terkondensasi
8	Ranting : HDPE (25:75)	Ranting	39,56	62,72	52,31	10,42	37,28	-
		HDPE	73,54					
9	Ranting : PET (25:75)	Ranting	38,43	28,76	21,85	6,91	71,24	-
		PET	25,69					
10	Ranting : PS (25:75)	Ranting	24,98	65,99	61,36	4,63	34,01	-
		PS	81,72					

Tabel 4.3 Penelitian Pirolisis Jenis Plastik Massa 500 g

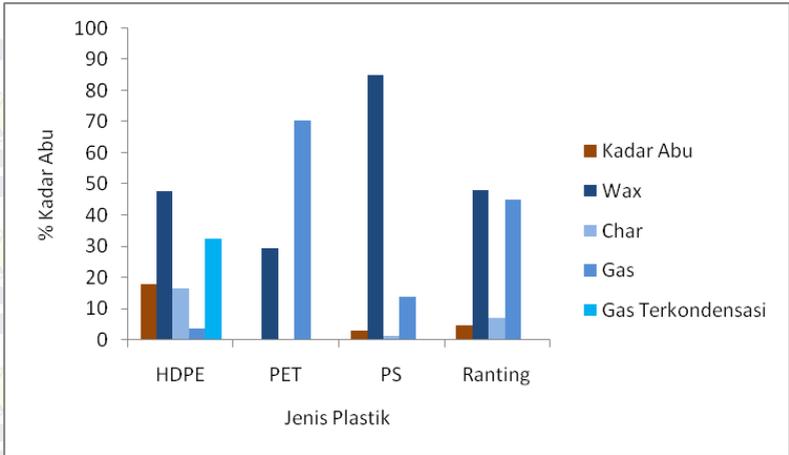
No	Jenis Bahan	Padatan Tersisa (g)	Padatan Tersisa (%)	Hasil Padatan (%)		Hasil Gas (%)	
				Wax	Char	Gas	Gas Terkondensasi
1	HDPE	427	85,40	69,91	15,49	14,60	-
2	PET	273	54,60	36,42	18,18	45,40	-
3	PS	419	83,80	52,27	31,53	16,20	-

4.6 Karakteristik Fisik Sampel Setelah Pirolisis

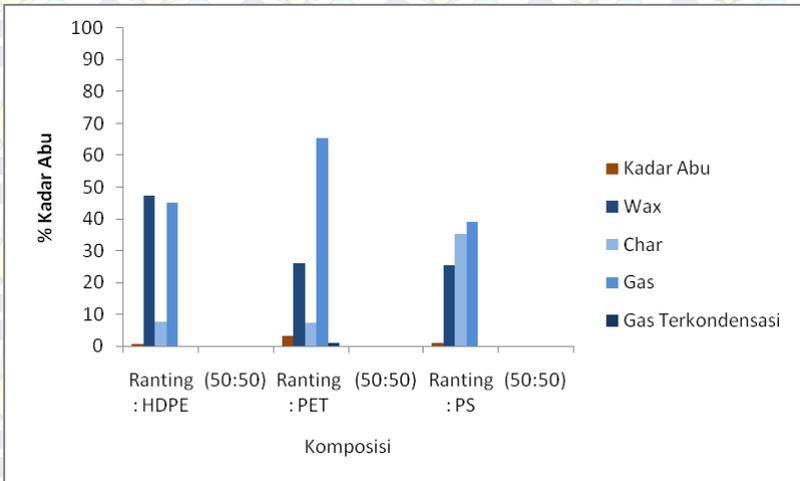
Penelitian yang telah dilakukan terhadap beberapa jenis plastik komposisi sampel, dapat terlihat bahwa nilai kadar air ranting dengan komposisi ranting 100% yaitu sebesar 3,05%. Tujuan pengukuran kadar air pada padatan sampel setelah pirolisis yaitu untuk mengetahui kandungan air yang tersisa pada padatan, karena kadar air yang tersimpan dapat mengurangi nilai kalor jika sampel digunakan pada proses pembakaran. Pada prosesnya, sampel ditimbang setiap 1 jam sekali untuk mengetahui kadar air yang terdapat pada sampel telah stabil atau belum setelah dipanaskan pada oven. Jika hasil penimbangan 1 dan penimbangan 2 tidak $> 4\%$ maka sampel dapat dihitung berat kering kemudian dihitung kadar air. Ranting dan PET yang memiliki kadar air tinggi menghasilkan gas cukup tinggi. Kadar air dapat berpengaruh terhadap hasil gas terkondensasi yang memiliki fase kandungan air tinggi.

Kadar abu ranting yaitu sebesar 12,78% dan kadar *volatile solid* sebesar 87,22%. Kadar abu merupakan massa yang tertinggal pada saat pembakaran terjadi dan mengandung bahan-bahan anorganik. Berdasarkan bahwa kadar abu dengan jenis plastik PET menunjukkan nilai terendah yaitu sebesar 0,75% hal tersebut sesuai dengan hasil pirolisis pada Tabel 4.2 bahwa plastik jenis PET menghasilkan nilai char terendah yaitu sebesar 0,22%. Sesuai dengan literatur kadar abu plastik PET sebesar 0,09% dengan kadar *volatile* yang tinggi sehingga berpotensi menghasilkan gas yang tinggi (Zhou dkk, 2014). Gambar 4.26 merupakan hasil pengukuran kadar abu dengan massa 500 g.

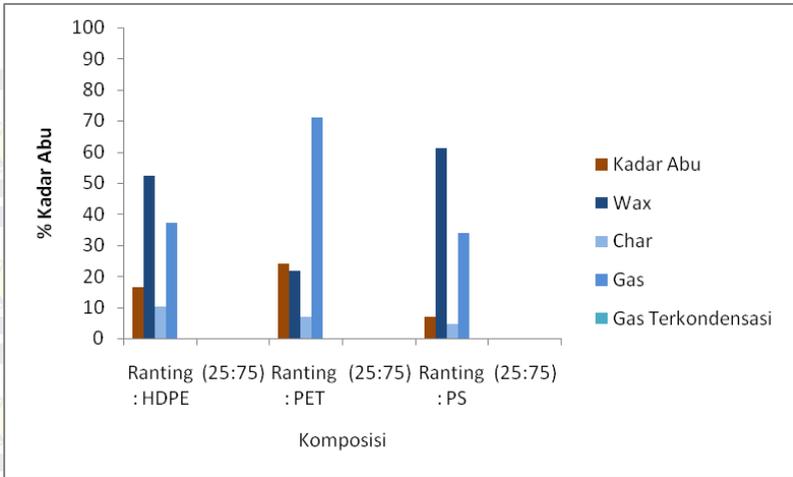
Analisis kadar abu dilakukan setelah sampel padatan dilakukan analisis kadar air. Sampel kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat awal sebelum dilakukan analisis kadar abu. Prosedur tercantum pada lampiran B. Pada penelitian pirolisis analisis kadar abu merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi produksi *char* yang dihasilkan. Semakin tinggi nilai kadar abu maka semakin tinggi produksi padatan dan gas yang akan dihasilkan (Abnisa dkk, 2014).



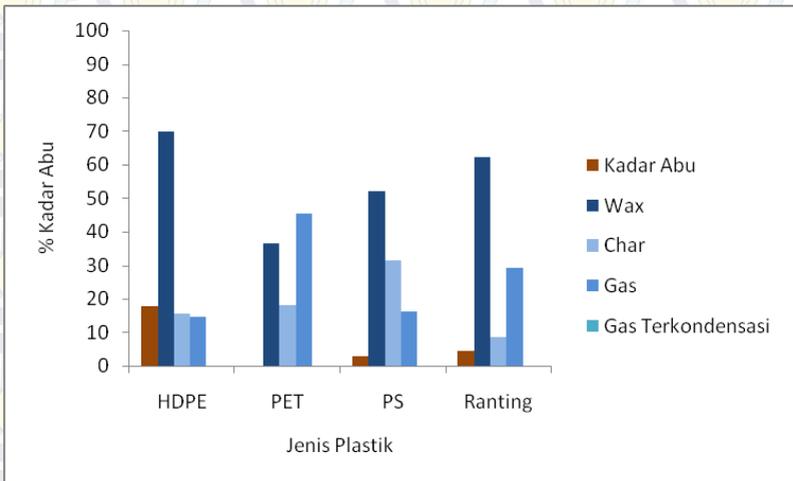
Gambar 4.23 Kadar Abu Jenis Plastik dan Ranting



Gambar 4.24 Kadar Abu Komposisi 50:50



Gambar 4.25 Kadar Abu Komposisi 25:75

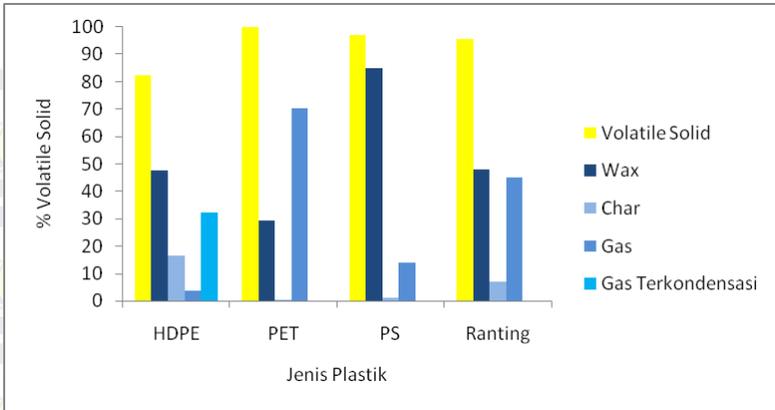


Gambar 4.26 Kadar Abu Pirolisis 500 g

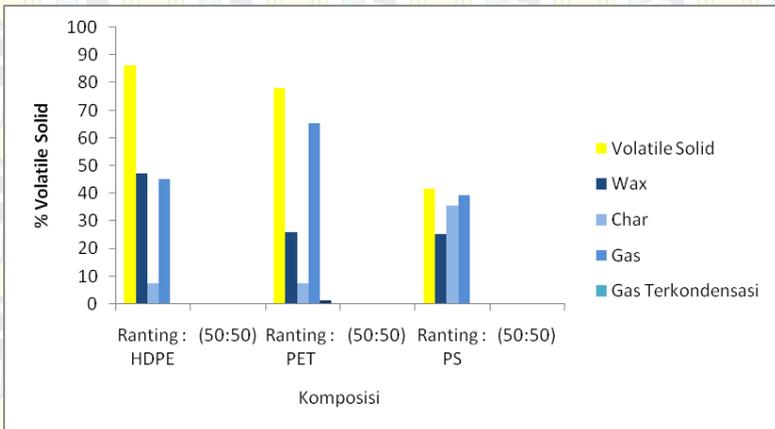
Kadar *volatile solid* merupakan unsur yang mudah menguap dari suatu zat pada saat pembakaran. Prosedur analisis untuk *volatile solid* sama dengan prosedur abu namun berbeda pada perhitungan akhir saja. Nilai *volatile solid* tertinggi rata-rata pada sampel PET yaitu sebesar 99,25%. Nilai *volatile solid* tinggi pada plastik jenis PET mempengaruhi hasil penelitian pirolisis dengan sampel jenis plastik PET yang memiliki hasil pirolisis gas tertinggi yaitu sebesar 70,32%. Hal tersebut membuktikan bahwa kadar *volatile solid* berpengaruh penting terhadap produk pirolisis yang dihasilkan.

Volatile solid memiliki pengaruh penting terhadap potensi gas dan *wax* yang akan dihasilkan. Semakin tinggi kadar *volatile solid* suatu bahan maka semakin tinggi potensi bahan tersebut untuk menghasilkan gas dan *wax*. Kadar *volatile solid* pada kayu bergantung pada kandungan lignoselulosa. Lignoselulosa terdiri dari lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Selulosa yang banyak terkandung pada ranting pohon dapat terdekomposisi dari temperatur yang rendah hingga pada temperatur yang sangat tinggi. Ranting yang memiliki kandungan lignin tinggi akan menyebabkan produksi padatan yang tinggi (Abnisa dkk, 2014).

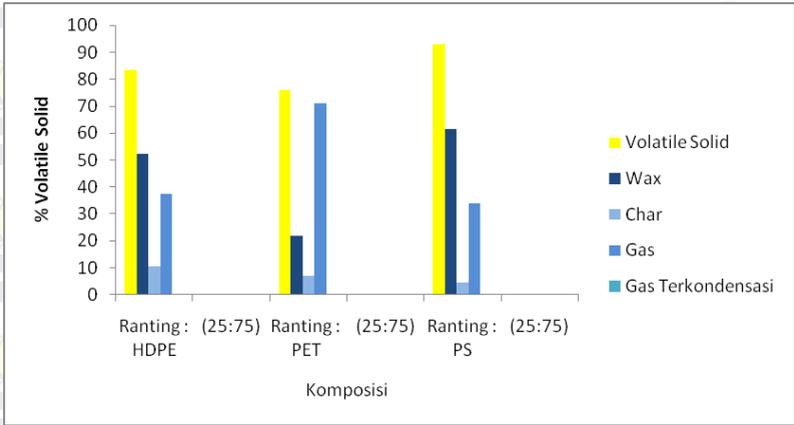
Sesuai pada bahwa kandungan *volatile solid* pada ranting cukup tinggi yaitu 87,22%. Nilai tersebut tidak berbeda jauh dengan jenis plastik yang lainnya. Dari analisis ini dapat terlihat bahwa penelitian pirolisis yang telah dilakukan menghasilkan padatan yang lebih banyak dibandingkan dengan gas dan *wax* karena sesuai dengan kandungan bahan baku yang digunakan pada pirolisis. Pada Gambar 4.30 merupakan kadar abu dengan pirolisis 500 g.



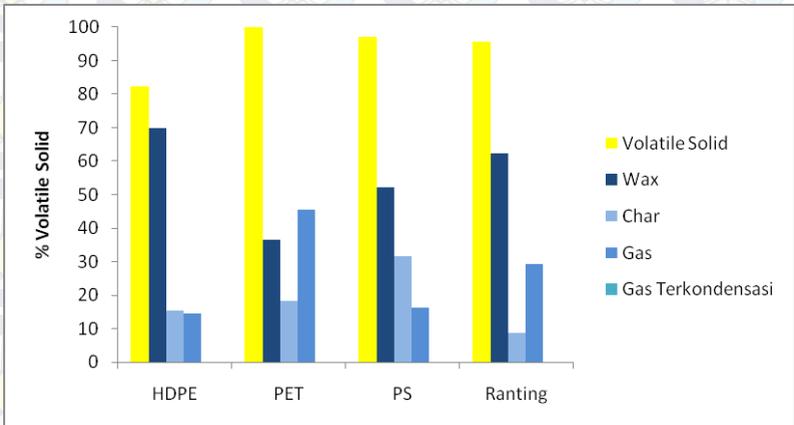
Gambar 4.27 Kadar *Volatile Solid* Jenis Plastik dan Ranting



Gambar 4.28 Kadar *Volatile Solid* Komposisi 50:50



Gambar 4.29 Kadar Volatile Solid Komposisi 25:75



Gambar 4.30 Kadar Abu Pirolisis 500 g

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini, yaitu

1. Jenis sampah plastik yang menghasilkan gas tertinggi yaitu jenis plastik PET sebesar 45,40% dan jenis plastik yang menghasilkan wax tertinggi yaitu jenis plastik HDPE sebesar 69,91%.
2. Komposisi yang menghasilkan gas tertinggi yaitu komposisi dengan ranting 25% dan PET 75% sebesar 71,24% dan komposisi yang menghasilkan wax tertinggi yaitu komposisi dengan ranting 25% dan PS 75% sebesar 61,36%.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian pirolisis selanjutnya, antara lain:

1. Dalam penelitian pirolisis faktor ukuran kondensor sangat penting untuk diperhatikan. Panjang kondensor disarankan minimal 100 cm.
2. Penelitian terhadap kualitas atau parameter kimia gas, minyak kondensasi dan wax perlu dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., Daud, W. M. A. W. D. 2014. Energy Conversion and Management. *A Review on Co-Pyrolysis of Biomass: An Optional Technique to Obtain A High Grade Pyrolysis Oil* 87:71-85.
- Adrados, A., Marco, de., Caballero, B. M., López, A., Laresgoiti, M. T., Torees, A. 2012. Pyrolysis of Plastic Packaging Waste: A Comparison of Plastic Residuals from Material Recovery Facilities with Simulated Plastic Waste. *Waste Management* 32:826-832
- Agustia, Y. P. 2013. *Emisi Gas Rumah Kaca Pengelolaan dan Pengangkutan Sampah Pemukiman di Kecamatan Gubeng, Surabaya Timur*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Amilia, R., Yusindra, S. E. 2011. *Briket dari Char Pirolysa Tempurung Kelapa*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Akhtar, J., Amin, S. N. 2012. Renewable and Sustainable Energy Reviews. *A Review on Operating Parameters for Optimum Liquid Oil Yield in Biomass Pyrolysis* 16:5101-5109.
- Badan Standarisasi Nasional. 2008. SNI 3242 Tentang Pengelolaan Sampah di Permukiman. Jakarta.
- Borman, G. L., Ragland, K. W. 1998. Combustion Engineering, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- Bridgwater, A. V. 1980. Resource Recovery and Conservation. *Waste Inceneration and Pyrolysis*. 5(1):99-115.
- Bridgwater, A. V. 2012. Biomassa and Energy. *Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading* 38:68-94
- Browneel, L. E., Young, E. H., 1979. *Equipment Design*. London: John Wiley and Sony inc.
- Caglar, A., Aydinli, B. 2009. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. *Isothermal Co –Pyrolysis of Hazelnut Shell and Ultra High Molecular Weight Polyethylene : The Effect of Temperature and Composition on the Amount of Pyrolysis Products* 86 : 304-309.

Cunliffe, A.M., Williams, P.T. 1998. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. *Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres* 44:131–152.

Damanhuri, Enri., Padmi, Tri. 2008. Pengurugan (*Landfill*). Institut Teknologi Sepuluh Nopember: Program Studi Teknik Lingkungan FTSL.

Delgado, R., Rosas, J. G., Gómez, N., Matinez, O., Sanchez, M. E., Cara, J. 2013. Fuel. *Energy Valorisation of Crude Glycerol and Corn Straw by Means of Slow Co-Pyrolysis: Production and Characterisation of Gas, Char, and Bio Oil* 112:31-37.

Dimitrov, N., Krehula, L. K., Sirocic, A. P., Murgic, Z. H. 2013. Polymer Degradation and Stability. *Analysis of Recycled PET Bottles products by Pyrolysis-Gas Chromatography* 98:972-979.

Di Blasi, C. 2008. Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science* 34:47-99.

Ellens, C. J., Brown, R. C. 2012. Biosource Technology. *Optimization of Free Fall Reactor for the Production of Fast Pyrolysis Bio Oil* 103:374-380

Girard, J. P. 1992. Smoking in Technology of Meat Product. New York: Clermont Ferrand, Ellis Horwood.

Gusmailina, G. P. 2002. Buletin Penelitian Hasil Hutan. *Pengaruh Pemberian Char/residu terhadap Pertumbuhan Tanaman Cabai Merah (Capsicum annum)* 20(3):217-229.

Haji, G. A., Mas'ud, Z. A., Lay, B. W., Sutjahjo, S. H., Pari, G. 2006. Karakteristik Asap Cair Hasil Pirolisis Sampah Organik Padat. Bogor : Institut Pertanian Bogor.

Himawanto, D. A., Indarto., Saptoadi, H., Rohmat, T. A. 2011. Reaktor. Karakteristik dan Pendekatan Kinetika Global pada Pirolisis Lambat Sampah Kota Terseleksi 13(3):140-147.

López, A., Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Adrados, A. 2010. Waste Management. *Pyrolysis of Municipal Plastic Waste: Influence of Raw Material Composition* 30:620-627.

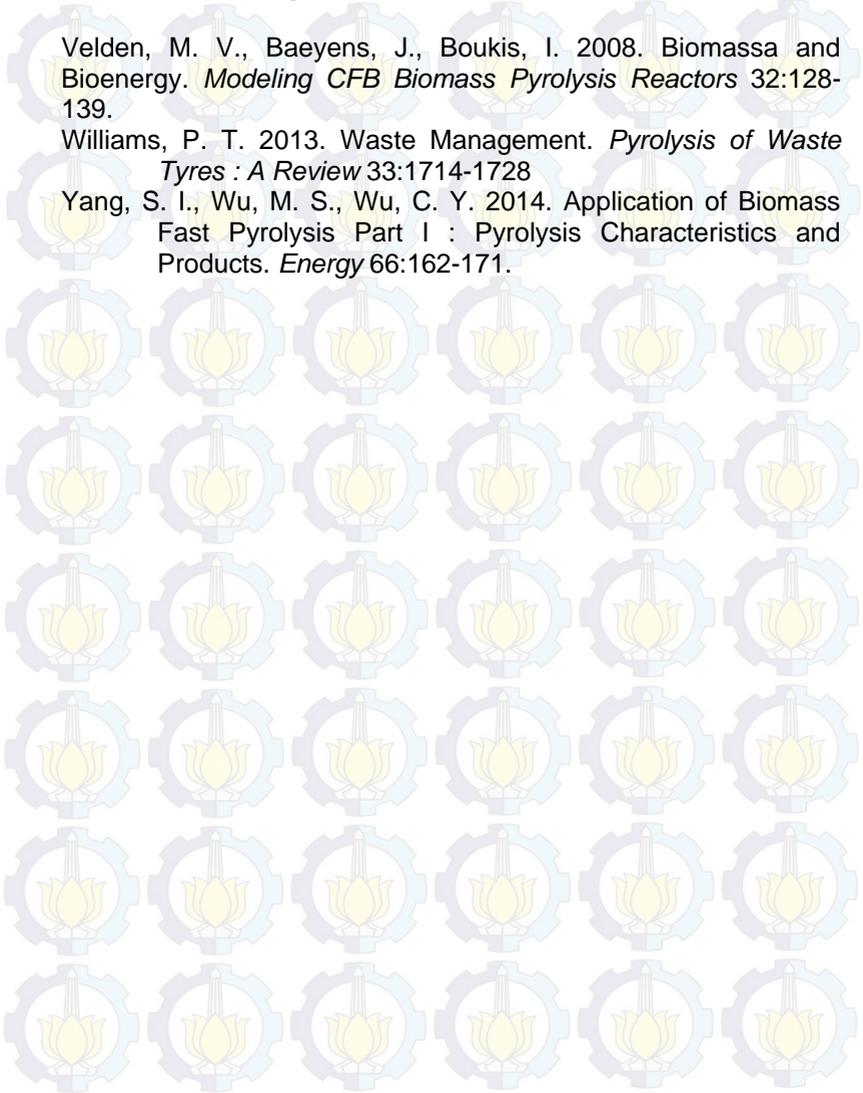
- Maga, J. A. 1998. *Smoke in Food Processing*. Florida : CRC Press.
- Obeid, F., Joseph, Z., Al-Muhtaseb, A.H., Bouhadir, K. 2014. Thermo-catalytic Pyrolysis of Waste Polyethylene Bottles in a Packed Bed Reactor with Different Bed Materials and Catalysts. *Energy Conversion and Management* 85:1-6.
- Ojolo, S. J., Bamgboye, A. I. 2005. Agricultural Engineering International : the CIGR E Journal Fuel and Reduce Waste. *Conversion of Municipal Solid Waste to Produce Fuel and Reduce Waste* 7.
- Park, J., Lee, Yongwoon., Ryu, C., Park, Y. 2014. Sloe Pyrolysis of Rice Straw: Analysis of Products Properties, carbon, and energy yield. *Bioresource Technology* 155:63-70.
- Pemerintah Republik Indonesia. *Status Lingkungan Hidup Kota Surabaya Tahun 2012*.
- Putra, A. R. P. 2011. *Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Wax dengan Proses Pirolisis*. Surabaya : Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jatim.
- Pszezola, D. E. 1995. Tour highlights production and uses of smoke-based flavors. Liquid smoke a natural aqueous condensate of wood smoke provides various advantages in addition to flavors and aroma. *J Food Tech* 1:70-74.
- Ratnasari, F. 2011. *Pengolahan Cangkang Kelapa Sawit dengan Teknik Pirolisis untuk Produksi Bio Oil*. Semchar/residu : Universitas Diponegoro.
- Sulistiyorini, L. 2005. Pengelolaan Sampah dengan Cara Menjadikannya Kompos. *Jurnal Kesehatan Lingkungan* 2(1):77-84.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A. 1993. *Integrated Solid Waste Management : Engineering Principles And Issues*. McGraw Hill International Editions.
- Unus, S. 2002. *Pupuk Organik Kompos dari Sampah, Bioteknologi Agroindustri*. Bandung : Humaniora Utama Press.

United State Environmental Protection Agency. 2013. *Solid Waste Management*.

Velden, M. V., Baeyens, J., Boukis, I. 2008. Biomassa and Bioenergy. *Modeling CFB Biomass Pyrolysis Reactors* 32:128-139.

Williams, P. T. 2013. Waste Management. *Pyrolysis of Waste Tyres : A Review* 33:1714-1728

Yang, S. I., Wu, M. S., Wu, C. Y. 2014. Application of Biomass Fast Pyrolysis Part I : Pyrolysis Characteristics and Products. *Energy* 66:162-171.



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Qonita Rachmawati lahir di Lamongan tanggal 7 Juni 1993. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya TK Aisyiyah Bustanul Athfal 1. SDN Kutorejo 2 Tuban, SMP Negeri 1 Tuban, SMA Taruna Nusantara Magelang, dan melanjutkan kuliah di Jurusan Teknik Lingkungan FTSP-ITS Surabaya dengan NRP 3311 100 117. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif berorganisasi di Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (BEM FTSP) dan Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) ITS. Pada organisasi tersebut penulis tergabung sebagai staff pada dua periode yaitu 2012/2013 dan 2013/2014. Selain itu, penulis juga aktif pada kegiatan kepanitiaan jurusan, fakultas, maupun institut. Penulis berharap penelitian ini dapat berguna pada kehidupan pembaca sekalian.