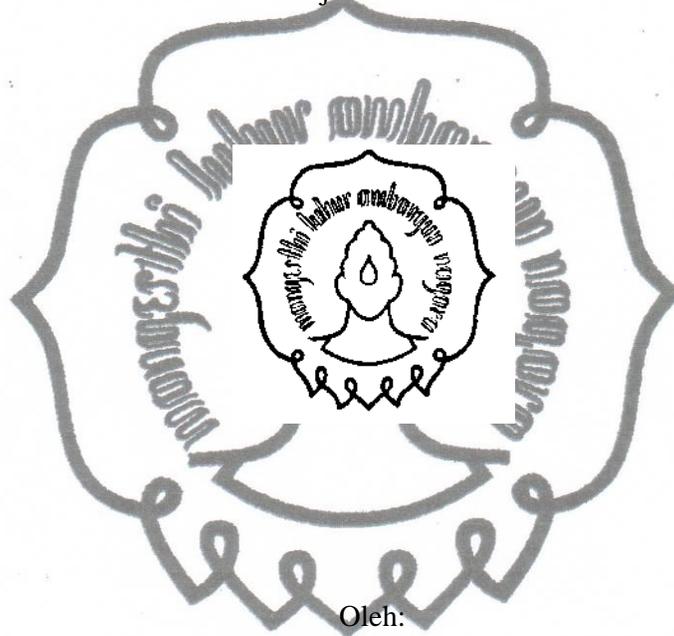


**STUDI SIFAT MINYAK PIROLISIS CAMPURAN SAMPAH
BIOMASA DAN SAMPAH PLASTIK *POLYPROPYLENE (PP)***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Oleh:

ADITYO SURYO AJI WIBOWO
I 0406009

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA
2011**

commit to user

**STUDI SIFAT MINYAK PIROLISIS CAMPURAN SAMPAH BIOMASA
DAN SAMPAH PLASTIK *POLYPROPYLENE (PP)***

Disusun oleh

Adityo Suryo Aji Wibowo
NIM. I 0406009

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Tech. Suyitno, S.T.M.T.
NIP. 197409022001121002

Zainal Arifin, ST,MT
NIP.197303082000031001

Telah dipertahankan di hadapan Tim Dosen Penguji pada hari..... Tanggal
..... Maret 2011

1. Rendy Adhi Rachmanto., ST,MT
NIP. 197101192000121006

2. Wibawa Endra Juwana., ST,MT
NIP. 197009112000031001

3. Jaka Sulistya Budi, ST
NIP. 196710191999031001

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Koordinator Tugas Akhir

Dody Ariawan, S.T.M.T.
NIP.197308041999031003

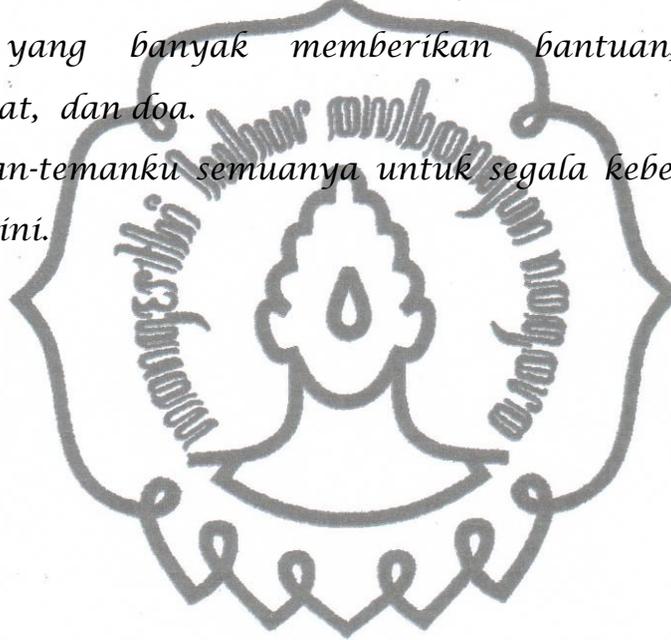
Wahyu Purwo R., ST,MT
NIP. 19720229 200012 1 001

commit to user

PERSEMBAHAN

Karya ini kupersembahkan untuk:

- 1. Bapakku Terhormat Bapak Suparto SH dan Mamahku Tercinta Mamah Titi Sugiharti untuk seluruh doa dan bantuan yang telah engkau keluarkan demi putramu ini.*
- 2. Saudaraku tercinta: Mbak Diana, Adek Andika dan Adek Arda yang banyak memberikan bantuan, inspirasi, semangat, dan doa.*
- 3. Teman-temanku semuanya untuk segala kebersamaanmu selama ini.*



MOTTO

“Think big“
(Donald Trump)

“Berfikir Baik, Berperasaan Baik, dan Lakukanlah Yang Baik”
(Mario Teguh)

Demi masa. Sesungguhnya manusia itu benar-benar dalam kerugian, kecuali orang-orang yang beriman dan mengerjakan amal saleh dan nasehat menasehati supaya mentaati kebenaran dan nasehat menasehati supaya menetapi kesabaran.

(Al 'Ashr)

Bukankah Kami telah melapangkan untukmu dadamu, dan Kami telah menghilangkan daripadamu bebanmu, yang memberatkan punggungmu, Dan Kami tinggikan bagimu sebutan (nama)mu, Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.

{Alam Nasyrah}

Kemuliaan orang adalah agamanya, harga dirinya (kehormatannya) adalah akalunya, sedangkan ketinggian kedudukannya adalah akhlakunya.

(HR. Ahmad dan Al Hakim)

Sesungguhnya Allah baik dan menyukai kebaikan, bersih dan menyukai kebersihan, murah hati dan senang kepada kemurahan hati, dermawan dan senang kepada kedermawanan. (HR. Tirmidzi)

Besarnya pahala sesuai dengan besarnya ujian dan cobaan. Sesungguhnya Allah 'Azza wajalla bila menyenangkan suatu kaum Allah menguji mereka. Barangsiapa bersabar maka baginya manfaat kesabarannya dan barangsiapa murka maka baginya murka Allah. (HR. Tirmidzi)

commit to user

STUDI SIFAT MINYAK PIROLISIS CAMPURAN SAMPAH BIOMASA DAN SAMPAH PLASTIK *POLYPROPYLENE* (PP)

Adityo Suryo Aji Wibowo

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Sebelas Maret
Surakarta, Indonesia

Abstrak

Indonesia menghasilkan sampah dengan jumlah yang sangat tinggi. Sampah ini dapat dimanfaatkan kembali dengan cara proses pirolisis. Proses pirolisis adalah proses dekomposisi sampah dengan menggunakan temperatur yang tinggi, tanpa adanya oksigen, dan menghasilkan produk cairan yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Reaktor pirolisis dibuat berkapasitas 1,5 kg dengan pemanas dari listrik. Didalam penelitian ini diteliti mengenai massa jenis, viskositas, dan nilai kalor. Selanjutnya, minyak hasil pirolisis dimanfaatkan untuk memasak air dengan menggunakan kompor. Efisiensi kompor berbahan bakar minyak pirolisis diuji dengan menggunakan metode standar *water boiling test* (wbt). Sampah yang diproses dengan pirolisis terdiri dari sampah biomasa dan sampah plastik *polypropylene* dengan menggunakan suhu 400°C, 500°C dan 600°C dengan perbandingan komposisi 70% biomassa : 30% plastik ; 50% biomassa : 50% plastik ; dan 30% biomassa : 70% plastik. Dari penelitian ini diperoleh hasil efisiensi kompor berbahan bakar minyak yang terbaik pada komposisi 30% biomassa : 70% plastik pada temperatur 400°C yaitu sebesar 24% dan ini setara dengan efisiensi minyak tanah pada pengujian ini. Nilai kalor tertinggi terdapat pada komposisi 30% biomassa : 70% plastik pada temperatur 400°C yaitu sebesar 46,5MJ/kg, massa jenis tertinggi terdapat pada komposisi 70% biomassa : 30% plastik pada temperatur 400°C yaitu sebesar 0,81 kg/L, dan viskositas tertinggi terdapat pada komposisi 70% biomassa : 30% plastik pada temperatur 400°C yaitu sebesar 5cp.

Kata kunci: pirolisis, biomasa, *polypropylene*, sampah, bahan bakar minyak, *water boiling tes*, temperatur, efisiensi, kompor.

STUDY OF PYROLYSIS OIL FROM MIXTURE OF BIOMASS AND PLASTIC POLYPROPYLENE (PP) WASTES

Adityo Suryo Aji Wibowo

**Mechanical Engineering Department
Sebelas Maret University
Surakarta, Indonesia**

Abstract

Indonesia produces waste with a very high number. This waste can be reused by means of pyrolysis. The pyrolysis process is the decomposition process of waste by using high temperatures, without oxygen, and produced a liquid product that can be used as fuel. Pyrolysis reactor was built with a capacity of 1,5 kg and heated by electric heaters. In this research was examined about density, viscosity, and heating value of the pyrolysis oil. Furthermore, the results of pyrolysis oil were used in stove for cooking water. Efficiency of pyrolysis oil-fired stoves was tested by using standard methods of water boiling test (WBT). Wastes were processed by pyrolysis and consisted of biomass waste and plastic waste from type of polypropylene. The pyrolysis was performed by using temperature of 400°C, 500°C, and 600°C with composition ratio of 70% biomass : 30% plastic; 50% biomass : 50% plastic and 30% biomass : 70% plastic. From this experiment can be concluded that the best efficiency for stove of oil pyrolysis was produced from composition 30% biomass : 70% plastic at temperature 400°C as big as 24% and this efficiency result is equal with kerosene at this experiment. The highest heating value was produced from composition 30% biomass : 70% plastic at temperature 400°C as big as 46,5 MJ/kg. The highest density value was produced from composition 70% biomass : 30% plastic at temperature 400°C as big as 0.81 kg/L, and the highest viscosity value was produced from composition 70% biomass : 30% plastic at temperature 400°C as big as 5cp.

Keywords: pyrolysis, biomass, polypropylene, waste, oil fuel, water boiling test, temperature, efficiency, stove.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warohmatullohi wabarokatuh.

Puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah Subhanahu Wata'ala yang telah melimpahkan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Selama menyelesaikan tugas akhir ini penulis memperoleh banyak ilmu dan pengalaman yang mudah-mudahan dapat dijadikan bekal untuk masa depan penulis.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis banyak memperoleh bantuan, bimbingan, pengalaman dan pelajaran yang sangat berharga dari berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini perkenankanlah Penulis menghaturkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dody Ariawan, S.T. M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FT UNS.
2. Bapak Dr. Tech. Suyitno, S.T.M.T. dan Bapak Zainal Arifin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing skripsi.
3. Bapak-bapak dosen di Jurusan Teknik Mesin UNS.
4. Kedua orang tuaku tercinta dan semua saudaraku tersayang.
5. Saudara-saudaraku seperjuangan di Laboratorium Konversi Energi.
6. Semua teman-temanku untuk dukungan dan do'anya

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna, untuk itu masukan dan saran membangun akan penulis terima dengan ikhlas dan penulis mengucapkan terimakasih. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca pada umumnya. Akhirnya semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi kemajuan bersama.

Surakarta, Maret 2011

Penulis

commit to user

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR RUMUS	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Perumusan dan Batasan Masalah	1
1.3.Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
1.4.Sistematika Penulisan	3
BAB II DASAR TEORI	4
2.1.Tinjauan Pustaka	4
2.2.Pirolisis	8
2.3.Biomassa	8
2.4.Plastik	9
2.5.Pirolisis lambat	10
2.6.Parameter yang Berpengaruh Pada Proses Pirolisis	11
2.7.Pengujian karakteristik minyak pirolisis	13
2.7.1. Viskositas	13
2.7.2. Massa Jenis	15
2.7.3. Nilai Kalor	16
2.8.Perfomansi minyak pirolisis	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1.Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2.Alat dan Bahan yang Digunakan	21
3.3.Skema Alat	23
3.4.Pelaksanaan penelitian	24
3.5.Tahapan Pengujian	25
3.6.Metode Analisa Data	29
3.7.Diagram Alir Penelitian	30
3.8.Jadwal Penelitian	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1.Hasil Pirolisis	31
4.1.1. Pirolisis pada Temperatur 400°C	31
4.1.2. Pirolisis pada Temperatur 500°C	32
4.1.3. Pirolisis pada Temperatur 600°C	33
4.1.4. Analisis Perbandingan Hasil Pirolisis pada Tempe- ratur 400, 500, dan 600°C	33
4.2.Pengujian Karakteristik Minyak Pirolisis	36
4.2.1. Viskositas	37
4.2.2. Massa jenis	38

commit to user

4.2.3. Nilai Kalor	39
4.3. Pengujian Efisiensi Kompor dengan Bahan Bakar Minyak Pirolisis	40
BAB V PENUTUP	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN	46



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Jumlah produk dari reaksi pirolisis dan gasifikasi	11
Tabel 2.2. Viskositas beberapa fluida.....	15
Tabel 2.3. Massa jenis berbagai fluida.....	16
Tabel 2.4. Nilai kalor berbagai macam bahan bakar	18
Tabel 4.1. <i>Viskositas</i> minyak pirolisis	37
Tabel 4.2. <i>Viskositas</i> bahan bakar minyak dan pelumas	38
Tabel 4.3. Massa jenis hasil minyak pirolisis.....	39
Tabel 4.4. Nilai kalor hasil minyak pirolisis	39
Tabel 4.5. Hasil pengujian efisiensi kompor.....	41



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Hasil pirolisis untuk perbandingan komposisi dengan suhu....	4
Gambar 2.2. Dekomposisi <i>intraparticle</i> dan <i>extraparticle</i> padatan yang berhubungan dengan konversi minyak	11
Gambar 2.3. Kalorimeter tipe-bom.....	18
Gambar 3.1. Skema alat proses pirolisis.....	23
Gambar 3.2. Skema reaktor pirolisis dari sisi depan	24
Gambar 3.3. Gambar susunan peralatan uji efisiensi performansi minyak pirolisis dengan metode wbt	26
Gambar 3.4. Susunan kompor etanol.....	26
Gambar 3.5. Saringan kompor	27
Gambar 3.6. Tabung minyak sisi dalam.....	27
Gambar 3.7. Tabung minyak sisi luar.....	27
Gambar 3.8. Tabung luar kompor	28
Gambar 3.9. Kompor etanol.....	28
Gambar 4.1. Hasil pirolisis pada temperatur 400°C	31
Gambar 4.2. Hasil pirolisis pada temperatur 500°C	32
Gambar 4.3. Hasil pirolisis pada temperatur 600°C	33
Gambar 4.4. Hasil keseluruhan dari proses pirolisis	35

DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1. Viskositas.....	14
Rumus 2.2. Massa Jenis	16
Rumus 2.3. Nilai Kalor	23
Rumus 2.4. Panas Sensibel (<i>Sensible Heat</i>)	19
Rumus 2.5. Panas Laten (<i>Laten Heat</i>)	20
Rumus 2.6. Input Energi Panas	20
Rumus 2.7. Efisiensi Termal	20



DAFTAR NOTASI

a	=	Kekentalan Air
x	=	Kekentalan Zat Cair
t_a	=	Waktu Alir Air
t_x	=	Waktu Alir Zat Cair
a	=	Massa Jenis Air
x	=	Massa Jenis Zat Cair
	=	Massa Jenis (kg/m^3)
m	=	Massa (kg)
V	=	Volume (m^3)
U	=	Energi panas yang dihasilkan oleh sampel (kalori)
Q_{AIR}	=	Energi panas yang diserap oleh air (kalori)
Q_{KAL}	=	Energi panas yang diserap oleh kalorimeter (kalori)
m_{AIR}	=	Massa Air (gram)
$c_{v \text{ AIR}}$	=	Kalor Jenis Air (kalori/g.K)
T_2	=	Temperatur Setelah Reaksi (K)
T_1	=	Temperatur Sebelum Reaksi (K)
C_c	=	Kapasitas Kalor dari Kalorimeter (kalori/K)
C_{AIR}	=	Kapasitas Kalor dari Air (kalori/K)
SH	=	Panas Sensible (J)
C_p	=	Panas jenis air ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
T	=	Beda temperatur air ($^\circ\text{C}$)
LH	=	Panas Laten (J)
W_e	=	Massa Air Yang Diuapkan (kg)
H_{fg}	=	Panas Laten Air (J/kg)
Q_{in}	=	Energi Panas Tersedia Dalam Bahan Bakar (J)
WF	=	Kebutuhan Bahan Bakar (kg)
LHV	=	Nilai Kalor Rendah (<i>Low Heating Value</i>) Bahan Bakar (J/kg)
TE	=	Efisiensi <i>Thermal</i> (%)

DAFTAR LAMPIRAN

Hasil Pirolisis	47
<i>Water Boiling Test</i> (WBT)	59
Gambar L1. Alat pirolisis.....	70
Gambar L2. Reaktor pirolisis	70
Gambar L3. <i>Flow meter</i>	71
Gambar L4. Kondensor.....	71
Gambar L5. Kotak pengatur suhu.....	72
Gambar L6. Isi kotak pengatur suhu.....	72
Gambar L7. Sampah plastik <i>Polypropylene</i> dan sampah Biomasa	73
Gambar L8. Hasil minyak pirolisis.....	73
Gambar L9. minyak pirolisis	74
Gambar L10. Hasil arang pirolisis	74
Gambar L11. Hasil minyak pirolisis sebelum 1 bulan (1 hari setelah percobaan).....	75
Gambar L12. Hasil minyak pirolisis setelah 1 bulan (41 hari setelah percobaan).....	75
Gambar L13. Proses WBT	76
Gambar L14. Proses Pembakaran dengan kompor etanol	76
Gambar L15. Viscoster (Rion VT-04E).....	77
Hasil Uji Kalor	78



**SURAT TUGAS PEMBIMBING DAN PENGUJI TUGAS AKHIR
PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN UNS**

Program Studi : **S1 Reguler**

Nomor : **0310/TA/S1/11/2010**

Nama : **ADITYO SURYO AW**
NIM : **I0406009**
Bidang : **Konversi Energi**
Pembimbing 1 : **DR. TECHN SUYITNO., MT./197409022001121002**
Pembimbing 2 : **ZAINAL ARIFIN, ST,MT/197303082000031001**
Penguji : **1. RENDY ADHI RACHMANTO., ST,MT/ 197101192000121006**
2. WIBAWA ENDRA JUWANA., ST,MT/ 197009112000031001
3. JAKA SULISTYA BUDI, ST/ 196710191999031001
Mata Kuliah Pendukung
1. Motor Bakar(MS73013)
2. Turbin(MS73043)
3. Komputasi Perpindahan Panas(MS73053)

Judul Tugas Akhir

**"STUDI SIFAT MINYAK PIROLISIS CAMPURAN SAMPAH
BIOMASA DAN SAMPAH PLASTIK POLYPROPYLENE (PP)**

..

Surakarta, 2010-11-15 08:05:17
Ketua Jurusan Teknik Mesin,

Dody Ariawan, ST, MT
NIP. 197308041999031003

Tembusan :

1. Mahasiswa ybs.
2. Dosen Pembimbing TA ybs.
3. Koordinator TA.
4. Arsip.

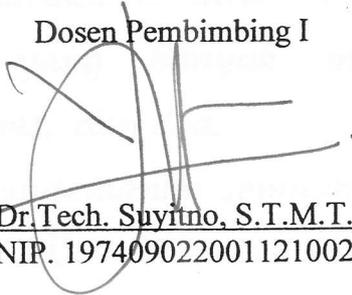
**STUDI SIFAT MINYAK PIROLISIS CAMPURAN SAMPAH BIOMASA
DAN SAMPAH PLASTIK *POLYPROPYLENE (PP)***

Disusun oleh



Adityo Suryo Aji Wibowo
NIM. I 0406009

Dosen Pembimbing I



Dr.Tech. Suyitno, S.T.M.T.
NIP. 197409022001121002

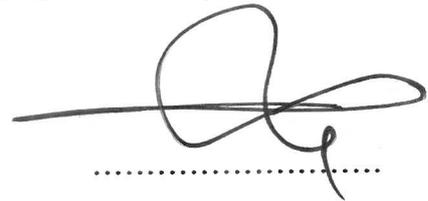
Dosen Pembimbing II



Zainal Arifin, ST,MT
NIP.197303082000031001

Telah dipertahankan di hadapan Tim Dosen Penguji pada hari jum'at, 1 April
2011

1. Rendy Adhi Rachmanto., ST,MT
NIP. 197101192000121006



.....

2. Wibawa Endra Juwana., ST,MT
NIP. 197009112000031001



.....

3. Jaka Sulistya Budi, ST
NIP. 196710191999031001



.....

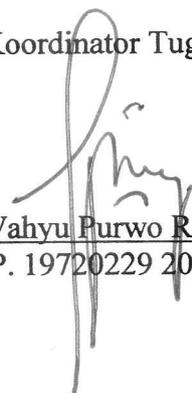
Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dody Ariawan, S.T.M.T.
NIP.197308041999031003

Koordinator Tugas Akhir



Wahyu Purwo R., ST,MT
NIP. 19720229 200012 1 001

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Sampah merupakan masalah yang umum terjadi Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup (Meneg LH, 2008) produksi sampah di Indonesia mencapai 167 ribu ton perhari. Komposisi terbesar sampah di Indonesia adalah sampah organik yang layak kompos sebesar 65 %, kertas 13 %, dan plastik 11 %. Jumlah yang luar biasa itu dihasilkan dari 220 juta jiwa jumlah penduduk dengan rata-rata produksi sampah 800 gram perhari. Saat ini, baru lima persen dari total 167 ribu ton sampah perhari tersebut yang bisa dimanfaatkan. Berdasarkan data KLH pada tahun 2008, sampah yang diolah menjadi kompos baru mencapai 12.800 ton perhari. Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) memperhitungkan bahwa sampah ini berpotensi memproduksi gas metan sebanyak 8.800 ton perhari. Potensi emisi metan sebanyak ini dapat meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca sebesar 745,2 Gg (giga gram). Daya rusak gas metan terhadap lapisan ozon 21 kali lebih kuat dibandingkan dengan Karbondioksida (CO₂). Begitu pula untuk sampah plastik, pendaur ulangan sampah plastik di Indonesia masih sulit dilakukan karena di Indonesia sulit untuk mengotomatisasi penyortiran sampah plastik, jika sampah plastik dibakar akan menghasilkan asap beracun yang berbahaya bagi kesehatan, dan jika ditimbun, dibutuhkan waktu 1000 tahun agar plastik dapat terurai oleh tanah untuk terurai secara sempurna (Radar Sulteng, 2009).

Isu yang berkembang sekarang ini adalah mengubah sampah terutama sampah biomasa dan plastik menjadi bahan bakar cair alternatif dengan cara pirolisis. Dengan cara pirolisis bisa didapatkan hasil minyak dan gas yang bisa digunakan sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil (Bhattacharya P (2009)).

1.2.Perumusan dan Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut, maka permasalahan penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik sifat fisik meliputi nilai massa jenis dan viskositas dari minyak hasil pirolisis sampah?
2. Bagaimana karakteristik sifat kimia meliputi nilai kalor dari minyak hasil pirolisis sampah ?
3. Bagaimana efisiensi minyak pirolisis dengan menggunakan kompor etanol ?

Pada penelitian yang akan dilaksanakan masalah dibatasi sebagai berikut :

1. Pirolisis yang digunakan adalah proses pirolisis lambat dengan pemanas listrik.
2. Sampah biomasa yang digunakan adalah sampah daun Angsana dan sampah plastik *polypropylene* (PP).
3. Ukuran dari daun Angsana dibiarkan sesuai ukurannya.
4. Ukuran dari sampah plastik *polypropylene* sebesar 0,5 cm x 0,5 cm.
5. Rata-rata kadar air untuk sampah biomasa adalah 15% (dengan toleransi 1%) dan untuk sampah plastik *polypropylene* (PP) adalah 1% (dengan toleransi 1%). Penelitian ini menggunakan basis kering (*dry Basis*)
6. Minyak hasil pirolisis diuji sifat fisiknya yaitu massa jenis dan viskositasnya.
7. Minyak hasil pirolisis diuji sifat kimia dalam hal nilai kalornya.
8. Pengujian efisiensi kompor berbahan bakar minyak pirolisis menggunakan metode WBT dengan menggunakan kompor etanol yang ada dipasaran.

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menghasilkan data-data karakteristik sifat fisik meliputi massa jenis, dan viskositas dari minyak pirolisis campuran sampah biomasa dan sampah plastik *polypropylene* (PP).
2. Menghasilkan data-data karakteristik sifat kimia meliputi nilai kalor dari minyak pirolisis campuran sampah biomasa dan sampah plastik *polypropylene* (PP).
3. Mengetahui efisiensi minyak pirolisis campuran sampah biomasa dan sampah plastik *polypropylene* (PP) dengan menggunakan kompor etanol.

Hasil penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi bagi pengembangan bidang konversi energi khususnya dalam bidang penemuan bahan bakar alternatif.
2. Dihasilkannya penyelesaian permasalahan sampah yang semakin hari semakin besar jumlahnya.
3. Dihasilkannya bahan bakar cair alternatif dari sampah biomasa dan sampah plastik.
4. Meningkatkan nilai tambah dari sampah biomasa dan sampah plastik.
5. Mengamalkan ilmu yang dipelajari selama kuliah di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

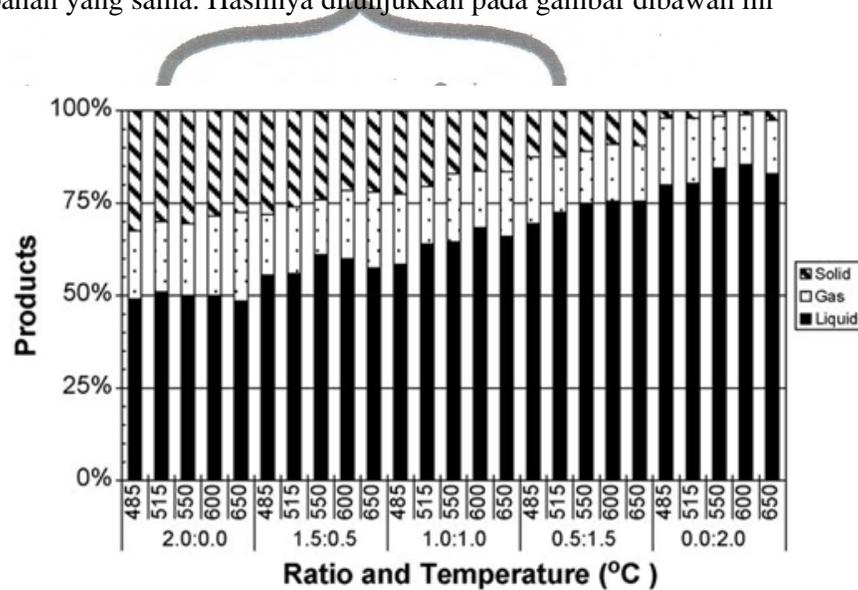
1.4.Sistematika Penulisan

1. Bab I Pendahuluan, berisi latar belakang masalah, rumusan dan batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
2. Bab II Dasar Teori, berisi tinjauan pustaka yang berkaitan dengan pirolisis campuran sampah biomasa dan plastik *polypropylene* (PP) , minyak yang dihasilkan serta dasar teori untuk perhitungan.
3. Bab III Metode Penelitian, berisi tentang cara pengambilan data pada penelitian. Pada penelitian ini pengujian dilakukan dengan cara memanaskan reaktor hingga mencapai suhu 400°C, 500°C, dan 600°C. Kadar air untuk biomasa 15% dan untuk plastik PP 1%, dengan perbandingan campuran antara sampah biomasa dan sampah plastik PP (70%B; 30%P), (50%B;50%P), dan (30%B;70%P).
4. Bab IV Data dan Analisa, berisi data hasil pengujian dan analisa data hasil pengujian yang berupa nilai densitas, viskositas dari minyak pirolisis, nilai kalor, dan nilai keterbakaran dari bahan bakar minyak pirolisis sampah biomasa dan sampah plastik *polypropylene* (PP).
5. Bab V Penutup, berisi kesimpulan penelitian dan saran yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

BAB II DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Aydinli B & Caglar A (2010) telah meneliti tentang perbandingan antara pirolisis biomasa (kulit kemiri) dengan *polyethylene oxide* (PEO). Mereka meneliti tentang pengaruh dari perbandingan komposisi dengan suhu untuk jumlah bahan yang sama. Hasilnya ditunjukkan pada gambar dibawah ini



Gambar 2.1. Hasil pirolisis untuk perbandingan komposisi dengan suhu

Untuk setiap komposisi, dengan suhu yang bervariasi, hasilnya bisa dilihat pada gambar 2.1. Dengan peningkatan jumlah PEO untuk semua temperatur, hasil dari minyak meningkat dan jumlah padatan menurun dan hasil gas cenderung sama. Ini menandakan bahwa pada umumnya dekomposisi dari bahan ini cenderung meningkatkan jumlah minyaknya daripada untuk hasil gasnya. Karena selama proses pirolisis, gas panas didalam reaktor dikondensasikan untuk menghasilkan minyak. Dari penelitian ini terlihat bahwa pirolisis PEO menghasilkan lebih banyak hasil minyak dari pada pirolisis kulit kemiri. Rata-rata besarnya adalah 50% untuk kulit kemiri dan 83% untuk PEO. Hasil yang diperoleh dari pencampuran antara kulit kemiri dengan PEO adalah dengan peningkatan jumlah PEO, hasil dari minyak akan meningkat hampir secara linier. Tes nyala api telah dicoba untuk hasil minyak dari proses pirolisis PEO dengan

kulit kemiri. Telah diketahui bahwa minyak dari pirolisis kulit kemiri tidak terbakar tetapi PEO dan minyak pirolisisnya bisa terbakar. Pada perbandingan komposisi 1.5:0.5 menghasilkan minyak yang tidak dapat terbakar seperti pada kulit kemiri, sedangkan untuk komposisi 1.0:1.0 minyak yang dapat terbakar diperoleh pada temperatur 485°C, 515°C, dan 550°C. tetapi pada temperatur 660°C dan 650°C nyala api muncul setelah minyak diuapkan untuk menghilangkan beberapa penghambatnya.

Bhattacharya et al (2009) telah meneliti tentang pirolisis kayu dan plastik di dalam sebuah reaktor pirolisis. Mereka meneliti tentang analisa sifat fisik dan sifat kimia dari minyak pirolisis. Penelitian mereka menunjukkan bahwa pirolisis lambat dari kayu dan plastik di dalam reaktor menghasilkan suatu peningkatan kandungan hidrogen di dalam hasil minyaknya. Mereka melakukan penelitian di dalam reaktor pirolisis skala lab dengan kecepatan 2 kg/jam dan tekanan 1 atm, dengan perbandingan komposisi untuk plastik 50% dan kayu pinus 50%. Mereka menggunakan 3 macam plastik yang berbeda yaitu *polystyrene* (PS), *high density polyethylene* (HDPE) dan *polypropylene* (PP) dan dipirolisis dengan kayu pinus kuning pada suhu 525°C dan 450°C untuk menghasilkan perubahan kandungan minyaknya. Kelebihan minyak yang diperoleh dari hasil pirolisis pencampuran plastik dan kayu pinus dibandingkan minyak hasil pirolisis kayu pinus itu sendiri yaitu minyak pirolisis pencampuran plastik dan kayu pinus memperlihatkan kandungan *carbon*, *hydrogen*, nilai kalor yang lebih tinggi dan kandungan yang lebih rendah untuk air, nilai asam, kandungan oksigen, dan nilai viskositasnya.

Caglar A & Aydinli B (2009) telah meneliti tentang efek dari temperatur dan komposisi dari hasil pirolisis kulit kemiri dan *polyethylene* (UHMWPE). Biomasa adalah sebuah material polimer dalam bentuk komposit dan dapat dinamakan polimer natural atau *biopolymer*. Semua jenis dari tumbuhan biomasa terdiri atas *cellulose microfibril*, *hemicellulosa* dan *lignin* dalam jumlah yang bermacam-macam. *Hemicellulosa* terdekomposisi antara temperatur 220°C dan 350°C, pada suhu 260°C terjadi dekomposisi maksimum. Kemudian selulosa terdekomposisi pada temperatur antara 300°C dan 400°C dan tertinggi pada temperatur 350°C. *Lignin* terdekomposisi mulai dari suhu 200°C dan terus terdekomposisi sampai suhu 700°C. Lignin merupakan sumber utama padatan di

dalam proses pirolisis. PVC mempunyai dua puncak maksimal dalam terdekomposisi yaitu pada 320°C dan 470°C, yang dikenal sebagai *polymer* (PS: 420°C; PA: 470°C; PET: 480°C; PP:480°C; PE:495°C ; PC:510°C) mempunyai temperatur dekomposisi lebih besar dari pada biomasa. Sehingga dekomposisi *lignin* bersamaan waktu dengan *polymer* dalam waktu yang lebih lama. Interaksi antara unsur biomasa dengan plastik terjadi antara *cellulosa* dan poly (*vinil chloride*) (PVC) atau Poly (*vinylidene chloride*) . Pada PVC telah diteliti bahwa HCl pada suhu 320°C didalam PVC berinteraksi dengan unsur-unsur biomasa dan membawa perubahan komposisi kimia dari biomasa dan PVC.

Encinar J M et al (2009) telah meneliti tentang *Jerusalem artichoke pyrolysis: Energetic evaluation*. Mereka meneliti tentang pengaruh dari temperatur (400°C–800°C), ukuran dari partikel (0,63–2,00 mm), laju nitrogen (75–300 mL min⁻¹), dan massa awal yang digunakan (2,5–10 g). Peningkatan temperatur menyebabkan penurunan untuk hasil padatan dan minyak sedangkan hasil gas meningkat. Penurunan hasil minyak disebabkan karena reaksi minyak sekunder ketika temperatur semakin meningkat. Inilah juga yang menyebabkan hasil gas meningkat disebabkan juga karena reaksi minyak sekunder dari minyak. Dengan peningkatan temperatur mempengaruhi juga peningkatan jumlah karbon dan *ash* sedangkan jumlah volatil menurun. Ketika temperatur meningkat kandungan gas seperti H₂, CO, CH₄, dan CO₂ juga meningkat dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai hasil maksimum ini semakin sedikit. Pengaruh dari masa sampel awal dan ukuran dari partikel adalah ketika ukuran dari partikel meningkat hasil dari padatan dan gas sedikit menurun sedangkan hasil dari minyak sedikit meningkat. Hasil *ash* dari padatan sedikit menurun dan sedikit peningkatan untuk hasil volatil. Hal ini disebabkan karena sedikit pengaruh dari proses penghantaran panasnya yang terjadi pada setiap partikelnya. Pengaruh dari masa awal dari proses pirolisis adalah konstan, artinya untuk parameter ini tidak begitu berpengaruh terhadap proses pirolisis. Pengaruh dari laju nitrogen yaitu peningkatan dari laju nitrogen menyebabkan penurunan jumlah minyak dan peningkatan jumlah gas, sedangkan hasil padatan sedikit menurun. Hal ini disebabkan karena pengaruh dari komponen-komponen yang dapat terkondensasi, seandainya waktu untuk terkondensasi semakin cepat (karena laju nitrogen

semakin besar) maka hasil minyak yang diperoleh akan semakin sedikit. Nilai kalor tertinggi untuk hasil minyak diperoleh pada temperatur 400°C dan ini akan semakin menurun bersamaan dengan meningkatnya temperatur. Nilai kalor untuk hasil gas akan semakin meningkat bersamaan dengan meningkatnya temperatur sedangkan nilai kalor untuk padatan hampir konstan.

Hidayat E (2009) telah meneliti tentang studi sifat fisik, kimia dan uji unjuk kerja kompor dengan bahan bakar minyak pirolisis sekam padi. Dari penelitian yang telah dilakukan berupa pirolisis sekam padi dan pengujian karakteristik minyak pirolisis yang dihasilkan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Viskositas rata-rata minyak pirolisis sekam padi lebih tinggi dibandingkan dengan air yaitu sebesar 0,91 cP.
2. Massa jenis rata-rata minyak pirolisis dalam penyimpanan kurang dari 15 hari sebesar 997,4 kg/m³.
3. Setelah penyimpanan lebih dari 1 bulan maka, minyak pirolisis akan terpisah menjadi 2 bagian yaitu bagian atas dan bagian bawah rata-rata massa jenis bagian atas minyak pirolisis 770 kg/m³. dan rata-rata massa jenis bagian bawah 858 kg/m³.
4. Unsur penyusun utama minyak pirolisis sekam padi adalah *acetic acid*, kelompok *phenol*, dan kelompok *furan*.
5. Pada pengujian kompor dengan bahan bakar minyak pirolisis, efisiensi tertinggi dicapai pada sampel dengan kadar air 20%, kapasitas 5 kg/jam dan temperatur dinding reaktor 400°C yaitu sebesar 39%.

Santoso J (2010) telah meneliti tentang uji sifat minyak pirolisis dan uji performansi kompor berbahan bakar minyak pirolisis dari sampah plastik. Dari penelitian yang telah dilakukan berupa pirolisis plastik dan pengujian karakteristik minyak pirolisis yang dihasilkan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil minyak terbanyak adalah pada temperatur dinding reaktor 450°C, pada plastik PP dan LDPE bernilai sama yaitu sebesar 66%.
2. Massa jenis rata-rata minyak pirolisis plastik PP dan LDPE berturut-turut sebesar 0,73 kg/L dan 0,76 kg/L.

3. Massa jenis minyak pirolisis plastik PP dan LDPE meningkat dengan peningkatan suhu dinding reaktor.
4. Viskositas dinamik rata-rata minyak pirolisis plastik PP dan LDPE berturut-turut sebesar 0,43 cP dan 0,58 cP.
5. Viskositas dinamik minyak pirolisis plastik PP dan LDPE meningkat dengan peningkatan suhu dinding reaktor.
6. Nilai kalor rata-rata minyak pirolisis plastik PP dan LDPE berturut-turut sebesar 43,33 MJ/kg dan 43,34 MJ/kg.
7. Pengaruh suhu dinding reaktor tidak signifikan terhadap nilai kalor minyak pirolisis plastik PP maupun LDPE, karena nilainya hampir sama.
8. Efisiensi kompor rata-rata pada pengujian kompor dengan menggunakan minyak pirolisis plastik PP dan LDPE dengan metode WBT, berturut-turut sebesar 42% dan 46%.
9. Diantara jenis plastik yang telah diteliti, maka jenis plastik yang memiliki potensi sifat fisik dan kimia yang lebih unggul jika diolah menjadi minyak pirolisis adalah jenis plastik PP.

2.2. Pirolisis

Pirolisis adalah suatu proses penguraian material organik secara *thermal* pada temperatur tinggi tanpa adanya oksigen (Bhattacharya P et al. 2009) Pirolisis berasal dari bahasa Yunani “*pyr*” artinya api dan “*lysis*” artinya memisahkan. Produk yang dihasilkan melalui proses pirolisis adalah padatan, minyak, dan gas. Padatan mempunyai struktur seperti grafit. Padatan tersusun atas karbon murni pada temperatur tinggi. Struktur ini bisa juga ditemukan pada membran *fuel cell*. Minyak yang dihasilkan pada proses pirolisis dapat dibandingkan dengan minyak tanah dan minyak ini merupakan sumber dari bahan kimia yang berharga misalnya alkohol, asam organik, eter, ketone, alifatik dan hidrokarbon aromatik. Dan gas yang dihasilkan berupa CO_x, NO_x, H₂ dan Alkana (Aydinli, B. & Caglar, A. 2010).

2.3. Biomasa

Biomasa adalah material hidup atau yang dulunya pernah hidup dan mengandung karbon, hidrogen, dan oksigen contohnya biomasa adalah kayu yang

rumus molekulnya adalah $C_6H_{12}O_6$. Biomasa termasuk bahan yang dapat diperbaharui dan dapat dibakar sebagaimana bahan bakar fosil. Biomasa tersusun atas material organik seperti bahan bakar fosil, tetapi bahan bakar fosil telah berubah bentuk oleh proses geologi, misalnya minyak tanah dan batu bara. Meskipun bahan bakar fosil dahulu merupakan biomasa, sekarang mereka bukanlah biomasa karena kandungan karbon mereka telah keluar dari siklus karbon untuk waktu yang sangat lama. Komposisi biomasa adalah karbon, hidrogen, dan oksigen. Biomasa juga adalah sebuah material polimer dalam bentuk komposit dan dapat dinamakan polimer natural atau *biopolymer*. Semua jenis dari tumbuhan biomasa terdiri atas *cellulose microfibril*, *hemicellulosa* dan *lignin* dalam jumlah yang bermacam-macam (Caglar, A. & Aydinli, B. 2009).

2.4. Plastik

Plastik adalah suatu material organik sintetik atau material organik semi sintetik. Plastik berasal dari bahasa Yunani yaitu "*plastikos*" artinya kemudahan untuk dibentuk atau dicetak. Atau "*platos*" artinya dicetak, karena sifat plastik yang mudah dicetak atau kekenyalannya dalam pembuatan yang membuatnya mudah dibuat. Ada 2 macam tipe plastik yaitu *thermoplastics* dan *thermosetting polymer*. *Thermoplastics* adalah plastik yang tidak mengalami perubahan komposisi kimia ketika dipanaskan dan dapat dicetak kembali, misalnya *polyethylene*, *polystyrene*, *polyvinyl chloride* dan *polytetrafluoroethylene* (PTFE). *Thermoset* dapat dicairkan dan dibentuk tetapi hanya sekali. Setelah menjadi padat mereka akan tetap padat. Material dasar plastik berasal dari minyak bumi dan gas alam. Plastik akan terurai ketika dipanaskan beberapa ratus derajat *celcius*. Kebanyakan plastik tersusun atas polimer dari karbon, dan hidrogen atau dengan oksigen, nitrogen, *chlorin* atau sulfur. Plastik adalah juga merupakan material yang berbahan dasar polimer, contohnya adalah *polypropylene* (PP), *polyvinyl chloride* (PVC), *high density polyethylene* (HDPE), *linear low density polyethylene* (LLDPE), *low density polyethylene* (LDPE), *polyester thermoplastic* (PETE), *polystyrene* (PS), dan *phenolic*. *Polypropylene* adalah plastik tidak jernih atau berawan, lebih kuat, ringan, daya tembus yang rendah, ketahanan yang baik terhadap lemak, stabil pada suhu tinggi, mengkilap, aman untuk menyimpan

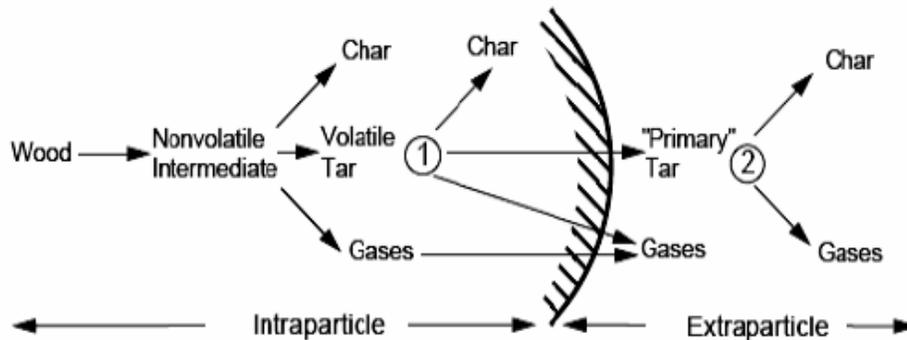
makanan/minuman. Plastik *polypropylene* ini mempunyai rumus molekul $(C_3H_6)_n$ (Caglar, A. & Aydinli, B. 2009).

2.5. Pirolisis lambat

Pirolisis lambat dari biomasa dilakukan pada laju pemanasan kurang dari 100K/menit (Evans, R. 2004). Mekanisme reaksi yang terjadi dan produk yang dihasilkan sangat berbeda dengan pirolisis *fast* dan *flash*. Banyak produk yang berharga yang dihasilkan selama pirolisis lambat. Produk utama yang dihasilkan selama pirolisis lambat adalah padatan dan minyak. Padatan dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam aplikasi pembakaran. Bersama dengan minyak dan padatan, pada temperatur yang lebih tinggi maka akan didapatkan gas sebagai hasil dari pemecahan kedua. Karena besarnya cakupan produk banyak keuntungan yang didapatkan dari pirolisis lambat. Efek dari temperatur, laju pemanasan dan waktu tinggal adalah unsur penting pada pirolisis lambat.

Encinar J M et al (2009) telah meneliti tentang *Jerusalem artichoke pyrolysis: Energetic evaluation*. Mereka meneliti tentang pengaruh dari temperatur (400°C–800°C), ukuran dari partikel (0,63–2,00 mm), laju nitrogen (75–300 mL min⁻¹), dan massa awal yang digunakan (2,5–10 g). Peningkatan temperatur menyebabkan penurunan untuk hasil padatan dan minyak sedangkan hasil gas meningkat. Penurunan hasil minyak disebabkan karena reaksi minyak sekunder ketika temperatur semakin meningkat. Inilah juga yang menyebabkan hasil gas meningkat disebabkan juga karena reaksi minyak sekunder dari minyak. Dengan peningkatan temperatur mempengaruhi juga peningkatan jumlah karbon dan *ash* sedangkan jumlah volatil menurun. Ketika temperatur meningkat kandungan gas seperti H₂, CO, CH₄, dan CO₂ juga meningkat dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai hasil maksimum ini semakin sedikit. Ketika laju pemanasan meningkat banyaknya gas seperti CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ dan lainnya meningkat. Itu menunjukkan bahwa laju pemanasan yang lebih tinggi akan melepaskan gas hidrokarbon. Begitu juga produk minyak meningkat seiring dengan kenaikan laju pemanasan. Temperatur memiliki efek signifikan terhadap hasil produk. Pada temperatur yang lebih tinggi maka hasil produk akan semakin banyak dan sedikit padatan. Dengan adanya kenaikan temperatur maka akan ada

kenaikan energi yang pada akhirnya akan memungkinkan terjadinya reaksi minyak sekunder diluar partikel sehingga akan terjadi pemisahan minyak menjadi gas dan padatan yang selanjutnya akan menurunkan kadar minyak yang terkandung sehingga menyebabkan penurunan minyak pirolisis dan kenaikan padatan serta gas hal ini bisa dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Dekomposisi Intraparticle dan extraparticle padatan yang berhubungan dengan konversi minyak (Morf 2001).

Tabel 2.1. Jumlah produk dari reaksi pirolisis dan gasifikasi (Evans, R. 2004)

Kondisi	Produk		
	Minyak	Padatan	Gas
Pirolisis cepat (laju pemanasan >100K/min)	75%	12%	13%
Pirolisis lambat (laju pemanasan <100K/min)	30%	35%	35%
Gasifikasi	5%	10%	85%

2.6. Parameter yang Berpengaruh Pada Proses Pirolisis

Parameter utama yang mempengaruhi pirolisis adalah sebagai berikut yaitu :

1. Kadar air

Kadar air berpengaruh pada proses pirolisis. Energi dari luar yang seharusnya digunakan untuk proses pirolisis digunakan sebagian untuk proses pengeringan kadar air dalam bahan. Akibatnya, pada bahan dengan kadar air yang lebih tinggi akan diperoleh padatan yang lebih banyak atau dengan kata lain proses dekomposisi pada bahan dengan kadar air yang tinggi membutuhkan energi yang lebih besar (Chaurasia & Babu. 2005).

2. Ukuran partikel

Efek dari ukuran partikel pada proses pirolisis dari biomasa telah diteliti oleh Chaurasia dan Babu (2005). Hasil dari padatan akan meningkat sedangkan hasil dari volatil dan gas akan menurun ketika ukuran partikel meningkat. Fenomena ini adalah konsekuensi dari penurunan temperatur pada setiap posisi radial dengan adanya peningkatan pada ukuran partikel. Konsentrasi dari volatil dan gas meningkat sampai dengan nilai tertentu dan kemudian menurun sesuai dengan kenaikan ukuran partikel. Kenaikan signifikan terhadap waktu pirolisis diteliti sebagai peningkatan ukuran partikelnya. Seiring dengan kenaikan ukuran partikel maka waktu yang dibutuhkan untuk proses pirolisis pada temperatur pirolisis tertentu juga akan meningkat.

3. Laju pemanasan

Ketika laju pemanasan dinaikkan maka padatan akan menurun. Produk gas yang dihasilkan pada temperatur antara 200°C dan 400°C adalah CO dan CO₂ sedangkan pada temperatur yang lebih tinggi konsentrasi yang rendah dari gas hidrokarbon juga diamati. Ketika laju pemanasan meningkat banyaknya gas seperti CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ dan lainnya meningkat. Itu menunjukkan bahwa laju pemanasan yang lebih tinggi akan melepaskan gas hidrokarbon. Begitu juga minyak meningkat seiring dengan kenaikan laju pemanasan (Besler & William, 1996)

4. Temperatur

Temperatur memiliki efek penting terhadap hasil produk. Pada temperatur yang lebih tinggi maka hasil gas akan semakin banyak, hasil minyak akan meningkat sampai batas tertentu kemudian menurun, sedangkan hasil padatan cenderung rendah. Semakin tinggi temperatur nilai kalor untuk hasil gas akan meningkat, untuk hasil padatan cenderung konstan, sedangkan untuk hasil minyak akan semakin menurun. (Encinar, J.M., et al, 2009).

5. Bahan

Aydinli B & Caglar A (2010) telah meneliti tentang kulit kemiri dengan plastik. Dengan peningkatan jumlah plastik didapatkan hasil

minyak yang lebih banyak, padatan yang lebih sedikit, dan hasil gas yang cenderung sama.

6. Komposisi bahan uji.

Dengan penambahan material plastik didalam proses pirolisis menghasilkan suatu peningkatan kandungan hidrogen di dalam hasil minyaknya dibandingkan pada proses pirolisis biomasa tanpa plastik. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi yang berbeda dari bahan yang diperlukan untuk proses pirolisis menghasilkan hasil kandungan komposisi yang berbeda untuk minyaknya (Bhattacharya, P., 2009).

7. Laju nitrogen

Peningkatan dari laju nitrogen menyebabkan penurunan jumlah minyak dan peningkatan jumlah gas, sedangkan hasil padatan sedikit menurun. (Encinar, J. M. et al. 2009).

8. Waktu tinggal padatan .

Waktu tinggal padatan mempengaruhi jumlah hasil dari pirolisis karena semakin lama bahan didalam reaktor maka padatan akan semakin terdekomposisi menjadi minyak dan gas. (Encinar, J. M. et al. 2009).

9. Waktu tinggal volatil

Semakin lama volatil tinggal didalam reaktor maka rantai karbon dari volatil itu akan semakin pendek dan semakin sulit terkondensasi sehingga minyak yang dihasilkan semakin sedikit karena semakin sulit terkondensasi (Encinar, J. M. et al. 2009).

10. Tipe pirolisis

Tipe pirolisis mempengaruhi hasil yang diperoleh dari proses pirolisis. Pirolisis cepat menghasilkan lebih banyak hasil minyak daripada hasil padatan dan gasnya. Pirolisis lambat menghasilkan hasil minyak, gas, dan padatan yang hampir seimbang (Evans, R., 2004).

2.7. Pengujian Karakteristik Minyak Pirolisis

2.7.1. Viskositas

Fluida yang mengalir melalui sebuah pipa dapat dipandang terdiri atas lapisan-lapisan tipis zat alir yang bergerak dengan laju berbeda-beda sebagai

akibat adanya gaya kohesi maupun adhesi. Gesekan internal di dalam fluida dinyatakan dengan besaran viskositas atau kekentalan dengan satuan *poise*.

Viskositas juga bisa diartikan kemampuan suatu zat untuk mengalir pada suatu media tertentu. Salah satu cara untuk mengukur besarnya nilai viskositas zat cair adalah dengan menggunakan *viskosimeter oswald*.

Cara pengukuran dengan cara *viskosimeter oswald* adalah dengan cara membandingkan dua jenis fluida yaitu *aquadest* dengan zat cair lainnya, masing-masing dengan kekentalan η_a dan η_x , keduanya memiliki volume yang sama dan mengalir melalui pipa yang ukurannya sama. Karena kedua zat alir memiliki volume yang sama tetapi kekentalannya berbeda, maka debit keduanya juga berbeda, misalkan Q_a dan Q_x . Dengan demikian waktu yang diperlukan untuk mengalirkan *aquadest* dan zat cair tersebut dengan volume yang sama juga berbeda, misalkan t_a dan t_x .

Dengan demikian maka,

$$\eta_x = \frac{t_x \cdot \rho_x}{t_a \cdot \rho_a} \eta_a \quad (2.1)$$

Pada penelitian ini viskositas diukur hanya pada kondisi kamar.

Dimana :

a = kekentalan air

x = kekentalan zat cair

t_a = waktu alir air

t_x = waktu alir zat cair

ρ_a = massa jenis air

ρ_x = massa jenis zat cair

Tabel 2.2. Viskositas beberapa fluida

No	Fluida	Suhu (°C)	Viskositas (cP)	Pustaka
1	Air	20	1	Douglas C. Giancoli, D.C., 1997
2	Alkohol Ethyl	20	1,2	
3	Minyak Mesin (SAE 10)	30	200	
4	Gliserin	20	1500	
5	Udara	20	0,018	
6	Hidrogen	0	0,009	
8	Minyak Tanah	28	0,294-3,34	http://www.en.wikipedia.orgs
9	Bensin	20	0,652	
10	Alkohol	27	0,8609	Percobaan di Laboratorium MIPA UNS
11	Aseton	27	0,3417	
12	Minyak pirolisis PP	27	0,43	Santoso J (2010)
13	Minyak Pirolisis LDPE	27	0,58	Santoso J.(2010)
14	Minyak Pirolisis Sekam Padi	27	0,91	Hidayat E (2009)

2.7.2. Massa jenis

Massa jenis atau densitas adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda.

Banyak hubungan antara massa jenis dengan sifat-sifat penting bahan bakar minyak, yaitu:

1. Untuk pembakaran pada volume tetap;

$$\text{Nilai kalor atas, Btu/lb} = 22\,320 - [3\,780 \times (\text{massa jenis})^2]$$

2. Untuk pembakaran pada tekanan tetap;

Nilai kalor bawah, Btu/lb = $19\,960 - [3\,780 \times (\text{massa jenis})^2] + (1\,362 \times \text{massa jenis})$

3. Persen hidrogen, % = $26 - (15 \times \text{massa jenis})$
4. Kalor spesifik, Btu/lb^oF = kal/gr^oC = $\frac{0,388 + (0,00045 \times (t^{\circ}\text{F}))}{\sqrt{\text{massa jenis}}}$
5. Kalor laten penguapan, Btu/lb = $\frac{110,9 - (0,09 \times t^{\circ}\text{F})}{\dots}$

Rumus untuk menentukan massa jenis adalah :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.2)$$

ρ = massa jenis (kg/m³)

m = massa (kg)

v = Volume (m³)

Massa jenis berbagai fluida dapat dilihat pada tabel 2.3 berikut ini

Tabel 2.3. Massa jenis berbagai fluida

No	Jenis Minyak	Massa jenis (Kg/L)	Pustaka
1	Bensin	0,68	Giancoli, D.C., 1997
2	Alkohol Alkil	0,79	
3	Air Laut	1,025	
4	Raksa	13,6	
5	Air (4 ⁰)	1	
6	Udara	$1,29 \times 10^{-3}$	
7	Minyak Tanah	0,78 – 0,81	http://www.en.wikipedia.orgs
8	Minyak pirolisis PP	0,71- 0,74	Santoso J (2010)
9	Minyak Pirolisis LDPE	0,74-0,77	Santoso J (2010)
10	Minyak pirolisis sekam padi	0,99	Hidayat E (2009)

2.7.3. Nilai kalor

Nilai kalor rendah (LHV, *Lower Heating Value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dalam proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas pembakaran dibuat 150°C. Pada temperatur ini air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah

kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas hasil pembakaran dibuat 25°C maka akan diperoleh nilai kalor atas (HHV, *High Heating Value*). Pada temperatur ini air akan berada dalam kondisi fasa cair. (Bailis, et al, 2007)

Nilai kalor bahan bakar dapat diketahui dengan menggunakan kalorimeter. Bahan bakar yang akan diuji nilai kalornya dibakar menggunakan kumparan kawat yang dialiri arus listrik dalam bilik yang disebut bom dan ditenamkan di dalam air. Bahan bakar yang bereaksi dengan oksigen akan menghasilkan kalor, hal ini menyebabkan suhu kalorimeter naik. Untuk menjaga agar panas yang dihasilkan dari reaksi bahan bakar dengan oksigen tidak menyebar ke lingkungan luar maka kalorimeter dilapisi oleh bahan yang berifat *isolator*. Untuk mengetahui nilai kalor dari bahan bakar tersebut dihitung menggunakan rumus:

$$\begin{aligned}
 E &= Q - W \\
 Q - W &= U + KE + PE \\
 Q - W &= U + KE + PE \\
 U &= Q_{KAL} + Q_{AIR} \\
 &= m_{c_c} T + m_{AIR} c_{v_{AIR}} T \\
 &= C_c T + C_{AIR} T \\
 &= C_c (T_2 - T_1) + C_{AIR} (T_2 - T_1)
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

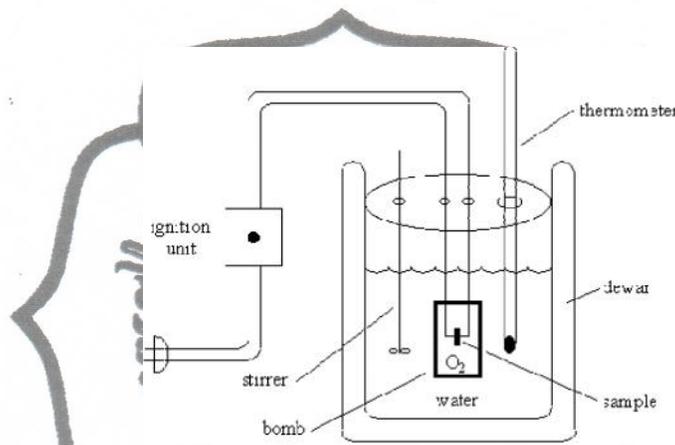
Dimana :

- U = Energi panas yang dihasilkan oleh sampel (kalori)
- Q_{AIR} = Energi panas yang diserap oleh air (kalori)
- Q_{KAL} = Energi panas yang diserap oleh kalorimeter (kalori)
- m_{AIR} = massa air (gram)
- c_{v_{AIR}} = kalor jenis air (kalori/g.K)
- T₂ = temperatur setelah reaksi (K)
- T₁ = temperatur sebelum reaksi (K)
- C_c = kapasitas kalor dari kalorimeter (kalori/K)
- C_{AIR} = kapasitas kalor dari air (kalori/K)

Kapasitas dari kalorimeter dapat diukur dengan cara membakar zat standar (*Asam Benzoat*) yang sudah diketahui U nya.

$$m_{\text{asam benzoat}} \cdot U_{\text{asam benzoat}} = C_c \cdot (T_2 - T_1), \text{ dimana}$$

$$U_{\text{asam benzoat}} = - 6318 \text{ kalori/g}\cdot\text{K}$$



Gambar 2.3. Kalorimeter tipe-bom

Tabel 2.4. Nilai kalor berbagai macam bahan bakar
(www.engineeringtoolbox.com)

No	Bahan Bakar	Nilai Kalor (MJ/kg)	
1	Minyak Tanah	43	
2	Bensin	47,3	
3	Alkohol 96%	30	
4	Minyak pirolisis PP	43,33	Santoso J (2010)
5	Minyak pirolisis LDPE	43,34	Santoso J (2010)

2.8. Perfomansi Minyak Pirolisis

Pengujian ini menggunakan kompor etanol dan menggunakan bahan bakar minyak pirolisis yang bertujuan untuk menguji besarnya efisiensi kompor apabila menggunakan minyak pirolisis sebagai bahan bakarnya. Metode yang digunakan yaitu dengan metode *water boiling test (WBT)*. (Bailis dkk 2007)

Pada dasarnya pengujian WBT dibagi menjadi 3 bagian penting yaitu pengujian WBT *start* dingin, pengujian WBT *start* panas, dan pengujian WBT *simmering*. Prosedur dasar yang digunakan dalam metode WBT :

1. Metode WBT *start* dingin yaitu pengujian dilakukan pada saat kompor dalam keadaan dingin, kemudian yang berada di dalam panci dipanaskan sampai airnya mendidih, setelah airnya mendidih kompor dimatikan dan catat waktu yang diperlukan untuk mendidihkan air, massa air yang di uapkan, temperatur air setelah mendidih, dan massa bahan bakar yang tersisa.
2. Metode WBT *start* panas yaitu hampir mirip dengan metode WBT *start* dingin tetapi pengujian dilakukan pada saat kompor dalam keadaan panas.
3. Metode *simmering* yaitu pengujian dilakukan dengan cara menjaga suhu air yang telah mendidih supaya konstan selama 45 menit, dan suhu tidak boleh naik atau turun lebih dari 3°C dari suhu air yang telah mendidih tadi. Langkah selanjutnya mencatat waktu yang diperlukan untuk mendidihkan air, massa air yang diuapkan, temperatur air setelah mendidih, dan massa bahan bakar yang tersisa.

Dasar teori yang digunakan untuk perhitungan efisiensi kompor minyak pirolisis adalah sebagai berikut :

1. Panas sensibel (*sensible heat*)

Panas sensibel adalah jumlah energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur air. Panas sensibel diukur sebelum dan sesudah air mencapai temperatur pendidihan. Panas sensibel dihitung menggunakan rumus:

$$SH = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Dimana :

- SH = panas sensible (J)
- m = massa air (kg)
- C_p = panas jenis air (J/kg°C)
- T = beda temperatur air (°C)

2. Panas laten (*laten heat*)

Panas laten adalah jumlah energi panas yang digunakan dalam menguapkan air.

Panas laten dihitung menggunakan rumus:

$$LH = W_e \times H_{fg} \quad (2.5)$$

Dimana :

LH = panas laten (J)

W_e = massa air yang diuapkan (kg)

H_{fg} = panas laten air (J/kg)

3. Input energi panas

Input energi panas adalah jumlah energi panas yang tersedia dalam bahan bakar. Input energi panas dihitung menggunakan rumus:

$$Q_{in} = HV \times WF \quad (2.6)$$

Dimana :

Q_{in} = energi panas tersedia dalam bahan bakar (J)

WF = kebutuhan bahan bakar (kg)

LHV = nilai kalor rendah (*low heating value*) bahan bakar (J/kg)

4. Efisiensi *thermal*

Efisiensi *thermal* adalah rasio energi yang digunakan dalam pendidihan dan dalam penguapan air terhadap energi panas yang tersedia dalam bahan bakar. Efisiensi termal dihitung dengan rumus :

$$TE = \frac{SH + LH}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Dimana :

TE = efisiensi *thermal* (%)

SH = panas sensibel (J)

LH = panas laten (J)

Q_{in} = energi panas tersedia dalam bahan bakar (J)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari bulan Juni 2010 - Januari 2011 di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan

3.2.1. Alat

1. Reaktor pirolisis

Reaktor pirolisis adalah alat untuk mendekomposisi sampah biomasa dan sampah plastik. Di dalam reaktor pirolisis inilah proses pirolisis berlangsung.

Dimensi :

- a. Diameter dalam 22 cm
- b. Panjang reaktor 75 cm

2. Timbangan

Timbangan digunakan untuk mengukur massa sampah biomasa dan massa sampah plastik *polypropylene* (PP), serta digunakan untuk mengetahui massa minyak pirolisis yang telah dihasilkan.

3. *Thermocouple*

Digunakan untuk mendeteksi suhu pada reaktor pirolisis.

4. *Thermocouple reader*

Berfungsi untuk membaca suhu pada *thermocouple* dan untuk mengatur suhu di dalam reaktor.

5. *Stopwatch*

Untuk mengetahui lamanya waktu pirolisis.

6. Kondensor

Alat yang digunakan untuk mengembunkan gas hasil pirolisis agar minyak yang dihasilkan lebih banyak.

7. *Flowmeter*

Alat ini digunakan untuk mengukur besar debit nitrogen yang masuk ke dalam reaktor pirolisis selama proses pirolisis berlangsung.

8. Regulator gas nitrogen

Alat ini digunakan untuk mengukur besar tekanan yang keluar dari tabung nitrogen dan untuk mengetahui jumlah gas nitrogen yang digunakan selama proses pirolisis.

9. Gelas ukur

Alat ini digunakan untuk mengetahui jumlah minyak pirolisis yang dihasilkan setiap 5 menit.

10. *Viskosimeter Oswald*

Alat ini digunakan untuk menguji viskositas dari minyak pirolisis.

11. Pipet

Alat ini digunakan untuk membantu melakukan uji viskositas.

12. Panci

Alat ini digunakan untuk melakukan uji kompor.

13. Kompor etanol

Alat ini digunakan untuk menguji kompor.

14. *Thermometer*

Alat ini digunakan untuk mengetahui suhu pada proses pirolisis dan uji kompor.

3.2.2. Bahan yang digunakan

1. Sampah biomasa

Sampah biomasa akan dipirolisis dan minyak hasil pirolisis tersebut akan diteliti.

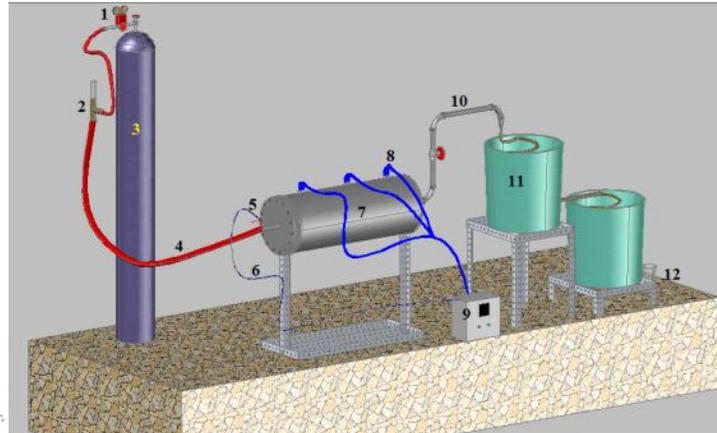
2. Sampah plastik *poly propylene* (PP)

Sampah plastik pp (*polypropylene*) akan dipirolisis dan minyak hasil pirolisis tersebut akan diteliti.

3. Gas nitrogen

Gas nitrogen digunakan untuk menciptakan lingkungan reaktor yang inert atau agar di dalam reaktor tidak terdapat oksigen.

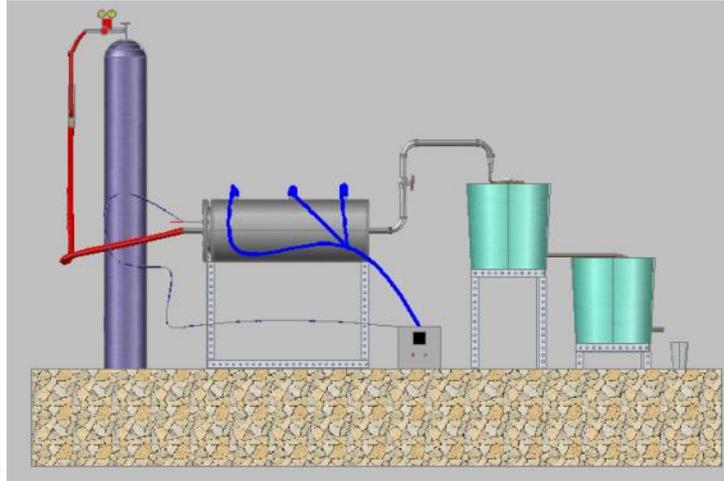
3.3. Skema Alat



Gambar 3.1. Skema alat proses pirolisis

Keterangan gambar

1. Regulator gas nitrogen
2. *Flowmeter*
3. Tabung gas nitrogen
4. Selang penghubung
5. *Thermocouple*
6. Kabel *thermocoupe*
7. Reaktor pirolisis
8. Konektor pemanas pirolisis
9. *Thermoreader* dan pengatur suhu
10. Pipa tempat keluar gas pirolisis
11. Kondensor
12. Gelas ukur



Gambar 3.2. Skema reaktor pirolisis dari sisi depan

3.4. Pelaksanaan Penelitian

Pada proses pirolisis suhu dibuat tetap adalah sebesar 400° C, 500° C dan 600° C, kadar air 15 %, untuk sampah biomasa dan 1% untuk sampah plastik polypropylene, massa sampah yaitu variasi sampah biomasa dengan sampah plastik *polypropylene* biomasa 1,5 kg dengan laju aliran nitrogen 150 mL min⁻¹. Variasi komposisi proses pirolisis campuran antara sampah biomasa dengan sampah plastik yaitu dengan perbandingan (70%B;30%P), (50%B;50%P), dan (30%B;70%P).

Prosedur yang dilakukan dalam proses pirolisis adalah sebagai berikut:

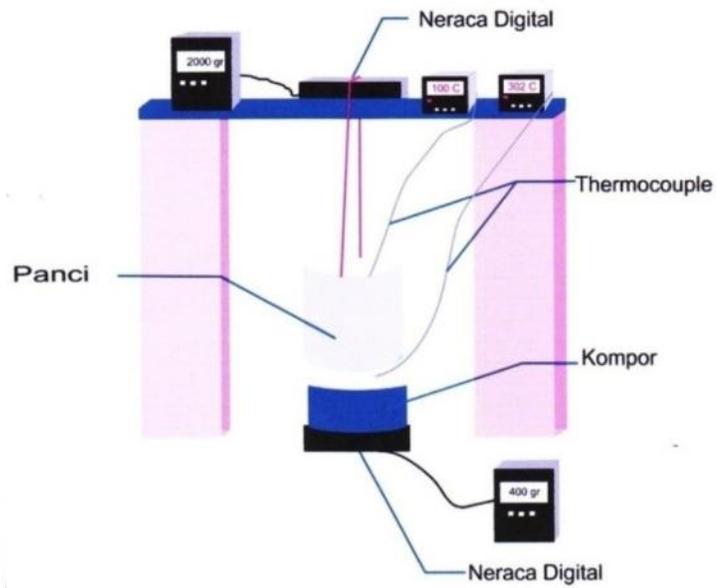
1. Memasang semua peralatan sesuai dengan skema alat pirolisis seperti pada gambar 3.1.
2. Memasukkan sampah biomasa 70% dan *polypropylene* 30%.
3. Menghembuskan gas nitrogen kedalam reaktor sebesar 150 mL min⁻¹.
4. Memanaskan reaktor pirolisis dengan menggunakan elemen pemanas dengan suhu 400° C.
5. Mencatat kenaikan suhu reaktor pirolisis setiap 5 menit.
6. Mencatat kenaikan suhu air kondensor setiap 5 menit.
7. Mencatat kenaikan hasil minyak pirolisis setiap 5 menit.
8. Menunggu sampai proses pirolisis selesai (reaktor sudah tidak mengeluarkan minyak dan asap).
9. Mematikan listrik reaktor dan mempersiapkan proses pirolisis selanjutnya.

10. Melakukan uji densitas setelah percobaan.
11. Melakukan uji nilai kalor, uji viskositas dan densitas 1 bulan setelah percobaan.
12. Mengulangi langkah (1) – (10) dengan bahan 50% sampah biomasa dan 50% *Polypropylene* suhu 400°C.
13. Mengulangi langkah (1) – (10) dengan bahan 30% sampah biomasa dan 70% *Polypropylene* suhu 400°C.
14. Mengulangi langkah (1) – (12) dengan suhu reaktor 500⁰ C
15. Mengulangi langkah (1) – (12) dengan suhu reaktor 600⁰ C

3.5. Tahapan Pengujian

Tahapan pengujiannya adalah pengujian karakteristik dari semua minyak pirolisis yang dihasilkan. Pengujian yang akan dilakukan meliputi pengujian viskositas, pengujian densitas, pengujian nilai kalor, dan pengujian performansi minyak pirolisis dengan menggunakan kompor etanol.

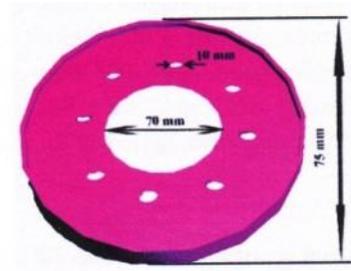
Pengujian efisiensi minyak pirolisis dilakukan dengan menggunakan uji WBT (*Water Boiling Test*) start dingin . Metode WBT adalah suatu uji unjuk kerja kompor etanol dengan cara mendidihkan air yang berada di dalam panci, yang tujuannya untuk mengetahui jumlah energi yang dihasilkan dan bahan bakar yang dipindahkan ke dalam panci yang berisi air. Gambar susunan peralatan dan gambar susunan kompor etanol pada pengujian performansi minyak pirolisis dengan menggunakan kompor etanol dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.3. Gambar susunan peralatan uji efisiensi performansi minyak pirolisis dengan metode WBT



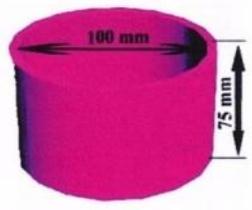
Gambar 3.4. Susunan kompor etanol



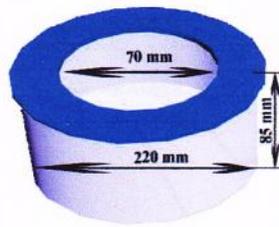
Gambar 3.5. Saringan kompor



Gambar 3.6. Tabung minyak sisi dalam



Gambar 3.7. Tabung minyak sisi luar



Gambar 3.8. Tabung luar kompor



Gambar 3.9. Kompor etanol

Bahan-bahan dan instrumentasi yang digunakan dalam pengujian efisiensi kompor antara lain:

- a. Kompor etanol

Kompor etanol yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.9.

- b. Neraca

Neraca berfungsi untuk mengukur massa bahan bakar dan massa air.

- c. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur air dan *burner*

- d. *Stopwatch*

Stopwatch digunakan untuk mengetahui waktu pendidihan air selama pengujian.

Prosedur dalam proses WBT disini menggunakan start dingin dan dilakukan melalui beberapa tahapan proses diantaranya sebagai berikut:

1. Merangkai peralatan seperti pada gambar 3.3.
2. Memasukkan air ke dalam panci sebanyak 0,5 kg.
3. Memasukkan bahan bakar minyak hasil pirolisis suhu 400°C komposisi 70%B;30%P kedalam kompor sebanyak 100 gram.

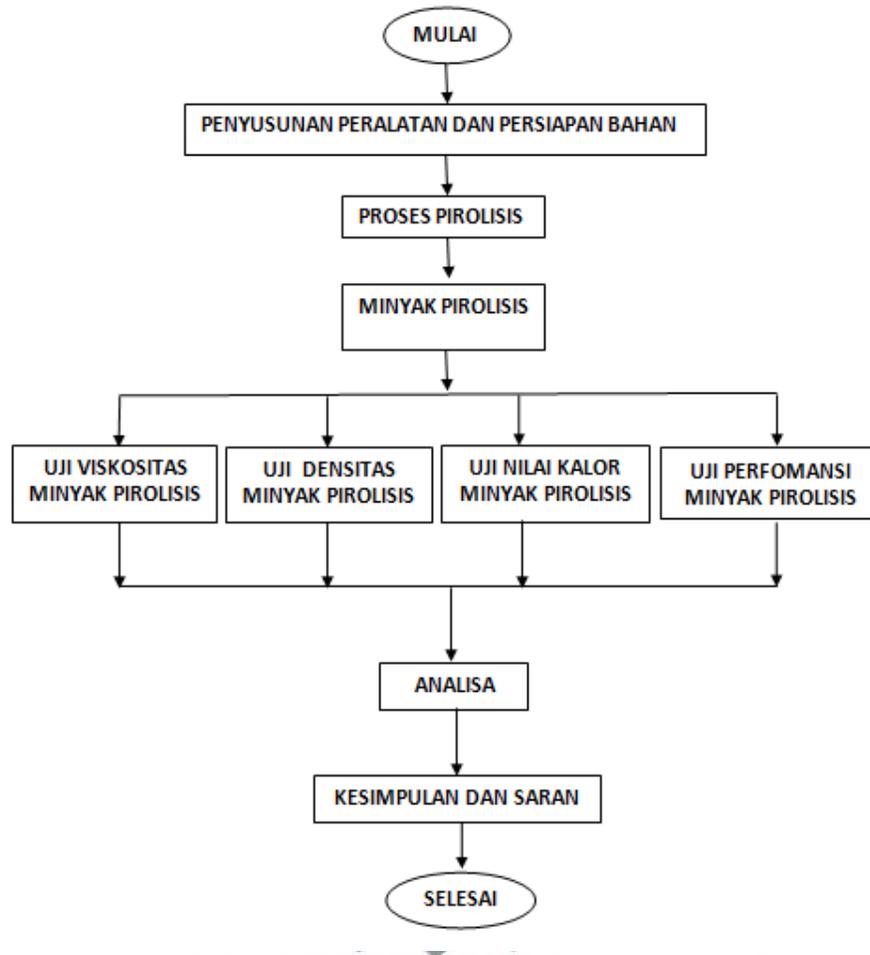
commit to user

4. Menghidupkan kompor, serta secara bersamaan menekan tombol *start* pada *stopwatch*.
5. Mencatat temperatur dan massa air, serta massa bahan bakar tiap 1 menit sekali.
6. Mencatat waktu hingga air mendidih.
7. Menahan proses sampai 30 menit.
8. Mematikan kompor.
9. Membuang air dan minyak, dan menggantinya dengan yang baru, serta menunggu temperatur panci dan kompor berada pada kondisi semula.
10. Mengulangi langkah (1) – (9) untuk semua minyak pirolisis, dari minyak pirolisis suhu 400°C komposisi 50%B:50%P sampai minyak pirolisis suhu 600°C komposisi 30%B:70%P.
11. Mengulangi langkah (1) — (9) dengan menggunakan minyak tanah.
12. Mengulangi langkah (1) — (9) dengan menggunakan bensin.

3.6. Metode Analisa Data

Dari data-data yang diperoleh, maka kemudian melakukan analisis terhadap sifat-sifat dari setiap minyak pirolisis yang dihasilkan, sehingga diketahui karakteristiknya dan kemudian melakukan analisa keterbakaran dari minyak pirolisis agar diketahui besar efisiensinya.

3.7. Diagram Alir Penelitian



3.8. Jadwal Penelitian

NO	KEGIATAN	BULAN					
		1	2	3	4	5	6
1	Survey dan Identifikasi masalah	■					
2	Pembuatan Proposal	■					
3	Pembelian Alat dan Bahan	■					
4	Pembuatan Minyak pirolisis		■	■			
5	Pengujian Minyak Pirolisis				■	■	
6	Analisa Data					■	
7	Penyusunan Laporan					■	■

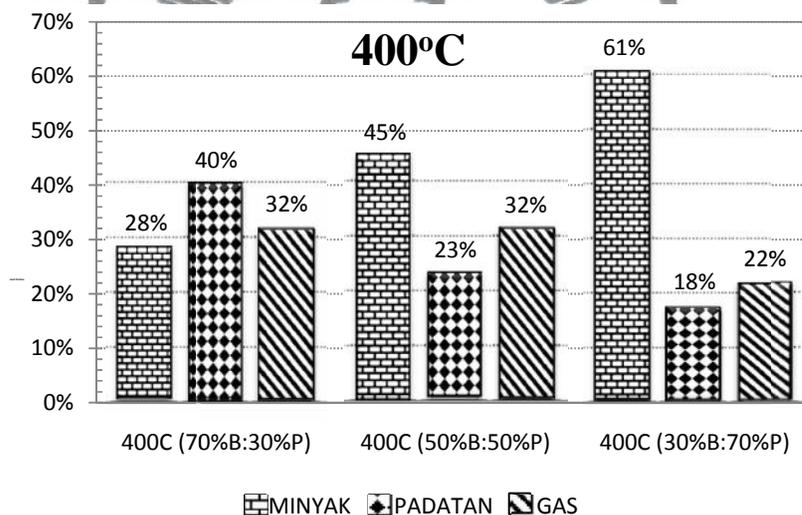
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pirolisis

Pirolisis campuran lambat antara biomasa dengan plastik *polypropylene* pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C, dengan perbandingan komposisi 70%B:30%P, 50%B:50%P, dan 30%B:70%P, dengan menggunakan laju pemanasan sebesar 11°C permenit telah dilakukan dan pembahasan hasilnya ditampilkan pada sub bab di bawah ini.

4.1.1. Pirolisis pada temperatur 400°C



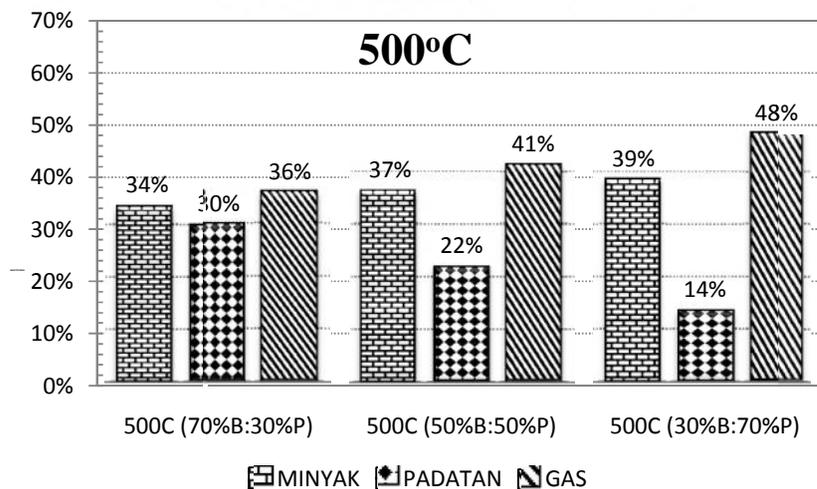
Gambar 4.1. Hasil pirolisis pada temperatur 400°C.

Untuk hasil proses pirolisis campuran antara sampah biomasa dengan sampah plastik *polypropylene* pada temperatur 400°C hasil minyak meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah plastik dan hasil minyak yang tertinggi terdapat pada komposisi 30%B:70%P sebesar 61%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak kandungan plastik menyebabkan hasil minyak yang diperoleh juga semakin banyak. Untuk padatan terjadi penurunan hasil bersamaan dengan penambahan jumlah plastik. Hal ini disebabkan karena plastik hanya menghasilkan sedikit padatan ketika dipirolisis. Untuk hasil padatan tertinggi

diperoleh pada komposisi 70%B:30%P sebesar 40%. Untuk gas, hasil gas menurun bersamaan dengan penambahan jumlah plastik, untuk hasil gas tertinggi diperoleh pada komposisi 70%B:30%P dan 50%B:30%P sebesar 32%. Hasil gas menurun pada temperatur ini dikarenakan molekul-molekul berat didalam minyak pirolisis masih belum mengalami pemecahan menjadi molekul-molekul ringan, sehingga hasil gas menurun sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.1.

4.1.2. Pirolisis pada temperatur 500°C

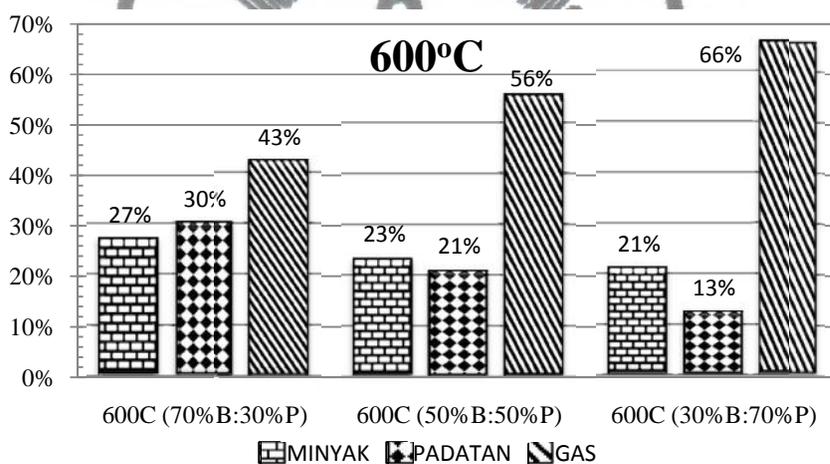
Untuk hasil proses pirolisis campuran antara sampah biomasa dengan sampah plastik *polypropylene* pada temperatur 500°C diperoleh hasil bahwa hasil minyak meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah plastik dan hasil minyak yang tertinggi terdapat pada komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 39%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak kandungan plastik menyebabkan hasil minyak yang diperoleh juga semakin banyak pada saat proses pirolisis pada temperatur 500°C. Untuk padatan, hasil padatan menurun bersamaan dengan penambahan jumlah plastik. Hasil padatan tertinggi diperoleh pada komposisi 70%B:30%P sebesar 30%. Untuk gas, hasil gas meningkat bersamaan dengan penambahan jumlah plastik. Hasil gas tertinggi diperoleh pada komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 48% sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Hasil pirolisis pada temperatur 500°C

4.1.3. Pirolisis pada temperatur 600°C

Untuk hasil proses pirolisis campuran antara sampah biomasa dengan sampah plastik *polypropylene* pada temperatur 600°C diperoleh hasil bahwa hasil minyak menurun seiring dengan bertambahnya jumlah plastik dan hasil minyak yang tertinggi terdapat pada komposisi 70%B:30%P yaitu sebesar 27%. Untuk padatan, hasil padatan menurun bersamaan dengan penambahan jumlah plastik. Hasil padatan tertinggi diperoleh pada komposisi 70%B:30%P. Untuk gas, hasil gas meningkat bersamaan dengan penambahan jumlah plastik. Hasil gas tertinggi diperoleh pada komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 66% sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Hasil pirolisis pada temperatur 600°C

4.1.3. Analisis perbandingan hasil pirolisis pada temperatur 400, 500, dan 600°C.

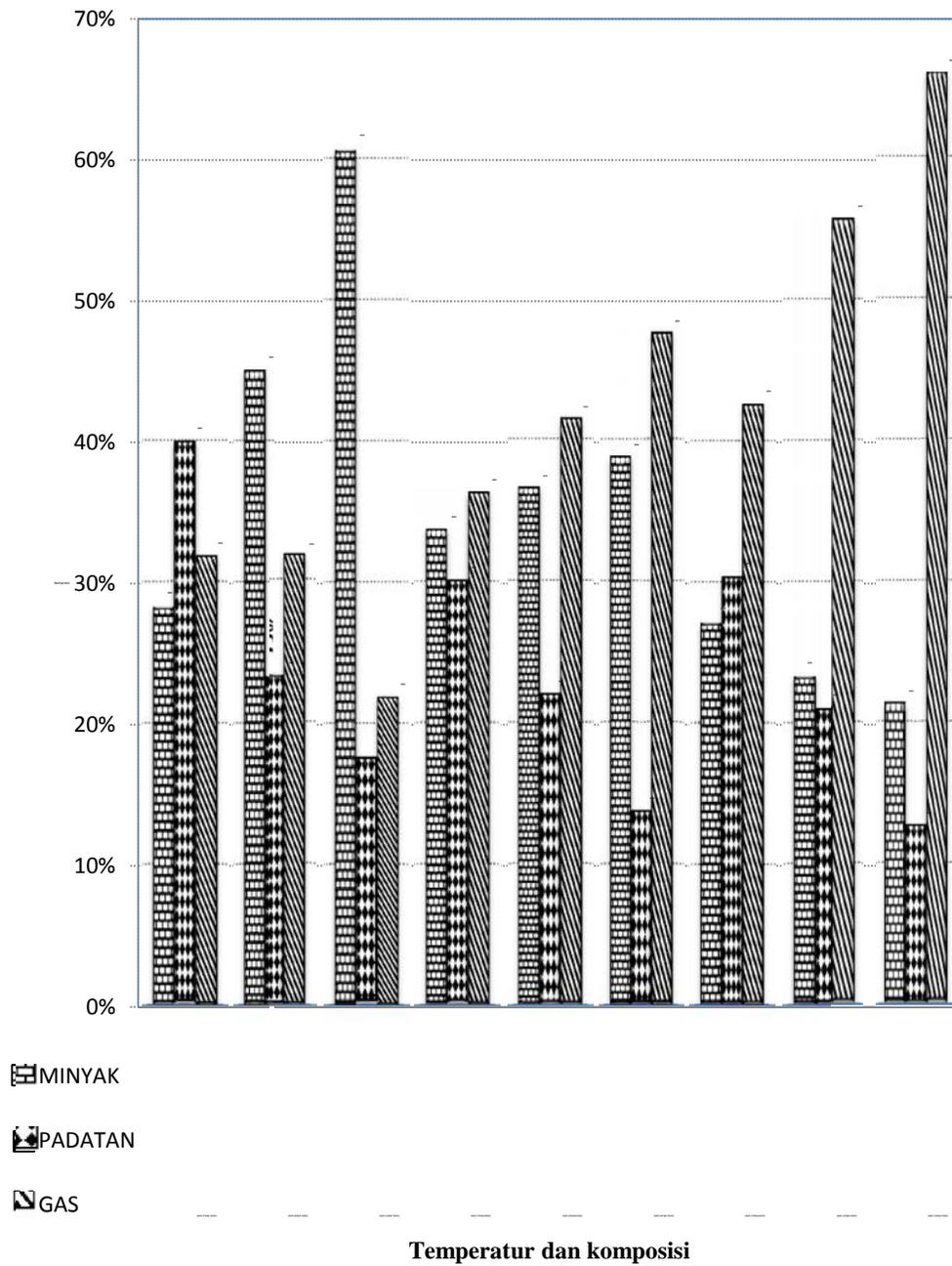
Didalam proses pirolisis lambat ini campuran antara sampah biomasa dan plastik *polypropylene* didapatkan hasil bahwa hasil minyak dan gas pada komposisi 70%B:30%P meningkat ketika temperatur naik dari 400°C menjadi 500°C kemudian minyak menurun ketika temperatur dinaikkan ke 600°C sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.4. Sementara itu, pada temperatur 400°C ke 500°C hasil padatan menurun. Hasil minyak dan gas pirolisis dari suhu 400°C ke 500°C meningkat karena pada temperatur ini terjadi pemecahan molekul yang sangat kuat (*strong cracking*) sehingga hasil minyak dan gas pada temperatur ini

naik sedangkan hasil padatan menurun (J.F. González et al. (2003)). Sedangkan ketika temperatur dinaikkan ke 600°C terjadi penurunan hasil minyak pirolisis yang disebabkan karena ketika temperatur dinaikkan ke 600°C terjadi pemecahan molekul-molekul berat di dalam minyak pirolisis menjadi molekul-molekul ringan yang mengakibatkan hasil minyak berkurang dan berubah menjadi gas. Hal ini juga bisa dilihat pada hasil gas pada campuran ini yang terlihat bahwa semakin tinggi temperatur, hasil gas cenderung naik. Pada hasil ini tidak menunjukkan adanya reaksi *tar* sekunder, karena jika dilihat dari hasil padatannya, ketika temperatur dinaikkan hasil padatan tidak naik, padahal reaksi *tar* sekunder adalah perubahan cairan menjadi padatan dan gas pada temperatur tertentu akibat dari temperatur yang semakin meningkat (Morf (2001)).

Pada pirolisis dengan komposisi 50%B:50%P diperoleh bahwa produk tertinggi minyak dan padatan terjadi pada temperatur 400°C yaitu sebesar 45% dan 23% kemudian hasil ini cenderung menurun ketika temperatur dinaikkan. Untuk gas, hasil tertinggi terjadi pada temperatur 600°C yaitu sebesar 56%. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Bhattacharya P (2009). Bhattacharya telah meneliti pirolisis pada kayu pinus dengan plastik *polypropylene*. Dalam penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa minyak dan padatan tertinggi terdapat pada temperatur pirolisis 400°C dan menurun bersamaan dengan meningkatnya temperatur sedangkan hasil gas yang diperoleh semakin meningkat ketika temperatur dinaikkan. Hal ini disebabkan karena ketika biomasa dan plastik *polypropylene* dipirolisis jumlah dari *light liquid* hanya bisa mencapai maksimum pada temperatur 400°C setelah itu menurun, sebaliknya *heavy liquid* menurun dengan semakin meningkatnya temperatur. Hal ini dikarenakan terpecahnya molekul-molekul *heavy liquid* menjadi *light liquid* pada temperatur yang lebih tinggi yang mengakibatkan hasil minyak dan padatan berkurang sedangkan hasil gas meningkat.

Hasil pirolisis pada komposisi 30%B:70%P diperoleh hasil bahwa produksi minyak dan padatan tertinggi terjadi pada temperatur 400°C yaitu sebesar 60% dan 18% kemudian hasil ini menurun bersamaan dengan meningkatnya temperatur. Untuk gas, produksinya meningkat bersamaan dengan meningkatnya temperatur. Produksi gas tertinggi diperoleh pada temperatur 600°C yaitu sebesar 66% sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.4. Hal ini disebabkan

Hasil pirolisis



Gambar 4.4. Hasil keseluruhan dari proses pirolisis
commit to user

karena semakin tinggi temperatur pirolisis semakin terjadi pemecahan molekul-molekul berat menjadi molekul-molekul ringan di dalam minyak pirolisis yang mengakibatkan hasil minyak berkurang dan berubah menjadi gas. Hal inilah yang menyebabkan hasil minyak menurun dan hasil gas naik dan ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Bhattacharya P (2009).

Pembahasan selanjutnya adalah untuk melihat pengaruh komposisi campuran antara biomasa dan plastik pada produksi pirolisis. Hasil minyak meningkat ketika komposisi plastik bertambah pada temperatur 400°C dan 500°C tetapi pada suhu 600°C hasil minyak menurun ketika komposisi plastik bertambah. Untuk gas, hasil gas semakin meningkat ketika komposisi plastik dinaikkan pada saat pirolisis pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C. Untuk padatan, hasil padatan semakin menurun ketika komposisi plastik bertambah pada saat pirolisis pada temperatur 400°C, 500°C, dan 600°C sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4.4. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Aydinli B & Caglar A (2010). Aydinli B & Caglar A telah meneliti tentang pirolisis kulit kemiri dengan plastik UHMWPE. Hasil dari penelitian mereka yaitu untuk hasil minyak yang diperoleh dari pirolisis campuran antara biomasa dengan plastik UHMWPE menunjukkan bahwa dengan peningkatan jumlah plastik hasil minyak akan meningkat sampai temperatur tertentu (515°C) kemudian menurun dengan meningkatnya temperatur. Untuk hasil padatan, ketika komposisi plastik bertambah dan ketika temperatur meningkat hasil padatan akan menurun, hal ini dikarenakan plastik murni apabila dipirolisis tidak menghasilkan padatan. Untuk gas, hasil gas akan meningkat dengan meningkatnya temperatur.

4.2. Pengujian Karakteristik Minyak Pirolisis

Setelah didapatkan hasil minyak pirolisis campuran antara biomasa dengan plastik *polypropylene*, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian karakteristik minyak pirolisis yang hasilnya dilaporkan pada sub bab berikut ini.

4.2.1. Viskositas

Data viskositas dari minyak hasil pirolisis lambat dapat dilihat pada Tabel 4.1. Terlihat bahwa viskositas minyak pirolisis lebih besar dari viskositas air. Hal ini menunjukkan bahwa minyak pirolisis lebih kental dibandingkan air. Viskositas

minyak pirolisis rata-rata dari seluruh sampel adalah sekitar 2,36 cP. Harga viskositas minyak pirolisis dari penelitian ini dibandingkan dengan viskositas fluida yang lain dapat dilihat pada tabel 4.2. Berdasarkan nilai dari viskositas minyak pirolisis dapat disimpulkan bahwa dengan pengurangan jumlah biomasa dan peningkatan jumlah plastik menyebabkan viskositas menjadi turun. Hal ini dikarenakan viskositas dari minyak pirolisis biomasa lebih tinggi dari pada viskositas air (Hidayat, E. (2009)) sedangkan viskositas dari minyak pirolisis plastik lebih rendah dari pada viskositas dari air (Santoso, J. (2010)).

Tabel 4.1. *Viskositas* minyak pirolisis

NO	SAMPEL	Viskositas (centipoise)
1	400C (70%B:30%P)	5
2	400C (50%B:50%P)	3,75
3	400C (30%B:70%P)	2
4	500C (70%B:30%P)	1,75
5	500C (50%B:50%P)	1,5
6	500C (30%B:70%P)	1,5
7	600C (70%B:30%P)	2
8	600C (50%B:50%P)	1,9
9	600C (30%B:70%P)	1,85
10	Aquadest	1

Tabel 4.2. *Viskositas* bahan bakar minyak dan pelumas

No	Fluida	Temperatur (°C)	Viskositas (cP)
1	Air	20	1
2	Kerosene	28	10
3	Bensin	20	0,652
4	Alkohol	27	0,8609
5	Aseton	27	0,3417
6	Rata-rata minyak pirolisis penelitian ini	30	2,36

Dilihat dari temperatur pirolisis, pada temperatur yang rendah dihasilkan minyak pirolisis yang mempunyai nilai viskositas yang lebih tinggi. Penyebabnya adalah bahwa pada temperatur yang rendah dihasilkan minyak pirolisis dengan molekul yang berat. Pada temperatur yang tinggi, molekul berat pada minyak pirolisis mengalami pemecahan menjadi molekul yang lebih ringan dan nilai viskositasnya lebih kecil.

4.2.2. Massa jenis

Nilai massa jenis minyak pirolisis adalah berkisar antara 0,67 – 0,81 kg/L dengan rata-rata 0,71 kg/L sebagaimana dilihat pada tabel 4.3. Harga ini hampir setara dengan nilai massa jenis dari air. Pada temperatur pirolisis 400, 500 dan 600°C, semakin banyak campuran plastik dan pengurangan jumlah biomassa menyebabkan massa jenis minyak pirolisis sedikit mengalami penurunan. Penyebabnya adalah massa jenis minyak pirolisis dari plastik lebih rendah dari minyak pirolisis dari biomassa, sesuai dengan penelitian dari Santoso J (2010) dan Hidayat E (2009) bahwa massa jenis dari plastik sebesar 0,74 kg/L lebih rendah daripada massa jenis dari biomassa sebesar 0,9974 kg/L.

Tabel 4.3. Massa jenis hasil minyak pirolisis

NO	SAMPEL	Massa Jenis (kg/L)
1	400C (70%B:30%P)	0.81
2	400C (50%B:50%P)	0.73
3	400C (30%B:70%P)	0.7
4	500C (70%B:30%P)	0.75
5	500C (50%B:50%P)	0.73
6	500C (30%B:70%P)	0.7
7	600C (70%B:30%P)	0.7
8	600C (50%B:50%P)	0.68
9	600C (30%B:70%P)	0.67
Rata-rata		0.71

4.2.3. Nilai kalor

Hasil pengujian nilai kalor minyak pirolisis menunjukkan bahwa nilai kalor minyak pirolisis cukup tinggi. Dari tabel 4.4 diketahui bahwa rata-rata nilai kalor dari minyak pirolisis yang dihasilkan adalah 34,37 MJ/kg. Nilai kalor tertinggi dari minyak pirolisis yaitu sebesar 46,5 MJ/kg terdapat pada sampel temperatur 400°C komposisi 30%B:70%P yang hampir mendekati nilai kalor dari bensin yang memiliki nilai kalor sebesar 47,3 MJ/kg

Tabel 4.4. Nilai kalor hasil minyak pirolisis

NO	SAMPEL	RATA-RATA (MJ/kg)
1	400C (70%B:30%P)	8,5
2	400C (50%B:50%P)	43,7
3	400C (30%B:70%P)	46,5
4	500C (70%B:30%P)	16,8
5	500C (50%B:50%P)	43
6	500C (30%B:70%P)	44,8
7	600C (70%B:30%P)	19,8
8	600C (50%B:50%P)	42,3
9	600C (30%B:70%P)	43,9
Rata-rata		34.37

Data nilai kalor minyak pirolisis juga menunjukkan bahwa nilai kalor lebih banyak dipengaruhi oleh jenis bahan baku yang dipirolisis dibandingkan dengan temperatur pirolisis. Dari tabel 4.4 terlihat bahwa pada komposisi dengan jumlah biomasa yang lebih banyak menghasilkan nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan jumlah plastik yang lebih banyak. Hal ini karena pada minyak pirolisis dari biomasa mengandung oksigen yang lebih banyak sehingga nilai kalornya rendah (Hidayat, E. (2009)). Oleh karena itu dengan jumlah biomasa yang semakin banyak menyebabkan nilai kalor minyak pirolisis campuran biomasa dan plastik semakin rendah. Pada minyak pirolisis dengan komposisi jumlah plastik yang lebih banyak dari pada jumlah biomasa menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi, hal ini karena minyak pirolisis dengan

jumlah plastik lebih banyak mempunyai jumlah *heavy liquid* yang lebih banyak, *heavy liquid* adalah minyak berat yang mempunyai kandungan rantai hidrokarbon dengan jumlah karbon diatas 6 sehingga dengan peningkatan jumlah plastik dan pengurangan jumlah biomassa menyebabkan jumlah *heavy liquid* bertambah dan jumlah oksigen berkurang sehingga berakibat nilai kalor meningkat (Bhattacharya P (2009)).

4.3. Pengujian Efisiensi Kompor Berbahan Bakar Minyak Pirolisis.

Pengujian efisiensi kompor menggunakan minyak pirolisis temperatur 400°C komposisi 30%B:70%P menggunakan air sebanyak 500 gram dengan menggunakan metode wbt start dingin hasilnya dapat dilaporkan berikut ini.

1. Besarnya panas sensibel dapat dihitung menggunakan rumus:

$$SH = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

dimana C_p adalah panas jenis air yang nilainya adalah 4180 J/kg.°C.

$$\begin{aligned} SH &= 0,5 \text{ kg} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times ^\circ\text{C}} \times (83 - 29^\circ\text{C}) \\ &= 113 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2. Panas laten dapat dihitung menggunakan rumus:

$$LH = W_e \times H_{fg}$$

dimana H_{fg} (panas laten air) adalah 2.268.000 $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

$$\begin{aligned} LH &= 0,155 \text{ kg} \times 2.268.000 \times \frac{\text{J}}{\text{kg}} \\ &= 352 \text{ kJ} \end{aligned}$$

3. Input energi panas dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Q_{in} = LHV \times WF$$

nilai LHV diperoleh dari hasil pengujian nilai kalor menggunakan *bomb calorimeter*, minyak pirolisis 400°C komposisi 30%B:70%P adalah

sebesar 46.500.000 $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

$$\begin{aligned} Q_{in} &= 46.500.000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \times 0,042 \text{ kg} \\ &= 1952 \text{ kJ} \end{aligned}$$

4. Efisiensi thermal dapat dihitung menggunakan rumus :

$$TE = \frac{SH + LH}{Q_{in}} \times 100\%$$

$$TE = \frac{(113 + 352) \text{ kJ}}{\dots} \times 100\%$$

$$= 24 \%$$

Hasil keseluruhannya hasil uji kompor dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.5. Hasil pengujian efisiensi kompor

NO	SAMPEL	Qin (kJ)	SH (kJ)	LH(kJ)	Efisiensi (%)
1	400C (70%B:30%P)	290	29	0	10
2	400C (50%B:50%P)	1398	94	120	15
3	400C (30%B:70%P)	1952	113	352	24
4	500C (70%B:30%P)	437	38	0	9
5	500C (50%B:50%P)	1891	99	261	19
6	500C (30%B:70%P)	1702	93	225	19
7	600C (70%B:30%P)	356	44	0	12
8	600C (50%B:50%P)	2538	116	299	16
9	600C (30%B:70%P)	2330	113	311	18
10	MINYAK TANAH	2150	138	376	24
11	BENSIN	1750	113	261	21

Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan massa air sebesar 500 gram dan massa bahan bakar sebesar 100 gram. Hasil efisiensi WBT yang tertinggi diperoleh pada temperatur 400°C dengan komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 24% dan harga efisiensi ini setara dengan efisiensi minyak tanah.

Pada penelitian ini dapat dipelajari bahwa dengan pengurangan biomassa dan peningkatan plastik pada setiap temperatur terjadi kenaikan efisiensi dari wbt, hal ini dikarenakan dengan pengurangan biomassa menyebabkan minyak yang tidak terbakar berkurang sesuai dengan penelitian Aydinli B & Caglar A (2010) dan dengan peningkatan plastik menyebabkan *heavy liquid* bertambah sesuai dengan penelitian Bhattacharya P (2009).

Pada Komposisi 70%B:30%P pada semua temperatur, sampel minyak ini hanya terbakar dalam waktu yang singkat setelah itu api padam dan tidak dapat dinyalakan kembali. Hal ini dikarenakan minyak pirolisis dari biomasa tidak dapat terbakar (Aydinli B & Caglar A (2010)). Sehingga minyak pirolisis dari komposisi 70%B:30%P tidak mampu digunakan untuk menguapkan air (LH = 0).

Pada komposisi 50%B:50%P pada semua temperatur, nilai efisiensi kompor meningkat pada temperatur 500°C dan mengalami penurunan pada

temperatur 600°C. Pada temperatur 500°C menuju 600°C terjadi penurunan efisiensi kompor, hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur jumlah dari *heavy liquid* mengalami penurunan dan *light liquid* mengalami peningkatan. Dengan terjadinya peningkatan *light liquid* menyebabkan bahan bakar mudah menyala dan akibatnya jumlah bahan bakar yang terbakar lebih banyak pada temperatur 600°C (Caglar A & Aydinli B, 2009). Dengan nilai kalor yang hampir sama antara minyak pirolisis yang dihasilkan pada temperatur 500°C dan 600°C, padahal pada temperatur yang lebih tinggi mudah terbakar/menyala, maka Qin akan meningkat. Sehingga dengan Qin yang lebih besar, padahal nilai kalornya hampir sama, maka efisiensi kompor menurun untuk temperatur pirolisis yang lebih tinggi. Dengan penambahan plastik dari 50% menjadi 70% pada saat proses pirolisis dapat diperoleh sedikit peningkatan nilai kalor. Penambahan plastik dapat mengurangi kadar oksigen dalam minyak pirolisis dan menambah kadar *heavy liquid*. Dengan semakin banyaknya *heavy liquid* menyebabkan jumlah minyak pirolisis yang dapat dibakar berkurang sehingga Qin semakin rendah pada saat menggunakan minyak dari hasil pirolisis campuran 70% pada temperatur pirolisis yang sama. Dengan Qin yang semakin rendah padahal nilai kalornya juga meningkat menyebabkan LH meningkat sehingga pada temperatur pirolisis yang sama, dengan semakin banyaknya kadar plastik menyebabkan efisiensi kompor mengalami sedikit peningkatan.

Pada komposisi 30%B:70%P pada semua temperatur, nilai efisiensi kompor mengalami penurunan pada setiap kenaikan temperatur. Hal ini dikarenakan semakin tinggi temperatur jumlah dari *heavy liquid* mengalami penurunan dan *light liquid* mengalami peningkatan. Dengan terjadinya peningkatan *light liquid* menyebabkan bahan bakar mudah menyala dan akibatnya jumlah bahan bakar yang terbakar lebih banyak pada temperatur yang lebih tinggi (Caglar A & Aydinli B, 2009). Dengan nilai kalor yang hampir sama antara minyak pirolisis yang dihasilkan pada setiap temperatur, padahal pada temperatur yang lebih tinggi mudah terbakar/menyala, maka Qin akan meningkat. Sehingga dengan Qin yang lebih besar, padahal nilai kalornya hampir sama, maka efisiensi kompor menurun untuk temperatur pirolisis yang lebih tinggi.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan pirolisis antara sampah biomasa dan plastik *polypropylene* dan pengujian karakteristik minyak pirolisis yang dihasilkan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Massa jenis rata-rata minyak pirolisis sebesar 0,71 kg/L. Dengan semakin meningkatnya jumlah biomassa, dan menurunnya jumlah plastik akan menghasilkan nilai massa jenis yang semakin tinggi sedangkan dengan pengurangan jumlah biomassa dan peningkatan jumlah plastik akan menghasilkan nilai massa jenis yang semakin rendah. Nilai massa jenis tertinggi terdapat pada suhu 400°C komposisi 70%B:30%P yaitu sebesar 0,81 kg/L dan nilai massa jenis terendah terdapat pada suhu 600°C komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 0,67 kg/L.
2. Viskositas dinamik rata-rata hasil minyak pirolisis sebesar 2,36 cP. Dengan semakin meningkatnya jumlah biomassa dan menurunnya jumlah plastik akan menghasilkan nilai viskositas yang semakin tinggi sedangkan dengan pengurangan jumlah biomassa dan peningkatan jumlah plastik akan menghasilkan nilai viskositas yang semakin rendah. Nilai viskositas tertinggi terdapat pada suhu 400°C komposisi 70%B:30%P yaitu sebesar 5 cP dan nilai viskositas terendah terdapat pada suhu 500°C komposisi 50%B:50%P yaitu sebesar 1,5 cP.
3. Nilai kalor rata-rata hasil minyak pirolisis sebesar 34,37 MJ/kg. Dengan semakin meningkatnya jumlah biomassa dan menurunnya jumlah plastik akan menghasilkan nilai kalor yang semakin rendah sedangkan dengan pengurangan jumlah biomassa dan peningkatan jumlah plastik akan menghasilkan nilai kalor yang semakin tinggi. Nilai kalor tertinggi terdapat pada suhu 400°C komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 46,5 MJ/kg dan nilai kalor terendah terdapat pada suhu 400°C komposisi 70%B:30%P yaitu sebesar 8,5 MJ/kg.
4. Pada penelitian ini menggunakan massa air sebesar 500 gram dan massa bahan bakar yang digunakan sebesar 100 gram. Hasil efisiensi WBT yang tertinggi

diperoleh pada temperatur 400°C komposisi 30%B:70%P yaitu sebesar 24% dan harga efisiensi ini setara dengan efisiensi minyak tanah sedangkan nilai efisiensi terendah terdapat pada suhu 500°C komposisi 70%B:30%P yaitu sebesar 9%. Dengan semakin meningkatnya jumlah biomassa dan menurunnya jumlah plastik akan menghasilkan nilai efisiensi yang semakin rendah sedangkan dengan pengurangan jumlah biomassa dan peningkatan jumlah plastik akan menghasilkan nilai efisiensi yang semakin tinggi.

5.2. Saran

Setelah melakukan penelitian, maka saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang pengaruh laju pemanasan pirolisis dengan menggunakan reaktor pirolisis yang kontinyu.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai zat-zat penyusun bahan bakar minyak pirolisis dengan menggunakan peralatan *gas chromatography (GC analysis)*.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang sifat-sifat bahan bakar dari minyak pirolisis antara lain *flash point* dan sifat kimia dari minyak pirolisis.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengembangan kompor khusus untuk minyak pirolisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Aydinli, B. & Caglar, A., 2010, "The Comparison of Hazelnut Shell Co-Pyrolysis with Polyethylene Oxide and Previous Ultra-High Molecular Weight Polyethylene" *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 87, 263–268.
- Bailis, R., Ogle, D., MacCarty, N., & Stil, D., 2007, "The Water Boiling Test (WBT)" *WBT Version*. 3.0.
- Bernardo, M.S., Lapa, N., Barbosa, R., Goncalves, M., Mendes, B., Pinto, F., & Gulyurtlu, I., 2009, "Chemical and Ecotoxicological Characterization of Solid Residues Produced During the co-Pyrolysis of Plastics and Pine Biomass", *Journal of Hazardous Materials*. 166 , 309–317.
- Besler, S., Williams, T.P., 1996, "The influence of Temperature and Heating", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 89, 333–339.
- Bhattacharya, P., Steele, P. H., Hassan, E. B. M., Mitchell, B., Ingram, L., & Pittman, C. U., 2009, "Wood / Plastic co-Pyrolysis in an Auger Reactor: Chemical and Physical Analysis of The Products" *Fuel*. 88, 1251–1260.
- Chaurasia, A.S., & Babu, B.V., 2004, "Influence of product yield, Density, Heating Conditions and Conversion on Pyrolysis of Biomass" *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 87 , 305–308.
- Caglar, A., & 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 , 304–309.
- Encinar, J. M., Gonzalez, J. F., Martinez, G., & Roman, S., 2009, "Jerusalem Artichoke Pyrolysis: Energetic Evaluation" *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 85, 294–300.
- Evans, R., 2004, "Options for Renewable Hydrogen Technologies", *Energy & Agricultural Carbon Utilization*. 86 ,304–309.
- Hidayat, E., 2009, "Studi Sifat Fisik, Kimia dan Uji Unjuk Kerja Kompor dengan Bahan Bakar Minyak Pirolisis Sekam Padi".
- Santoso, J., 2010, "Uji sifat minyak pirolisis dan uji performansi Kompor berbahan bakar minyak pirolisis dari Sampah plastik".

