

**PENGARUH DEBIT DAN ARAH ALIRAN AIR PENDINGINAN
KONDENSOR TIPE *DOUBLE TUBE* TERHADAP MINYAK HASIL
PIROLISIS PLASTIK *POLYPROPYLENE***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



RAMA REYNEI

NIM. 155060200111053

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2019

repository.ub.ac.id

**PENGARUH DEBIT DAN ARAH ALIRAN AIR PENDINGINAN
KONDENSOR TIPE *DOUBLE TUBE* TERHADAP MINYAK HASIL
PIROLISIS PLASTIK *POLYPROPYLENE***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



RAMA REYNEI

NIM. 155060200111053

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

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

**Mengetahui,
Ketua Program Studi S1**



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

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

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

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

Malang, 04 July 2019

Mahasiswa



Rama Reynei

NIM. 155060200111053

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 018/UN10.F07.12.21/PP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

RAMA REYNEI

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH DEBIT DAN ARAH ALIRAN AIR PENDINGINAN KONDENSOR
Tipe DOUBLE TUBE TERHADAP MINYAK HASIL PIROLISIS PLASTIK
POLYPROPYLENE**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **27 JUN 2019**



Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

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

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Debit dan Arah Alirab Air Pendinginan Kondensor Tipe *Double Tube* Terhadap Minyak Hasil Pirolisis Plastik *Polypropylene*

Nama Mahasiswa : Rama Reynei
NIM : 155060200111053
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr.Eng. Mega Nur Sasongko ST., MT.
Pembimbing II : Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Winarto, ST., MT., Ph.D.
Dosen Penguji 2 : Purnami, ST., MT.
Dosen Penguji 3 : Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 19 Juni 2019
SK Penguji : 1187/UN10.F07/SK/2019



Teruntuk Ucapan

Terimakasih Kepada :

Kedua orang tua, kakak, dan adikku tercinta.

I love you!

PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena kasih dan karunianya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yakni skripsi yang berjudul “**Pengaruh Debit dan Arah Aliran Air Pendinginan Kondensator Tipe *Double Tube* terhadap Minyak Hasil Pirolisis Plastik *Polypropylene*”**”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan mahasiswa Teknik Mesin Universitas Brawijaya dalam meraih gelar Sarjana Teknik. Penulis sadar sepenuhnya bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Namun demikian, hal ini tidak mengurangi rasa hormat dan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi bantuan pemikiran, bimbingan, tenaga, dan dorongan semangat hingga terselesaikannya karya ini. Untuk itu penulis ingin menyampaikan terima kasih yang tulus dan sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapa dan Mama yang selalu mendoakan penulis dan mendukung penulis dalam berbagai aspek.
2. Clara, Yosi, dan Cristy selaku kakak dan adik penulis yang selalu menjadi penyemangat penulis.
3. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku dosen pembimbing I dan Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak meluangkan waktu dan ilmu untuk membimbing penulis serta selalu memberikan semangat kepada penulis.
4. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku dosen pembimbing II dan KKDK Konversi Energi skripsi yang telah banyak memberikan saran dan arahan dalam penyusunan skripsi kepada penulis.
5. Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
6. Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng. Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin.
7. Seluruh dosen pengajar dan staff administrasi Jurusan Teknik Mesin.
8. Fahrizal Perdana dan Muhammad Reza Wahyudi selaku teman seperjuangan penyelesaian skripsi ini.
9. Gazalla Taufik Putri, terkasih, pemberi warna dan penyemangat penulis dari awal SMA sampai penyusunan skripsi.
10. William, Fahrizal, Reza, Naufal, Akmal, Franz, Lambang, dan Difal selaku teman-teman asisten Laboratorium Motor Bakar yang telah banyak membantu selama penelitian penulis berlangsung.
11. Basis Lapo selaku perkumpulan yang memberi warna kepada penulis dalam menjalankan perkuliahan.

12. Teman-teman Mahasiswa Mesin Angkatan 2015 dan Keluarga Besar Mahasiswa Mesin.
13. Serta semua pihak terkait yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Terima kasih banyak penulis ucapkan untuk jasa-jasa yang akan terkenang sepanjang masa. Setelah melalui berbagai rintangan dan masalah-masalah yang dihadapi, penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan skripsi dan ilmu yang dimiliki masih membutuhkan penyempurnaan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis butuhkan. Semoga penyusunan skripsi ini dapat berguna kelak dikemudian hari dan dapat dikembangkan untuk selanjutnya.

Malang, 12 Mei 2019



Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Sebelumnya	5
2.2. Pirolisis	7
2.3. <i>Heat Exchanger</i>	8
2.3.1 Macam-Macam Perpindahan Panas	8
2.3.1.1 Konduksi	8
2.3.1.2 Konveksi	10
2.3.1.3 Radiasi	11
2.3.2 Kondensor	11
2.3.3 Klasifikasi Kondensor Berdasarkan Arah Aliran Fluida Kerja	12
2.3.3.1 Aliran Searah (<i>Parallel Flow</i>)	12
2.3.3.2 Aliran Berlawanan (<i>Counter Flow</i>)	12
2.3.4 Analisis Perpindahan Panas	13
2.4 Bilangan Reynolds	15
2.5 Plastik	15
2.5.1 <i>Polypropylene (PP)</i>	18
2.6 Bahan Bakar	19
2.6.1 Alkana	20
2.6.2 Alkena	20



2.6.3 Alkuna.....	21
2.6.4 Alisiklik Hidrokarbon	21
2.6.5 Hidrokarbin Aromatik.....	21
2.6.6 Sifat Bahan Bakar Minyak.....	22
2.7 Hipotesis.....	23
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1. Metode Penelitian	25
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.3. Variabel Penelitian.....	25
3.4. Alat dan Bahan Penelitian.....	26
3.4.1 Alat yang Digunakan	26
3.4.2 Bahan yang Digunakan.....	32
3.5 Prosedur Peneitian.....	32
3.6 Diagram Alir Penelitian	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASA.....	35
4.1 Pengaruh Arah Aliran dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis	35
4.2. Pengaruh Arah dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Sifat Fisik Hasil Minyak Pirolisis	37
4.2.1 Pengaruh Arah dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Densitas Minyak Hasil Pirolisis.....	37
4.2.2 Hubungan Arah dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Nilai Viskositas Minyak Hasil Pirolisis	39
4.2.3 Hubungan Arah dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Nilai Kalor Minyak Hasil Pirolisis.....	41
BAB V PENUTUP	45
5.1. Kesimpulan	45
5.2. Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter operasi dan produk dari ketiga macam proses pirolisis.....	8
Tabel 2.2	Konduktivitas Termal Beberapa Bahan pada Temperatur Ruang	9
Tabel 2.3	Polimerisasi Berbagai Jenis Monomer	16
Tabel 2.4	Kode Daur Ulang Plastik	17
Tabel 2.5	Propertis dari <i>Polypropylene</i>	19
Tabel 2.6	Sifat Fisik dan Kimia Fuel Oil.....	23



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perbandingan bilangan Reynolds terhadap perpindahan kalor	5
Gambar 2.2	Pengaruh debit air pendingin dan posisi kondensor terhadap hasil kondensasi pirolisis getah pinus.....	6
Gambar 2.3	Hubungan temperature pirolisis terhadap massa minyak	6
Gambar 2.4	Proses dekomposisi molekul hidrokarbon besar menjadi molekul yang lebih kecil selama pirolisis.....	7
Gambar 2.5	Perpindahan panas konduksi melalui dinding.....	9
Gambar 2.6	<i>Parallel flow</i>	12
Gambar 2.7	Aliran berlawanan	12
Gambar 2.8	Perpindahan panas pada pipa <i>double tube</i>	14
Gambar 2.9	Destilasi minyak bumi	16
Gambar 2.10	Polimerisasi.....	16
Gambar 2.11	Struktur polimer <i>polypropylene</i>	18
Gambar 2.12	Klasfikasi hidrokarbon	20
Gambar 2.13	Contoh alkana, alkena, dan alkuna	21
Gambar 2.14	Struktur hidrokarbon aromatik.....	21
Gambar 3.1	Alat pirolisis.....	26
Gambar 3.2	Kondensor double tube jenis: (a) <i>parallel flow</i> , (b) <i>counter flow</i>	27
Gambar 3.3	Instalasi kondensor <i>parallel flow</i>	27
Gambar 3.4	Instalasi kondensor counter flow	28
Gambar 3.5	<i>Flowmeter</i>	29
Gambar 3.6	<i>Viscometer</i>	30
Gambar 3.7	<i>Bomb kalorimeter</i>	31
Gambar 3.8	Data logger.....	31
Gambar 3.9	<i>Aerometer</i>	32
Gambar 3.10	Plastik <i>polypropylene</i>	32
Gambar 3.12	Diagram alir penelitian	34



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Minyak Hasil Pirolisis
- Lampiran 2 Instalasi Alat Penelitian
- Lampiran 3 Lembar Data Hasil Pengujian Sifat Fisik



RINGKASAN

Rama Reynei, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2019, *Pengaruh Debit dan Arah Aliran Air Pendinginan Kondensor Tipe Double Tube Terhadap Minyak Hasil Pirolisis Plastik Polypropylene*, Dosen Pembimbing: Mega Nur Sasongko dan Widya Wijayanti.

Polypropylene (PP) adalah salah satu jenis plastik yang menyumbang angka limbah tertinggi. Maka dari itu sudah dicanangkan pengolahan limbah supaya dapat dikonversi menjadi sumber energi mengingat kebutuhan akan energi juga meningkat dari tahun ke tahun.

Penelitian ini bertujuan guna melihat pengaruh debit dan arah aliran air kondensor tipe *double tube* terhadap minyak hasil pirolisis plastik PP baik dari segi volume dan sifat fisik. Metode yang digunakan ialah *true experimental*. Plastik PP dengan massa 250 gram dan besar 3 cm x 3 cm akan dipirolisis dengan waktu 90 menit, variasi debit 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit dan arah aliran *parallel* dan *counter*.

Penelitian ini mendapat hubungan antara debit dan arah aliran air pada kondensor dalam proses pirolisis plastik PP. Semakin besar debit pada setiap arah aliran *parallel* dan *counter* maka volume minyak hasil yang didapat semakin banyak juga. Namun pada sifat fisik seperti massa jenis, viskositas, dan nilai kalor, tidak dipengaruhi oleh debit dan arah aliran air pendinginan di kondensor tipe *double tube*. Pirolisis plastik PP dengan pendinginan air tipe *double tube* menghasilkan minyak hasil dengan sifat fisik yang mendekati bahan bakar minyak komersil yaitu bensin, minyak tanah, dan solar. Didapat bahwa debit 7 liter/menit dan arah aliran *counter flow* air pendinginan pada kondensor optimal pada pirolisis plastik PP.

Kata kunci: Kondensor, Pirolisis, Minyak hasil, *Polypropylene*

SUMMARY

Rama Reynei, Majoring in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, May 2019, *Effect of Volumetric flow rate and flow direction on water cooled double tube condenser on tar product pyrolysis polypropylene plastic*, Consultant: Mega Nur Sasongko dan Widya Wijayanti.

Polypropylene is one of the most plastic that take part in waste distribution. Number of energies used is increas every year. Because of that, waste treatment is planned for converting this waste to energy sources.

The purpose of this experiment is to find effect of volumetric flow rate and flow direction of water cooled double tube condenser on volume and physical properties of PP plastic pyrolysis tar product. True experimental methods are used. 250 grams plastic PP with 3 cm x 3 cm area were heated for 90 minutes with absence of oxygen, it was cooled with double tube condenser at 1 liter/minute, 4 liter/minutes, and 7 liter/minutes with co-current and counter water flow.

This experimental got an effect of volumetric flow rate and flow direction of water cooled double tube condenser on PP plastic pyrolysis. The increase of the volumetric flow rate at co-current and counter water flow, more volume of the liquid product. But, physical properties like density, viscosity, and caloric value, isn't affected by volumetric flow rate and flow direction of water cooled double tube condenser. Tar product of plastic PP pyrolysis with water cooled double tube condenser have physical properties similarity with commercial fuel like gasoline, kerosene, and diesel. Obtain that the optimum PP plastic pyrolysis water cooled double tube condenser volumetric flow rate is 7 liter/minutes and optimum flow direction is counter water flow.

Keywords: Condenser, pyrolysis, Tar, Polypropylene.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Pemakaian energi dalam kehidupan sehari-hari merupakan kebutuhan kita sebagai makhluk hidup agar bisa bertahan hidup. Berdasarkan data dari Kementerian ESDM tahun 2018, pada tahun 2017 konsumsi energi nasional digunakan pada sektor rumah tangga sebesar 31% diikuti sektor transportasi 29% dan industri 22% dari total 1,23 miliar *barrels oil equivalent* (BOE). Hal tersebut membuktikan pemakaian energi memegang penting dalam kehidupan makhluk hidup. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Dewan Energi Dunia, ketahanan energi Indonesia menduduki posisi ke-69 dari 129 negara pada tahun 2014. Terdapat tiga aspek yang meliputi ketahanan *energy*, yakni keterjangkauan pasokan energi, ketersediaan sumber energi, dan kelanjutan pengembangan energi baru terbarukan. Dikutip dari sindonews, dengan asumsi tidak ada penemuan cadangan baru minyak bumi dan laju produksi sama dengan produksi tahun 2016 yaitu sebesar 881.000 Barel per Hari, maka cadangan minyak bumi Indonesia diperkirakan akan habis pada tahun 2026.

Melihat data dan masalah yang ada mengenai kebutuhan energi di Indonesia, maka diperlukan energi alternatif guna memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat di Indonesia. Macam-macam energi alternatif yang sudah dikembangkan yaitu energi surya, air, panas bumi, angin, pasang surut laut, biomassa, bioalkohol, dan biogas. Sumber-sumber energi ini dapat kita peroleh di berbagai lokasi di Indonesia. Namun, walaupun jumlahnya melimpah dan selalu tersedia, sumber-sumber energi ini juga tidak luput dari berbagai kekurangan. Jika dibandingkan dengan sumber energi yang berasal dari fosil, sumber-sumber energi ini mengalami permasalahan pada mahalnya biaya pengolahan dan sulitnya mengumpulkan sumber-sumber energi tersebut agar dapat mencukupi kapasitas yang diinginkan untuk dikonsumsi, seperti biogas, walaupun pengolahannya tidak mahal, namun teknik pengumpulan dan pemisahan sampah dari berbagai tempat susah untuk dilakukan.

Seperti yang kita ketahui, limbah plastik menjadi ancaman serius bagi lingkungan tempat kita tinggal, berbagai upaya dilakukan untuk meminimalisasi jumlah sampah plastik yang kian hari kian meningkat. Plastik adalah jenis bahan non-biodegradable yang sulit diuraikan oleh alam. Menurut *plasticnews*, Tiga mayoritas limbah

plastik didominasi oleh plastik PET, PP, dan HDPE. Untuk mengatasi hal tersebut maka diadakan program daur ulang sampah plastik. Namun hal tersebut dirasakan semakin tidak efektif, hanya sekitar 4% yang dapat didaur ulang, sisanya menggunung di tempat penampungan sampah. Hal ini bisa dilakukan karena pada dasarnya plastik berasal dari fraksi minyak bumi. Plastik terdiri dari beberapa jenis salah satunya adalah plastik PP (*PolyPropylene*). Plastik PP merupakan jenis plastik terbaik karena resistansinya terhadap minyak dan tahan suhu tinggi. Plastik ini biasanya digunakan sebagai bungkus makanan (*snack*), tutup botol air mineral, tutup botol obat dan lain-lain. Selain itu plastik juga mempunyai nilai kalor cukup tinggi, setara dengan bahan bakar fosil seperti bensin dan solar.

Banyak upaya yang telah dilakukan untuk mengkonversi material-material sampah plastik tersebut untuk menghasilkan bahan bakar karena melihat dari sifat penyusun sampah plastik yaitu berupa hidrokarbon. Dalam menghasilkan minyak dari proses pirolisis, terdapat proses kondensasi yang berfungsi untuk mengubah fase *uncondensable gas* hasil pirolisis menjadi fase cair. Apriani dan Munawar (2012) meneliti tentang Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Minyak Menggunakan Proses Pirolisis. Mereka menggunakan proses pirolisis untuk mengubah sampah yang berada di TPA Benowo Surabaya yang sudah tidak dipungut pemulung sehingga bisa dijadikan bahan baku proses pirolisis. Sebelum dimasukkan ke reaktor pirolisis, sampah berjenis LDPE dan HDPE dijemur, dipilah dari pengotor, dan dipotong sampai ukuran 1-2 cm². Setelah ditimbang seberat 500 gram, plastik dipanaskan tanpa adanya oksigen dengan variasi waktu dan suhu. Dari penelitian tersebut didapatkan temperatur optimal untuk menghasilkan minyak pada 400°C dengan waktu 60 menit. Pramudya & Rahma (2013) melakukan penelitian Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Sumber Bahan Bakar Cair Menggunakan Proses Pirolisis. Mereka meneliti menggunakan plastik jenis PP, PET, dan *Polystirene* dengan massa seberat 500 gram dan lama pemanasan selama 5 jam. Pada akhir kesimpulan disertakan bahwa, perlu adanya penelitian lanjutan tentang system pendinginan yang tepat untuk pirolisis plastik, guna menemukan parameter yang paling baik dalam proses pirolisis plastik. Haryadi (2015) meneliti tentang Pengaruh Arah Aliran Air Pendingin Padakondensor Terhadap Hasil Pengembunan proses Pirolisis Limbah Plastik. Pada penelitian tersebut didapat semakin besar debit aliran, maka hasil minyak yang didapat semakin banyak juga. Tetapi disaran yang tertera, penulis mengatakan perlu adanya perbaikan atau penyempurnaan pada system kondensasinya sehingga hasil dari pirolisis semakin efektif. Miandad et al (2017) meneliti tentang pengaruh dari sampah plastik terhadap hasil liquid oil pirolisis.

Dalam saran yang ia tujukan, penelitian tentang post-treatment terhadap hasil pirolisis sangat disarankan. Hal tersebut ditujukan agar dapat meningkatkan minyak hasil pirolisis dan mengetahui parameter pengolahan minyak hasil pirolisis. Pada penelitian tersebut menyarankan perlakuan *post-treatment* seperti filtrasi, reaksi kimia, dan destilasi.

Meninjau yang sudah dijelaskan diatas, penelitian ini diharapkan mendapatkan cara maksimal pada arah aliran dan debit aliran kondensasi guna pengolahan palstik *polypropylene* dengan cara pirolisis menjadi bahan bakar minyak yang menyerupai bahan bakar dipasaran.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah dijelaskan, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh debit aliran pendinginan dan arah aliran pendinginan pada kondensor terhadap karakteristik hasil minyak pirolisis plastik PP?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan adalah plastik pembungkus makanan jenis *polypropylene*.
2. Menggunakan tipe pirolisis *Fix Bed*.
3. Menggunakan gas Nitrogen sebagai kondisi *inert* pirolisis.
4. Temperatur pemanasan 400°C.
5. Kondensasi dengan air pada suhu ruang.
6. Tidak mendalam hingga struktur kimia
7. Hasil pirolisis berupa gas tidak diteliti

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini ialah:

1. Mengetahui pengaruh debit aliran pendinginan di kondensor terhadap karakteristik minyak hasil dari pirolisis plastik.
2. Mengetahui pengaruh arah aliran pendinginan di kondensor terhadap karakteristik minyak hasil dari pirolisis plastik.
3. Mendapat parameter kondensasi yang efektif guna memaksimalkan pirolisis plastik *polypropylene*.

1.5 Manfaat Penelitian

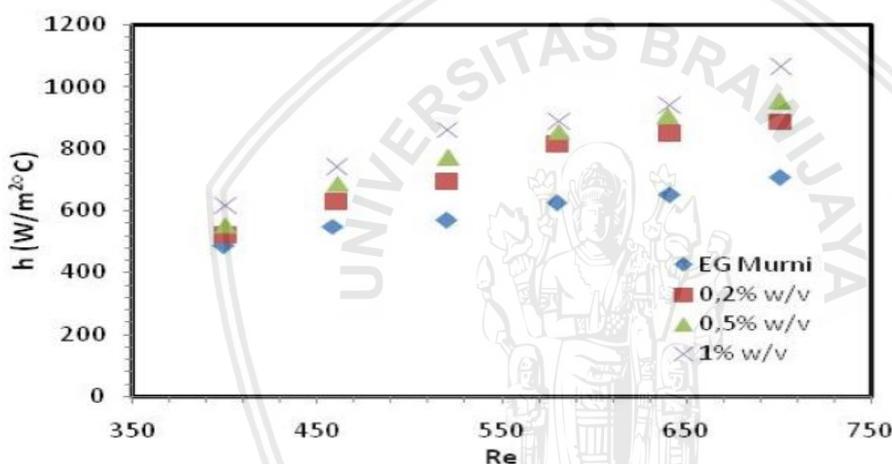
1. Mengembangkan pengetahuan yang sudah ada.
2. Dapat memberi alternatif kondensasi dalam pengolahan pirolisis plastik.
3. Memberi referensi data yang diharapkan untuk perancangan dalam skala yang lebih besar.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

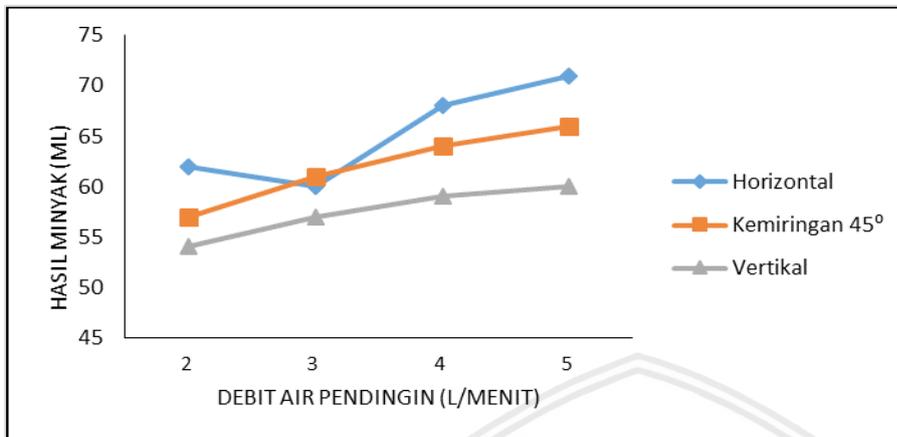
Putra et al (2012) meneliti tentang Studi Eksper-Imental Perpindahan Kalor Konveksi fluida Nano TiO₂-Ethylene Glycol pada *Circular Tube* di Bawah Kondisi Fluks Kalor Konstan. Didapatkan pengaruh bilangan Reynolds terhadap karakteristik perpindahan kalor. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan bilangan Reynolds aliran di pipa serta konsentrasi partikel nano dalam fluida dasar. Didapat semakin meningkatnya bilangan Reynolds, perpindahan kalor juga meningkat.



Gambar 2.1 Perbandingan bilangan Reynolds terhadap perpindahan kalor
Sumber: Putra et al (2012)

Ahmad et al (2018) meneliti pengaruh debit air pendingin dan posisi kondensor terhadap hasil kondensasi pirolisis getah pinus. Peneliti menjadikan variasi debit aliran 2L/menit, 3L/menit, 4L/menit, dan 5L/menit dan variasi kemiringan horizontal, vertikal, dan kemiringan 45° sebagai variabel bebasnya. Penelitian ini menggunakan getah pinus dengan massa 1 kg dan dipanaskan hingga temperatur 350°C dalam waktu 20 menit. Hasilnya didapat bahwa semakin cepat debit aliran pendingin pada proses kondensasi, hasil minyak yang dihasilkan semakin tinggi juga. Hal tersebut dikarenakan semakin besar debit yang digunakan akan dapat mendinginkan kondensor lebih baik dibandingkan debit yang kecil, dimana panas ayang akan dialirkan dan dibawa keluar dan diganti atau diisi lagi oleh air pendingin yang baru sehingga kondensor akan senantiasa dingin. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat untuk posisi yang paling banyak menghasilkan minyak ada pada posisi horizontal, hal tersebut dikarenakan semakin besar sudut kemiringan pipa kalor maka

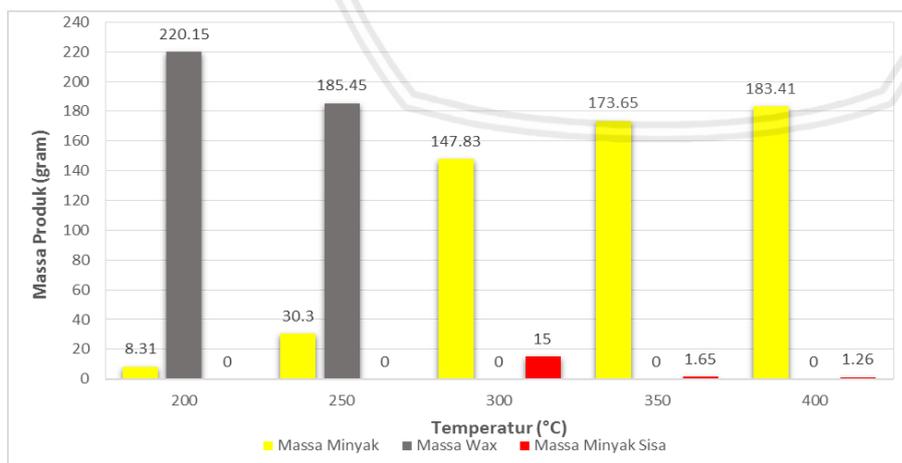
semakin lambat aliran fluida dan membuat uap bergerak dengan hambatan kecil. Uap bergerak semakin lambat disetiap bertambahnya sudut kemiringan karena adanya *head loss*.



Gambar 2.2 Pengaruh debit air pendingin dan posisi kondensator terhadap hasil kondensasi pirolisis getah pinus

Sumber: Ahmad et al (2018)

Mardika (2018), meneliti mengenai pengaruh Temperatur Terhadap Pembentukan *Fuel Oil* Hasil Pirolisis Plastik *Polypropylene* (PP). Peneliti mengambil data dengan variasi temperatur 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, dan 400°C. Bahan yang digunakan adalah plastik *polypropylene* dengan massa 250 gram dan dipanaskan selama 2 jam pada *pyrolyzer fix bed* dengan ukuran plastik 20 cm². Penelitian ini memaparkan bahwa dengan kenaikan temperatur pemanasan mulai dari 200°C hingga 400°C mengalami kenaikan hasil minyak. Pada Gambar 2.3 dapat dilihat pada temperatur 400°C dengan minyak sebanyak 183,41 gram.

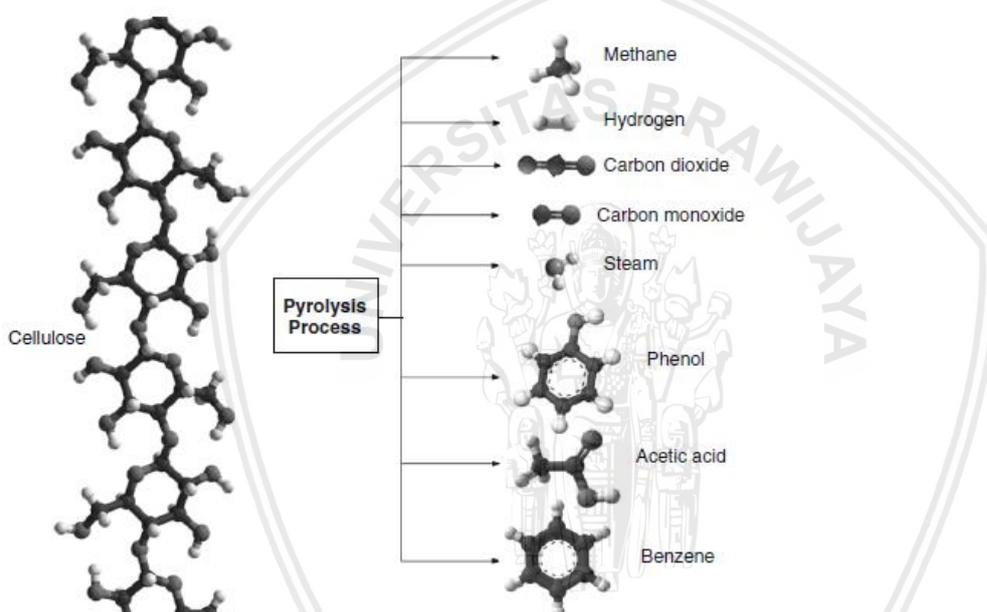


Gambar 2.3 Hubungan temperatur pirolisis terhadap massa minyak

Sumber: Mardika (2018)

2.2 Pirolisis

Cracking merupakan salah satu metode dalam pemecahan makromolekul hidrokarbon menjadi molekul hidrokarbon yang lebih kecil tanpa atau dengan sedikit sekali oksigen (Basu, 2010). Cracking memiliki 3 turunan yaitu *thermal cracking*, *catalytic cracking*, dan *hydro-cracking*. Pada pirolisis, pemecahan makromolekul menggunakan panas menjadi molekul lebih kecil seperti *paraffins*, *olefins*, *naphthenes* dan *aromatics*, fraksi *volatile* dan residu (Castrovinci, 2008) dapat dilihat pada Gambar 2.4. Temperatur kerja pirolisis berada pada kisaran 300°C-650°C tergantung *feedstock* dan hasil yang diinginkan (Basu, 2010). Selama pirolisis, molekul hidrokarbon kompleks yang panjang menjadi molekul hidrokarbon yang lebih pendek dan molekul gas, *liquid*, dan *char* yang lebih sederhana.



Gambar 2.4 Proses dekomposisi molekul hidrokarbon besar menjadi molekul yang lebih kecil selama pirolisis

Sumber: Basu (2010:66)

Berdasarkan temperatur pirolisis, laju pemanasan, dan waktu penahanan, pirolisis diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu:

1. Pirolisis Lambat

Pirolisis lambat atau bisa disebut karbonisasi, memiliki tujuan utama yaitu menghasilkan char. Dalam proses ini, gas hasil pirolisis ditahan selama 5 menit - 30 menit, temperatur yang rendah (sekitar 400°C). Dengan waktu yang lama, pirolisis lambat mengakibatkan uap hasil yang dapat dikondensasi diubah menjadi char dan gas yang tidak dapat dikondensasi (Basu, 2010:74).

2. Pirolisis Cepat

Pirolisis cepat mempunyai tujuan untuk memaksimalkan produk *liquid* atau *bio-oil*. Biomasa dipanaskan dengan cepat sehingga mencapai temperatur pirolisis sebelum terjadi dekomposisi. Pirolisis Cepat menghasilkan 60%-75% produk minyak (minyak dan cairan lainnya) dengan 15%-25% padatan (utamanya biochar) dan 10%-20% gas tergantung bahan yang dipirolisis (Jahirul et al, 2012:4956). Empat faktor penting untuk meningkatkan hasil *liquid* dari pirolisis cepat adalah waktu pemanasan yang cepat, temperatur reaksi antara 425°C sampai 600°C, waktu tinggal uap dalam reaktor yang cepat (<3 s), dan pendinginan cepat dari produk gas.

3. Pirolisis Kilat

Di pirolisis kilat biomasa dipanaskan sangat cepat tanpa oksigen, waktu tinggal gas yang singkat, dan dengan temperatur antara 450°C -1000°C. Produk hasil pirolisis kilat mengandung gas yang dapat terkondensasi dan tidak, keluar dari *pyrolyzer* dengan waktu tinggal yang cepat dibawah 1 detik. Setelah melewati kondensor, gas yang terkondensasi dapat menghasilkan lebih dari 75% bio-oil (Jahirul et al, 2012: 4957).

Tabel 2.1

Parameter Operasi dan Produk dari Ketiga Macam Proses Pirolisis

Proses Pirolisis	Waktu Tinggal (s)	Temperatur (°C)	Produk
Lambat	300-1800	400	Char, Tar, Gas
Cepat	<3	425-600	Char, Tar, Gas
Kilat	<1	450-1000	Tar, Gas

2.3 Heat Exchanger

Energi panas dapat ditransfer dari satu sistem ke sistem yang lain, sebagai hasil dari perbedaan temperatur. Adapun transfer energi panas selalu terjadi dari medium suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah, dan perpindahan panas berhenti ketika kedua medium mencapai suhu yang sama.

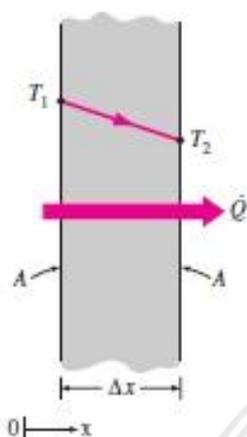
Proses perpindahan panas dapat berpindah dengan tiga cara, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Semua cara dari perpindahan panas memerlukan adanya perbedaan suhu, dan semua cara berasal dari medium suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah.

2.3.1 Macam-Macam Perpindahan Panas

2.3.1.1 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan energi dari partikel yang lebih energik dari suatu zat dengan yang kurang energik yang berdekatan akibat dari interaksi antara partikel (cengel, 2003:17). Konduksi dapat terjadi pada zat benda padat, cair dan gas. Pada gas dan cair,

konduksi ini disebabkan oleh tabrakan dan pembauran dari gerakan molekul selama gerakan acak mereka. Pada benda padat, gerakan ini disebabkan akibat kombinasi getaran dari molekul di dalam kisi dan berpindahnya energi yang disebabkan oleh elektron bebas. Laju konduksi panas melalui media tergantung pada geometri dari medium, ketebalan, dan bahan dari medium, serta beda suhu di medium tersebut. Ilustrasi konduksi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Perpindahan panas konduksi melalui dinding

Sumber: Cengel (2003:18)

Tabel 2.2

Konduktivitas Termal Beberapa Bahan pada Temperatur Ruang

Bahan	K, W/m.°C
Diamond	2300
Silver	429
Copper	401
Gold	317
Aluminum	237
Iron	80,2
Mercury (l)	8,54
Glass	0,78
Brick	0,72
Water (l)	0,613
Human skin	0,37
Wood (oak)	0,17
Helium (g)	0,152
Soft rubber	0,13
Glass fiber	0,043
Air (g)	0,026
Urethane, rigid foam	0,026

Sumber: Cengel (2003)

Konduktivitas termal (k) merupakan kemampuan menghantarkan panas melalui ketebalan suatu material per area per perbedaan temperatur (cengel, 2003:19). Dapat dikatakan konduktivitas termal adalah besarnya kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Semakin besarnya nilai konduktivitas sebuah material mengindikasikan

material tersebut sebagai konduktor yang bagus, dan semakin rendah nilai k mengindikasikan buruknya material tersebut sebagai konduktor yang buruk atau isolator. Macam-macam konduktivitas termal menurut bahan dan temperatur ruang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Perbedaan temperatur pada dinding adalah $\Delta T = T_2 - T_1$. Percobaan dapat menghasilkan laju dari perpindahan panas Q melalui dinding dua kali lipat ketika perbedaan suhu diseluruh dinding atau area A normal terhadap arah perpindahan panas dua kali lipat, tapi dibelah dua ketika ketebalan dinding L dua kali lipat. Dengan demikian kita menyimpulkan bahwa laju konduksi panas melalui lapisan dinding sebanding dengan perbedaan suhu diseluruh lapisan dan area perpindahan panas, namun berbanding terbalik dengan ketebalan lapisan, sehingga dapat dirumuskan dengan:

$$Q_{\text{konduksi}} = k.A \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -k.A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots \dots \dots (2-1)$$

Sumber: Cengel (2003)

Dimana:

Q = Laju perpindahan panas dengan cara konduksi (watt)

K = Koefisien perpindahan panas konduksi ($W/m \cdot ^\circ C$)

A = Luas penampang (m^2)

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ = Gradient temperatur ($^\circ C$)

2.3.1.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas yang disebabkan pergerakan molekul. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara cair ataupun gas. Terdapat 2 jenis konveksi, yaitu konveksi natural dan konveksi paksa. Perpindahan panas secara konveksi dapat dikatakan konveksi paksa apabila terdapat gaya eksternal yang membantu perpindahan panas, seperti kipas maupun pompa. Perpindahan panas secara konveksi dirumuskan dengan:

$$q_{\text{konveksi}} = h \cdot A \cdot \Delta T \dots \dots \dots (2-2)$$

Sumber: Cengel (2003)

Dimana:

q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas permukaan (m^2)

ΔT = Perbedaan temperatur ($^\circ C$)

Parameter yang mempengaruhi perpindahan panas secara konveksi diantaranya koefisien perpindahan panas pada fluida (h), kecepatan fluida (v) dan panas jenis fluida (C_p).

2.3.1.3 Radiasi

Radiasi berbeda dengan dua perpindahan panas sebelumnya. Pada perpindahan panas secara radiasi tidak diperlukan medium untuk memindahkan panas melainkan dengan gelombang elektromagnetik (Cengel, 2003). Menurut buku termodinamika yang ditulis Saad (1999) radiasi termal merupakan energi yang dipancarkan oleh materi akibat perubahan konfigurasi electron atom atau molekul pembangun materi tersebut. Berbeda dengan konveksi dan radiasi, perpindahan panas secara radiasi dapat terjadi antara dua permukaan yang dipisahkan oleh satu medium yang lebih dingin. Contohnya adalah saat panas matahari sampai ke permukaan bumi melewati dinginnya lapisan atmosfer.

$$q_{\text{radiasi}} = e\sigma AT^4 \dots\dots\dots (2-3)$$

Sumber: Cengel (2003)

Dimana:

q_{radiasi} = Perpindahan kalor (W)

e = Emisivitas benda (hitam = 1)

σ = Konstanta Stefan-Boltzmann ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

A = Luas permukaan (m^2)

T = Suhu permukaan benda (K)

2.3.2 Kondensor

Kondensasi adalah proses fisika yang mengubah dari fase gas atau uap menjadi fase cair (Calvert, 1990:2182). Hal ini dapat terjadi jika temperatur diturunkan dan/atau tekanan uap dinaikkan. Kondensasi dapat diaplikasikan pada *heat exchanger* tipe *double pipe*. Perpindahan panas secara konveksi dan konduksi terjadi pada *heat exchanger* tipe *double pipe* ini. Perpindahan panas secara konduksi terjadi dari fluida bersuhu tinggi ke fluida suhu lebih rendah melewati perantara dinding kondensor. Perpindahan panas secara konveksi terjadi pada aliran fluida kerja kondensor.

Kondensor yang berperan sebagai salah satu komponen utama sistem pirolisis akan sangat menentukan hasil minyak yang didapat. Sebagaimana diketahui bahwa efektivitas kerja kondensor dipengaruhi beberapa faktor antara lain: desain kondensor, nilai konduktivitas bahan, kerapatan lapisan isolasi pada kondensor, suhu lingkungan

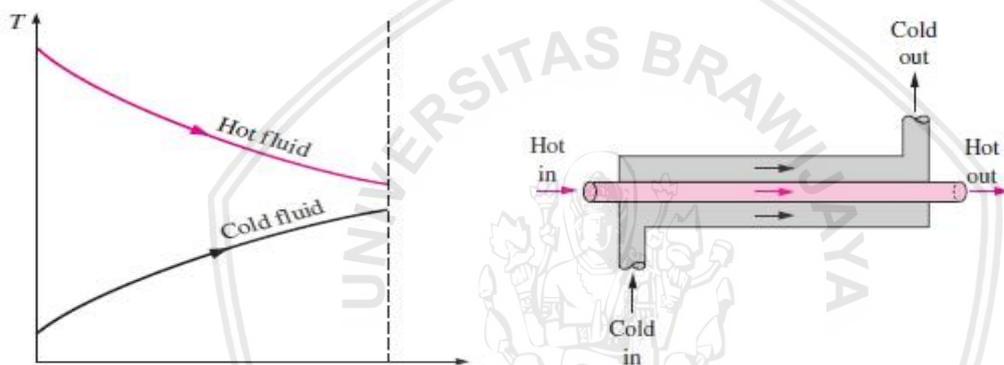
pengoperasian, faktor pengotoran (*fouling factor*), jenis fluida pendingin, dan lain-lain (Cengel, 2003).

2.3.3 Klasifikasi Kondensor Berdasarkan Arah Aliran Fluida Kerja

Klasifikasi kondensor berdasarkan arah aliran fluida kerja dipisahkan menjadi tiga jenis, yaitu: aliran searah (*parallel flow*) dan aliran berlawanan (*counter flow*).

2.3.3.1 Aliran Searah (*Parallel Flow*)

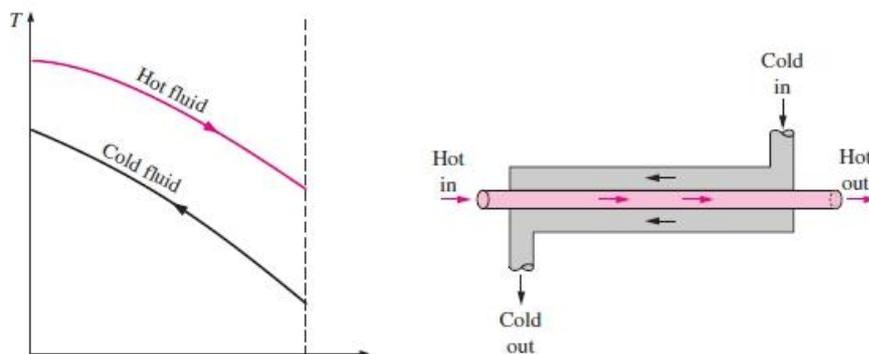
Heat Exchanger bertipe aliran searah atau *parallel flow* seperti pada Gambar 2.6, memiliki arah aliran fluida panas dan aliran fluida dingin yang sama (cengel, 2003:668). Pada tipe ini, nilai efektifitas perpindahan panas rendah (Kays dan Crawford, 1993:424).



Gambar 2.6 *Parallel flow*
Sumber: Cengel (2003)

2.3.3.2 Aliran Berlawanan (*Counter Flow*)

Pada aliran berlawanan pada Gambar 2.7, aliran fluida panas dan dingin masuk dari *input* yang berbeda, sehingga arah aliran pada fluida panas dan dingin berlawanan arah (cengel, 2003:682). Aliran jenis ini adalah aliran yang paling efisien, karena menghasilkan perbedaan temperatur tertinggi pada perpindahan panas dikondensor (shah, 1981:57).



Gambar 2.7 Aliran berlawanan
Sumber: Cengel (2003)

2.3.4 Analisis Perpindahan Panas

Pada saat proses transfer panas, beda suhu antara fluida panas dan fluida dingin pada waktu masuk dan pada waktu keluar tidaklah sama, maka kita perlu menentukan nilai rata-rata beda suhu untuk bias menentukan besar kalor yang dipindahkan fluida saat penukar kalor.

Pada aliran *parallel*, dua fluida masuk bersama-sama dalam alat penukar kalor bergerak dalam arah yang sama dan keluar bersama-sama pula. Sedangkan pada aliran *counter*, dua fluida bergerak dengan arah yang berlawanan dan pada aliran yang menyilang.

Laju perpindahan panas dapat dihitung dari besar energi yang dilepas oleh fluida panas atau besar energi yang diterima oleh fluida dingin. Besarnya perpindahan panas pada alat penukar kalor dapat dirumuskan menjadi:

$$Q = U \cdot A_i \cdot \Delta T_{lm} \dots\dots\dots (2-4)$$

Sumber: Shah dan Sekulic (2003)

$$Q = \frac{\Delta T_{lm}}{R_{Total}} \dots\dots\dots (2-5)$$

Sumber: Cengel (2003)

Dimana:

Q = Perpindahan panas (W)

U = Total koefisien perpindahan panas (W/m².°C)

A_i = Luas permukaan pipa dalam (m²)

R_{Total} = Total *Thermal Resistance* (°C/W)

ΔT_{lm} = Rata-rata temperatur antara fluida panas dan dingin (°C)

Untuk menghitung rata-rata temperatur antara fluida panas dan dingin, kita harus menghitung perbedaan temperatur antara fluida dingin dan panas. Untuk arah *counter* menggunakan rumus:

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out} \dots\dots\dots (2-6)$$

Sumber: Shah dan Sekulic (2003)

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in} \dots\dots\dots (2-7)$$

Sumber: Shah dan Sekulic (2003)

Dan untuk arah *parallel* menggunakan rumus:

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in} \dots\dots\dots (2-8)$$

Sumber: Cengel (2003)

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out} \dots\dots\dots (2-9)$$

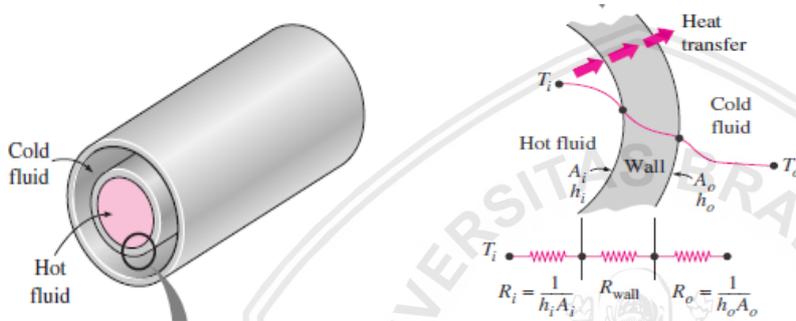
Sumber: Cengel (2003)

Dan rumus untuk menghitung rata-rata temperatur antara fluida panas dan dingin ialah:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \dots\dots\dots(2-10)$$

Sumber: Shah dan Sekulic (2003)

Dalam menentukan nilai total koefisien perpindahan panas (U), nilai *thermal resistance* (R) harus diketahui, karena $1/U \cdot A_i = R_{total}$. Pada pipa *double tube*, fluida panas didalam pipa akan menghantarkan panas secara konveksi ke dinding, lalu melewati dinding secara konduksi, dan dari dinding ke fluida dingin secara konveksi. Perpindahan panas pipa *double tube* dapat diilustrasikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Perpindahan panas pada pipa *double tube*
 Sumber: Cengel (2003)

Menurut penjabaran Gambar 2.8, nilai total *thermal resistance* adalah:

$$R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_i/D_o)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \dots\dots\dots(2-11)$$

Sehingga didapat rumus Total koefisien perpindahan panas (U) ialah:

$$U = \frac{1}{A_i R_{total}} = \frac{1}{A_i} \times \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_i/D_o)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(D_i/D_o)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{h_o A_o}} \dots\dots\dots(2-12)$$

Dimana:

- h_i = Koefisien perpindahan panas konveksi pada pipa dalam
- h_o = Koefisien perpindahan panas konveksi pada pipa luar
- A_i = Luas perpindahan panas yang berkontak pada pipa dalam
- A_o = Luas perpindahan panas yang berkontak pada pipa luar
- D_i = Diameter dalam pipa
- D_o = Diameter luar pipa
- L = Panjang pipa

2.4 Bilangan Reynolds

Dua jenis aliran, *laminar flow* dan *turbulent flow*, tergantung pada geometri permukaan, kekasaran permukaan, kecepatan aliran, temperatur permukaan, dan tipe fluida. Bilangan Reynolds adalah rasio dari gaya inersia dengan viskositas. Gaya inersia disini termasuk gaya karena momentum mengalirnya fluida. Dan viskositas adalah nilai kekentalan suatu fluida. Rumus dapat dilihat pada 2-11.

$$Re = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{viskositas}} = \frac{\rho v L}{\mu} \dots\dots\dots (2-11)$$

Sumber: Cengel (2003)

Dimana:

Re = Reynolds Number

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

v = Kecepatan fluida (m/s)

μ = Viskositas dinamik (kg/s.m)

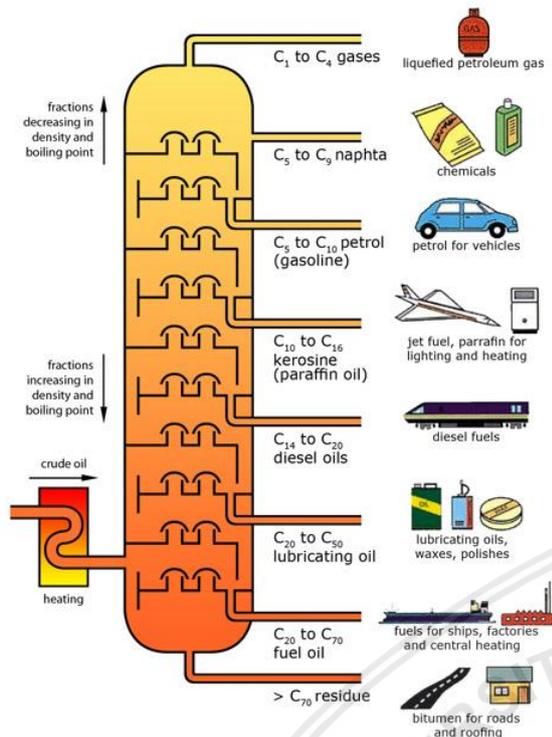
L = Panjang geometri (m)

Dapat dilihat dirumus 2-11 bahwa yang mempengaruhi bilangan Reynolds yaitu densitas fluida, kecepatan fluida, viskositas dinamik, dan panjang geometri. Aliran dapat dikatakan laminar jika nilai Re berada dibawah 2300. Dan dapat dikatakan *turbulent* jika nilai Re berada diatas 4000. Diantara nilai Re 2300-4000 dinamakan aliran transisi.

2.5 Plastik

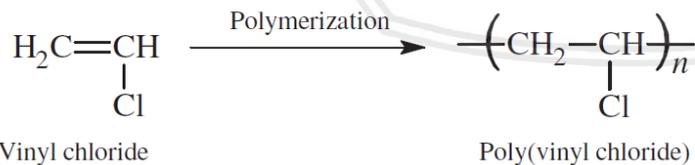
Sejak puluhan tahun yang lalu, plastik menjadi bagian penting dalam hidup manusia. Plastik digunakan sebagai bahan baku kemasan, tekstik, bagian-bagian kendaraan, dan alat-alat elektronik. Dalam dunia kedokteran, plastik bahan digunakan untuk mengganti bagian-bagian tubuh manusia yang sudah tidak berfungsi lagi. Penggunaan plastik sangat masif diterapkan dalam barang-barang rumah tangga dikarenakan sifatnya yang elastis dan ringan. Disamping sifatnya, bahan plastik dipilih guna menekan biaya produksi pembuatan suatu bahan.

Mayoritas moderen plastik berasal dari bahan alam seperti minyak bumi. Bahan dasar plastik didapat dari proses destilasi minyak mentah. Pada proses destilasi minyak bumi yang diilustrasikan pada Gambar 2.9, fraksi paling berat adalah pelumas dan *heavy gas oil* yang digunakan untuk memanaskan bahan bakar. Sedangkan fraksi paling ringan menghasilkan gas, bensin, *paraffin*, dan *naphtha*. Pada umumnya, pembuatan plastik diambil dari *naphtha*.



Gambar 2.9 Destilasi minyak bumi
Sumber: Bonamy (2016)

Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah karbon dan hidrogen (Surono, 2013). Polimerisasi adalah sebuah proses dimana molekul sederhana seperti monomer bergabung menjadi molekul yang lebih besar melalui proses kimia. Seperti arti dari polimer/*polymer* yang diambil dari bahasa Yunani, yaitu '*poly*' (banyak) dan '*meros*' (bagian). Polimer adalah bentuk besar dari molekul yang disusun dari banyak molekul kecil (*monomers*) dengan proses polimerisasi dapat dilihat pada Gambar 2.10. Contoh monomer dan *polymer* dapat dilihat pada Tabel 2.2.



Gambar 2.10 Polimerisasi
Sumber: Chanda (2013)

Tabel 2.3
Polimerisasi Berbagai Jenis Monomer

Monomer	Polimer
Ethylene $\text{CH}_2=\text{CH}_2$	Polyethylene (PE) $\left(\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right)_n$
Propylene $\text{CH}_2=\text{CH}$ CH_3	Polypropylene (PP) $\left(\text{CH}_2-\text{CH} \right)_n$ CH_3

Monomer	Polimer
Styrene $\text{CH}_2=\text{CH}$ 	Polystyrene (PS) $\text{-(CH}_2\text{-CH)-}_n$ 
Acrylonitrile $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CN}$	Polyacrylonitrile $\text{-(CH}_2\text{-CH)-}_n$ 
Vinyl chloride $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$	Poli (vinyl chloride) (PVC) $\text{-(CH}_2\text{-CH)-}_n$ 

Sumber: Chanda (2013)

Polimer dapat dibedakan menjadi dua macam menurut perilaku pemrosesan termal yaitu *thermoplastik* dan *thermoset*. *Thermoplastik* adalah polimer yang dapat dilunakkan dan dikeraskan dengan cara mengubah temperatur (Chanda, 2013). *Thermoplastik polymers* mengandung rantai yang tidak permanen antar ikatan kimianya, sehingga dengan temperatur yang tinggi antar ikatan dapat terpecah. Sedangkan jenis *thermoset* ketika sudah dibentuk menjadi bentuk akhirnya, polimer jenis ini tidak dapat dileburkan dan dibentuk lagi. Hal tersebut dikarenakan *thermoset* memiliki rantai antar molekul yang kuat sehingga kekuatan dan elastisitas tidak terpengaruh oleh temperatur (Chanda, 2013).

Melihat sifat kelompok polimer diatas, jenis *thermoplastik* memungkinkan untuk didaur ulang. Dalam dunia industri, dibuat kode pada plastik untuk menandakan atau mengidentifikasi jenis polimer. Pada Tabel 2.3 dapat dilihat kode polimer dan setiap polimer memiliki bahan dasar dan kegunaan yang berbeda.

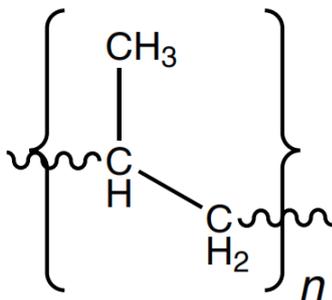
Tabel 2.4
Kode Daur Ulang Plastik

Kode	Nama	Keterangan
	<i>Polyethylene terephthalate</i> (PET / PETE)	Biasa dipakai untuk botol plastik yang ransparan seperti botol air mineral dan botol minuman lainnya. Botol atau produk dari bahan plastik ini hanya bisa digunakan sekali pakai saja, karena apabila dipakai berulang partikel berbahaya yang ada dibahan ini akan lepas dan mengakibatkan penyakit kunker dalam jangka panjang.
	<i>High Density Polyethylene</i> (HDPE)	Mempunyai sifat bahan yang kuat, keras, dan mempunyai ketahanan terhadap suhu tinggi. Bahan ini biasanya dipakai untuk botol susu yang berwarna putih, tupperware, galon air mineral dan sebagainya.
	<i>Polyvinyl Chloride</i> (PVC / V)	Plastik yang sulit untuk didaur ulang. Plastik ini bisa ditemukan pada plastik pembungkus.

Kode	Nama	Keterangan
	<i>Low Density Polyethylene</i> (LDPE)	Biasanya dipakai untuk tempat pembungkus makanan, plastik kemasan, dan botol-botol. Barang-barang dengan kode jenis ini dapat di daur ulang dan baik untuk barang-barang yang fleksibilitasnya besar akan tetapi kuat. Bahan ini bisa dibilang tidak dapat dihancurkan tetapi tetap baik untuk tempat makanan, karena sulit bereaksi secara kimia dengan makanan yang dikemas.
	<i>Polypropylene</i> (PP)	Mempunyai karakteristik transparan, berwarna putih tetapi tidak jernih, dan mengkilap. <i>Polypropylene</i> lebih kuat dan ringan dengan daya tembus uap yang rendah, tahan terhadap lemak, stabil terhadap suhu yang tinggi.
	<i>Polystyrene</i> (PS)	Biasanya dipakai sebagai bahan tempat makan styrofoam, tempat minum satu kali pakai, dll. Bahan Polystyrene bisa bocor dan bahan styrene masuk ke dalam makanan ketika makanan tersebut terkena. Bahan Styrene berbahaya untuk otak, mengganggu hormon pada wanita yang berakibat pada reproduksi, dan syaraf.
	<i>Other</i>	Untuk jenis plastik 7 <i>Other</i> ini ada 4 jenis, yaitu SAN (<i>styrene acrylonitrile</i>), ABS (<i>acrylonitrile butadiene styrene</i>), PC (<i>polycarbonate</i>), dan nylon.

2.5.1 Polypropylene (PP)

Polypropylene yang diilustrasikan pada Gambar 2.11 adalah polimer jenuh yang memiliki struktur *monomer* berupa *propylene*. Plastik jenis ini masuk dalam jenis plastik termoplastik polimer dan digunakan dalam berbagai aplikasi, diantaranya pengemasan, tekstil, alat tulis, wadah, dan lain-lain (budiprasojo, 2016). Karakteristik plastik *polypropylene* memiliki temperatur peleburan dan temperatur dekomposisi berturut-turut 176°C dan 328°C. Karakteristik plastik *polypropylene* dapat dilihat pada Tabel 2.4.



Gambar 2.11 Struktur polimer *polypropylene*
Sumber: Peacock (2016)

Menurut handbook of polymers karangan Geoge Wypych, *polypropylene* memiliki karakteristik berupa:

Tabel 2.5
Propertis dari *Polypropylene*

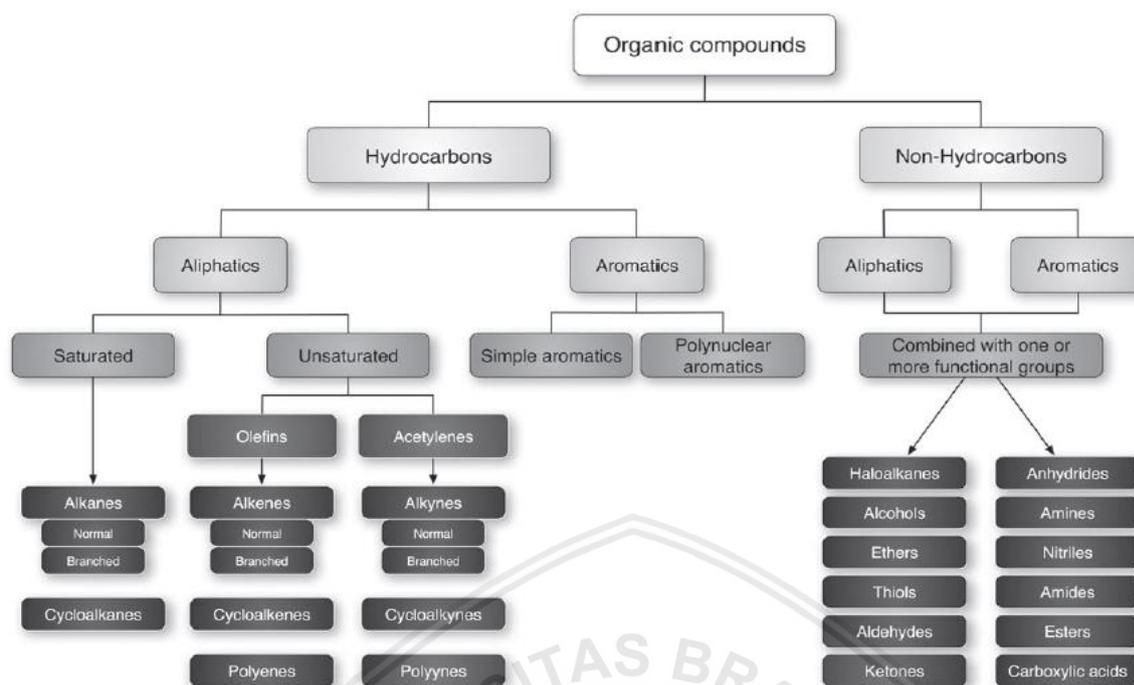
Propertis	Units	<i>Polypropylene</i>
<i>Density</i>	Kg/m ³	900-910
<i>Melting point</i>	°C	176
<i>Tensile strength</i>	MPa	38
<i>Shrinkage</i>	%	
<i>Elongation</i>	%	400
<i>Young's modulus</i>	MPa	17000
<i>Glass-transition temperature</i>	°C	-10
<i>Service temperature</i>	°C	
<i>Specific heat (20°C-80°C)</i>	kJ/KgK	1.9
<i>Thermal conductivity</i>	kW/mK	0.42-0.61
<i>Decomposition on set temperature</i>	°C	328

Sumber: Harding et al (2007:58) dan Wyprych (2016:498)

2.6 Bahan Bakar

Suatu materi dimana saat dipanaskan pada suhu tertentu disertai oksidasi dengan oksigen akan terjadi proses pembakaran disebut bahan bakar (astuti, 2014). Mayoritas bahan bakar, yang digunakan sekarang ini dihasilkan dari destilasi minyak mentah, adalah LPG, bensin, *kerosene*, dan solar. Minyak mentah sendiri berasal dari fosil hewan dan tumbuhan yang mengendap dalam batuan bumi selama jutaan tahun.

Bahan bakar yang berasal dari minyak mentah dapat digunakan untuk pembakaran dikarenakan adanya molekul hidrokarbon. Hidrokarbon adalah molekul yang mengandung unsur hidrogen dan karbon, dimana hidrokarbon tersebut memiliki panjang dan struktur yang bermacam-macam mulai dari rantai lurus, bercabang, sampai melingkar (Freudenrich, 2001).



Gambar 2.12 Klasifikasi hidrokarbon

Sumber: Stauffer et al (2008)

Hidrokarbon dapat dibedakan menjadi dua, yaitu alifatik dan aromatik seperti Gambar 2.12. Senyawa alifatik termasuk semua asiklik atau siklik, *saturated* atau *unsaturated*. Sedangkan senyawa aromatik termasuk *unsaturated* dan struktur lingkaran (termasuk benzena) (Stauffer et al, 2008). IUPAC menjelaskan senyawa aromatik dicirikan seperti benzena.

2.6.1 Alkana

Secara natural, alkana terdapat di minyak mentah dan komponen mayoritas disegala bahan bakar (Stauffer et al, 2008). Alkana yang diilustrasikan pada Gambar 2.13 adalah asiklik alifatik hidrokarbon yang mempunyai rumus kimia C_nH_{2n+2} dan memiliki karakteristik rangkap karbon tunggal.

Sifat fisika dari alkana selaras dengan struktur kimianya. Pada temperatur ruangan dan tekanan atmosfer, C_1 - C_4 alkana berfase gas, C_5 - C_{17} alkana berfase liquid, dan lebih dari C_{18} berfase padat. Struktur pada alkane yang memiliki rantai lurus dan bercabang juga mempengaruhi sifat fisiknya. Seperti titik didih dari n-pentana, isopentana, dan neopentana berturut-turut 36°C , 28°C , dan 10°C .

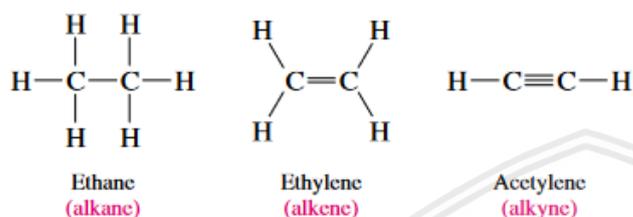
2.6.2 Alkena

Alkena yang diilustrasikan pada Gambar 2.13 adalah hidrokarbon asiklik (bercang atau tidak bercabang) yang mempunyai satu rangkap pada karbon dan mempunyai rumus

kimia C_nH_{2n} . Dikarenakan alkena mengandung lebih sedikit dari kemungkinan maksimal hidrogen yang menempel pada atom karbon, alkena digolongkan pada *unsaturated*.

2.6.3 Alkuna

Alkuna yang diilustrasikan pada Gambar 2.13 adalah hidrokarbon asiklik (bercabang atau tidak bercabang) yang mempunyai ikatan rangkap tiga dan mempunyai rumus kimia C_nH_{2n-2} .



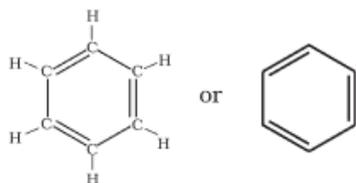
Gambar 2.13 Contoh alkana, alkena, dan alkuna
Sumber: Carey (2000)

2.6.4 Alisiklik Hidrokarbon

Gabungan hidrokarbon alisiklik mengacu pada senyawa alifatik (jenuh dan tidak jenuh) dimana bagian dari atom karbon berada pada formasi melingkar (siklus), tapi bukan senyawa benzoid atau senyawa aromatik. Sikloalkana adalah mempunyai sifat jenuh karena memiliki rangkap satu pada senyawanya. Alisiklik hidrokarbon yang tidak jenuh adalah sikloalkena dan sikloalkuna.

2.6.5 Hidrokarbon Aromatik

Hidrokarbon aromatik adalah hidrokarbon dengan struktur melingkar dengan ikatan rangkap dua dan satu secara bergantian. Susunan mendasar dari hidrokarbon aromatik tersusun dari 6 karbon yang membentuk lingkaran (C_6H_6), dan dapat berupa monosiklik atau polisiklik.



Gambar 2.14 Struktur hidrokarbon aromatik
Sumber: Chang (2010)

Senyawa aromatik yang paling sederhana adalah benzena yang memiliki rumus kimia C_6H_6 , senyawa benzena bersifat karsinogen dan mudah terbakar, namun merupakan bahan

kimia industri yang penting. Benzena sangat stabil dikarenakan energi resonansi senyawa aromatik sehingga rangkapnya terus berpindah.

2.6.6 Sifat Bahan Bakar Minyak

Sifat adalah ciri, identitas atau kekhasan yang dimiliki suatu objek. Sifat materi adalah karakteristik yang dimiliki materi tertentu. Sifat materi digolongkan menjadi sifat intrinsik dan ekstrinsik.

Sifat intrinsik adalah sifat yang dimiliki dari objek atau benda itu sendiri dimana sifat tersebut tidak bergantung pada bentuk dan ukuran materi tersebut (Langton & Lewis, 1998). sebagai contoh sifat intrinsik antara lain massa jenis, warna, bau, kekentalan, titik didih, dan lain-lain. Sifat ekstrinsik adalah sifat yang tidak berhubungan dengan kualitas dari objek atau benda tersebut (Langton & Lewis, 1982). Sifat ekstrinsik bergantung dengan jumlah dan bentuk benda tersebut. Contohnya yaitu massa, Panjang, dan volume. Untuk memudahkan membedakannya dapat digunakan dengan metode yang sederhana. Misalnya terdapat sebuah zat sebanyak 1 liter, lalu zat tersebut dipisahkan menjadi dua bagian 0,5 liter dalam dua wadah terpisah. Jika sifat dari zat tersebut tetap saat volume 1 liter dan 0,5 liter, maka sifat tersebut dikatakan sifat intrinsik, contohnya massa jenis. Saat 1 liter dan 0,5 liter, massa jenis dari zat tersebut tidak akan berubah, melainkan tetap. Hal tersebut dikarenakan massa jenis tidak bergantung pada ukuran materi. Beda halnya dengan massa. Ketika 1 liter dan 0,5 liter zat tersebut ditimbang, akan menghasilkan massa yang berbeda. Hal tersebut dikarenakan sifat ekstrinsik bergantung dengan bentuk dari zat tersebut.

Selain sifat intrinsik dan ekstrinsik, suatu materi juga memiliki sifat fisika dan sifat kimia. Sifat fisika adalah sifat suatu zat yang dapat diidentifikasi atau diamati tanpa mengubah zat penyusun materi tersebut. Contohnya adalah wujud zat, warna, massa jenis, kekentalan, dll. Sifat kimia adalah sifat zat yang berhubungan dengan proses terbentuknya zat jenis baru atau komposisi penyusun yang baru sehingga dapat mengubah rumus kimia zat tersebut. Contohnya adalah zat penyusun, rantai karbon, dll.

Pada Tabel 2.6 ditampilkan sifat fisik dan sifat kimia dari *gasoline*, *kerosene*, dan diesel.

Tabel 2.6
Sifat Fisik dan Kimia *Fuel Oil*

<i>Properties</i>	<i>Fuel Oil</i>		
	Gasoline	Kerosene	Diesel
Range of carbon numbers	C ₄ – C ₁₃	C ₁₀ – C ₁₆	C ₁₀ – C ₁₉
-Alkanes	54.3 (wt. %)	78 – 96 (vol. %)	64 – 85 (vol.%)
-Alkenes	1.8	0 – 5	1 – 10
-Aromatics	30.5	4 – 25	5 – 30
Physical state	Liquid	Liquid	Liquid
Color	Colorless to pale brown	Colorless to brown	Colorless to brown
Melting point	(-90.5) – (-95.4)°C	-45.6°C	(-48) – (18)°C
Boiling point	39 – 204°C	175 – 325°C	101 – 588°C
Density (20°C)	0.7 – 0.8 g/ml	0.8 g/ml	0.87 – 1.0 g/ml
Flash point	-46°C	38°C	38 – 58°C
Calorific Value	44 MJ/kg	43.4 MJ/kg	43 MJ/kg
	10516,3 cal/g	10372,85 cal/g	10277,2 cal/g
Viscosity (40°C)	0.64 – 0.88 cSt	1.39 – 1.5 cSt	3.12 – 3.353 cSt

Sumber: The National Academy of Science (2005); Gao (2010); Jones (2010); Global (2016)

2.7 Hipotesis

Menilik berdasarkan teori dan penelitian yang berkaitan, maka ditarik hipotesis yakni pada pirolisis plastik polipropilena setiap perbedaan debit aliran dan arah aliran, akan mempengaruhi sifat fisik dari hasil pirolisis plastik polypropylene dan menghasilkan hasil minyak yang memiliki karakteristik sifat fisik yang tidak sama satu dengan yang lain.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian pirolisis plastik polipropilen ini menggunakan penelitian *true experimental* atau penelitian sesungguhnya karena dalam penelitian ini peneliti mengontrol semua variable luar yang mempengaruhi jalannya eksperimen, sehingga validitas internal dapat terjaga. Pada penelitian sesungguhnya ini juga berfungsi mengetahui lebih lanjut hubungan sebab-akibat serta membandingkan dengan hipotesis yang sudah dialami. Hasil dari pirolisis nantinya akan diuji beberapa sifat fisiknya serta dibandingkan dengan sifat fisik bahan bakar minyak yang ada dipasaran.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu : Maret 2019 - selesai

Tempat : Laboratorium Motor Bakar Teknik Mesin Universitas Brawijaya

3.3 Variabel Penelitian

Digunakan 3 variabel untuk penelitian ini:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas penelitian ini yaitu variasi debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, 7 liter/menit dan arah aliran *couter flow* dan *parallel flow*.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan dampak dari variable bebas, pada penelitian ini variable terikatnya adalah volume dan karakteristik sifat fisik minyak hasil pirolisis (densitas, viskositas, nilai kalor).

3. Variabel Terkontrol

Variabel ini dikendalikan agar pengaruh variable bebas terhadap variable terikat, tidak dipengaruhi oleh faktor luar yang tidak diteliti. Variabel terkontrol penelitian ini adalah:

- a. Plastik PP jenis kantong plastik makanan seberat 250 gram dengan bentuk persegi ukuran 3 cm x 3 cm.
- b. Waktu pemanasan pirolisis selama 90 menit (1,5 jam)

- c. Temperatur pemanasan pirolisis 400°C
- d. Temperatur kondensasi 25°C

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat yang Digunakan

1. Alat Priolisis

Alat pirolisis yang diilustrasikan pada Gambar 3.1 menggunakan volum ruang pembakaran sebesar 9000cc. Bahan yang digunakan adalah *Stainless Steel* 201 tebal 5 mm dengan diameter saluran keluaran 1.5 inci. Pemanasan pirolisis akan menggunakan kompor gas yang terhubung dengan termokontrol dan *termocouple*, sehingga pemanasan plastik dapat dijaga pada suhu yang diinginkan.

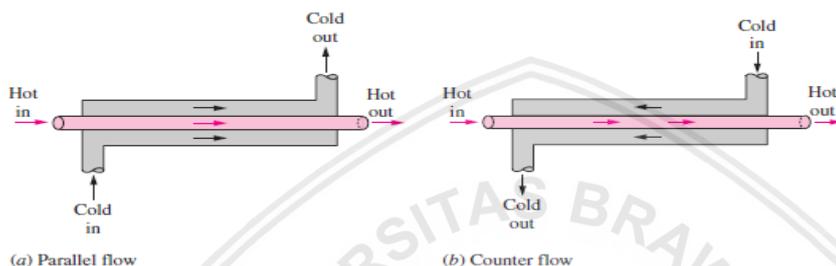


Gambar 3.1 Alat pirolisis

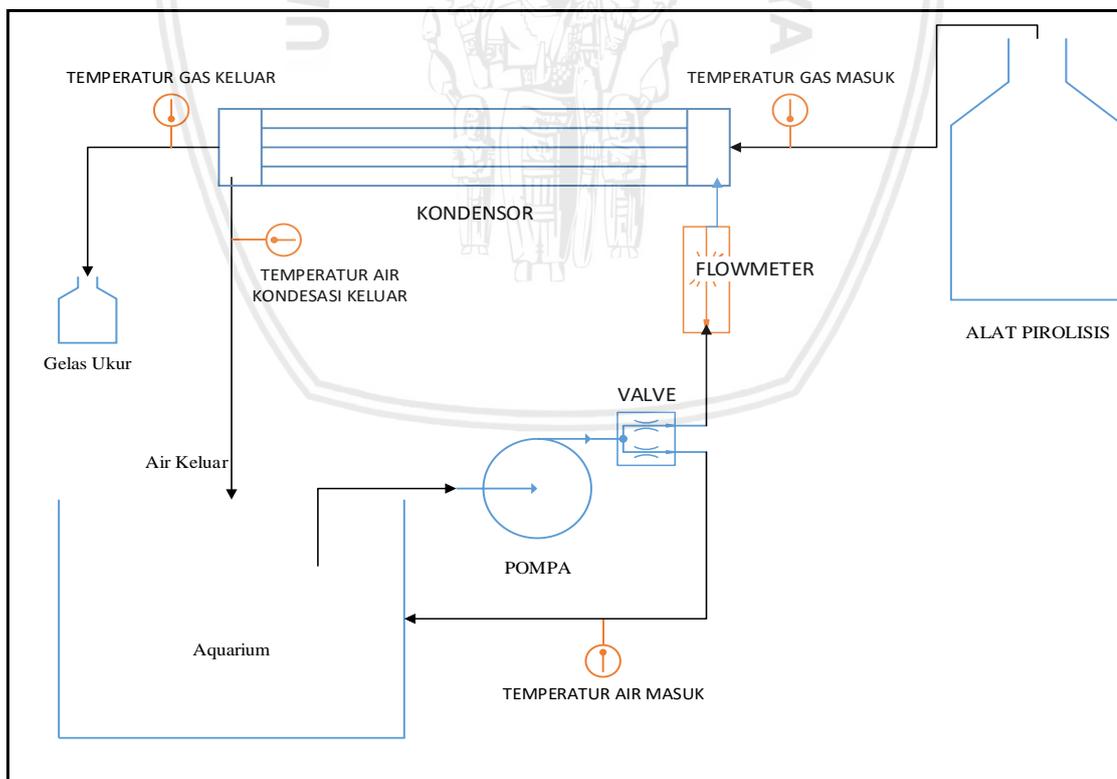
2. Instalasi Kondensor

Pada penelitian ini menggunakan kondensor dengan spesifikasi pipa dalam berbahan tembaga dengan diameter 5/8 dan pipa bagian luar berbahan PVC dengan diameter 1 inci. Pipa bagian dalam dengan bahan tembaga sendiri memiliki konduktivitas termal sebesar 401 W/m.°C (cengel, 2004:20) sehingga kalor dari fluida panas yang berada dalam pipa tembaga dapat berpindah ke fluida dingin yg berada diluarnya. Pada pipa bagian luar memakai pipa PVC agar tidak adanya perpindahan panas dari lingkungan ke fluida dingin.

Dalam penelitian menggunakan instalasi kondensasi dengan dua jenis yang diilustrasikan pada Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan Gambar 3.4, yaitu: *parallel flow* dan *counter flow*.



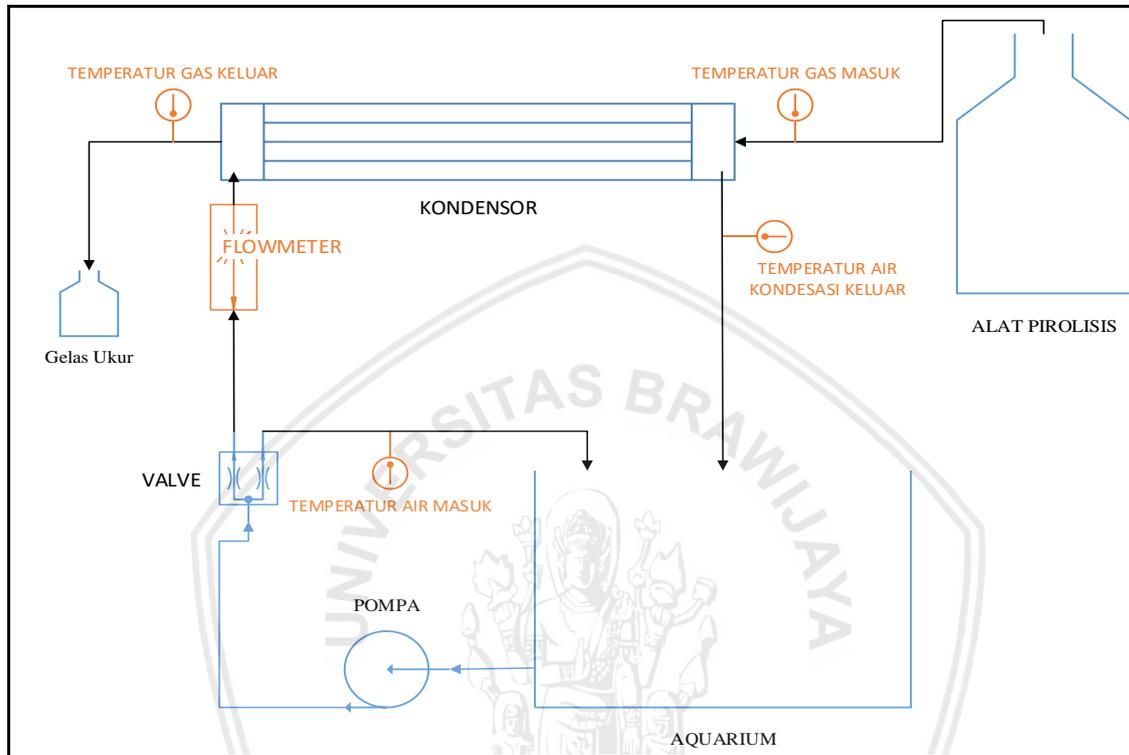
Gambar 3.2 Kondensator *double tube* jenis: (a) *parallel flow*, (b) *counter flow*
Sumber: Cengel (2004)



Gambar 3.3 Instalasi kondensator *parallel flow*

Pada Gambar 3.3, instalasi kondensator dengan arah aliran *parallel*, gas hasil pirolisis masuk kondensator dengan melewati sensor temperatur gas masuk, lalu keluar pada ujung kondensator dan melewati sensor temperatur gas keluar, dan akhirnya

minyak masuk pada gelas ukur. Pada kondensor, fluida dingin mengalir searah dengan arah aliran gas masuk. Air diambil dari bak penampungan (aquarium) dan dialirkan menggunakan pompa. Setelah pompa terdapat *valve* (katup) yang digunakan untuk mengatur debit aliran pompa yang tinggi ke *flowmeter*. Fluida dingin keluar dari kondensor langsung menuju bak penampungan (aquarium) untuk digunakan kembali.



Gambar 3.4 Instalasi kondensor *counter flow*

Pada Gambar 3.4, instalasi kondensor tipe aliran *counter* hanya memiliki perbedaan pada arah aliran fluida dinginnya saja dengan tipe aliran *parallel*. Pertama-tama, gas hasil pirolisis keluar dari *pyrolyzer* langsung masuk ke kondensor dengan melewati sensor gas temperatur gas masuk. Hasil dari kondensasi tersebut keluar pada ujung kondensor dengan melewati sensor temperatur gas keluar dan hasil dari kondensasi masuk ke gelas ukur. Lalu pada kondensor, aliran fluida dingin dipompa dari bak penampungan (aquarium) menggunakan pompa melewati *valve* (katup) dan *flowmeter* untuk mengatur debit aliran, lalu fluida dingin masuk dari ujung kondensor (gas keluar). Fluida dingin kondensor keluar dari tempat gas hasil pirolisis masuk lalu melewati sensor temperatur air kondensasi keluar dan dialirkan ke bak penampungan (aquarium).

3. Timbangan Digital

Timbangan digital pada Gambar 3.5 memiliki ketelitian 0,01 ini digunakan untuk menimbang massa plastik *polypropylene*.

Spesifikasi dari alat yaitu:

Merk : ACIS BC 500

Kapasitas Maksimal : 500 gram

Ketelitian : 0,01 gram

4. Tabung Erlenmeyer

Tabung Erlenmeyer digunakan untuk menampung minyak hasil pirolisis dan minyak yang terjebak di reaktor pirolisis

5. Stopwatch

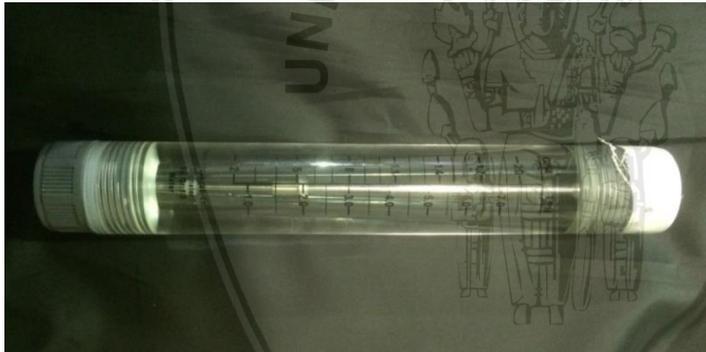
Digunakan untuk mengukur lama waktu nitrogen masuk

6. Kompor

Kompor digunakan untuk memanaskan *pyrolyzer* dengan sumber bahan bakar dari tabung gas LPG 3 kg.

7. *Flowmeter*

Flowmeter pada Gambar 3.6 digunakan untuk mengatur dan mengetahui debit aliran air pendingin yang masuk ke kondensor.



Gambar 3.5 *Flowmeter*

8. Tabung Gas Nitrogen

Digunakan untuk menampung gas nitrogen, yang nantinya akan dimasukkan ke reaktor pirolisis.

9. Viscometer

Viscometer pada Gambar 3.7 digunakan untuk menghitung viscositas fluida, dalam hal ini minyak hasil pirolisis.

Spesifikasi:

Beda potensial : 200 Volt

Daya : 500 Watt



Gambar 3.6 Viscometer

10. Bomb Calorimeter

Bomb Calorimeter pada Gambar 3.8 berfungsi untuk mengetahui nilai kalor suatu bahan bakar dalam hal ini minyak hasil pirolisis.

Spesifikasi:

Merk : Parr

Tipe : NSI-13 No. P0253008

Arus : 8 amper

Frekuensi : 50 Hz

Rpm : 1425

Satuan : kcal/kg

Peralatan :

- *Oxygen bomb calorimeter*
- *Calorimeter controller*
- *Oval bucket*
- *Auto charger*
- *Water heater*
- *Water cooler*
- *Retrofit kit*
- *Thermometer*
- *Fuse wire*
- *Tray/sample cup*



Gambar 3.7 Bomb kalorimeter

11. *Cutter* dan gunting

Cutter dan gunting digunakan untuk memotong plastik PP hingga ukuran yang ditentukan

12. *Data Logger*

Data Logger pada Gambar 3.9 digunakan untuk menampilkan temperatur pada sensor *thermocouple* yang ada pada instalasi.



Gambar 3.8 Data logger

13. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur pada titik yang sudah ditentukan. Pada penelitian ini menggunakan tipe k.

14. Aerometer

Aerometer pada Gambar 3.10 digunakan untuk mengukur *densitas* suatu fluida, dalam hal ini densitas minyak hasil pirolisis.



Gambar 3.9 Aerometer

3.4.2 Bahan yang Digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini menggunakan plastik polipropilen (PP) berupa plastik bungkus makanan berwarna jernih ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.10 Plastik polypropylene

3.5 Prosedur Penelitian

Berikut merupakan prosedut penelitian mulai dari persiapan hingga pengambilan data:

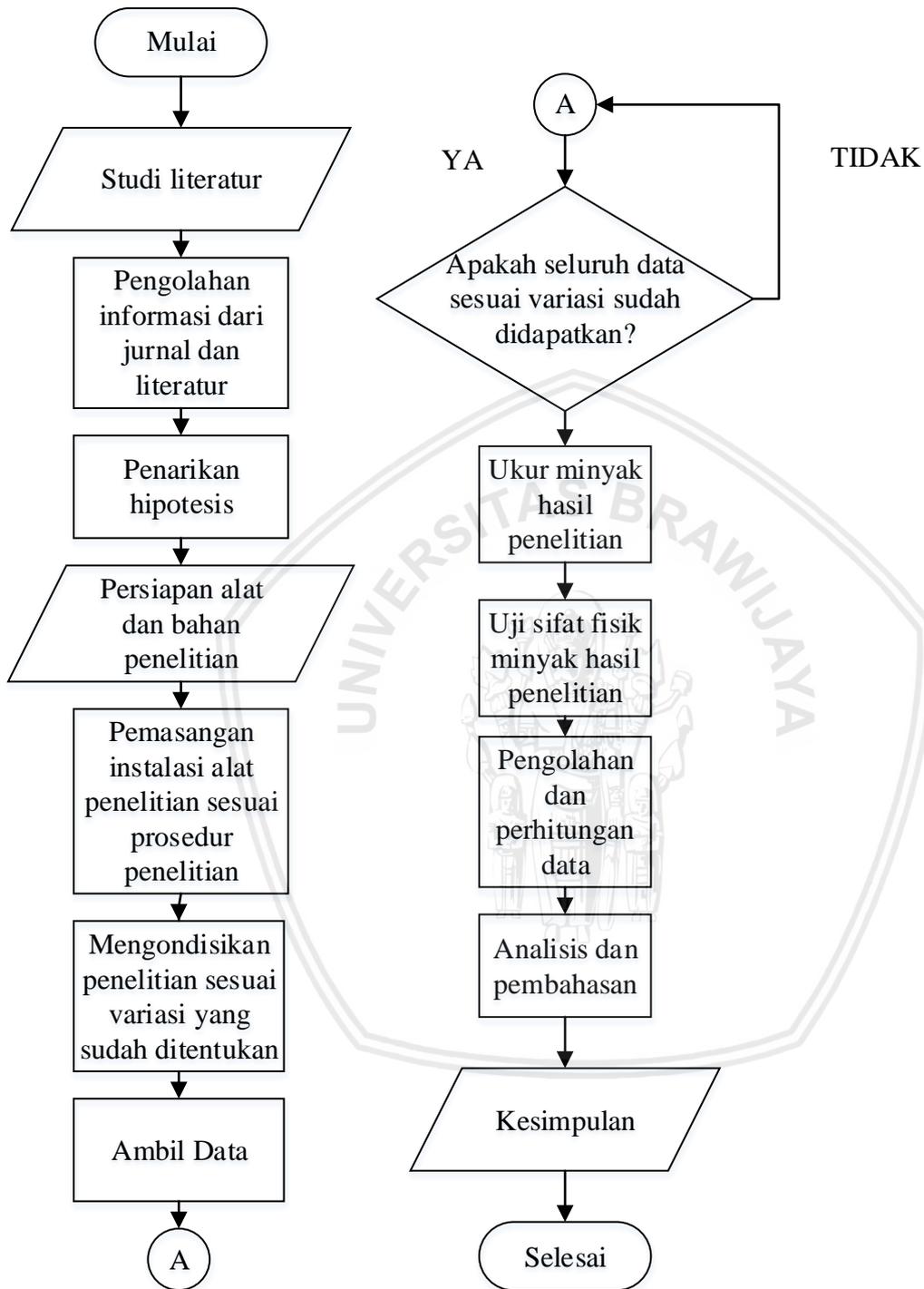
1. Pemotongan plastik

Bahan plastik yang ada dipotong-potong menjadi ukuran 3 cm x 3 cm dengan menggunakan gunting dan *cutter*.

2. Penimbangan plastik
Plastik yang sudah dipotong kecil ditimbang menggunakan timbangan elektrik hingga menunjukkan angka 250 gram.
3. Pemasukan plastik ke *pyrolyzer*
Plastik seberat 250 gram dimasukkan kedalam *pyrolyzer* secara hati-hati agar plastik tidak berceceran, lalu kunci penutup *pyrolyzer* secara kuat dan rapat.
4. Pemasukan gas nitrogen
Nitrogen diinjeksikan kedalam *pyrolyzer* melewati katup yang sudah disediakan sebanyak 18 liter, atau dengan debit 3 liter/menit selama 6 menit.
5. Persiapan instalasi kondensor dan pembaca
Instalasi kondensor mengikuti skema instalasi alat. Lalu atur debit aliran kondensasi sesuai dengan debit yang sudah ditentukan. Persiapkan juga alat pembaca data dengan cara menghubungkan *thermocouple* ke data *logger*.
6. Prosedur proses pirolisis
 - a. Membuka tutup tabung *pyrolyzer*
 - b. Memasukkan palstik PP kedalam *pyrolyzer*
 - c. Tutup dan kencangkan baut pengunci
 - d. Memasukkan gas nitrogen kedalam tabung melewati katup yang sudah disediakan, 3 liter/menit selama 6 menit
 - e. Menyiapkan sistem kondensasi sesuai skema dan atur debit aliran pendinginan sesuai variasi data
 - f. Hubungkan *thermocouple* ke data *logger* guna pembacaan data
 - g. *Setting* temperatur *thermocontroller* 400°C
 - h. Hidupkan pemanas pirolisis dan *thermocountroller*
 - i. Catat data yang tampil pada data *logger* setiap 5 menit
 - j. Apabila sudah selesai, matikan alat dan ambil hasil pirolisis
 - k. Ukur volum minyak hasil pirolisis setelah terkondensasi dan sebelum terkondensasi
 - l. Apabila sudah didapatkan data, ulangi proses dari awal untuk variasi yang lain
7. Pengujian karakteristik sifat-fisik
Pengujian karakteristik sifat fisik dari hasil pirolisis menggunakan *bomb calorimeter*, *viscometer* dan *aerometer* yang berada di Laboratorium Motor Bakar.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian yang akan dilakukan, terdapat pada Gambar 3.13.

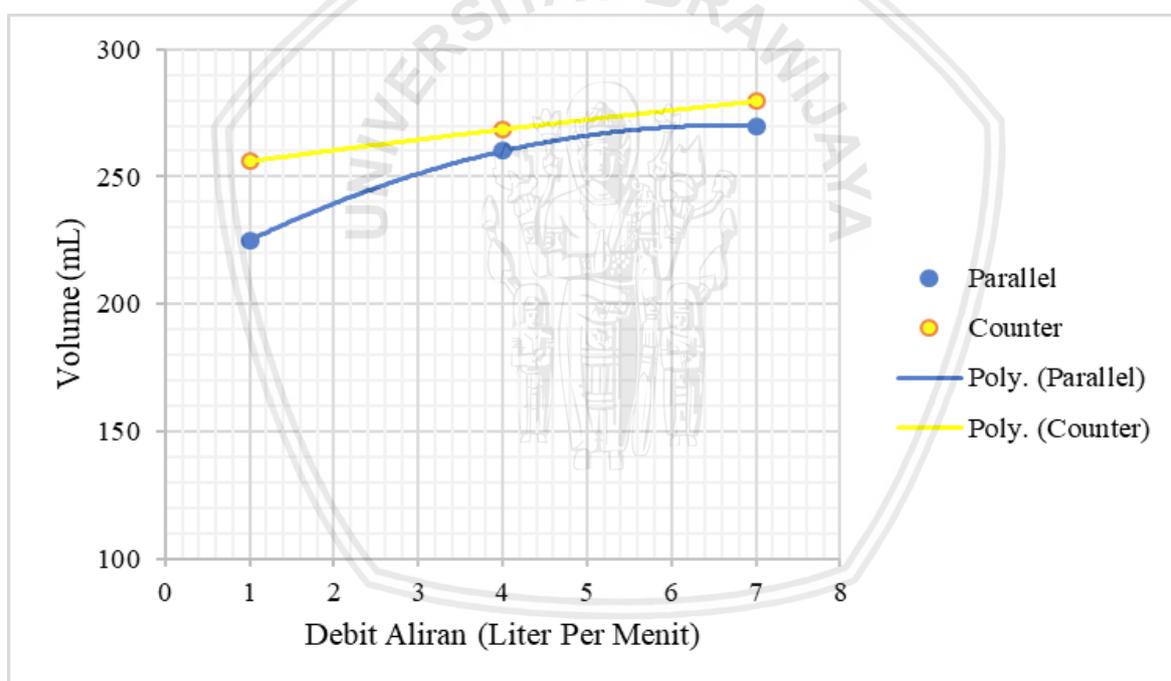


Gambar 3.11 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian plastik *polypropylene* (PP) sebanyak 250-gram selama 90 menit menggunakan pirolisis *fix bed* dengan variasi arah aliran *parallel* dan *counter* serta debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit. Data disajikan dalam bentuk grafik yang sebelumnya telah diolah dan dianalisis.

4.1 Pengaruh Arah Aliran Dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis



Gambar 4.1 Hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap volume minyak hasil pirolisis

Gambar 4.1 menunjukkan grafik hubungan arah aliran dan debit aliran terhadap hasil pirolisis. Grafik berwarna biru menunjukkan hasil pirolisis setelah melewati kondensor pada arah aliran *parallel*, sedangkan grafik berwarna kuning menunjukkan hasil pirolisis setelah melewati kondensor pada arah aliran *counter*.

Pada pengujian didapat semakin meningkatnya debit aliran pada setiap arah aliran air kondensor *parallel* dan *counter* yang berfungsi sebagai *heat exchanger* pada gas yang keluar dari *pyrolyzer*, menghasilkan minyak hasil pirolisis semakin banyak. Gas hasil proses pirolisis memiliki 2 karakteristik, *condensable* dan *uncondensable*. *Condensable* gas

merupakan gas yang bisa terkondensasi sehingga fasenya dapat berubah dari gas menjadi cair. Pada Gambar 4.1 membuktikan bahwa semakin besar debit aliran air pendinginan pada kondensor tipe *double tube*, semakin banyak juga *condensable* gas hasil pirolisis yang berubah fase menjadi cair sehingga minyak yang dihasilkan semakin banyak. Meningkatnya volume minyak hasil setelah kondensasi dikarenakan perpindahan panas yang terjadi seiring meningkatnya debit aliran juga semakin tinggi. Hal tersebut seperti penelitian dari Putra et al pada tahun 2012 yang menyatakan semakin besar nilai Reynolds maka perpindahan panas yang terjadi semakin banyak juga. Kecepatan fluida berbanding lurus dengan nilai Reynolds, sehingga semakin besar kecepatan fluida, maka perpindahan panas juga semakin besar. Nilai terendah terdapat pada arah aliran *parallel* dengan debit aliran 1 liter/menit dengan volume sebanyak 225 mL, dan tertinggi pada arah aliran *counter* dan debit aliran 7 liter/menit dengan volume sebanyak 279,5 mL.



Gambar 4.2 Minyak hasil

Pada arah aliran, didapat arah aliran *counter* mengalami lebih banyak perpindahan panas dibandingkan arah aliran *parallel*. Hubungan antara perpindahan panas dengan volume hasil pirolisis ialah semakin banyak perpindahan panas yang terjadi maka banyak gas yang bersifat *condensable* dapat berubah fase menjadi cair (minyak). Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.1 yang menunjukkan disetiap debit aliran, *counter flow* menghasilkan minyak yang lebih banyak daripada *parallel flow*. Pada *parallel flow*, aliran gas dan air kondensor searah sehingga perpindahan panas terjadi dititik yang sama. Pada awal masuk gas dan air kondensor masuk, terjadi proses perpindahan panas yang maksimal karena perbedaan temperatur yang tinggi. Tapi seiring mengalirnya kedua fluida tersebut, perbedaan

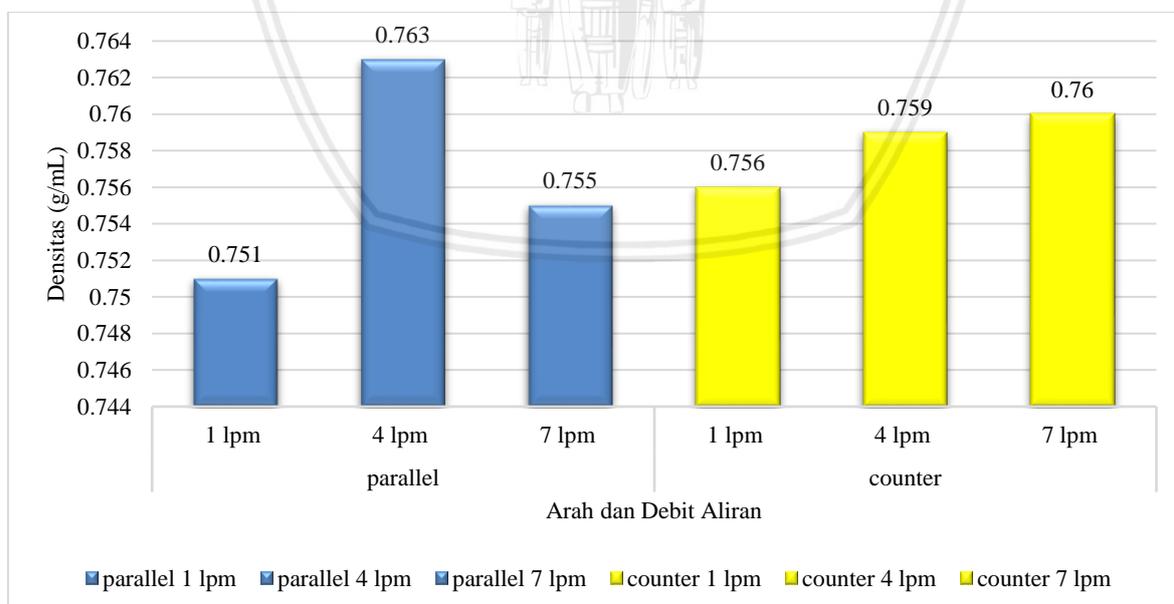
temperatur antara kedua fluida mengecil sehingga perpindahan panas yang terjadi tidak maksimal. Berbeda dengan *counter flow*, aliran gas hasil pirolisis dan air kondensor berlawanan arah. Sehingga setiap titik pada aliran gas hasil pirolisis akan berkontak dengan air kondensor masuk. Hal tersebut menyebabkan perbedaan temperatur kedua fluida tetap tinggi (tidak seperti *parallel*) dan menghasilkan perpindahan panas berlangsung secara maksimal. Minyak hasil dapat dilihat pada Gambar 4.2.

4.2 Pengaruh Arah dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Sifat Fisik Hasil Minyak Pirolisis

Berikut merupakan hubungan arah dan debit aliran terhadap sifat fisik minyak hasil pirolisis *polypropylene* yang mencakup nilai densitas, viskositas dan nilai kalor. Selain itu, minyak hasil pirolisis dibandingkan dengan sifat fisik bahan bakar minyak komersial.

4.2.1 Pengaruh Arah Dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Densitas Minyak Hasil Pirolisis

Densitas atau massa jenis merupakan kerapatan suatu zat pada volume tertentu. Kerapatan suatu zat bergantung terhadap massa atom penyusun senyawa zat tersebut. Semakin besar massa atom penyusun dengan nilai volume yang sama, maka nilai massa jenis akan semakin meningkat juga.



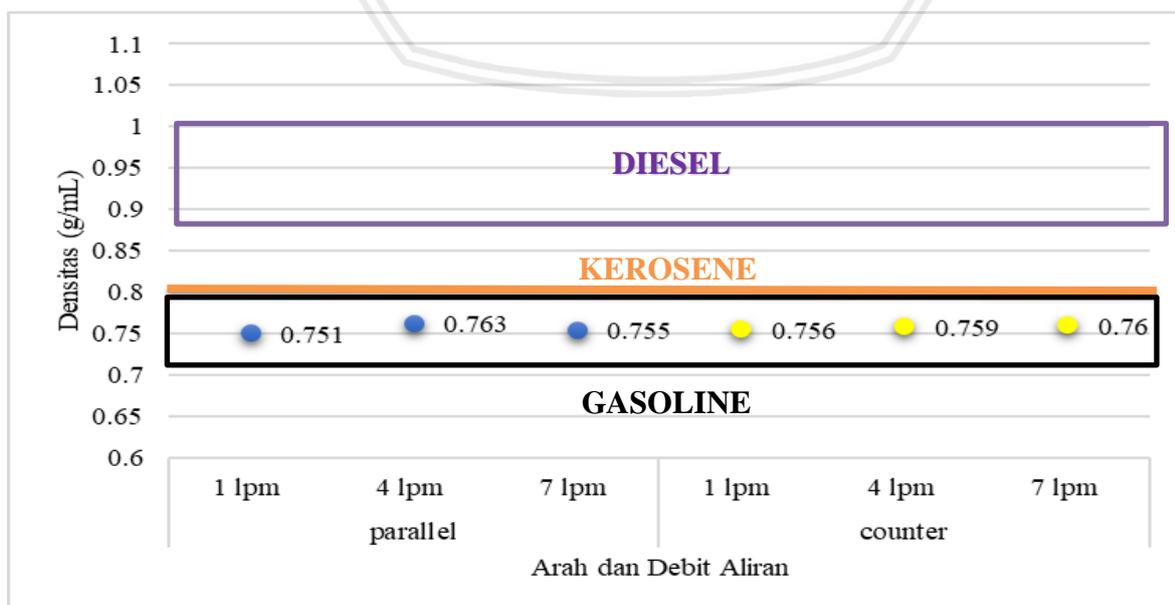
Gambar 4.3 Hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai densitas minyak hasil pirolisis

Pada Gambar 4.3 terdapat grafik hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai densitas minyak hasil pirolisis. Pada arah aliran *parallel* terjadi kenaikan lalu penurunan

seiring kenaikan debit aliran. Tetapi pada arah aliran *counter* mengalami kenaikan seiring bertambahnya debit aliran. *Range* nilai densitas pada pengujian dengan temperatur pengujian 20°C dengan arah aliran parallel berkisar antara 0,751-0,763 g/ml, sedangkan pada pengujian arah aliran *counter* berkisar antara 0,756-0,76 g/ml.

Pada arah aliran *parallel* nilai tertinggi diperoleh dengan debit 4 liter/menit dengan nilai densitas yaitu 0.763 g/ml dan nilai terendah pada debit aliran 1 liter/menit dengan nilai densitas yaitu 0.751 g/ml. Pada arah aliran *counter* nilai tertinggi diperoleh dengan debit 7 liter/menit dengan nilai densitas 0,76 g/ml dan nilai terendah pada debit aliran 1 liter/menit dengan nilai densitas 0,756 g/ml.

Faktor yang mempengaruhi nilai densitas atau massa jenis yaitu massa relatif molekul (M_r) dan jarak antar molekul, dimana M_r merupakan jumlah massa relatif pada setiap unsur penyusun senyawa tersebut (Chang, 2010). Pada pirolisis, proses pembentukan senyawa pada gas hasil pirolisis berada pada *pyrolyzer* atau tungku pembakarannya bukan dikondensor. Hal tersebut dibuktikan dengan temperatur gas masuk sebelum kondensor maksimal mencapai 120°C, sedangkan temperatur dekomposisi plastik *polypropylene* berada pada temperatur 328°C. Ketika sebuah zat sudah melewati temperatur dekomposisinya, zat tersebut akan mengalami proses dekomposisi. Lalu ketika temperaturnya berada dibawah temperatur dekomposisi, maka molekul yang terdekomposisi akan membentuk molekul baru. Dengan begitu parameter dalam proses pembentukan senyawa pada hasil pirolisis yaitu temperatur pemanasan, waktu pemanasan, dan waktu tunggu gas hasil pirolisis berada di *pyrolyzer* (Gao, F. 2010). Maka nilai densitas atau massa jenis hasil pirolisis tidak dipengaruhi oleh arah aliran dan debit aliran kondensor.



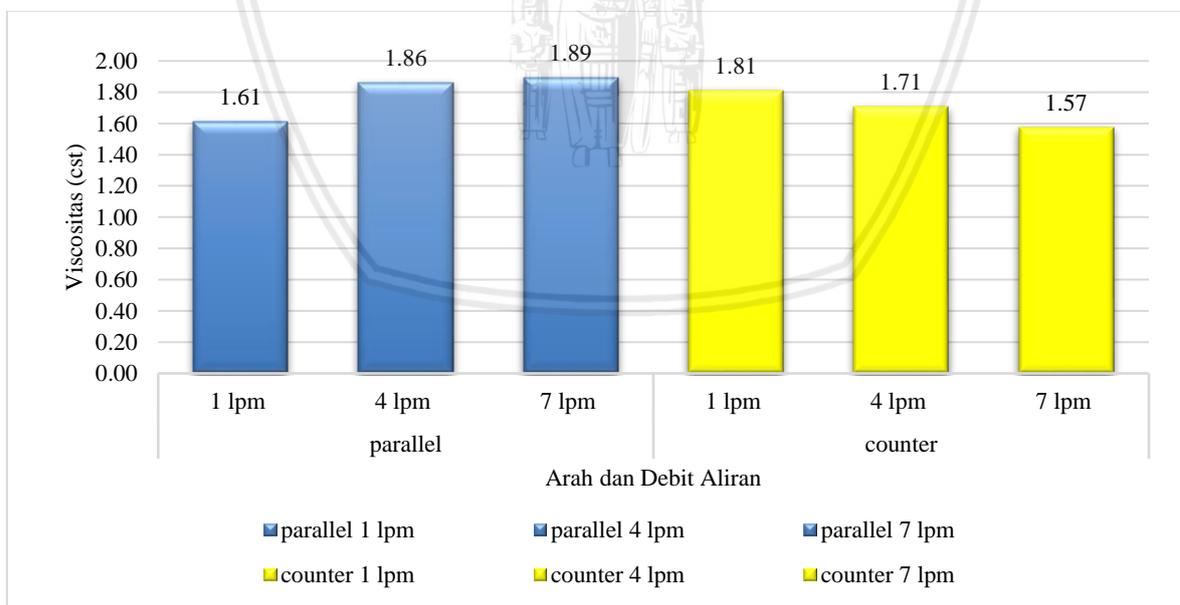
Gambar 4.4 Perbandingan densitas pengujian dengan densitas bahan bakar minyak komersil

Gambar 4.4 menjelaskan perbandingan densitas pada pengujian variasi arah aliran dan debit aliran kondensasi dengan densitas bahan bakar komersil. Merujuk ke Tabel 2.4 nilai densitas bahan bakar minyak komersial *gasoline* (bensin) dengan nilai 0.7-0.8 g/ml, *kerosene* (minyak tanah) dengan nilai 0.8 g/ml, dan *diesel* (solar) dengan nilai 0.87-1 g/ml. Dari data pengujian didapat bahwa *range* dengan variasi arah aliran *parallel* dan *counter* serta debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit, didapat berkisar dari 0.751-0.763 g/ml.

Melihat dari Gambar 4.4 bahwa semua nilai hasil pengujian pirolisis plastik *polypropylene* dengan temperatur 400°C lalu didinginkan dengan kondensor tipe *double tube*, didapat nilai densitas pengujian masuk dalam *range* (kotak warna hitam) nilai densitas dari *gasoline* (bensin).

4.2.2 Hubungan Arah Dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Nilai Viskositas Minyak Hasil Pirolisis

Menurut buku Chemistry yang ditulis Chang (2010), viskositas adalah nilai dari ketahanan fluida tersebut untuk mengalir. Sehingga semakin besar nilai viskositas, semakin lambat fluida untuk mengalir. Faktor utama yang mempengaruhi kekentalan zat adalah gaya antar-molekul dan bentuk molekul penyusunnya.



Gambar 4.5 Hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai viskositas minyak hasil pirolisis

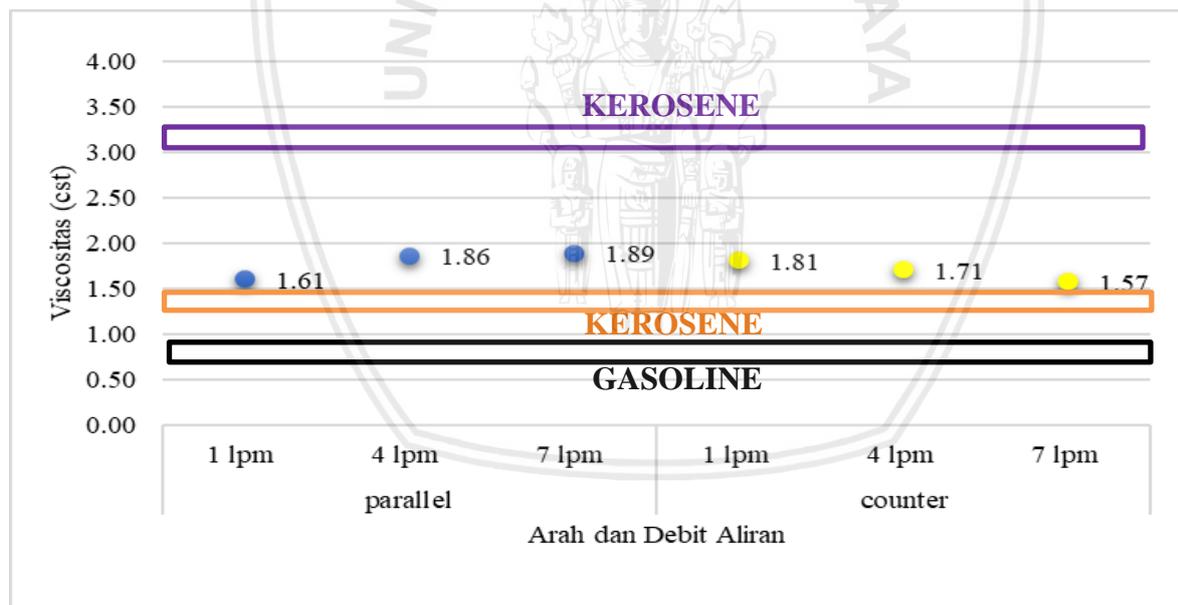
Gambar 4.5 menampilkan grafik pengaruh arah aliran dan debit aliran terhadap nilai viskositas minyak hasil pirolisis. Pengujian nilai viskositas diuji dengan visko meter pada

temperatur 40°C dengan satuan centistoke (cst). Range data yang didapat berkisar dari yang paling rendah yaitu 1.57 cst dan yang tertinggi yaitu 1.89 cst.

Pada arah aliran *parallel* didapat semakin besar debit aliran pendinginan pada kondensor, nilai viskositas mengalami kenaikan juga. Pada aliran *parallel*, nilai terendah pada debit 1 liter/menit dengan nilai viskositas sebesar 1.61 cst dan nilai tertinggi pada debit 7 liter/menit dengan nilai viskositas sebesar 1.89 cst.

Sedangkan pada aliran *counter* didapat semakin besar debit aliran pendinginan pada kondensor, nilai viskositas mengalami penurunan (berbanding terbalik). Nilai tertinggi didapat pada debit aliran 1 liter/menit dengan viskositas sebesar 1.81 cst, dan nilai terendah didapat pada debit aliran 7 liter/menit dengan viskositas sebesar 1.57 cst.

Faktor yang mempengaruhi nilai viskositas adalah gaya antarmolekul penyusun minyak hasil pirolisis. Saat gaya antarmolekul kuat nilai viskositas akan semakin tinggi, begitu pula sebaliknya. Terciptanya gaya antarmolekul terjadi saat proses pembentukan molekul senyawa yang terjadi di-*pyrolyzer* (sebelum kondensor). Sehingga arah dan debit aliran pendinginan kondensor tidak mempengaruhi nilai viskositas hasil pirolisis.



Gambar 4.6 Perbandingan nilai viskositas pengujian dengan viskositas bahan bakar minyak komersil

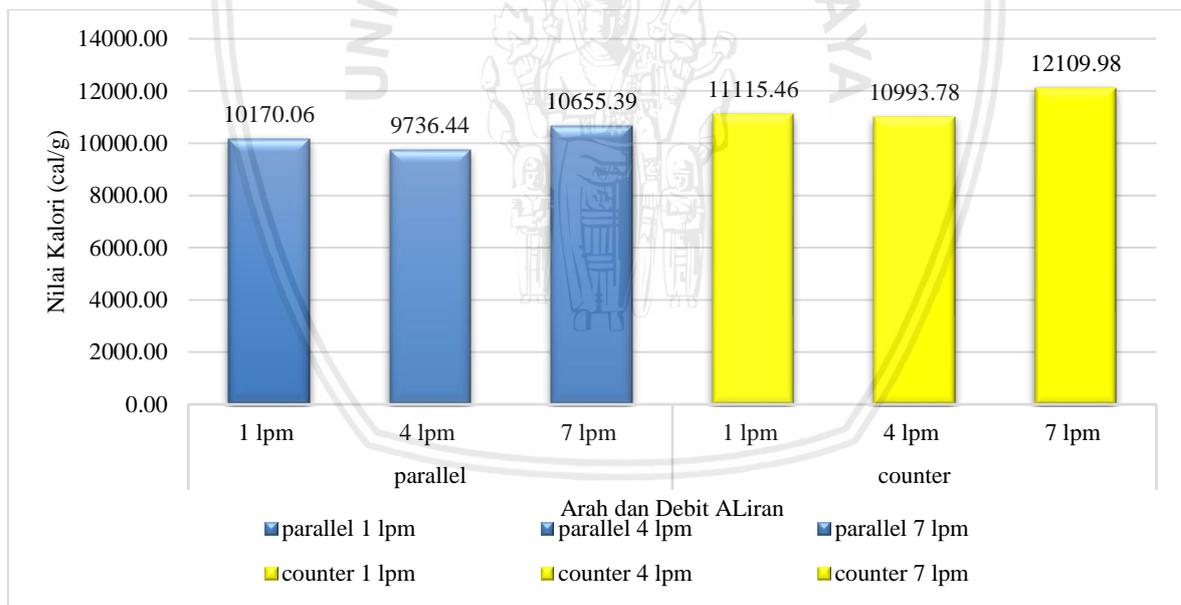
Gambar 4.6 menjelaskan perbandingan nilai viskositas pada pengujian variasi arah aliran dan debit aliran kondensasi dengan nilai viskositas bahan bakar komersil. Merujuk ke tabel 2.4 nilai viskositas bahan bakar minyak komersial *gasoline* (bensin) dengan nilai 0.64-0.88 cst, *kerosene* (minyak tanah) dengan nilai 1.39-1.5 cst, dan *diesel* (solar) dengan nilai 3.12-3.353 cst. Dari data pengujian didapat bahwa *range* dengan variasi arah aliran *parallel*

dan *counter* serta debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit, didapat berkisar dari 1.57-1.89 cst.

Menilik Gambar 4.6 bahwa pengaruh arah dan debit aliran kondensor tipe *double tube* pada pirolisis *polypropylene* tidak dalam *range* minyak komersial tetapi nilai viskositas cenderung sama dengan nilai viskositas *kerosene* (minyak tanah).

4.2.3 Hubungan Arah Dan Debit Aliran Kondensor Terhadap Nilai Kalor Minyak Hasil Pirolisis

Nilai kalor merupakan banyaknya energi panas yang dihasilkan dari pembakaran suatu zat per satuan massa (Chang, 2010). ΔH_c adalah perubahan entalpi total pada suatu sistem, dimana terjadi reaksi antara molekul dengan O_2 secara sempurna dan menghasilkan atau melepas energi ke lingkungan (Chan, 2010). Sehingga pelepasan energi akibat reaksi yang terjadi pada proses pembakaran (ΔH_c) dapat dikatakan sebagai nilai kalor. Pada pengambilan data, digunakan *bomb calorimeter* dengan prinsip mengukur perbedaan temperatur pada air untuk menghitung banyaknya kalor yang dihasilkan dari spesimen.

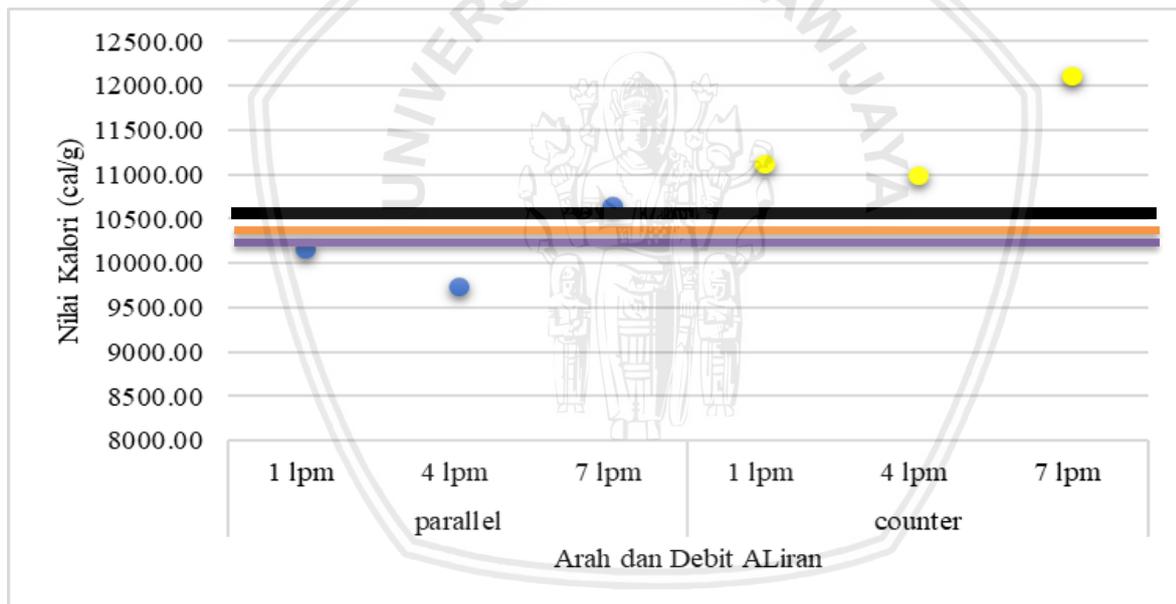


Gambar 4.7 Hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai kalor minyak hasil pirolisis

Pada Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh arah dan debit aliran pendinginan kondensor tipe *double tube* pada hasil pirolisis plastik *polypropylene* dengan temperatur pemanasan $400^{\circ}C$ terhadap nilai kalor. *Range* nilai kalor didapat mulai dari 9736,55 cal/g hingga 12109,98 cal/g. Didapat bahwa pada 2 variasi arah aliran (*parallel* dan *counter*), nilai kalor mengalami penurunan pada debit 4 liter/menit dan mengalami kenaikan pada debit 7 liter/menit.

Pada arah aliran *parallel* nilai terendah didapat pada debit 4 liter/menit dengan nilai kalor sebesar 9736,44 cal/g dan nilai tertinggi didapat pada debit 7 liter/menit dengan nilai kalor sebesar 10655,39 cal/g. Pada arah aliran *counter* nilai terendah didapat pada debit 4 liter/menit dengan nilai kalor 10993,78 cal/g dan nilai tertinggi didapat pada debit 7 liter/menit dengan nilai kalor 12109,98 cal/g. Didapat bahwa kecenderungan pada kedua arah aliran mengalami penurunan pada debit 4 liter/menit. Pada debit 7 liter/menit merupakan nilai kalor puncak dari kedua arah aliran dikarenakan penangkapan atau perubahan fase gas hasil pirolisis lebih maksimal.

Besarnya nilai kalor yang dihasilkan dari sebuah zat tergantung dari unsur penyusun senyawa, panjang rantai karbon dan jenis ikatan antar karbon. Penyusunan senyawa minyak hasil pirolisis terjadi di-*pyrolyzer*. Sehingga kondensor tidak mempengaruhi struktur kimia dari minyak hasil pirolisis. Dapat kita simpulkan bahwa nilai kalor (sifat ekstrinsik) tidak dipengaruhi oleh arah maupun debit aliran kondensor.



Gambar 4.8 Perbandingan nilai kalor pengujian dengan nilai kalor bahan bakar minyak komersil

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan nilai kalor minyak hasil pirolisis dengan variasi arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai kalor bahan bakar minyak komersil. Dikutip dari Tabel 4.2, bahwa nilai kalor *gasoline* (bensin) sebesar 10.516,3 cal/g, nilai kalor *kerosene* (minyak tanah) sebesar 10.372,85 cal/g, dan nilai kalor *diesel* (solar) sebesar 10.277,2 cal/g.

Nilai kalor dengan arah aliran *parallel* memiliki kecenderungan dibawah nilai kalor *diesel* dan diatas nilai kalor *gasoline*. Pada debit aliran 1 liter/menit dan 4 liter/menit, nilai kalor memiliki kecenderungan dibawah nilai kalor *diesel*. Sedangkan pada debit aliran 7 liter/menit memiliki kecenderungan diatas nilai *gasoline*. Sedangkan nilai kalor dengan arah

aliran counter memiliki kecenderungan diatas nilai gasoline. Baik 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit memiliki nilai kalo diatas nilai kalor gasoline.





Halaman ini sengaja dikosongkan.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis data hasil penelitian maka didapatkan kesimpulan:

1. Karakteristik minyak hasil pirolisis dengan debit aliran pendinginan kondensor tipe *double tube* 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit, yaitu:
 - A. Pada volume, mengalami kenaikan seiring meningkatnya debit aliran pendinginan pada kondensor. Hal tersebut dikarenakan perpindahan panas yang terjadi semakin meningkat juga.
 - B. Pada nilai densitas, viskositas, dan nilai kalor tidak dipengaruhi oleh pendinginan pada kondensor dikarenakan senyawa minyak hasil pirolisis sudah terbentuk saat di *pyrolyzer*.
2. Karakteristik minyak hasil pirolisis dengan arah aliran *parallel* dan *counter* pada pendinginan kondensor, yaitu:
 - A. Pada volume, arah aliran *counter* didapat lebih maksimal dibandingkan arah aliran *parallel* dikarenakan perpindahan panas yang lebih maksimal.
 - B. Pada densitas, viskositas, dan nilai kalor tidak dipengaruhi kondensasi pada kondensor dikarenakan senyawa yang sudah terbentuk saat di *pyrolyzer*.
3. Beberapa sifat fisik *fuel oil* hasil pirolisis apabila dibandingkan dengan bahan bakar komersil memiliki persamaan. Pada densitas minyak hasil pirolisis masuk dalam *range gasoline*, pada viskositas tidak masuk dalam *range*, tetapi mendekati *range kerosene*, dan nilai kalor pada arah alira *parallel* cenderung mendekati *diesel* dan *gasoline*, dan untuk nilai kalor pada arah aliran *counter* diatas nilai kalor *gasoline*.

5.2 Saran

1. Disarankan untuk penelitian selanjutnya untuk menganalisa dari sisi sifat kimia pada dampak variasi pendinginan kondensasi hasil pirolisis.
2. Disarankan untuk mengontrol *heating rate* disetiap pengujian agar hasil pirolisis dapat menyeragamkan gas hasil pirolisis.



Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A. & Anis, S. 2018. Pengaruh Debit Air Pendingin dan Posisi Kondensor Terhadap Hasil Kondensasi Pirolisis Getah Pinus. *Jurnal sainteknol.* XVI (1): 13-20.
- Aprian, R. P. & Munawar, A. 2012 Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Minyak Menggunakan Proses Pirolisis. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan.* IV (1). 44-53.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory.* Burlington: Elsevier Inc.
- Calvert, J. G. 1990. *Glossary of Atmospheric Chemistry Terms.* USA: Atmospheric Chemistry Division National Center for Atmospheric Research.
- Cengel, Y. 2003. *Heat Transfer.* New York: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. 2006. *Thermodynamics An Engineering Approach (fifth edition).* New York: McGraw-Hill.
- Chanda, M. 2013. *Introduction to Polymer Science and Chemistry.* Boca Raton: CRC Press.
- Chang, R. 2010. *Chemistry 10th Edition.* New York: McGraw-Hill.
- Gao, F. 2010. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. *PhD Thesis.* Unpublished. New Zealand: University of Canterbury.
- Global Companies LLC. 2016. Safety Data Sheet. Waltham. <http://www.globalp.com/documents/msds.cfm>. (diakses 7 April 2019).
- Harding, K.G., Dennis J.S., Blottnitz H.v., & Harrison S.T.L. 2007. Environmental Analysis of Plastic Production Processes: Comparing Petroleum-Based Polypropylene and Polyethylene with Biologically-Based Poly-B-Hydroxybutyric Acid Using Life Cycle Analysis. *Journal of Biotechnology.* CXXX (I):57-66.
- Haryadi, S. 2015. Pengaruh Arah Aliran Air Pendingin pada Kondensor Terhadap Hasil Pengembunan Proses Pirolisis Limbah Plastik. *Skripsi.* Tidak Dipublikasi. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Horrocks, A.R. & Price D. 2008. *Advances in Fire Retardant Materials.* Bolton: Woodhead Publishing.
- Jones, J.C.. 2010. *Hydricarbons-Physical Properties And Their Relevance To Utilisation.* Frenderiksberg: Ventus Publishing Aps.
- Kays, W.M. & Crawford, M.E. 1993. *Convective Heat and Mass Transfer (Third Edition).* New York: McGraw-Hill.
- Khan, M.Z.H., Sultana, M., Al-Mamun, M.R., & Hasan, M.R., 2016. Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend. *Journal of Environmental and Public Health.* Volume 2016. 1-6.
- Klein, R. 2011. *Laser Welding of Plastics.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Langton, R. & Lewis, D. 1998. *Philosophy and Phenomenological Research*. USA: International Phenomenological Society.
- Mardika, E.R. 2018. Pengaruh Temperature Terhadap Pembentukan Fuel Oil Hasil Pirolisis Plastik Polypropylene. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazaiza, A.S., Rehan, M., Ismail, I.M.I., & Nizami, A.S. 2017. Effect of Plastik Waste Types on Pyrolyziz Liquid Oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Volume 119: 239-252.
- Peacock, A.J. 2006. *Polymer Chemistry Properties and Applications*. Munich: Hanser Publisher.
- Putra, I.K., Kristiawan, B., & Budiana, E.P. 2012. Studi Eksper-Imental Perpindahan Kalor Konveksifluida Nano TiO₂-Ethylene Glycol pada Circular Tubedi Bawah Kondisi Fluks Kalor Konstan. *Mekanika*. X (2): 117-124.
- Shah, R.K. & Sekulic, D.P. 2003. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Stauffer E., Dolan J.A., & Newman R. 2008. *Fire Debris Analysis*. USA: Academic Press is an imprint of Elsevier.
- The National Academy od Science. 2005. Fuels, Combustion Products and Propellants. Gulf War and Health. Volume 3: 30-31. Washington, DC: The National Academies Press.
- Wypych, G. 2016. *Handbook of Polymers Second Edition*. Toronto: ChemTec Publishing.

Lampiran 1 Minyak Hasil Pirolisis

Minyak hasil pirolisis pada variasi debit 1 liter/menit dengan arah aliran parallel



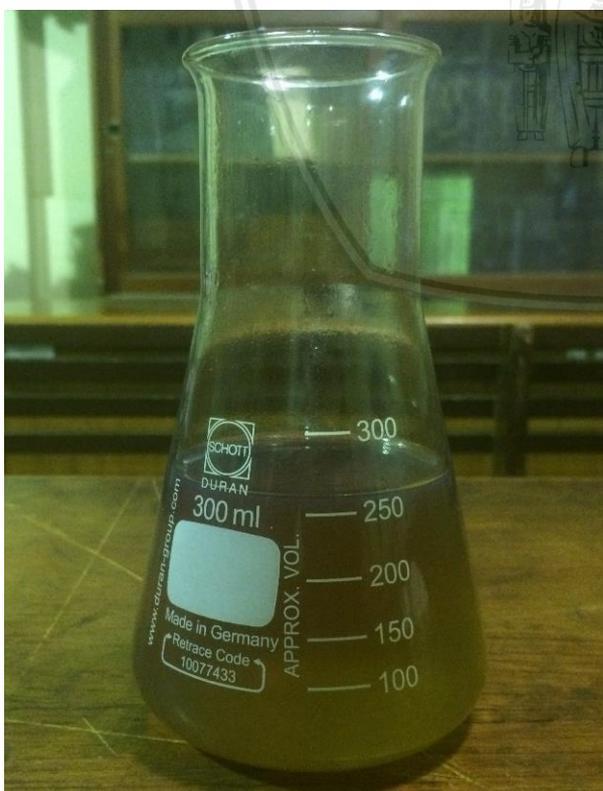
Minyak hasil pirolisis pada variasi debit 1 liter/menit dengan arah aliran counter



Minyak hasil pirolisis pada variasi debit 4 liter/menit dengan arah aliran parallel



Minyak hasil pirolisis pada variasi debit 4 liter/menit dengan arah aliran counter



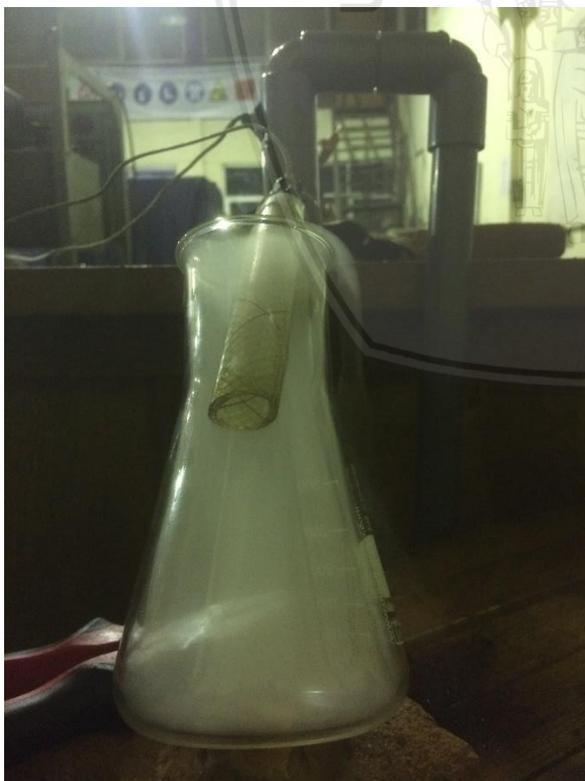
Minyak hasil pirolisis pada variasi debit 7 liter/menit dengan arah aliran parallel



Minyak hasil pirolisis pada variasi debit 7 liter/menit dengan arah aliran counter



Lampiran 2 Instalasi Alat Penelitian



Lampiran 3 Lembar Data Hasil Pengujian Sifat Fisik



KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN
LABORATORIUM MOTOR BAKAR

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang 65145

Web : motorbakar.ub.ac.id Email : LaboratoriummotorbakarCEL@gmail.com



Nomor : 027/Pengujian/CEL/FT/2019

Perihal : Pengujian *Bomb Calorimeter*, Viskositas dan Densitas

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Dr. Eng. Nurkholis, ST., MT.Eng

NIP : 19740121 199903 1 001

Jabatan : Kepala Laboratorium Motor Bakar

Menerangkan dengan sesungguhnya bahwa mahasiswa :

Nama : Rama Reynei

NIM : 155060200111053

Jurusan : Mesin

Fakultas : Teknik

Universitas : Brawijaya

Benar melakukan pengujian *Bomb Calorimeter*, Viskositas dan Densitas di Laboratorium Motor Bakar selama Maret 2019 – April 2019. Berikut adalah data hasil pengujian pada sampel **Minyak Hasil Pirolisis PP**.

No.	Variasi	Nilai Kalor (cal/gram)	Viskositas pada 40°C (cst)	Densitas pada 20°C (g/ml)
1	Pendinginan Pararel 1 LPM	10170.06	1.61	0.751
2	Pendinginan Pararel 4 LPM	9736.44	1.86	0.763
3	Pendinginan Pararel 7 LPM	10655.39	1.89	0.755
4	Pendinginan Counter 1 LPM	11115.46	1.81	0.756
5	Pendinginan Counter 4 LPM	10993.78	1.71	0.759
6	Pendinginan Counter 7 LPM	12109.98	1.57	0.760

Mengetahui
Kepala Laboratorium



Dr. Eng. Nurkholis, ST., MT.Eng
NIP. 19740121 199903 1 001

Pengaruh Debit Dan Arah Aliran Air Pendinginan Kondensator Tipe *Double Tube* Terhadap Minyak Hasil Pirolisis Plastik *Polypropylene*

Rama Reynei, Mega Nur Sasongko, Widya Wijayanti
Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. Mayjend. Haryono no. 167, Malang, 65145, Indonesia
Email: ramareynei@gmail.com

ABSTRAK

Limbah plastik menjadi ancaman serius bagi lingkungan tempat kita tinggal. Berbagai upaya dilakukan untuk meminimalisasi jumlah sampah plastik yang kian hari kian meningkat. Plastik *polypropylene* merupakan salah satu jenis limbah plastik yang menyumbang angka yang tinggi. Penelitian tentang pengolahan plastik menjadi minyak dengan proses pirolisis dicanangkan guna mencari parameter terbaik. Salah satu proses yang penting dalam pengolahan plastik menjadi minyak yaitu kondensasi. Dengan metode *true experimental* sehingga didapat parameter kondensasi efektif guna memaksimalkan pirolisis plastik *polypropylene*. Plastik *polypropylene* seberat 250 gram, temperatur pemanasan 400°C, waktu pemanasan 90 menit, variasi arah aliran berupa *parallel flow* dan *counter flow*, serta debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit. Hasil dari penelitian ini didapat semakin tinggi debit aliran, semakin banyak volum minyak hasil pirolisis. Pada variasi *counter flow* dan *parallel flow* didapat *counter flow* menghasilkan minyak daripada *parallel flow*. Sedangkan sifat fisik berupa densitas, viskositas, dan nilai kalor minyak hasil pirolisis tidak dipengaruhi oleh proses kondensasi pada kondensator. Hal tersebut dikarenakan sifat fisik tersebut sudah terbentuk di-*pyrolyzer*. Yang mempengaruhi ialah temperatur pemanasan dan waktu tinggal gas di-*pyrolyzer*. Minyak hasil memiliki sifat fisik yang mendekati bahan bakar minyak komersial (bensin, minyak tanah, solar).

Kata Kunci: pirolisis, kondensator, *polypropylene*.

PENDAHULUAN

Limbah plastik menjadi ancaman serius bagi lingkungan tempat kita tinggal sehingga berbagai upaya dilakukan untuk meminimalisasi jumlah sampah plastik yang kian meningkat. Tiga mayoritas limbah plastik didominasi oleh plastik PET, PP, dan HDPE. Plastik adalah jenis bahan non-biodegradable yang sulit diurai oleh alam. Plastik terdiri dari beberapa jenis salah satunya adalah plastik PP (*PolyPropylene*). Plastik ini biasanya digunakan sebagai bungkus makanan (*snack*), tutup botol air mineral, tutup botol obat dan lain-lain.

Banyak upaya yang telah dilakukan untuk mengkonversi material-material sampah plastik tersebut untuk menghasilkan bahan bakar karena melihat dari sifat penyusun sampah plastik yaitu berupa hidrokarbon. Apriani dan Munawar (2012) meneliti tentang Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Minyak Menggunakan Proses Pirolisis. Hasil penelitian menunjukkan temperatur optimal untuk menghasilkan minyak pada 400°C dengan waktu 60 menit [1].

Pirolisis merupakan metode dalam pemecahan makromolekul hidrokarbon menjadi molekul hidrokarbon yang lebih kecil tanpa adanya oksigen [2]. Terdapat 4 komponen penting dalam proses pirolisis, yaitu geometri

pyrolyzer, temperatur pemanasan, waktu tinggal, dan pendinginan.

Miandad et al (2017) meneliti tentang pengaruh dari sampah plastik terhadap hasil liquid oil pirolisis. Dalam saran yang ia tujukan, penelitian tentang post-treatment terhadap hasil pirolisis sangat disarankan. Hal tersebut ditujukan agar dapat meningkatkan minyak hasil pirolisis dan mengetahui parameter pengolahan minyak hasil pirolisis [3].

Putra et al (2012) meneliti tentang Studi Eksper-Imental Perpindahan Kalor Konveksi fluida Nano TiO₂-Ethylene Glycol pada *Circular Tube* di Bawah Kondisi Fluks Kalor Konstan. Didapat semakin meningkatnya bilangan Reynolds, perpindahan kalor juga meningkat [4].

Kondensasi adalah proses fisika yang mengubah dari fase gas atau uap menjadi fase cair (Calvert, 1990). Hal ini dapat terjadi jika temperatur diturunkan dan/atau tekanan uap dinaikkan. Kondensasi dapat diaplikasikan pada *heat exchanger* tipe *double pipe*. Perpindahan panas secara konveksi dan konduksi terjadi pada *heat exchanger* tipe *double pipe* ini. Perpindahan panas secara konduksi terjadi dari fluida bersuhu tinggi ke fluida suhu lebih rendah melewati perantara dinding kondensator. Perpindahan panas

secara konveksi terjadi pada aliran fluida kerja kondensor.

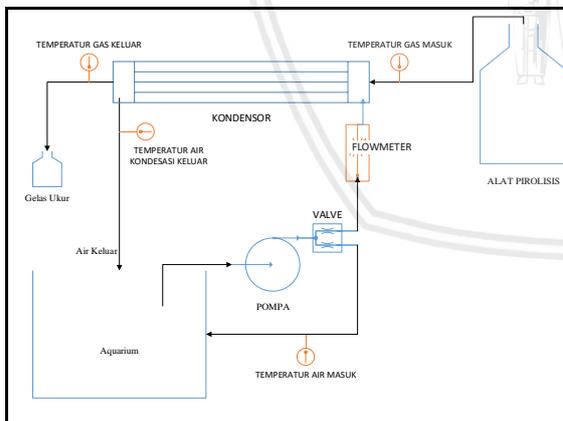
Meninjau yang sudah dijelaskan diatas, penelitian ini diharapkan mendapatkan cara maksimal pada arah aliran dan debit aliran kondensasi guna pengolahan palstik *polypropylene* dengan cara pirolisis menjadi bahan bakar minyak yang menyerupai bahan bakar dipasaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian pirolisis plastik *polypropylene* ini menggunakan penelitian *true experimental* atau penelitian sesungguhnya karena dalam penelitian ini peneliti mengkontrol semua variable luar yang mempengaruhi jalannya eksperimen, sehingga validitas internal dapat terjaga. Pada penelitian sesungguhnya ini juga erfungsi mengetahui lebih lanjut hubungan sebab-akibat serta membandingkan dengan hipotesis yang sudah didalam. Hasil dari pirolisis nantinya akan diuji beberapa sifat fisiknya serta dibandingkan dengan sifat fisik bahan bakar minyak yang ada dipasaran.

Instalasi Penelitian dengan Variasi Kondensor tipe Double Tube Parallel Flow

Instalasi alat pirolisis dari pyrolyzer hingga kondensor pada penelitian ini seperti yang ditampilkan pada gambar 1.



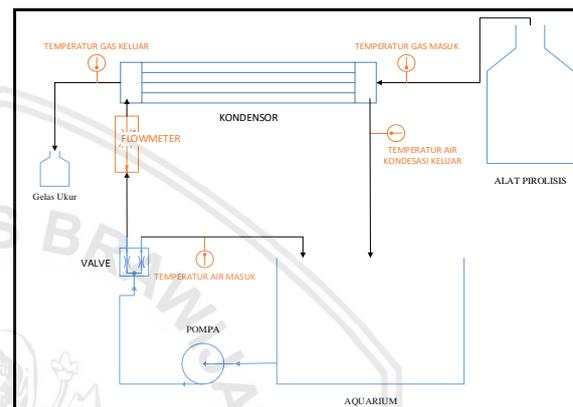
Gambar 1. Instalasi pirolisis dan kondensor *parallel flow*

Pada Gambar 1, instalasi kondensor dengan arah aliran *parallel*, gas hasil pirolisis masuk kondensor dengan melewati sensor temperatur gas masuk, lalu keluar pada ujung kondensor dan melewati sensor temperatur gas keluar, dan akhirnya minyak masuk pada gelas ukur. Pada kondensor, fluida dingin mengalir searah dengan arah aliran gas masuk. Air diambil dari bak penampungan (aquarium) dan dialirkan

menggunakan pompa. Setelah pompa terdapat *valve* (katup) yang digunakan untuk mengatur debit aliran pompa yang tinggi ke *flowmeter*. Fluida dingin keluar dari kondensor langsung menuju bak penampungan (aquarium) untuk digunakan kembali.

Instalasi Penelitian dengan Variasi Kondensor tipe Double Tube Counter Flow

Instalasi pada gambar 2 tidak berbeda jauh dengan gambar 1, perbedaan terdapat diarah aliran kondensor.



Gambar 2. Instalasi pirolisis dan kondensor *counter flow*

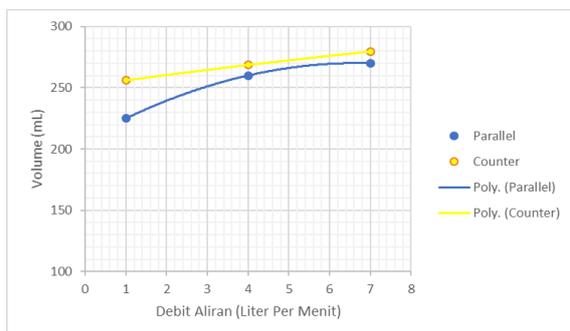
Pada Gambar 2, instalasi kondensor tipe aliran *counter* hanya memiliki perbedaan pada arah aliran fluida dinginnya saja dengan tipe aliran *parallel*. Pertama-tama, gas hasil pirolisis keluar dari *pyrolyzer* langsung masuk ke kondensor dengan melewati sensor gas temperatur gas masuk. Hasil dari kondensasi tersebut keluar pada ujung kondensor dengan melewati sensor temperatur gas keluar dan hasil dari kondensasi masuk ke gelas ukur. Lalu pada kondensor, aliran fluida dingin dipompa dari bak penampungan (aquarium) menggunakan pompa melewati *valve* (katup) dan *flowmeter* untuk mengatur debit aliran, lalu fluida dingin masuk dari ujung kondensor (gas keluar). Fluida dingin kondensor keluar dari tempat gas hasil pirolisis masuk lalu melewati sensor temperatur air kondensasi keluar dan dialirkan ke bak penampungan (aquarium).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan grafik hasil serta pembahasan terhadap variable yang sudah ditentukan. Dalam pembahasan, dilakukan perbandingan sifat fisik minyak hasil pirolisis dengan kondensasi tipe *double tube* dengan sifat fisik minyak bahan bakar komersil.

Volum

Pada gambar 3 menunjukkan grafik volum minyak hasil pirolisis dengan variasi arah dan debit aliran di kondensor.



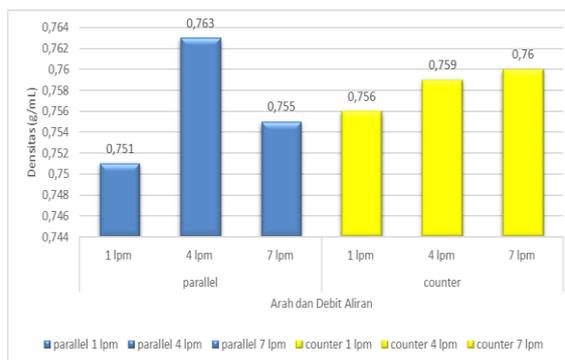
Gambar 3. Grafik hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap volum minyak hasil pirolisis

Pada arah aliran, didapat arah aliran *counter* menghasilkan minyak lebih banyak dibandingkan arah aliran *parallel*. Pada awal masuk gas dan air kondensor, terjadi proses perpindahan panas yang maksimal karena perbedaan temperatur yang tinggi. Tapi seiring mengalirnya fluida tersebut, perbedaan temperatur antara kedua fluida mengecil sehingga perpindahan panas yang terjadi tidak maksimal. Berbeda dengan *counter flow*, aliran gas hasil pirolisis dan air kondensor berlawanan arah. Sehingga setiap titik pada aliran gas hasil pirolisis akan berkontak dengan air kondensor masuk. Hal tersebut menyebabkan perbedaan temperatur kedua fluida tetap tinggi (tidak seperti *parallel*) dan menghasilkan perpindahan panas berlangsung secara maksimal.

Gambar 3 menunjukkan semakin besar debit aliran pendinginan kondensor, maka *condensable* gas hasil pirolisis semakin banyak menjadi minyak. Hal tersebut dikarenakan perpindahan panas yang terjadi meningkat seiring bertambahnya debit aliran.

Densitas

Densitas atau massa jenis merupakan kerapatan suatu zat pada volum tertentu. Kerapatan suatu zat bergantung terhadap massa atom penyusun senyawa zat tersebut [7]. Semakin besar massa atom penyusun dengan nilai volum yang sama, maka nilai massa jenis akan semakin meningkat juga.



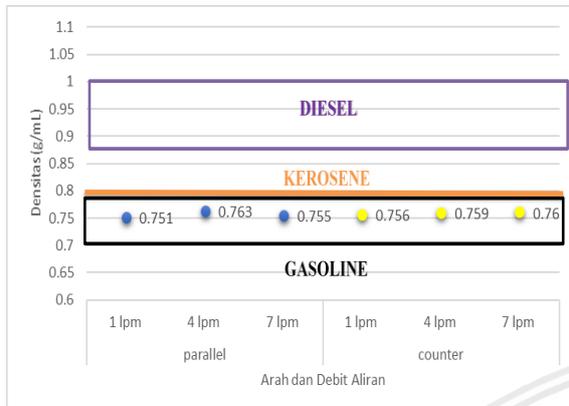
Gambar 4. Hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai densitas minyak hasil pirolisis

Pada gambar 4 terdapat grafik hubungan arah dan debit aliran terhadap nilai densitas minyak hasil pirolisis. Pada arah aliran *parallel* terjadi kenaikan lalu penurunan seiring kenaikan debit aliran. Tetapi pada arah aliran *counter* mengalami kenaikan seiring bertambahnya debit aliran. *Range* nilai densitas pada pengujian dengan temperatur pengujian 20°C dengan arah aliran *parallel* berkisar antara 0,751-0,763 g/ml, sedangkan pada pengujian arah aliran *counter* berkisar antara 0,756-0,76 g/ml.

Pada arah aliran *parallel* nilai tertinggi diperoleh dengan debit 4 liter/menit dengan nilai densitas yaitu 0.763 g/ml dan nilai terendah pada debit aliran 1 liter/menit dengan nilai densitas yaitu 0.751 g/ml. Pada arah aliran *counter* nilai tertinggi diperoleh dengan debit 7 liter/menit dengan nilai densitas 0,76 g/ml dan nilai terendah pada debit aliran 1 liter/menit dengan nilai densitas 0,756 g/ml.

Faktor yang mempengaruhi nilai densitas atau massa jenis yaitu massa relatif molekul (M_r) [7], dimana M_r merupakan jumlah massa relatif pada setiap unsur penyusun senyawa tersebut. Pada pirolisis, proses pembentukan senyawa pada gas hasil pirolisis berada pada *pyrolyzer* atau tungku pembakarannya [11]. Hal tersebut dibuktikan dengan temperatur gas masuk sebelum kondensor maksimal mencapai 120°C, sedangkan temperatur dekomposisi plastik *polypropylene* berada pada temperatur 328°C [6]. Ketika sebuah zat sudah melewati temperatur dekomposisinya, zat tersebut akan mengalami proses dekomposisi. Lalu ketika temperaturnya berada dibawah temperatur dekomposisi, maka atom-atom yang terdekomposisi akan membentuk ikatan baru. Dengan begitu parameter dalam proses pembentukan senyawa pada hasil pirolisis yaitu temperatur pemanasan, waktu pemanasan, dan

waktu tunggu gas hasil pirolisis berada di *pyrolyzer*. Maka nilai densitas atau massa jenis hasil pirolisis tidak dipengaruhi oleh arah aliran dan debit aliran kondensor.



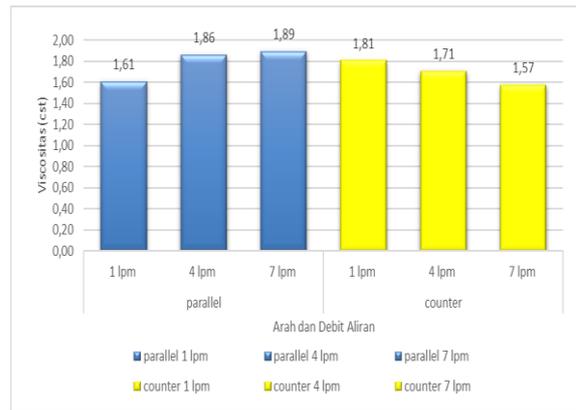
Gambar 5. Grafik perbandingan densitas pengujian dengan densitas bahan bakar minyak komersil

Gambar 5 menjelaskan perbandingan densitas pada pengujian variasi arah aliran dan debit aliran kondensasi dengan densitas bahan bakar komersil. Nilai densitas bahan bakar minyak komersial *gasoline* (bensin) dengan nilai 0.7-0.8 g/ml, *kerosene* (minyak tanah) dengan nilai 0.8 g/ml, dan *diesel* (solar) dengan nilai 0.87-1 g/ml [5]. Dari data pengujian didapat bahwa *range* dengan variasi arah aliran *parallel* dan *counter* serta debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit, didapat berkisar dari 0.751-0.763 g/ml.

Melihat dari gambar 5 bahwa semua nilai hasil pengujian pirolisis plastik *polypropylene* dengan temperatur 400°C lalu didinginkan dengan kondensor tipe *double tube*, didapat nilai densitas pengujian masuk dalam *range* (kotak warna hitam) nilai densitas dari *gasoline* (bensin).

Viskositas

Menurut buku Chemistry yang ditulis Chang (2010), viskositas adalah nilai dari ketahanan fluida tersebut untuk mengalir [7]. Sehingga semakin besar nilai viskositas, semakin lambat fluida untuk mengalir [7]. Faktor utama yang mempengaruhi kekentalan zat adalah gaya antar-molekul [7-8].



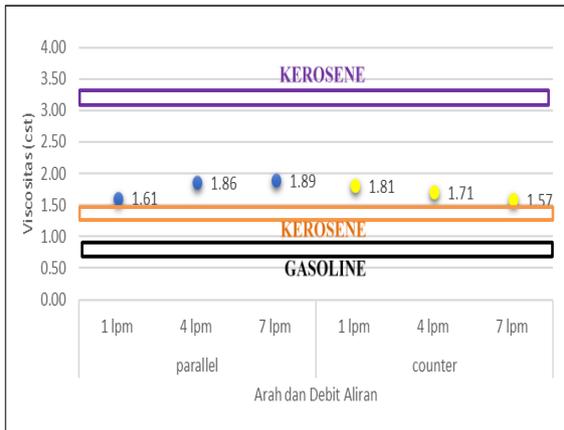
Gambar 6. Hubungan arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai viskositas minyak hasil pirolisis

Gambar 6 menampilkan grafik pengaruh arah aliran dan debit aliran terhadap nilai viskositas minyak hasil pirolisis. Pengujian nilai viskositas diuji dengan visco meter pada temperatur 40°C dengan satuan centistoke (cst). Range data yang didapat berkisar dari yang paling rendah yaitu 1.57 cst dan yang tertinggi yaitu 1.89 cst.

Pada arah aliran *parallel* didapat semakin besar debit aliran pendinginan pada kondensor, nilai viskositas mengalami kenaikan juga. Pada aliran *parallel*, nilai terendah pada debit 1 liter/menit dengan nilai viskositas sebesar 1.61 cst dan nilai tertinggi pada debit 7 liter/menit dengan nilai viskositas sebesar 1.89 cst.

Sedangkan pada aliran *counter* didapat semakin besar debit aliran pendinginan pada kondensor, nilai viskositas mengalami penurunan (berbanding terbalik). Nilai tertinggi didapat pada debit aliran 1 liter/menit dengan viskositas sebesar 1.81 cst, dan nilai terendah didapat pada debit aliran 7 liter/menit dengan viskositas sebesar 1.57 cst.

Dikarenakan faktor yang mempengaruhi nilai viskositas suatu zat yang sudah dijelaskan pada penjelasan sebelumnya dan proses pembentukan senyawa hasil pirolisis yang sudah dijelaskan pada pembahasan gambar 4, sehingga arah dan debit aliran pendinginan kondensor tidak mempengaruhi nilai viskositas hasil pirolisis.



Gambar 7. Grafik perbandingan nilai viskositas pengujian dengan viskositas bahan bakar minyak komersil

Gambar 7 menjelaskan perbandingan nilai viskositas pada pengujian variasi arah aliran dan debit aliran kondensasi dengan nilai viskositas bahan bakar komersil. Nilai viskositas bahan bakar minyak komersil *gasoline* (bensin) dengan nilai 0.64-0.88 cst, *kerosene* (minyak tanah) dengan nilai 1.39-1.5 cst, dan *diesel* (solar) dengan nilai 3.12-3.353 cst [9][10]. Dari data pengujian didapat bahwa range dengan variasi arah aliran *parallel* dan *counter* serta debit aliran 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit, didapat berkisar dari 1.57-1.89 cst.

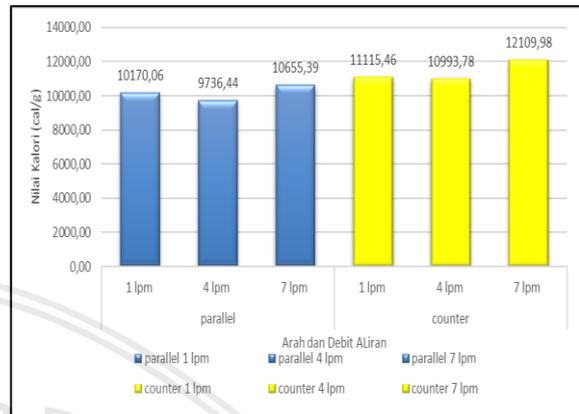
Menilik gambar 7 bahwa pengaruh arah dan debit aliran kondensator tipe *double tube* pada pirolisis *polypropylene* tidak dalam range minyak komersil tetapi nilai viskositas cenderung sama dengan nilai viskositas *kerosene* (minyak tanah).

Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan banyaknya energi panas yang dihasilkan dari pembakaran suatu zat per satuan massa [12]. ΔH_c adalah perubahan entalpi total pada suatu sistem, dimana terjadi reaksi antara molekul dengan O_2 secara sempurna dan menghasilkan atau melepas energi ke lingkungan [12]. Sehingga pelepasan energi akibat reaksi yang terjadi pada proses pembakaran (ΔH_c) sebanding dengan nilai kalor. Pada pengambilan data, digunakan *bomb calorimeter* dengan prinsip mengukur perbedaan temperatur pada air untuk menghitung banyaknya kalor yang dihasilkan dari spesimen.

Pada gambar 8 menunjukkan pengaruh arah dan debit aliran pendinginan kondensator tipe *double tube* pada hasil pirolisis plastik *polypropylene* dengan temperatur pemanasan 400°C terhadap nilai kalor. Range nilai kalor

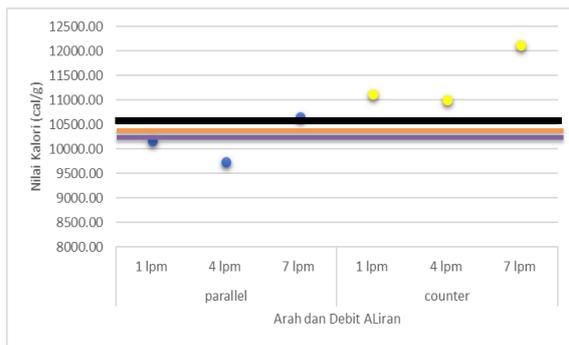
didapat mulai dari 9736,55 cal/g hingga 12109,98 cal/g. Didapat bahwa pada 2 variasi arah aliran (*parallel* dan *counter*), nilai kalor mengalami penurunan pada debit 4 liter/menit dan mengalami kenaikan pada debit 7 liter/menit.



Gambar 8. Grafik hubungan arah dan debit aliran kondensator terhadap nilai kalor minyak hasil pirolisis

Pada arah aliran *parallel* nilai terendah didapat pada debit 4 liter/menit dengan nilai kalor sebesar 9736,44 cal/g dan nilai tertinggi didapat pada debit 7 liter/menit dengan nilai kalor sebesar 10655,39 cal/g. Pada arah aliran *counter* nilai terendah didapat pada debit 4 liter/menit dengan nilai kalor 10993,78 cal/g dan nilai tertinggi didapat pada debit 7 liter/menit dengan nilai kalor 12109,98 cal/g. Didapat bahwa kecenderungan pada kedua arah aliran mengalami penurunan pada debit 4 liter/menit. Pada debit 7 liter/menit merupakan nilai kalor puncak dari kedua arah aliran dikarenakan penangkapan atau perubahan fase gas hasil pirolisis lebih maksimal.

Besarnya nilai kalor yang dihasilkan dari sebuah zat tergantung dari unsur penyusun senyawa, panjang rantai karbon dan jenis ikatan antar karbon. Penyusunan senyawa minyak hasil pirolisis terjadi di-*pyrolyzer*. Sehingga kondensator tidak mempengaruhi struktur kimia dari minyak hasil pirolisis. Dapat kita simpulkan bahwa nilai kalor (sifat ekstrinsik) tidak dipengaruhi oleh arah maupun debit aliran kondensator.



Gambar 9. Grafik perbandingan nilai kalor pengujian dengan nilai kalor bahan bakar minyak komersil

Gambar 9 menunjukkan perbandingan nilai kalor minyak hasil pirolisis dengan variasi arah dan debit aliran kondensor terhadap nilai kalor bahan bakar minyak komersil. Nilai kalor *gasoline* (bensin) sebesar 10.516,3 cal/g, nilai kalor *kerosene* (minyak tanah) sebesar 10.372,85 cal/g, dan nilai kalor *diesel* (solar) sebesar 10.277,2 cal/g [11].

Nilai kalor dengan arah aliran *parallel* memiliki kecenderungan dibawah nilai kalor *diesel* dan diatas nilai kalor *gasoline*. Pada debit aliran 1 liter/menit dan 4 liter/menit, nilai kalor memiliki kecenderungan dibawah nilai kalor *diesel*. Sedangkan pada debit aliran 7 liter/menit memiliki kecenderungan diatas nilai *gasoline*. Sedangkan nilai kalor dengan arah aliran *counter* memiliki kecenderungan diatas nilai *gasoline*. Baik 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit memiliki nilai kalo diatas nilai kalor *gasoline*.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis data hasil penelitian maka didapatkan kesimpulan:

- Karakteristik minyak hasil pirolisis dengan debit aliran pendinginan kondensor tipe *double tube* 1 liter/menit, 4 liter/menit, dan 7 liter/menit, yaitu:
 - Pada volum, mengalami kenaikan seiring meningkatnya debit aliran pendinginan kondensor. Hal tersebut dikarenakan kondensor berpengaruh terhadap sifat ekstrinsik.
 - Pada densitas, viskositas, dan nilai kalor kondensasi tidak mempengaruhi sifat intrinsik dikarenakan senyawa yang sudah terbentuk saat di *pyrolyzer*.
- Karakteristik minyak hasil pirolisis dengan arah aliran *parallel* dan *counter* pada pendinginan kondensor, yaitu:
 - Pada volum, arah aliran *counter* didapat lebih maksimal dibandingkan

arah aliran *parallel* dikarenakan perpindahan panas yang lebih maksimal.

- Pada densitas, viskositas, dan nilai kalor kondensasi tidak mempengaruhi sifat intrinsik dikarenakan senyawa yang sudah terbentuk saat di *pyrolyzer*.
- Beberapa sifat fisik *fuel oil* hasil pirolisis apabila dibandingkan dengan bahan bakar komersil memiliki persamaan. Pada densitas minyak hasil pirolisis masuk dalam *range gasoline*, pada viskositas tidak masuk dalam *range*, tetapi mendekati *range kerosene*, dan nilai kalor pada arah aliran *parallel* cenderung mendekati *diesel* dan *gasoline*, dan untuk nilai kalor pada arah aliran *counter* diatas nilai kalor *gasoline*.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprian, R. P. & Munawar, A. 2012. Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Minyak Menggunakan Proses Pirolisis. *Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*. IV (1). 44-53
- Basu, P. 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis. USA : Elsevier Inc.
- Miandad, R., Barakat, M.A., Aburiazaiza, A.S., Rehan, M., Ismail, I.M.I., & Nizami, A.S. 2017. Effect of Plastik Waste Types on Pyrolyziz Liquid Oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Volume 119: 239-252
- Putra, I.K., Kristiawan, B., & Budiana, E.P. 2012. Studi Eksper-Imental Perpindahan Kalor Konveksifluida Nano TiO₂-Ethylene Glycol pada Circular Tubedi Bawah Kondisi Fluks Kalor Konstan. *Mekanika*. X (2): 117-124
- The National Academy of Science. 2005. Fuels, Combustion Products and Propellants. *Gulf War and Health*. Volume 3: 30-31. Washington, DC: The National Academies Press.
- Wypych, G. 2016. *Handbook of Polymers Second Edition*. Toronto: ChemTec Publishing
- Chang, R. 2010. *Chemistry 10th Edition*. NewYork: McGraw-Hill.
- Jones, J.C.. 2010. *Hydricarbons-Physical Properties And Their Relevance To Utilisation*. Frenderiksberg: Ventus Publishing Aps.
- Jones, J.C. 2010. Hydrocarbon – Physical Properties and their Relevance to

- Utilisation. Frederiksberg : Ventus Publishing ApS.
- [10] Global Companies LLC. 2016. Safety Data Sheet. Waltham. <http://www.globalp.com/documents/msds.cfm>. (diakses 7 april 2019).
- [11] Gao, F. 2010. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels. *PhD Thesis*. Unpublished. New Zealand: University of Canterbury.
- [12] Khan, M.Z.H., Sultana, M., Al-Mamun, M.R., & Hasan, M.R., 2016. Pyrolytic Waste Plastic Oil and Its Diesel Blend: *Fuel Characterization*. *Journal of Environmental and Public Health*. Volume 6: 1-6

