

**PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL
TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES
PIROLISIS SAMPAH PLASTIK**

(Skripsi)

Oleh

SITI LATIFAH

NPM 1915021007



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

**PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL
TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES
PIROLISIS SAMPAH PLASTIK**

Oleh

SITI LATIFAH

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2024

ABSTRAK

PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK

Oleh

Siti Latifah

Sampah kota yang paling sering dijumpai adalah sampah plastik. Contohnya adalah jenis *polypropylene* (PP) dan *polystyrene* (PS). Jenis plastik tersebut memiliki potensi untuk diolah menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis. Salah satu tahap penting dalam pirolisis adalah proses kondensasi. Sebagian gas dari reaktor pirolizer dikondensasikan dalam kondensor untuk menghasilkan cairan yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai laju perpindahan panas, efektivitas perpindahan panas, dan volume minyak yang dihasilkan selama proses pirolisis. Untuk mencapai tujuan tersebut diperlukan data temperatur yang diperoleh dengan cara merekam data temperatur gas masuk, *output bio-oil*, dan air pendingin *inlet* dan *outlet* pada saat eksperimen menggunakan alat *Temperature Recorder* dan dibandingkan dengan hasil teoritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk 1 kg plastik PP pada aliran berlawanan diperoleh nilai laju perpindahan panas, efektivitas perpindahan panas, dan volume minyak masing-masing 27,94 kW, 97,62%, dan 332 ml. Sedangkan pada aliran searah, diperoleh nilai laju perpindahan panas, efektivitas perpindahan panas, dan volume minyak masing-masing 27,52 kW, 96,48%, dan 325 ml. Untuk plastik PS, aliran berlawanan menghasilkan laju perpindahan panas, efektivitas perpindahan panas, dan volume minyak masing-masing 27,52 kW, 98,57%, dan 131 ml. Sedangkan aliran searah menghasilkan laju perpindahan panas, efektivitas perpindahan panas, dan volume minyak masing-masing 27,73 kW, 98,52%, dan 111 ml. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap optimalisasi sistem pirolisis sebagai upaya pengelolaan limbah plastik yang berkelanjutan.

Kata kunci : pirolisis, kondensasi, efektivitas kondensor, plastik PP, plastik PS

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF THE DIRECTION OF FLUID FLOW ON A DOUBLE-PIPE TYPE VERTICAL CONDENSER FOR COOLING GAS PRODUCED BY THE PYROLYSIS PROCESS OF PLASTIC WASTE

By

Siti Latifah

The most common municipal solid waste is plastic waste. Examples are polypropylene (PP) and polystyrene (PS). These types of plastic have the potential to be processed into liquid fuel through the pyrolysis process. One of the important stages in pyrolysis is the condensation process. Some gas from the pyrolyzer reactor is condensed in the condenser to produce a liquid that can be used as fuel. This study aims to determine the value of the heat transfer rate, heat transfer effectiveness, and oil volume produced during the pyrolysis process. To achieve this purposes, temperature data is required which is obtained by recording temperature data of inlet gas, bio-oil output, and inlet and outlet cooling water during experiments using a Temperature Recorder and compared with theoretical results. The results of the study showed that for 1 kg of PP plastic in counter flow, the values of the heat transfer rate, heat transfer effectiveness, and oil volume are 27.94 kW, 97.62%, and 332 ml respectively. While in parallel flow, the values of the heat transfer rate, heat transfer effectiveness, and oil volume are 27.52 kW, 96.48%, and 325 ml respectively. For PS plastic, counter flow produces heat transfer rate, heat transfer effectiveness, and oil volume of 27.52 kW, 98.57%, and 131 ml respectively. While parallel flow produces heat transfer rate, heat transfer effectiveness, and oil volume of 27.73 kW, 98.52%, and 111 ml respectively. This research is expected to provide significant contribution to the optimization of pyrolysis system as an effort to manage sustainable plastic waste.

Keywords: pyrolysis, condensation, condenser effectiveness, PP plastic, PS plastic

Judul Skripsi : **PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK**

Nama Mahasiswa : **Siti Latifah**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021007

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2

Dr. Harmen, S.T., M.T.

Ahmad Yonanda, S.T., M.T.

NIP 19690620 200003 1 001

NIP 19930110 201903 1 008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan

Ketua Program Studi

Teknik Mesin

S1 Teknik Mesin

Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D.

Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.

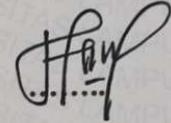
NIP 19710817 199802 1 003

NIP 19790821 200312 1 003

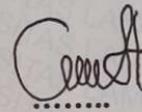
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

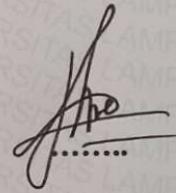
Ketua Penguji : **Dr. Harmen., S.T., M.T**



Anggota Penguji : **Ahmad Yonanda., S.T., M.T**



Penguji Utama : **Agus Sugiri., S.T., M.Eng**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan., S.T., M.Sc. }
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **17 September 2024**

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul “PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK” dibuat dengan usaha Saya sendiri dan bukan hasil dari plagiat sebagaimana diatur dalam pasal 36 peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No.13 Tahun 2019.

Bandar Lampung, 09 Oktober 2024

Penulis,



Siti Latifah

NPM 1915021007

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Desa Marga Kencana, Kecamatan Tulang Bawang Udik, Kabupaten Tulang Bawang Barat, Provinsi Lampung pada tanggal 01 Juli 2000 sebagai anak kedua dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 3 Marga Kencana tahun 2007 hingga 2013, kemudian melanjutkan di SMPN 1 Tulang Bawang Barat dari tahun 2013 hingga 2016, lalu melanjutkan di SMAN 1 Tumijajar yang diselesaikan pada tahun 2019, pada tahun yang sama penulis mendaftarkan diri sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam dunia organisasi kemahasiswaan antara lain Badan Eksekutif Mahasiswa Universitas Lampung (BEM UNILA) tahun 2020-2021, Badan Eksekutif Mahasiswa tingkat Fakultas Teknik Universitas Lampung (BEM FT UNILA) tahun 2021-2022, dan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) tahun 2022-2023.

Penulis pernah melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk. Baturaja, Sumatera Selatan pada tahun 2022 dengan judul laporan **“ANALISIS KEAUSAN RAIL TOP AND BOTTOM PADA RECLAIMER CLAY AREA 24RE03 DI PT SEMEN BATURAJA (PERSERO) Tbk.”** Tahun 2023 Penulis melaksanakan penelitian yang tergabung dalam tim Pirolisis dengan judul penelitian **“PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK”** dibawah bimbingan Dr. Harmen, S.T., M.T., dan Ahmad Yonanda, S.T., M.T

MOTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Maka sesungguhnya beserta kesulitan pasti ada kemudahan”

(QS.Al-Insyirah[94]:5)

“Angin tidak berhembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji kekuatan akarnya”

~Sayyidina Ali bin Abi Thalib~

“Being FEARLESS isn't being 100% not FEARFUL, it's being terrified but you jump anyway”

~Taylor Swift~

SANWACANA

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat dan kelimpahan-Nya penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Sholawat serta salam tak lupa penulis hatur agungkan kepada nabi Muhammad SAW, yang telah membimbing manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang benderang. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Dalam skripsi ini penulis mengambil judul “*PENGARUH ARAH ALIRAN FLUIDA PADA KONDENSOR VERTIKAL TIPE PIPA GANDA UNTUK PENDINGINAN GAS HASIL PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK*”. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua, Bapak Musman dan Ibu Gumarsih, yang telah membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang dan selalu mendukung penulis dalam situasi apapun dan selalu mendoakan penulis tanpa henti.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lmapung beserta staff dan jajarannya.
3. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah banyak memberikan ilmu terkait penelitian skripsi dan dukungan dalam menyelesaikannya.

6. Ahmad Yonanda, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 2 yang telah membimbing dalam penyusunan dan ilmu terkait penelitian yang telah penulis laksanakan.
7. Agus Sugiri S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembahas atas masukan dan saran dalam berjalannya penelitian dan seminar.
8. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis.
9. Dr. Ofik Taufik Purwadi, S.T., M.T. sebagai Kepala TPST Universitas Lampung dan staff atas penyediaan fasilitas yang membantu penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Mas Mufid dan istri selaku kakak penulis yang selalu memberikan saran dan semangat untuk penulis agar segera menyelesaikan tugas akhir ini, dan keponakan penulis Maulana Khabib Khoirudin yang selalu memberikan hiburan dengan tingkah lucunya.
11. Teman-teman dekat penulis Mbak Nisa, Ragil, Dila, Lutfi, Diah, Raras yang telah memberikan semangat dan selalu mendengar keluh kesah penulis selama penyusunan skripsi. Terima kasih untuk segala energi positif yang sudah diberikan kepada penulis selama ini.
12. Teman-teman kost kamila Mba Adel, Mba Nepi, Mba Nur yang selalu memberi dukungan dan selalu menghibur penulis setiap waktu.
13. TPST SQUAD yaitu Juntara, Karina, Rehan yang telah membantu materi dan non-materi selama proses penelitian penulis.
14. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin Universitas Lampung angkatan 2019 yang memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis.
15. Terakhir untuk Siti Latifah, diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang sudah dimulai. Terima kasih karena sudah berusaha dan tidak menyerah menghadapi proses yang tidak mudah. Terima kasih karena sudah bertahan sejauh ini.

Penulis bersyukur karena telah dikelilingi oleh orang-orang yang membantu dalam menyelesaikan tugas akhir dan semoga Allah SWT membalas atas kebaikan mereka semua dan semoga senantiasa diberkahi dan dilindungi oleh-Nya. Didalam skripsi ini penulis juga menyadari bahwa banyak kesalahan ataupun kekurangan dalam penulisan dan pembuatan tugas akhir ini. Penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak yang membacanya.

Bandar Lampung, 09 Oktober 2024

Penulis,

Siti Latifah

NPM 1915021007

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR TABEL.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Pengenalan Plastik.....	6
2.1.1. Pengertian Plastik.....	6
2.1.2. Sifat Termal Bahan Plastik.....	8
2.2. Pirolisis.....	9
2.3. Perpindahan Panas.....	10
2.3.1. Perpindahan Panas Konduksi.....	10
2.3.2. Perpindahan Panas Konveksi.....	12
2.3.3. Perpindahan Panas Radiasi.....	13
2.4. Kondensasi.....	14
2.5. Kondensor.....	15
2.5.1. Jenis – Jenis Kondensor Berdasarkan Konstruksinya.....	15
2.5.2. Jenis – Jenis Kondensor Berdasarkan Arah Aliran Fluida.....	19
2.6. Aliran Fluida.....	22
2.6.1. Jenis Aliran Fluida.....	22
2.7. Efektivitas Perpindahan Panas.....	24
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	27

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	27
3.1.1	Tempat Penelitian.....	27
3.1.2	Waktu Penelitian.....	27
3.2	Alat dan Bahan.....	27
3.2.1	Alat.....	27
3.2.2	Bahan.....	33
3.3	Skema Penelitian.....	34
3.3.1	Studi Literatur.....	34
3.3.2	Persiapan.....	35
3.3.3	Pelaksanaan.....	35
3.3.4	Analisis <i>Heat Exchanger</i>	36
3.3.5	Analisis Hasil Pengujian.....	36
3.4	Alur Tahapan Penelitian	36
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1	Hasil Penelitian	38
4.1.1	Data <i>Temperature</i> yang Diperoleh.....	38
4.1.2	Data Laju Perpindahan Panas.....	39
4.1.3	Nilai Efektivitas Perpindahan Panas.....	47
4.1.4	Data Volume Minyak yang Dihasilkan.....	50
4.2	Pembahasan.....	51
4.2.1	Pengaruh Arah Aliran Fluida Terhadap Nilai Laju Perpindahan Panas.....	51
4.2.2	Pengaruh Arah Aliran Fluida Terhadap Efektifitas Perpindahan Panas.....	53
4.2.3	Pengaruh Arah Aliran Fluida Terhadap Volume Minyak yang Dihasilkan	55
V.	PENUTUP.....	57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
	DAFTAR PUSTAKA	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik <i>Thermoplastic</i>	7
Tabel 2.2 Data temperatur transisi dan temperatur lebur plastik	8
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>double pipe heat exchanger</i>	30
Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Rata-Rata.....	38
Tabel 4.2 Nilai Laju perpindahan panas fluida panas pada jenis plastik PP dan PS untuk aliran searah dan aliran berlawanan.....	39
Tabel 4.3 Hasil perhitungan efektivitas laju perpindahan panas pada plastik PP dan PS.....	47
Tabel 4.4 Volume minyak yang dihasilkan pada proses pirolisis.....	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi	11
Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi	12
Gambar 2.3 Kondensor <i>shell and tube</i>	17
Gambar 2.4 Kondensor <i>shell and coil</i>	17
Gambar 2.5 Kondensor tipe <i>double pipe</i>	19
Gambar 2.6 Kondensor tipe <i>parallel flow</i>	20
Gambar 2.7 Kondensor tipe <i>counter flow</i>	21
Gambar 2.8 Aliran Laminar	23
Gambar 2.9 Aliran Transisi.....	23
Gambar 2.10 Aliran Turbulen	24
Gambar 3.1 Reaktor Pirolisis Tipe <i>Fixed Bed</i>	28
Gambar 3.2 <i>Double Pipe Heat Exchanger</i>	29
Gambar 3.3 Detail gambar <i>double pipe heat exchanger</i>	29
Gambar 3.4 <i>12 Channel Temperatur Recorder Datalogger</i>	31
Gambar 3.5 Gas LPG	31
Gambar 3.6 Timbangan Digital	32
Gambar 3.7 <i>Water Pump</i>	32
Gambar 3.8 Kunci pipa, kunci pas, kunci ring.....	33
Gambar 3.9 Plastik PP yang sudah dicacah	33
Gambar 3.10 Plastik PET yang sudah dicacah.....	33
Gambar 3.11 Plastik PS yang sudah dihaluskan	34
Gambar 4.1 Skema Arah Aliran Berlawanan.....	40
Gambar 4.2 Skema Arah Aliran Searah.....	42
Gambar 4.3 Skema Arah Aliran Berlawanan.....	43
Gambar 4.4 Skema Arah Aliran Searah.....	45
Gambar 4.5 Nilai Laju Perpindahan Panas	52
Gambar 4.6 Nilai Efektivitas Perpindahan Panas	53
Gambar 4.7 Volume Minyak yang Dihasilkan	55

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sampah yang sering dijumpai dan umum adalah sampah plastik (Taufiqurrohman dan Yusuf, 2022). Plastik adalah salah satu bahan yang umum digunakan secara global, dan kuantitas sampah plastik diperkirakan akan meningkat setiap tahun. Sampah plastik adalah jenis sampah yang sulit untuk didegradasi. Kepadatan penduduk yang semakin tinggi bersama dengan migrasi penduduk dari wilayah pedesaan ke perkotaan dan pertumbuhan industri menyebabkan banyak limbah yang dihasilkan yang dapat menyebabkan masalah sosial, ekonomi, dan ekologis. Sebanyak 67,8 juta ton sampah dihasilkan pada tahun 2020. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia melaporkan bahwa 37,3% sampah dihasilkan dari kegiatan rumah tangga, 39,8% dari limbah makanan, dan sampah plastik yang memiliki proporsi 17% (Solekah dkk, 2022).

Pengolahan sampah yang efektif sangat penting untuk mendukung aktivitas kehidupan yang termasuk pemanfaatan limbah sebagai sumber energi terbarukan berkembang seiring perkembangan zaman. Hal ini memiliki dampak cukup besar pada sumber daya alam di seluruh dunia. Salah satu cara penanganan sampah plastik yaitu mengubahnya menjadi bahan bakar cair. *Thermal cracking* atau degradasi termal adalah teknologi yang dipakai untuk mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar cair. *Thermal Cracking* yang salah satunya adalah proses pirolisis merupakan suatu proses termal yang digunakan untuk mendegradasi bahan polimer rantai panjang misal plastik dan juga bahan organik layaknya biomassa dengan pemanasan bebas adanya oksigen menjadi bahan bakar cair. Pirolisis biasanya terjadi pada suhu antara 300-600°C. Selama suhu tersebut,

molekul hidrokarbon dengan rantai panjang akan terurai menjadi molekul dengan rantai pendek. Kemudian plastik akan mencair dan berubah menghasilkan gas. Kemudian gas tersebut mengalami proses pendinginan pada kondensor sehingga terkondensasi dan berbentuk cair. Hasil pengkondensasian ini dapat digunakan sebagai bahan bakar berupa bensin ataupun solar. Hasil dari pirolisis terdiri atas gas, cair, dan arang. (Syamsiro M, 2015).

Hasil pirolisis juga sangat bergantung pada pendinginan pada saat proses pirolisis berlangsung. Untuk memperoleh hasil cairan asap yang maksimal sangat bergantung kepada kondisi dan proses kondensasi yang berlangsung. Semakin kecil temperatur pendingin, akan menghasilkan semakin banyak minyak (Ridhuan K, dkk, 2019). Kondensasi atau pengembunan adalah proses perubahan wujud suatu material dari uap menjadi cair. Kondensasi terjadi saat gas panas menyentuh permukaan padat dengan temperaturnya dibawah temperatur saturasi uap panas, atau bisa saja terjadi apabila meningkatnya tekanan pada gas, ataupun disebabkan oleh kedua hal tersebut. Alat yang digunakan untuk mendinginkan gas panas agar berubah menjadi cairan adalah kondensor (Simanjuntak dkk., 2022). Kondensasi dapat berlangsung pada kondensor vertikal berpendingin air dengan tipe pipa ganda. Pendingin yang menggunakan kondensor dengan media air terbukti lebih baik untuk pendinginan cepat daripada pendingin dengan media udara. Efektivitas kinerja kondensor dipengaruhi oleh beberapa penyebab yaitu bentuk kondensor, nilai konduktivitas bahan, kerapatan lapisan isolasi pada kondensor, suhu lingkungan pengoperasian, faktor pengotoran (*fauling factor*), jenis cairan pendingin (Ahmad dan Samsudin, 2018).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Rama Reynei pada tahun 2019 mengenai pengaruh arah aliran fluida pendingin pada minyak hasil pirolisis plastik PP didapatkan volume minyak yang lebih maksimal pada arah *counter flow* karena pada *counter flow* mengalami perpindahan panas lebih banyak dari pada arah *parallel flow*. Hal ini dikarenakan aliran gas hasil pirolisis dan cairan pendingin kondensor berlawanan arah sehingga setiap titik pada aliran gas hasil pirolisis

akan berkontak dengan air kondensor masuk dan mengakibatkan perbedaan temperatur kedua fluida tetap tinggi dan perpindahan panas terjadi dengan maksimal. Begitu pula dengan eksperimen oleh Sigit Haryadi pada tahun 2015 mengenai pengaruh arah aliran air pendingin pada kondensor terhadap hasil proses pirolisis. Pada pengujian tersebut diperoleh bahwa arah aliran berlawanan lebih besar nilai laju perpindahan panas terhadap hasil minyak yang dihasilkan. Namun penulis menyadari bahwa perlu adanya revisi dan penyempurnaan pada sistem kondensasi agar hasil pirolisis semakin lebih baik. Universitas Lampung telah memiliki alat pirolisis dengan kapasitas 8kg dan dari penelitian bio oil yang dihasilkan masih rendah. Proses pendinginan yang belum optimal perlu dianalisa dan dilihat perpindahan arah aliran terhadap proses pendinginan perlu dilakukan perbaikan dan penyempurnaan lebih lanjut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka peneliti merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan nilai laju perpindahan panas pada kondensor saat proses pirolisis.
2. Bagaimana cara menentukan efektivitas perpindahan panas pada kondensor pada proses pirolisis.
3. Bagaimana cara mengetahui arah aliran fluida yang paling efektif untuk proses pendinginan pada proses pirolisis sampah plastic

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang akan diraih dari latar belakang ada adalah :

1. Mengetahui nilai laju perpindahan panas yang dihasilkan.

2. Mengetahui efektivitas perpindahan panas tiap arah aliran fluida dalam berlangsungnya pengkondensasian gas hasil pirolisis.
3. Mengetahui volume minyak yang dihasilkan pada proses pirolisis di setiap arah aliran fluida.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki batasan-batasan masalah yang tidak dapat dihindari penulis yakni.

1. Variasi arah aliran air yang berbeda yaitu *parallel flow* dan *counter flow* pada kondensor vertikal tipe pipa ganda dalam mengkondensasikan uap plastik hasil pirolisis.
2. Penelitian ini menggunakan kondensor vertikal tipe pipa ganda.
3. Sampel plastik yang digunakan adalah jenis plastic PP dan PET.
4. Penelitian ini tidak membahas tentang proses pirolisis dalam reaktor.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini yaitu

I. PENDAHULUAN

Pendahuluan menjelaskan latar belakang masalah secara jelas, tujuan yang melandasi pelaksanaan penelitian, batasan masalah yang dibuat untuk penelitian ini sehingga hasil penelitian lebih terarah, sistematika penulisan berupa format yang digunakan sebagai pedoman penulisan laporan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka terdiri atas landasan pustaka yang mendukung penelitian dan merupakan teori-teori dasar yang terdiri dari: definisi pirolisis, contoh

plastik yang digunakan, kondensasi, jenis-jenis kondensor, dan jenis-jenis aliran pada fluida.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian berisi lokasi dan waktu dilaksanakannya penelitian serta diagram alir pelaksanaan penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab 4 terdiri dari hasil pengujian pirolisis dan pembahasan analisis data data yang didapatkan ketika ataupun setelah eksperimen.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Terdiri dari kesimpulan dan saran yang diperoleh atas hasil penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengenalan Plastik

2.1.1 Pengertian Plastik

Plastik merupakan bahan yang berasal dari minyak bumi dan merupakan turunan minyak bumi melalui proses destilasi. Sifat plastik adalah memiliki ikatan kimia yang sangat kuat, sehingga banyak bahan yang terbuat dari plastik. Namun, plastik merupakan bahan yang tak terdekomposisi secara alamiah (*non biodegradable*) sehingga bahan ini menjadi limbah yang sukar terurai setelah digunakan dan menyebabkan lingkungan akan tercemar (Wahyudi J dkk, 2018).

Awalnya, minyak dan gas digunakan sebagai sumber alami untuk memproduksi plastik, namun dari waktu ke waktu minyak dan gas tergantikan oleh bahan sintetis untuk mencapai sifat plastik yang diinginkan dengan cara kopolimerisasi, laminasi dan ekstrusi. Dalam pengklasifikasiannya, plastik terbagi menjadi dua jenis yaitu *thermoplastic* dan *thermosetting*. *Thermoplastic* merupakan bahan plastik yang ketika mengalami kenaikan suhu akan meleleh dan berubah menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan *thermosetting* merupakan plastik yang tidak dapat dilebur kembali dengan pemanasan setelah dibentuk menjadi bentuk padat. Berdasarkan sifat kedua jenis plastik di atas, *Thermoplastic* merupakan jenis yang lebih bisa didaur ulang. Jenis plastik yang dapat digunakan kembali diberikan kode nomor agar mempermudah penidentifikasiannya dan

penggunaanya (Landi dan Arijanto, 2017). Tabel 2.1 menunjukkan macam-macam *thermoplastic* beserta karakteristiknya.

Tabel 2.1 Karakteristik *Thermoplastic*

Kode	Jenis Plastik	Titik Leleh (°C)	Contoh Penggunaan
	<i>Polyethylene terephthalate</i>	250	Botol air kemasan
	<i>High density polyethylene</i>	200-280	Botol sabun, dan <i>tupperware</i>
	<i>Polyvinyl chloride</i>	160-180	Pipa saluran air
	<i>Low density polyethylene</i>	160-240	
	<i>Polypropylene / polypropene</i>	200-300	Tutup botol plastik, tempat makanan dan minuman
	<i>Polystyrene</i>	180-260	<i>Styrofoam</i> dan kotak CD
	<i>Polycarbonate, nylon, ABS acrylonitrile, styrene acrylonitrile</i>	180-240	Alat-alat rumah tangga, bungkus pasta gigi

(Sumber : Damayanti Z dkk, 2023)

2.1.2 Sifat Termal Bahan Plastik

Sifat termal pada bahan plastik sangat penting diketahui dalam proses pembuatan dan proses daur ulang pada plastik. Sifat-sifat thermal tersebut yaitu titik lebur (T_m), temperatur transisi (T_g) dan juga temperatur dekomposisi. Temperatur transisi yaitu suhu peregangan struktur yang dialami plastik sehingga berubah dari kaku menjadi fleksibel. Diatas titik lebur, volume plastik akan bertambah sehingga memungkinkan molekul bergerak lebih bebas yang ditandai dengan peningkatan fleksibilitas. Temperatur leleh yaitu suhu saat plastik menjadi lunak dan mencair. Temperatur dekomposisi adalah batasan proses pencairan. Apabila temperatur meningkat diatas temperatur lebur, plastik akan meleleh dan strukturnya runtuk atau terdekomposisi. Dekomposisi disebabkan oleh energi panas melebihi energi ikat rantai molekul. Umumnya, polimer terdekomposisi pada temperatur melebihi 1,5 kali suhu transisi (Ibrahim M dkk, 2022). Pada Tabel 2.2 menunjukkan data sifat termal yang penting pada proses *recycle* sampah plastik.

Tabel 2.2 Data temperatur transisi dan temperatur lebur plastik

Jenis Bahan	T_m (°C)	T_g (°C)	Temperatur kerja maks. (°C)
PP	168	5	80
HDPE	134	-110	82
LDPE	330	-115	260
PA	260	50	100
PET	250	70	100
ABS		110	85
PS		90	70
PMMA		100	85
PC		150	246
PVC		90	71

(Sumber : Budiyanoro, 2010)

2.2 Pirolisis

Pirolisis atau perengkahan termal (*cracking*) merupakan proses yang melibatkan degradasi termal molekul polimer rantai panjang menjadi molekul-molekul kecil dan kurang kompleks. Proses tersebut terjadi tanpa oksigen pada peningkatan tekanan dan temperature yang tinggi dan dalam waktu yang singkat (Vijayakumar dan Sebastian, 2018). Produk utama yang dihasilkan pada proses pirolisis yaitu arang (*char*), minyak, dan gas. Arang yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai bahan bakar maupun karbon aktif. Minyak yang diperoleh dari proses pirolisis dimanfaatkan sebagai zat aditif ataupun campuran pada bahan bakar. Kemudian gas dihasilkan dapat dibakar langsung ataupun dapat digunakan kembali untuk mengkompensasi kebutuhan energi pada pabrik pirolisis karena bahan bakar gas memiliki nilai kalor yang cukup besar (Iswadi D dkk, 2017). Jenis-jenis plastik yang umum digunakan pada proses pirolisis antara lain plastic PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, dan PS dengan jumlah produk hasil yang berbeda-beda (Vijayakumar dan Sebastian, 2018).

Proses pirolisis atau proses dekomposisi termal ini terjadi pada suhu sekitar 500-800°C. Sampah plastik kemudian melebur pada temperatur tersebut dan menghasilkan gas. Proses tersebut mengakibatkan terpotongnya rantai panjang hidrokarbon menjadi rantai yang tidak panjang. Kemudian akan melewati proses pendinginan yang dihasilkan agar gas terkondensasi dan menghasilkan minyak. Minyak yang diperoleh dari proses kondensasi kemudian menjadi bahan bakar bensin ataupun bahan bakar diesel. Proses pirolisis meliputi 2 unsur penting yakni reaktor yang berfungsi untuk tempat pembakaran sampah plastik hingga menjadi gas, dan kondensoryang berfungsi untuk tempat kondensasi gas. Proses pembakaran dan pendinginan ini sangat penting guna memperoleh bahan bakar yang berkualitas (Yasa dan Siregar, 2023).

2.3 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan transfer energi dari satu tempat ke tempat lain karena suhu yang berbeda antara tempat tersebut dari media dengan temperatur yang tinggi ke media yang bertemperatur lebih rendah (Supu dkk, 2016). Perpindahan panas adalah bukti dari hukum termodinamika 1 mengenai energi yang tidak dapat diciptakan dan dihancurkan. Energi hanya dapat berpindah dan mengalami perubahan dari bentuk satu ke bentuk yang lain.

Perpindahan panas berlangsung dari media yang lebih panas ke media yang lebih dingin. Jika beberapa objek berada berdekatan satu sama lain dan memiliki perbedaan temperatur, maka objek yang lebih panas berubah menjadi dingin kemudian objek yang lebih dingin akan menjadi lebih panas hingga tercapainya keseimbangan temperatur (Wahyono dan Ilyas Rochani, 2019). Perpindahan panas memiliki 3 macam mekanisme yakni konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.3.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi yaitu transfer kalor yang berlangsung antara partikel yang memiliki energi tinggi ke partikel yang memiliki kelurangan energi yaitu saat keduanya bertemu dalam keadaan *steady*. Proses konduksi dapat pula berlangsung pada zat cair dan gas. Contohnya ketika memanaskan ujung besi dan bagian ujung lainnya disentuh akibatnya seiring waktu ujung besi yang disentuh akan terasa panas. Laju perpindahan panas yang terjadi pada proses konduksi memiliki kesesuaian dengan formula dibawah ini.

$$Q_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (1)$$

Dimana

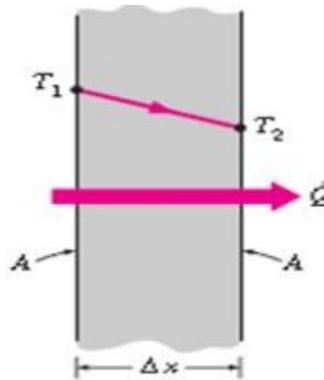
Q_{cond} = Laju perpindahan panas (W)

K = Konduktivitas termal (W/m. °C)

A = Luas permukaan (m²)

$\Delta T/\Delta x$ = Gradien suhu

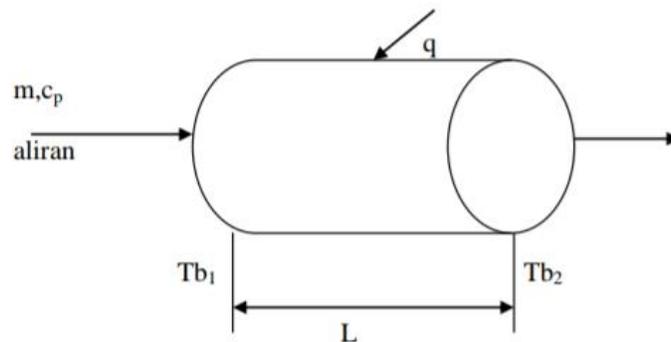
Konduktivitas termal menggambarkan kemampuan suatu bahan dalam menghantarkan panas. Nilai konduktivitas termal menentukan laju perpindahan panas dalam material, di mana semakin tinggi nilai konduktivitas termal, semakin cepat panas bergerak melalui bahan tersebut. Meskipun konduktivitas termal cenderung sedikit meningkat seiring kenaikan suhu, perubahan ini umumnya kecil dan sering diabaikan dalam analisis praktis. Material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti logam, memfasilitasi perpindahan panas yang efisien, sedangkan material dengan konduktivitas rendah bertindak sebagai isolator, membatasi aliran panas.. Gambar 2.1 berikut menunjukkan contoh perpindahan panas secara konduksi.



Gambar 2.1 Perpindahan panas konduksi (Sulung S dkk, 2019)

2.3.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi berlangsung saat panas berpindah dari tempat yang suhunya lebih tinggi ke tempat yang suhunya lebih dingin melalui gerakan, aliran, atau pencampuran. Beberapa contohnya adalah radiator mobil yang kehilangan panas dan juga pendinginan pada secangkir kopi. Terdapat 2 jenis perpindahan panas secara konveksi berdasarkan cara aliran digerakkan, yaitu konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Konveksi bebas terjadi ketika perbedaan suhu menyebabkan variasi kerapatan fluida, sehingga fluida bergerak secara alami tanpa bantuan gaya eksternal. Sebaliknya, konveksi paksa terjadi ketika gaya eksternal, seperti pompa atau kipas, mendorong fluida bergerak melintasi permukaan, mempercepat perpindahan panas. Kedua mekanisme ini memainkan peran penting dalam pengaturan aliran panas pada berbagai sistem teknik. Gambar 2.2 berikut menunjukkan contoh perpindahan panas konveksi.



Gambar 2.2 Perpindahan panas konveksi (J.P. Holman, 1986)

Berikut persamaan untuk menentukan nilai laju perpindahan panas konveksi berikut ini.

$$Q_{conv} = hA (T_w - T_{\infty}) \quad (2)$$

Dimana

Q_{conv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = Koefisien konveksi ($W/m^2\text{ }^{\circ}C$)

T_w = Temperatur permukaan ($^{\circ}C$)

T_{∞} = Temperatur lingkungan ($^{\circ}C$)

Tanda (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu bernilai positif (+).

2.3.3 Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah memindahkan panas melalui pancaran gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang tertentu. Proses ini tidak memerlukan medium, sehingga radiasi memungkinkan perpindahan panas terjadi bahkan di ruang hampa. Akibatnya, energi panas dapat berpindah secara langsung antara dua benda tanpa memerlukan kontak fisik atau perantara fluida.. Radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda karena suhunya disebut sebagai radiasi termal.

Radiasi memindahkan panas tanpa memerlukan medium, berbeda dengan konduksi dan konveksi yang bergantung pada zat perantara. Sinar matahari yang mencapai permukaan bumi merupakan contoh jelas dari perpindahan panas radiasi, di mana gelombang elektromagnetik membawa energi panas secara langsung tanpa adanya medium di antara keduanya. Pembahasan termodinamika menunjukkan bahwa radiator (penyiar) ideal, atau benda hitam (*black body*), memancarkan energi dengan pangkat empat temperatur absolut benda itu dan berbanding lurus dengan luas penampang, sehingga diperoleh persamaan berikut (Lubis dan Sudirman Lubis, 2022).

$$Q = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3)$$

Dimana :

Q = kalor yang dipancarkan setiap detik (J/s)

e = emisivitas benda ($0 < e < 1$)

σ = Konstanta Stefan-Bolzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ watt}/\text{m}^2\text{K}^4$)

A = luas permukaan (m^2)

T = suhu permukaan benda (K)

2.4 Kondensasi

Kondensasi adalah perubahan fisik pada uap ketika berubah dari fase gas menjadi fase cair. Proses ini berlangsung saat suhu gas menurun dan mengakibatkan pembentukan molekul atau atom lembab dalam volume udara antara fase gas dan penampang fluida ataupun zat padat (Yohanes E dkk, 2014). Kondensasi terjadi ketika uap menjadi dingin dan bertransformasi menjadi cairan. Proses ini dapat dipercepat dengan menurunkan suhu uap hingga mencapai titik embun atau dengan menerapkan tekanan, yang memaksa uap berubah menjadi cairan. Kombinasi antara pendinginan dan peningkatan tekanan juga efektif dalam memicu kondensasi.. Suhu optimum untuk pendinginan gas hasil pirolisis antara $10^\circ\text{-}30^\circ\text{ C}$.

Proses terjadinya kondensasi ialah kompresi atau penurunan suhu yang dapat tercapai dengan tekanan maksimum dan temperatur dibawah kritis. Proses kondensasi berlangsung ketika uap didinginkan dan bertransformasi menjadi cairan. Selain itu, kondensasi juga dapat terjadi jika uap dikompresi, yaitu dengan meningkatkan tekanan, sehingga menyebabkan uap berubah menjadi cair.

Kombinasi antara penurunan suhu dan kompresi juga dapat mendorong proses kondensasi ini. Kondensasi yaitu transformasi gas menjadi bentuk cairan yang terjadi karena perbedaan suhu. Suhu pengembunan akan berubah sesuai dengan tekanan uap yang muncul. Oleh karena itu, suhu kondensasi diartikan sebagai suhu dimana kejenuhan tercapai saat udara didinginkan pada tekanan konstan tanpa tambahan kelembaban. Terdapat 2 cara untuk mencapai pengembunan atau kondensasi sebagai berikut.

- 1) Menurunkan suhu sehingga mengurangi kemampuan uap air
- 2) Meningkatkan kuantitas uap air
- 3) Kondensasi terjadi ketika system melepaskan panas yang mengakibatkan (uap) berubah menjadi bentuk cairan (*liquid*) (Prasetya DR, 2019).

2.5 Kondensor

Kondensor mengubah zat pendingin dari fase gas menjadi fase cair dengan melepaskan panasnya melalui permukaan rusuk-rusuk kondensor. Zat pendingin yang berasal dari kompresor pada suhu dan tekanan tinggi melepaskan panas ke fluida pendingin, seperti air. Akibat pelepasan panas ini, gas pendingin didinginkan hingga mencapai kondisi jenuh, dan kemudian mengalami kondensasi menjadi cairan. (Ihsan S, 2018). Pada dasarnya, kondensor adalah APK yang berperan dalam mengubah fase refrigerant dari wujud uap menjadi wujud cair. Umumnya alat penukar kalor memiliki 2 fungsi yaitu : kondensor menghilangkan panas yang diserap oleh refrigerant dari dalam evaporator dan mengubah zat pendingin dari wujud uap menjadi wujud cair (Atoni dan Kisman H. Mahmud, 2015).

2.5.1 Jenis – Jenis Kondensor Berdasarkan Konstruksinya

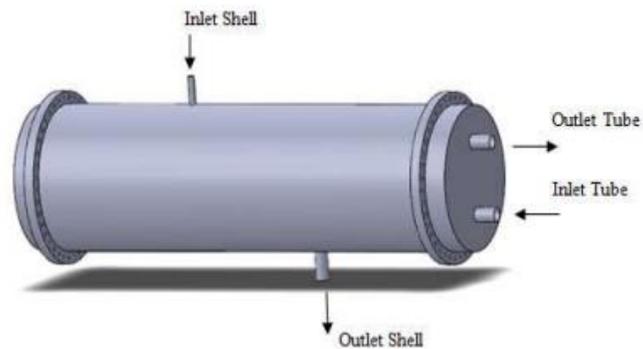
Jenis kondensor berdasarkan konstruksinya terdiri atas 3 jenis yaitu *Shell and tube condenser, shell and coil condenser, tube and tube condenser.*

2.5.1.1 *Shell and Tube Condenser*

Alat penukar kalor jenis *shell and tube* adalah alat penukar kalor yang umum digunakan dalam berbagai jenis industri karena paling sederhana digunakan jenis alat penukar kalor lainnya. Ini disebabkan oleh beberapa alasan berikut :

- a. Kondensor dirancang dengan tabung dan cangkang yang terletak secara konsentrik, di mana tabung berada di dalam cangkang.
- b. Kondensor ini mampu beroperasi pada tekanan dan suhu tinggi.
- c. Alat ini dapat berfungsi dengan baik meskipun terdapat perbedaan volume aliran yang besar
- d. Tersedia dalam berbagai jenis bahan atau material.
- e. Konstruksi kondensor dirancang kuat dan aman untuk menjamin keselamatan operasional.
- f. Kondensor ini beroperasi secara mekanis dengan baik dan handal, menawarkan tingkat keandalan yang tinggi.

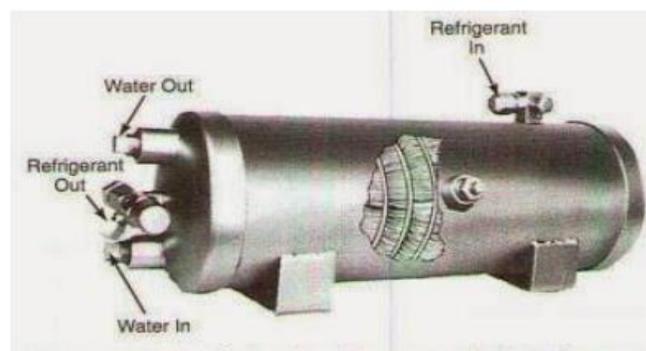
Pada tipe alat penukar kalor ini, fluida panas mengalir di dalam tabung, sementara fluida dingin mengalir di luar tabung dalam cangkang. Alat ini disebut penukar panas satu lintas karena kedua aliran fluida hanya melewati satu kali. Tipe aliran dalam penukar kalor ini adalah aliran searah (*parallel flow*) jika kedua fluida bergerak dalam arah yang sama, dan aliran lawan (*counter flow*) jika keduanya bergerak dalam arah yang berlawanan. (Ihsan S, 2015). Gambar 2.3 berikut menunjukkan gambar kondensor tipe *shell and tube*.



Gambar 2.3 Kondensor *shell and tube* (Ihsan S, 2018)

2.5.1.2 *Shell and Coil Condenser*

Baik tabung pipa maupun tanpa sirip, kondensor tabung dan koil tembaga biasanya digunakan untuk unit pendingin yang menggunakan freon pendingin berkapasitas lebih kecil, seperti penyegar udara dan pendingin air. Jenis kondensor ini biasanya dibuat dengan tabung pipa, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.. Pipa tersebut murah dan mudah dibuat. Aliran air di kondensor tabung dan koil mengalir melalui koil pipa pendingin. Di sini, kerak dan endapan pipa dapat dibersihkan menggunakan *detergent*. Gambar 2.4 berikut menunjukkan gambar kondensor *shell and coil*.



Gambar 2.4 Kondensor *shell and coil* (Ihsan S, 2015)

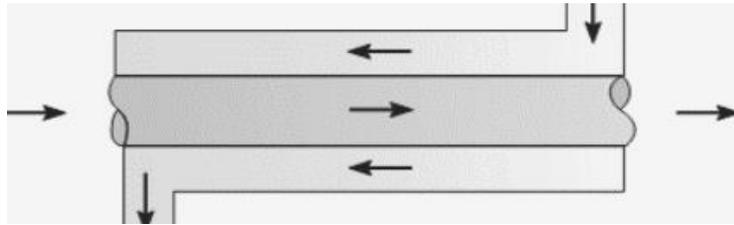
Kondensor *tube and coil* memiliki fitur berikut :

- Harganya murah karena mudah dibuat dan dipasang.
- Kompak karena posisinya yang tegak (vertical), sehingga mudah dipasang.
- Tidak perlu mengganti pipa pendingin, hanya membersihkannya dengan detergen.

2.5.1.3 Tube and Tube / Double Pipe Condenser

Alat penukar kalor ganda, atau pipa ganda, terdiri dari dua pipa yang dilas menjadi satu atau terhubung melalui kotak penyekat. Pada alat ini, fluida pertama mengalir di dalam pipa, sementara fluida kedua mengalir di ruang annulus yang berada antara pipa dalam dan pipa luar.. Penukar kalor pipa ganda dapat bekerja pada skala kecil, biasanya labolatorium, dengan laju aliran fluida yang rendah, temperatur sekitar 600°C , dan tekanan operasi yang lebih besar dari 300 atm pada annulus dan 1400 atm pada pipa. Alat penukar kalor pipa ganda memiliki banyak keuntungan, termasuk konstruksi yang mudah, pemeliharaan yang mudah, dan kemampuan untuk bekerja pada tekanan tinggi (Maulani dan Hendra Firdaus, 2021).

Beberapa faktor, seperti nilai kemampuan mentransfer kalor dari media antara fluida panas dan dingin, luas permukaan kontak antara fluida panas dan dingin, dan perbedaan suhu antara keduanya, memengaruhi kinerja alat penukar kalor dua pipa.. Selain itu, aliran fluida searah atau lawan arah memengaruhi kinerja penukar kalor tabung ganda (Markus dan Faldian. 2019). Gambar 2.5 menunjukkan gambar kondensor tipe *double pipe*.



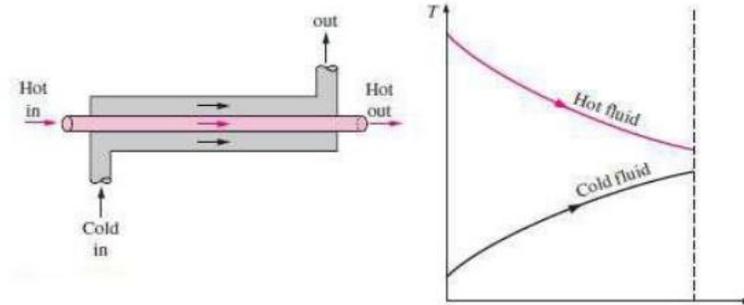
Gambar 2.5 Kondensor tipe *double pipe* (Markus dan Faldian, 2019)

2.5.2 Jenis – Jenis Kondensor Berdasarkan Arah Aliran Fluida

Jenis- jenis kondensor berdasarkan arah aliran fluida terdiri dari jenis aliran searah (*parallel*), aliran berlawanan (*counter current*), dan aliran silang (*crossflow*).

2.5.2.1 Kondensor Tipe Aliran Searah (*Parallel Flow*)

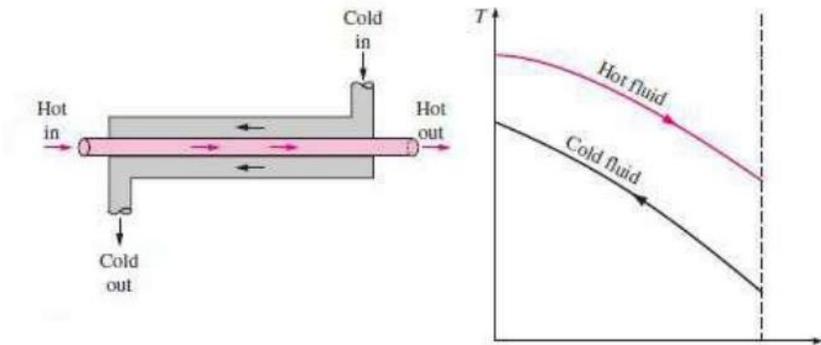
Kondensor tipe aliran searah atau aliran paralel, berfungsi sebagai alat penukar panas di mana zat cair panas dan dingin mengalir dalam arah yang sama saat masuk dan keluar. (Cengel, 2003). Pada tipe ini, suhu cairan yang memberikan panas selalu lebih tinggi daripada suhu cairan yang menerima panas saat memasuki dan meninggalkan kondensor. Akibatnya, suhu cairan yang menerima panas dan suhu cairan yang memberikan panas tidak akan sama saat keluar dari kondensor. Kondensor jenis ini adalah alat penukar panas yang paling tidak efisien. Gambar 2.6 menunjukkan kondensor tipe searah (*parallel flow*).



Gambar 2.6 Kondensor tipe *parallel flow* (Cengel, 2003 : 668)

2.5.2.2 Kondensor Tipe Aliran Berlawanan (*Counter Flow*)

Kondensor tipe aliran berlawanan juga dikenal sebagai kondensor *counter flow* memasuki penukar panas dari ujung yang berbeda dan mengalir dalam arah yang berlawanan (Cengel, 2003: 668). Dalam jenis kondensor ini, suhu fluida yang menerima panas saat keluar dari kondensor mungkin lebih tinggi daripada suhu fluida yang memberikan panas saat meninggalkan kondensor. Dalam situasi yang ideal, ketika luas penampang perpindahan panas tak terhingga dan tidak ada kehilangan panas ke lingkungan, maka suhu cairan yang menerima panas saat keluar dari kondensor dapat sama dengan suhu cairan yang memberikan panas saat masuk kondensor. Dengan teori ini, jenis kondensor dengan arah yang berlawanan adalah yang paling efektif (Haryadi S, 2015). Gambar 2.7 menunjukkan kondensor tipe *counter flow*.



Gambar 2.7 Kondensor tipe *counter flow* (Cengel, 2003: 668)

2.5.2.3 Kondensor Tipe Aliran Silang (*Cross Flow*)

Pada jenis alat penukar panas ini, perpindahan panas terjadi antara dua fluida yang saling tegak lurus, yang dikenal sebagai kondensor tipe aliran lintasan (Cengel, 2003: 669). Contoh umum penggunaannya adalah radiator mobil, di mana aliran air pendingin dari mesin bertukar energi dengan udara di lingkungan. Dari segi efektivitas pertukaran energi, alat penukar panas ini berada di antara dua jenis yang telah disebutkan sebelumnya. Ketika udara mengalir melalui radiator mobil, suhunya rata-rata hampir sama dengan suhu udara lingkungan. Suhu udara kemudian meningkat dengan laju yang berbeda pada berbagai posisi sebelum bercampur kembali setelah keluar dari radiator, mencapai suhu yang hampir seragam.

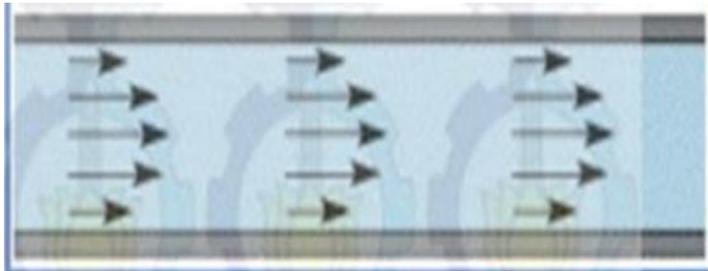
2.6 Aliran Fluida

2.6.1 Jenis Aliran Fluida

Fluida adalah substansi yang dapat mengalir, baik dalam bentuk cairan maupun gas. Karakteristik aliran fluida ditentukan menggunakan nilai bilangan Reynolds (Re). Bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos (Praama D dkk, 2022). Nilai bilangan Reynolds (Re) digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik aliran, apakah aliran tersebut laminar, transisi, atau turbulen. (Jalaluddin dkk, 2019). Faktor-faktor yang memengaruhi nilai bilangan Reynold pada suatu aliran meliputi kecepatan aliran, densitas fluida, viskositas, dan panjang karakteristik saluran aliran. Terdapat tiga jenis aliran fluida yaitu aliran laminar dengan $Re < 2300$, aliran transisi dengan $2300 < Re < 4000$, dan aliran turbulen dengan $Re > 4000$.

2.6.1.1 Aliran Laminar

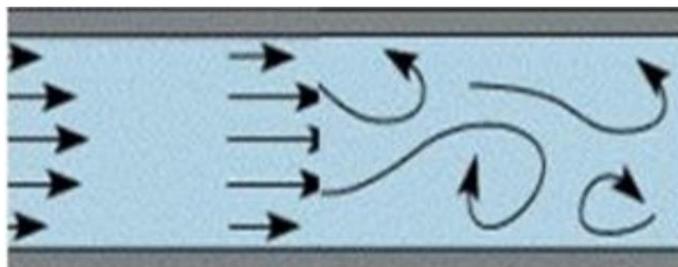
Aliran laminar adalah aliran di mana gerak partikel fluida sejajar dengan garis arusnya. Partikel fluida bergerak sepanjang lintasan yang halus, dan lancer pada satu lapisan meluncur satu arah pada lapisan yang bersebelahan dengannya. Salah satu faktor yang memainkan peran penting dalam pembentukan aliran laminar adalah viskositas fluida. Aliran jenis laminar bersifat *steady* yang berarti debit alirannya tetap di seluruh aliran atau debit alirannya tidak berubah seiring waktu (Simanjuntak HFP dkk, 2017). Aliran laminar ini memiliki bilangan Reynold sebesar < 2000 . Gambar 2.8 menunjukkan gambar arah laminar.



Gambar 2.8 Aliran Laminar (Simanjuntak HFP dkk, 2017)

2.6.1.2 Aliran Transisi

Aliran transisi adalah aliran yang terjadi ketika partikel fluida mengalami perubahan dari kondisi seragam ke kondisi acak (Simanjuntak HFP dkk, 2017). Aliran transisi juga merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Aliran transisi memiliki bilangan Reynold antara 2000-4000. Gambar 2.9 berikut menunjukkan aral aliran transisi.

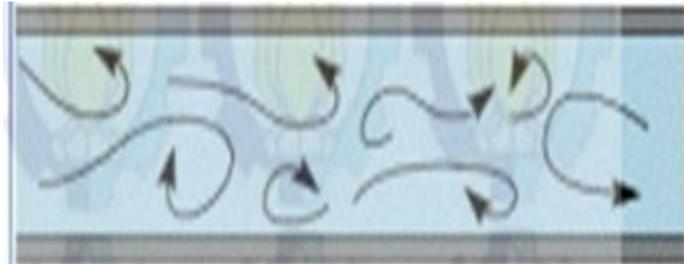


Gambar 2.9 Aliran Transisi (Simanjuntak HFP dkk, 2017)

2.6.1.3 Aliran Turbulen

Aliran dengan kecepatan relatif tinggi menghasilkan kondisi di mana fluida tidak mengalir dengan lancar, disebabkan oleh lintasan gerak partikel yang tidak teratur satu sama lain. Sebagai hasilnya, aliran turbulen ditandai oleh ketidakberaturan dalam lintasan fluida, kecepatan fluida yang tinggi, panjang skala yang

besar, serta viskositas yang rendah. (Simanjuntak HFP dkk, 2017). Aliran turbulen memiliki bilangan Reynold lebih besar dari 4000. Gambar 2.10 menunjukkan gambar aliran turbulen.



Gambar 2.10 Aliran Turbulen (Simanjuntak HFP dkk, 2017)

2.7 Efektivitas Perpindahan Panas

Perbandingan antara laju perpindahan panas sebenarnya dan laju perpindahan panas maksimum yang dapat terjadi dikenal sebagai efektivitas perpindahan panas. Laju aliran massa fluida panas dan dingin, suhu fluida, konstruksi pipa penukar panas, dan faktor pengotoran pipa adalah semua faktor yang harus dipertimbangkan untuk mengetahui seberapa efektif perpindahan panas. Pertukaran panas terjadi melalui kontak baik antara fluida dan dinding pemisah atau keduanya yang bercampur langsung (Rahmadi J dkk, 2023).

Dalam proses perpindahan panas, Untuk mengetahui seberapa banyak panas yang dipindahkan oleh fluida dalam alat penukar panas, menghitung nilai perbedaan suhu rata-rata antara fluida panas dan dingin saat masuk dan keluar. Dua fluida dalam alat penukar panas masuk bersama, bergerak searah, dan keluar bersama pula dalam aliran searah. Dalam aliran berlawanan, dua fluida bergerak ke arah yang berlawanan, dan dalam aliran menyilang, dua fluida saling melintasi atau bergerak tegak lurus.

Jumlah energi yang dilepaskan atau diterima oleh fluida panas atau dingin dapat digunakan untuk menentukan laju perpindahan panas. Berikut adalah rumus untuk laju perpindahan panas (Incropera et.al 6th edition, 2006).

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (4)$$

Keterangan :

\dot{Q} = laju perpindahan panas (W)

\dot{m} = laju aliran fluida (kg/s)

C_p = kapasitas panas fluida spesifik (J/Kg.K)

ΔT = perubahan suhu (K atau °C)

Jika temperatur memiliki perbedaan yang besar maka perhitungan laju perpindahan panas menggunakan entalpi sebagai berikut:

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_{in} - h_{out}) \quad (5)$$

Keterangan :

\dot{Q} = laju perpindahan panas (W)

\dot{m} = laju aliran fluida (kg/s)

h_{in} = entalpi spesifik fluida masuk (J/Kg)

h_{out} = entalpi spesifik fluida keluar (J/Kg)

sehingga nilai efektivitas perpindahan panas dapat dihitung dengan formula sebagai berikut (Cengel YA 3rd edition. 2003) :

$$\varepsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{max}} \times 100\% \quad (6)$$

Untuk
$$Q_{max} = C_{min} (Th_i - Tc_i) \quad (7)$$

Dengan C_{min} diperoleh dari nilai minimum dari C_h dan C_c

Dimana

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{ph} \quad (8)$$

$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \quad (9)$$

Keterangan :

ε = efektivitas perpindahan panas

Q_{act} = laju perpindahan panas (kW)

Q_{max} = laju perpindahan panas maksimal (kW)

C_h, C_c = kapasitas panas (kJ/Kg . °C)

C_{min} = nilai terkecil antara C_h dan C_c

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu pelaksanaan penelitian yang direncanakan oleh penulis adalah sebagai berikut :

3.1.1 Tempat Penelitian

Adapun tempat penelitian ini dilaksanakan di TPST (Tempat Pembuangan Sampah Terpadu) Universitas Lampung.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini diharapkan selesai dari bulan Juli 2023 sampai dengan bulan Oktober 2023.

3.2 Alat dan Bahan

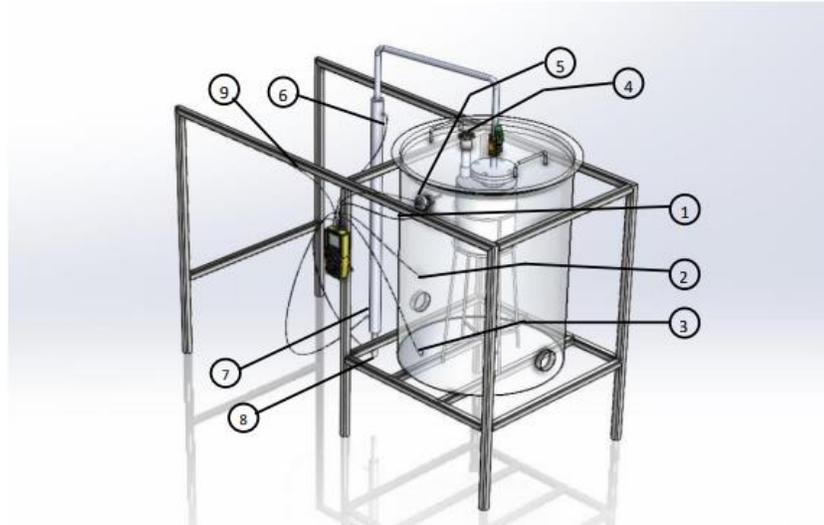
Alat dan bahan yang digunakan penulis dalam penelitian ini dilaksanakan terdiri dari alat utama dan alat pendukung lainnya yaitu sebagai berikut :

3.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Mesin Pirolisis Tipe *Fixed Bed*

Mesin pirolisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah pirolisis reaktor tipe *fixed bed* seperti pada gambar 3.1 berikut.



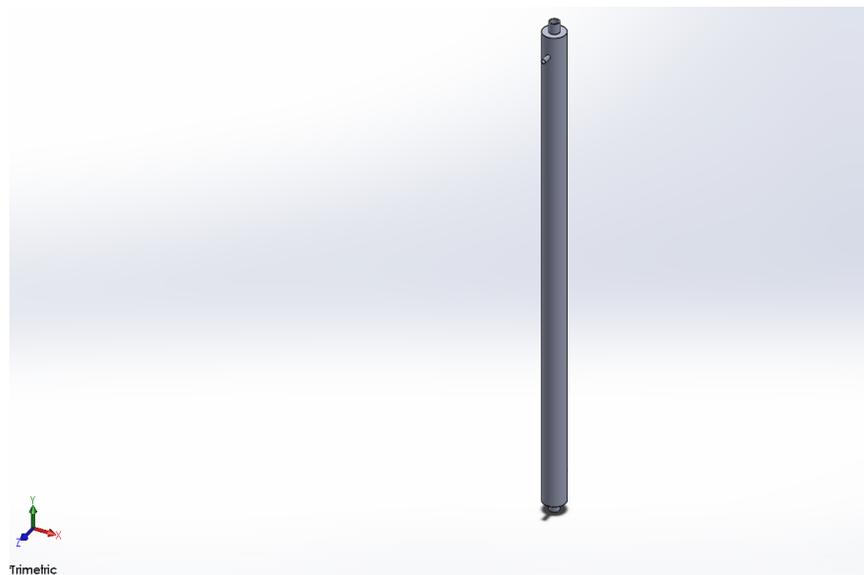
Gambar 3.1 Reaktor Pirolisis Tipe *Fixed Bed*

Keterangan gambar:

1. Dinding tungku bagian atas
2. Dinding tungku bagian tengah
3. Dinding tungku bagian bawah
4. Temperatur sampel
5. Temperatur api
6. Temperatur *flow inlet* kondensor
7. Temperatur *flow outlet* kondenser
8. Temperatur *output*
9. Temperatur lingkungan

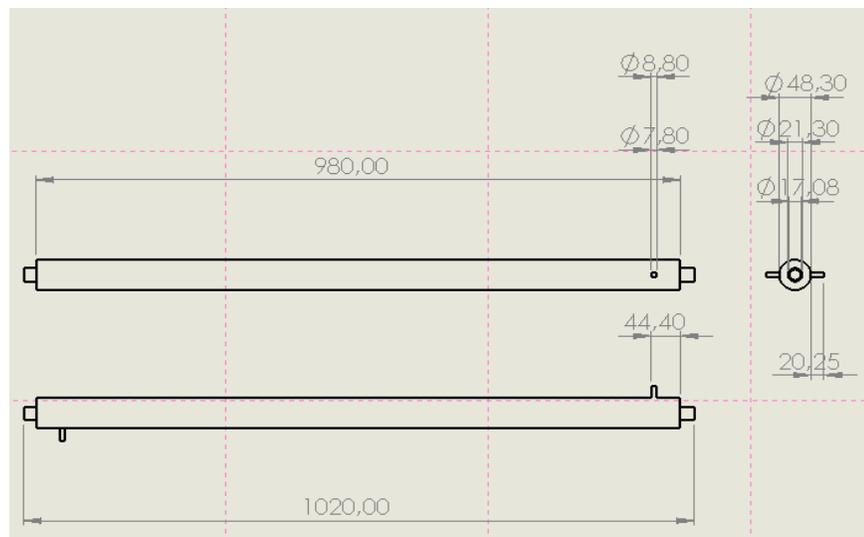
b. Kondensor Tipe Pipa Ganda

Kondensor tipe pipa ganda ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Double Pipe Heat Exchanger

Detail gambar *double pipe heat exchanger* ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Detail gambar *double pipe heat exchanger*

Tabel 3.1 Spesifikasi *double pipe heat exchanger*

Pipa luar	
Diameter dalam pipa	21,30 mm
Diameter luar pipa	48,30 mm
Tinggi pipa luar	980,00 mm
Diameter dalam <i>flow inlet</i> dan <i>flow outlet</i>	7,80 mm
Diameter luar <i>flow inlet</i> dan <i>flow outlet</i>	8,80 mm
Panjang <i>flow inlet</i> dan <i>flow outlet</i>	20,25 mm
Pipa dalam	
Diameter dalam pipa	17,08 mm
Diameter luar pipa	21,30 mm
Tinggi pipa dalam	1020 mm
Konstruksi kondensor	<i>Stainless Steel</i>
Temperatur	<i>Thermocouple Type K</i> <i>Thermometer</i>
Waktu	<i>Stopwatch</i>
Sistem sirkulasi air	<i>Water pump</i>

c. 12 Channel Temperatur Recorder Datalogger

Temperatur recorder datalogger berfungsi sebagai alat ukur suhu pada reaktor serta dapat merekam data temperatur pada saat pengujian dilakukan selama 1 sampai 3600 detik dengan data keluaran secara otomatis berupa format *excel*. Alat instrument ini dapat terhubung dengan 12 *channel thermocouple probe* tipe

J/T/E/R/S dengan resolusi $0,1^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}/$, $0,1^{\circ}\text{F}/1^{\circ}\text{F}$. Gambar 3.4 menunjukkan gambar 12 Channel Temperatur Recorder Datalogger.



Gambar 3.4 12 Channel Temperatur Recorder Datalogger

d. Gas LPG

Bahan bakar yang digunakan adalah gas LPG. Gas LPG yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.5 dibawah ini.



Gambar 3.5 Gas LPG

e. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk mempermudah untuk menentukan berat dari sampah plastik yang akan dipanaskan dalam reaktor untuk mempermudah teoritis seperti pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Timbangan Digital

f. *Water pump*

Water pump digunakan untuk mengalirkan air ke dalam sistem pipa kondensor untuk mendinginkan uap agar menjadi bentuk cair (*bio-oil*) yang ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 *Water Pump*

g. Kunci Pas Ring

Kunci pas ring berfungsi untuk bongkar pasang bagian reaktor dan pipa kondensor sistem pirolisis ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut ini.



Gambar 3.8 Kunci pipa, kunci pas, kunci ring

3.2.2 Bahan

Bahan yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu sampah plastik jenis PET (*Polyethylene*), PP (*Polypropylene*), dan PS (*Polystyrene*) yang sudah dibersihkan dan dikeringkan kemudian dicacah dan dihaluskan seperti pada gambar 3.9, gambar 3.10, dan gambar 3.11 untuk kemudian dimasukkan ke dalam reaktor.



Gambar 3.9 Plastik PP yang sudah dicacah



Gambar 3.10 Plastik PET yang sudah dicacah



Gambar 3.11 Plastik PS yang sudah dihaluskan

3.3 Skema Penelitian

Subtansi dari penelitian ini adalah melakukan analisa terkait dengan pengaruh arah fluida pendingin pada hasil proses pembakaran dari produk pirolisis dan untuk mengetahui efektifitas perpindahan panas pada kondensor pada proses pirolisis. Beberapa tahapan yang dilalui pada penelitian ini sebagai berikut.

3.3.1 Studi Literatur

Langkah pertama adalah studi literatur dari beberapa referensi, meliputi:

- a. Studi tentang potensi energi dari sampah plastik dan pemanfaatannya
- b. Studi tentang pirolisis, jenis-jenis reaktor, jenis-jenis kondensor, jenis aliran pada kondensor.
- c. Studi tentang laju perpindahan panas dan efektifitas perpindahan panas.
- d. Studi produk hasil pirolisis yang telah dilakukan sebelumnya
- e. Studi tentang penelitian pirolisis yang sudah dilaksanakan sebelumnya.

3.3.2 Persiapan

- a. Persiapan eksperimen *set up* seperti, persiapan alat-alat utama reactor dan kondensor.
- b. Persiapan alat pendukung seperti alat ukur temperatur (*thermorecorder*, *thermometer*, dan *thermocouple*), LPG, pompa akuarium, wadah air dan lain-lain.
- c. Persiapan bahan baku, yaitu plastik PET, PP, dan PS dicacah sampai ukuran yang ditentukan.
- d. Pengujian bahan baku plastik dengan variasi temperatur dan waktu tinggal dengan menggunakan pirolisis kontinu.

3.3.3 Pelaksanaan

- a. Memasukkan bahan baku sampah plastik kedalam reaktor kecil yang sudah ditentukan beratnya dengan PP sebanyak 1 kg, PET 1 kg, dan PS 1 gram.
- b. Memasukkan reaktor kedalam tungku pembakaran atau biasa disebut reaktor ruang proses pembakaran.
- c. Menghubungkan reaktor kecil dengan pipa penghantar pada kondensor
- d. Menghubungkan *thermocouple type k* yang ditempelkan pada reaktor dan kondensor ke alat *temperature data logger* untuk merekam temperatur.
- e. Melakukan uji coba awal untuk menentukan kondisi operasi pirolisis yang optimal, seperti temperatur, waktu tinggal, dan jenis bahan pendukung lainnya.
- f. Meletakkan LPG diatas timbangan digital untuk mengukur energi yang terpakai dalam setiap waktu.

- g. Memanaskan reaktor pirolisis hingga mencapai suhu yang diperlukan yaitu berkisar 450-550°C, dan biarkan sampah plastik mengalami pirolisis selama waktu yang telah ditentukan.
- h. Mengumpulkan produk pirolisis yang dihasilkan dari reaktor pirolisis, seperti gas, minyak, atau arang.

3.3.4 Analisis *Heat Exchanger*

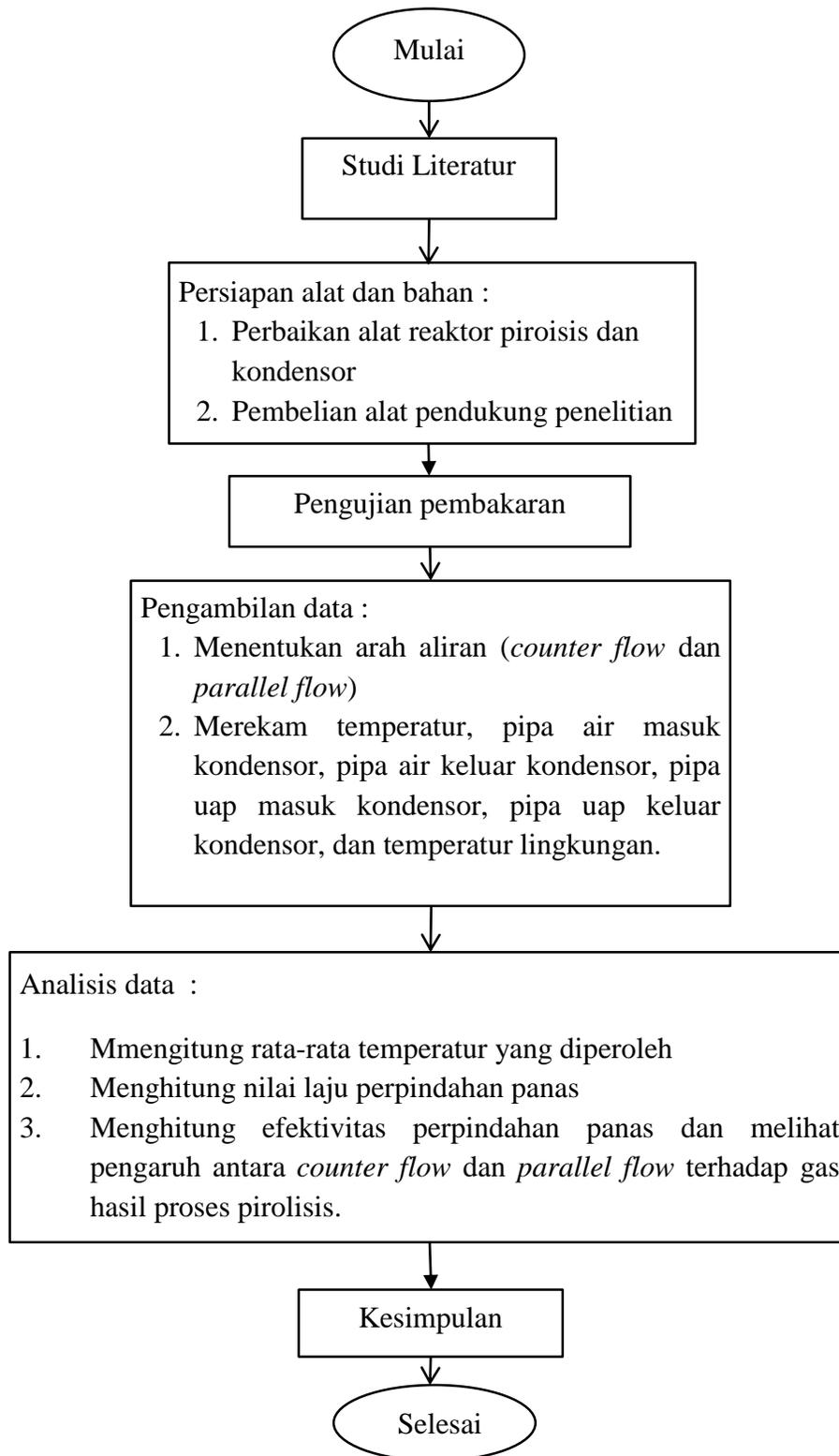
- a. Mengetahui temperatur uap masuk, temperatur uap keluar, temperatur *flow inlet*, dan temperatur *flow outlet* kondensor pada saat proses pembakaran.
- b. Mengatur arah aliran *counter flow* dan *parallel flow* pada setiap pengujian.

3.3.5 Analisis Hasil Pengujian

- a. Setelah data terkumpul, tahapan berikutnya adalah menghitung rata-rata suhu pada aliran *counter flow* dan *parallel flow*.
- b. Setelah menghitung nilai rata-rata selanjutnya adalah menghitung laju perpindahan panas dan efektivitas perpindahan panas pada aliran *counter flow* dan *parallel flow*.
- c. Melihat pengaruh efektivitas antara *counter flow* dan *parallel flow* terhadap pendinginan gas hasil proses pirolisis sampah plastik.

3.4 Alur Tahapan Penelitian

Alur tahapan penelitian ini disampaikan dalam bentuk flowchart yang ditunjukkan pada Gambar 3.12 berikut.



Gambar 3.12 Alur tahapan penelitian

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Proses pirolisis yang dilakukan menghasilkan nilai laju perpindahan panas yang berbeda pada tiap jenis aliran dan tiap jenis plastik. Pada jenis plastik PP aliran berlawanan menghasilkan nilai laju perpindahan panas sebesar 27,94 kW sedangkan pada aliran searah menghasilkan nilai laju perpindahan panas sebesar 27,52 kW. Pada jenis plastik PS aliran berlawanan menghasilkan nilai laju perpindahan panas sebesar 27,75 kW dan pada aliran searah menghasilkan nilai laju perpindahan panas sebesar 27,73 kW.
2. Efektivitas perpindahan panas yang dihasilkan pada proses pirolisis untuk aliran berlawanan lebih baik daripada aliran searah pada tiap jenis plastik. Pada jenis plastik PP aliran berlawanan menghasilkan efektivitas sebesar 97,67% dan aliran searah menghasilkan efektivitas sebesar 96,48%. Sedangkan plastik jenis PS aliran berlawanan menghasilkan efektivitas sebesar 98,57% dan aliran searah menghasilkan efektivitas sebesar 98,52%.
3. Volume minyak yang dihasilkan pada proses pirolisis pada 1 kg plastik PP aliran berlawanan sebanyak 332 ml dan aliran searah sebanyak 325 ml. sedangkan pada 100 gram plastik PS aliran berlawanan menghasilkan minyak sebanyak 131 ml dan aliran searah sebanyak 111 ml.

5.2 Saran

Saran yang dapat diambil setelah memperhatikan dan melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menambahkan variasi debit aliran fluida agar dapat mengetahui apakah laju aliran fluida dapat mempengaruhi nilai efektivitas kondensor.
2. Perlu adanya modifikasi bentuk kondensor agar gas hasil pirolisis tidak ada yang terbuang dan dapat terkondensasi semakin optimal.
3. Oleh karena *counter flow* merupakan jenis aliran yang lebih efektif daripada *parallel flow*, untuk penelitian selanjutnya agar menggunakan jenis *counter flow* agar minyak yang dihasilkan bisa lebih banyak.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., & Anis, S. (2018). Pengaruh Debit Air Pendingin Dan Posisi Kondensor Terhadap Hasil Kondensasi Pirolisis Getah Pinus. *Saintekmol : Jurnal Sains dan Teknologi*, 16(1), 13-20.
- Atoni, & Kisman H. (2015). Pengaruh Variasi Temperatur Air Pendinginan Kondensor Terhadap Tekanan Pada Beban Tetap. *JISI: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 2(1), 1-8.
- Basu, P. (2010). Biomass Gassification and Pyrolysis : Practical Design and Theory. *United Kingdom : Academic Press*.
- Batidzirai, B., et.al. (2013). *Biomass Torrefaction Technology : Techno-Economic Status and Future Prospects*. Energy (Vol. 62), pages 196-214.
- Budiyantoro, C. (2010). Thermoplastik dalam Industri. *Teknika Media, Surakarta*.
- Cengel, Y. A. (2003). Heat Transfer A Peactical Approach (2nd ed.). New York : McGraw-Hill Companies, Inc. All.
- Damayanti, Z., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Analisis Karakteristik *Fuel* Pirolisis Sampah Plastik Berdasarkan Jenis Plastik Yang Digunakan. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 8(1), 26-33.
- Dewi, N. A., Prasetyo, T., & Roihatin, A. (2022). Analisis Perpindahan Panas Heat Exchanger 05 di PPSDM Migas Cepu. *In Prosiding Seminar Nasional NCIET*, 3(1), 31-40.

- Haryadi, S. (2015). Pengaruh Arah Aliran Air Pendingin Pada Kondensor Terhadap Hasil Pengembunan Proses Pirolisis Sampah Plastik. *Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang : Semarang.*
- Holman, J. P. (1986). Heat Transfer : Sixth Edition. Southern Methodist University.
- Ibrahim, M., Machmud, M. N., & Ali, M. (2022). Bahan Bakar Minyak Dari Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik. *Journal of Engineering and Science*, 1(1), 20-30.
- Ihsan, S. (2015). Optimasi Kondensor Shell and Tube Berpendingin Air Pada Sistem Refrigerasi NH₃. *AL ULUM: Jurnal Sains dan Teknologi*, 1(1).
- Ihsan, S. (2018). Analisis Bentuk Aliran Pada Kondensor Tipe Shell and Tube Menggunakan Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics). *Journal of Industrial Engineering and Operation Management*, 1(1).
- Ihsan, S. (2018). Planning A Condenser Type Concentric Tube Heat Exchanger As An Instrument For Testing And The Learning. *Prosiding SNTTM*, 208-211.
- Incropera, F. P. & Dewitt, D. P. (2006), *Fundamentals Of Heat Transfer*. 6th Edition. John Wiley & Sons
- Irfan, A. M. (2012). Analisis Perubahan Tekanan dan Temperatur Kondensor Menggunakan Refrigeran R-22 Pada AC 1 PK. *Jurnal Teknik Mesin Teknologi*, 15(1), 43-50.
- Iswadi, D., Nurisa, F., & Liastuti, E. (2017). Pemanfaatan Sampah Plastik LDPE dan PET Menjadi Bahan Bakar Minyak Dengan Proses Pirolisis. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia UNPAM*, 1(2), 1-9.
- Jariyanti, J., Tahir, R., B., & Sarajuddin, S. (2022). Pemanfaatan Limbah Plastik Botol Bekas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Energi Terbarukan. *Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Komunikasi*, 2(1), 12-18.

- Landi, T., & Ariyanto, A. (2017). Perancangan dan Uji Alat Pengolah Sampah Plastik Jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) Menjadi Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(1), 1-8.
- Lubis, F., & Lubis, S. (2022). Analisis Baffle Cut Pada Alat Penukar Kalor Shell and Tube Pada Susunan Tabung Segi Empat. *Jurnal MESIL (Machine Electro Civil)*, 3(1), 39-44.
- Markus, M., & Faldian, F. (2019). Analysis of Double Pipe Heat Exchanger Performance by Utilizing The Heat of Discharge Compressor Pipe. *EDUSAINTEK*, 3.
- Maulani, I. S., & Firdaus, H. (2021). Analisis Desain Rancang Bangun Alat Penukar Kalor Tipe Double Pipe Aliran Cocurrent dan Counter Flow. *Jurnal Industri Galuh*, 3(01), 43-48.
- Prasetya, DR. (2019). Pengaruh Suhu Kondensor Terhadap Produksi Minyak Cengkeh Dengan Aliran Rotary. *Skripsi. Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Nasional Malang : Malang*.
- Rahmadi, J., Fauzen, F., & Putra, M. J. S. (2023). Studi Komparatif Efektivitas Perpindahan Kalor dengan Pengaturan Laju Aliran Fluida Pendingin Heat Exchanger Jenis Plate Aliran Searah. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(1), 3500-3506.
- Reynei, R. (2019). Pengaruh Debit dan Arah Aliran Air Pendinginan Kondensor Tipe *Double Pipe* Terhadap Minyak Hasil Pirolisis Plastik *Polypropylene (Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya)*.
- Ridhuan, K., Irawan, D., & Inthiafawzi, R. (2019). Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 8(1). 69-78.

- Robiansyura, R., Gani, U. A., & Taufiqurrahman, M. (2021). Analisis Efektifitas Laju Perpindahan Panas Alat Penukar Kalor Tipe Double Pipe. *JTRAIN : Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, 2(2), 97-104.
- Senthilkumar, P., & Sankaranarayanan, G., (2015). Effect of Jatropha Methyl Ester on Waste Plastic Oil Fluided DI Diesel Engine. *Energy Institue*, 89(4), pp. 504-512.
- Sihabudin, R. (2017). Pengaruh Persentase Katalis CaO Pada Pirolisis Campuran Cangkang Sawit dan Plastik Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Pyrolytic Oil. *Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta :Yogyakarta.*
- Simanjuntak, H. F. P., Manik, P., & Santosa, A. W. B. (2017). Analisa Pengaruh Panjang, Letak dan Geometri Lunas Bliga Terhadap Arah dan Kecepatan Aliran (Wake) Pada Kapal Ikan Tradisional (Studi Kasus Kapal Tipe Kragan). *Jurnal Teknik Perkapalan*, 5(1).
- Simanjuntak, J., Hasan, H., Pakpahan, B. M., & Putra, A. N. (2022). Pengaruh Suhu Kondensasi Pada Produksi Asap Cair Dari Biomassa Tempurung Kelapa Dengan Proses Pirolisis. *Sprocket Journal of Mechanical Engineering*, 4(1), 1-9.
- Sipayung, R. A., Ambarita, H., Nur, T. B., & Pintoro, A. (2019). Rancang Bangun Solar Cold Storage Dengan Kapasitas 10 Kilogram. *Jurnal Dinamis*, 7(3).
- Solekah, N. A., Handriana, T., & Usman, I. (2022). Millenials' Deals with Plastic : The Effect of Natural Environmental Orientation, Environmental Knowledge, and Environmental Concern on Willingness to Reduce Plastic Waste. *Journal of Consumer Science*, 7(2), 115-133.
- Suharko. (2018). Pengaruh Persentase CaO dan Zeolit Alam Sebagai Katalis Pada Pirolisis Campuran Cangkang Sawit dan Plastik Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Pyrolytic Oil. *Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta : Yogyakarta.*

- Sulung, S., Mainil, A. K., & Suandi, A. (2019). Heatsink 3d By CFD Analysis of Cooling System in A PC Desktop. *Rekayasa Mekanika*, 3(2), 20-25.
- Supu, I., Usman, B., Basri, S., & Sunarmi, S. (2017). Pengaruh Suhu Terhadap Perpindahan Panas Pada Material yang Berbeda. *Dinamika*, 7(1), 62-73.
- Syamsiro, M. (2015). Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik. *Jurnal Teknik*, 5(1), 47-56.
- Taufiqurrohman, M., & Yusuf, M. (2022). Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Pengolahan Daur Ulang Limbah. *Jurnal MENTARI : Manajemen, Pendidikan dan Teknologi Informasi* 1, no. 1 (2022): 46-57
- Vijayakumar, A., & Sebastian, J. (2018, August). *Pyrolysis Process to Produce Fuel From Different Types of Plastic-a review*. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* (Vol.369, p. 012062). IOP Publishing.
- Wahyono, W., & Rochani, I. (2019). Pembuatan Alat Uji Perpindahan Panas Secara Radiasi. *Eksergi*, 15(2), 50-59.
- Wahyudi, J., Prayitno, H. T., & Astuti, A. D. (2018). Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Baku Pembuatan Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Litbang : Media Informasi Penelitian, Pengembangan dan IPTEK*, 14(1), 58-67.
- Yasa, M., & Siregar, I. (2023). Pengaruh Jumlah Lilitan Pipa Kondensor Terhadap Kuantitas Minyak Pirolisis Sampah Plastik. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(01), 71-78.
- Yohanes, E., Soeparman, S., & Siswanto, E. (2014). Heat Flux Kondensasi pada Media Arang Tempurung Kelapa (*Cocos Nurifera*). *Jurnal Rekayasa Mesin*, 5(1), 39-49