

**ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA PIROLISIS SAMPAH
PLASTIK KAPASITAS 8 LITER**

Skripsi

Oleh:

Juntara Adi Kusuma

1915021019



**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA PIROLISIS SAMPAH
PLASTIK KAPASITAS 8 LITER**

Oleh:

Juntara Adi Kusuma

1915021019

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Sarjana Teknik

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRAK

ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA PIROLISIS SAMPAH PLASTIK KAPASITAS 8 LITER

Oleh

Juntara Adi Kusuma

Sampah plastik keberadaannya yang semakin banyak dari tahun ke tahun salah satunya adalah plastik jenis *polypropylene* (PP). Plastik PP dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar cair dengan dilakukan pirolisis. Pirolisis merupakan salah satu metode pengolahan sampah melalui proses *cracking thermal* (perengkahan termal) menjadi bahan bakar cair yang bermanfaat dengan bantuan panas. Sumber energi panas yang digunakan dalam reaktor pirolisis adalah LPG. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai energi *losses* atau rugi-rugi panas yang terjadi selama proses pirolisis serta *mass yield* dari produk pirolisis yang dihasilkan. Sampel plastik PP yang digunakan sebanyak 1 kg yang berukuran tidak seragam yaitu dalam bentuk cacahan yang ukurannya berkisar 1 sampai 3cm. Penelitian ini dilakukan proses pengujian selama 50 menit pada temperatur 400 sampai 500°C. Selama proses pengujian didapatkan tiga parameter nilai yang terjadi di dalam reaktor pirolisis yaitu energi masuk, energi keluar dan energi *losses*. Energi masuk sebesar 48.606,26 kJ (100%), energi keluar sebesar 15.708,42 kJ (32,32%), energi *losses* yang terukur di dapatlah energi *losses* pada dinding shield sebesar 793,7067 kJ (1,63%) dan energi *losses* yang tidak teridentifikasi sebesar 32.104,13 kJ (66,05%). Pirolisis sampah plastik PP menghasilkan nilai kalor sebesar 19.535,1 kJ/kg dengan *mass yield* yang didapatkan sebesar 29,29%. Manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui heat *losses* pada reaktor pirolisis yang dapat dimanfaatkan kembali, sehingga menjadikan proses pirolisis menjadi lebih efisien.

Kata Kunci: Sampah plastik, Pirolisis, Energi *losses*.

ABSTRACT

ENERGY BALANCE ANALYSIS IN PLASTIC WASTE PYROLYSIS 8 LITER CAPACITY

By

Juntara Adi Kusuma

The presence of plastic waste that is increasing from year to year, one of which polypropylene (PP) plastic. PP plastic can be used as liquid fuel by pyrolysis. Pyrolysis is a method of processing waste through a thermal cracking process into useful liquid fuel with the help of heat. The heat energy source used in the pyrolysis reactor is LPG. The aim of this research is to determine the value of energy losses or heat losses that occur during the pyrolysis process as well as the mass yield of the pyrolysis products produced. The PP plastic sample used was 1 kg which was not uniform in size, namely in chopped form whose size ranged from 1 to 3 cm. This research was carried out in a testing process for 50 minutes at a temperature of 400 to 500°C. During the testing process, three parameter values were obtained that occurred in the pyrolysis reactor, namely incoming energy, outgoing energy and energy losses. The incoming energy is 48,606.26 kJ (100%), the outgoing energy is 15,708.42 kJ (32.32%), the measured energy losses are 793.7067 kJ (1.63%) and energy losses on the shield wall. which was not identified was 32,104.13 kJ (66.05%). Pyrolysis of PP plastic waste produces a heating value of 19,535.1 kJ/kg with a mass yield of 29.29%. The benefit of this research is to determine heat losses in the pyrolysis reactor that can be reused, thus making the pyrolysis process more efficient.

Keywords: Plastic waste, pyrolysis, energy losses.

Judul Skripsi : **ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA
PIROLISIS SAMPAH PLASTIK KAPASITAS
8 LITER**

Nama Mahasiswa : **Juntara Adi Kusuma**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021019

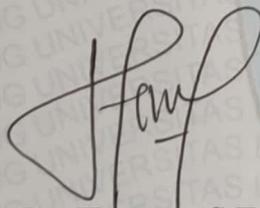
Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

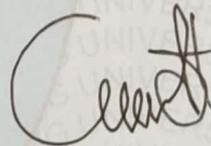
MENYETUJUI

Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP 19690620 200003 1 001

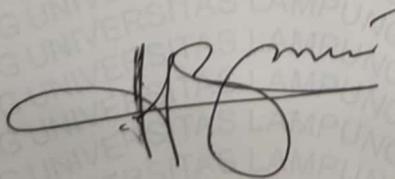


Ahmad Yonanda, S.T., M.T.
NIP 19930110 201903 1 008

MENGETAHUI

Ketua Jurusan

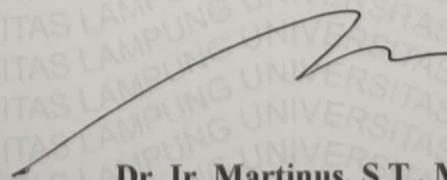
Teknik Mesin



Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, Ph.D.
NIP 19710817 199802 1 003

Ketua Program Studi

S1 Teknik Mesin

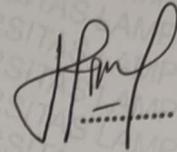


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP 19790821 200312 1 003

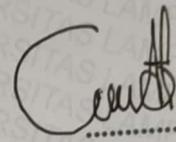
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

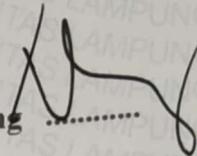
Ketua Penguji : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**



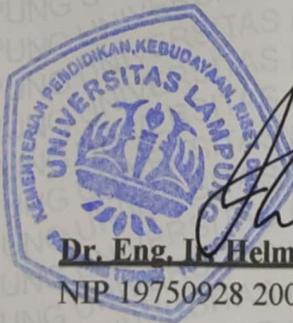
Anggota Penguji: **Ahmad Yonanda, S.T., M.T.**



Penguji Utama : **Ir. Herry Wardono, S.T., M.Sc., IPM., ASEAN Eng**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Friawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **13 Mei 2024**

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul “ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA PIROLISIS SAMPAH PLASTIK KAPASITAS 8 LITER” 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, 27 Juni 2024

Penulis,



Juntara Adi Kusuma
NPM 1915021019

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Seputih Banyak, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung pada tanggal 09 Januari 2000 sebagai anak pertama dari kedua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 1 Setia Bumi tahun 2006 hingga 2012, kemudian melanjutkan di SMP Negeri 1 Seputih Banyak yang diselesaikan pada tahun 2015, lalu melanjutkan di SMKS 3 PARAMARTA Seputih Banyak yang diselesaikan pada tahun 2018, pada tahun 2019 penulis mendaftarkan diri sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam dunia organisasi kemahasiswaan antara lain Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI-FT), dan menjadi bagian anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin 2019 (HIMATEM) Universitas Lampung.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di PT. Semen Baturaja (Persero), Sumatera Selatan pada tahun 2022 dengan judul **laporan “ANALISA LAJU KEAUSAN SLIDE PLATE SISTEM DRIVE POLYTRACK CLINKER COOLER PADA GRATE COOLER DI PT. SEMEN BATURAJA (Persero)”**.

Tahun 2023 Penulis melakukan penelitian yang tergabung dalam tim Pirolisis dengan judul penelitian **“ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA PIROLISIS SAMPAH PLASTIK KAPASITAS 8 LITER”** dibawah bimbingan Dr. Harmen, S.T., M.T. dan Ahmad Yonanda, S.T.,M.T.

MOTO

“Maka jangan sekali-kali membiarkan kehidupan dunia memperdayakan kamu”

(Q.s Fatir [35]: 5)

“Faber est quisque fortunae”

Setiap orang adalah perancang nasibnya sendiri

~ Appius Claudius Caecus ~

Jadilah penjaga pikiranmu, karena pikiran kita adalah sumber

kebahagiaan atau penderitaan

~ Marcuse Aurelius ~

Kenapa harus takut pada lara, sementara semua rasa dapat kita cipta

~ Payung Teduh ~

SANWACANA

Puji syukur dipanjatkan ke hadirat 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 penuh hidayah. Skripsi ini dibuat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Dalam skripsi ini penulis mengambil judul "*ANALISIS KESETIMBANGAN ENERGI PADA PIROLISIS SAMPAH PLASTIK KAPASITAS 8 LITER*". Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak Suryono dan Ibu Winarsih, yang telah membesarkan penulis dengan penuh rasa sayang dengan bimbingan dan usaha serta selalu memberikan doa yang selalu terpanjatkan dalam segala kegiatan.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung beserta staff dan jajarannya.
3. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Prodi Teknik Mesin Universitas Lampung
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Lampung
5. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang banyak memberikan ilmu terkait penelitian skripsi dan dukungan dalam penyelesaiannya.
6. Ahmad Yonanda, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang membimbing dalam penyusunan dan ilmu terkait penelitian ini.

7. Ir. Herry Wardoyo, M.Sc.,IPM,. ASEAN Eng. selaku Dosen Pembahas atas masukan dan saran dalam ber jalannya penelitian dalam seminar.
8. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung atas ilmu pengetahuan yang telah disampaikan.
9. Reka Angraini S.Pd. sebagai orang yang selalu memberikan dukungan proses-proses kegiatan dan menemani masa senang dan susah terutama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. TPST SQUAD, terdiri dari Juntara, Siti, Karina, dan Rehan yang telah membantu materi dan non-materi selama proses penelitian
11. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin UNILA yang telah memberikan bantuan dan dukungannya kepada penulis.

Penulis bersyukur karena telah dihadirkan orang-orang yang membantu dalam menyelesaikan tugas akhir dan semoga Allah SWT membalas atas kebaikannya serta selalu diberkahi dan dilindungi oleh-Nya. Di dalam skripsi ini penulis juga menyadari bahwa banyak kesalahan maupun kekurangan maka diharapkan memberikan saran atau kritik yang membangun dari pembaca. Akhir kata, semoga skripsi dapat bermanfaat bagi semua orang.

Bandar Lampung, 9 Juni 2024

Penulis,



Juntara Adi Kusuma

NPM 1915021019

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR NOTASI	v
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 Plastik.....	6
2.2 Karakteristik <i>Fuel</i> dari Sampah Plastik	8
2.3 Pirolisis	10
2.4 Klasifikasi Pirolisis	12
2.4.1 Pirolisis Lambat.....	12
2.4.2 Pirolisis Cepat.....	12
2.4.3 Pirolisis Kilat.....	13
2.5 Reaktor Pirolisis.....	14
2.5.1 Reaktor <i>Fixed Bed</i>	15
2.5.2 Reaktor <i>Fluidized Bed</i>	16
2.5.3 Reaktor Rotary Kiln.....	17
2.5.4 Reaktor <i>Ablative</i>	18
2.6 Parameter Pirolisis	19
2.6.1 Reaksi Temperatur.....	19
2.6.2 Laju Pemanasan.....	20

2.6.3	Jenis Biomassa.....	21
2.6.4	<i>Residence Time</i> (Waktu Tinggal)	21
2.6.5	Ukuran Partikel Bahan Baku	22
2.7	Perpindahan Panas	22
2.7.1	Konduksi.....	23
2.7.2	Konduksi Pada Silinder	25
2.7.3	Konveksi	26
2.7.4	Radiasi	27
2.8	<i>Liquefied Petroleum Gas</i> (LPG)	27
2.9	Kesetimbangan Energi	28
2.9.1	Energi <i>Input</i>	30
2.9.2	Energi <i>Output</i>	31
2.9.3	Energi <i>Losses</i>	31
2.9.4	<i>Mass Yield</i>	32
2.10	Diagram <i>Sankey</i>	33
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN		34
3.1	Tempat dan Waktu Pelaksanaan Penelitian	34
3.2	Alat dan Bahan.....	34
3.3	Alur Tahapan Penelitian.....	39
3.4	Skema Penelitian.....	40
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		43
4.1	Data Energi Hasil Pengujian	43
4.2	Hasil Perhitungan Energi Pirolisis.....	44
4.3	Analisis termal dinding silinder pirolisis	44
4.4	<i>Mass Yield, dan Energy Yield</i>	49
4.5	Pembahasan.....	50
V. PENUTUP		58
5.1	Kesimpulan	58
5.2	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Reaksi Pirolisis	11
Gambar 2.2 Mesin Pirolisis	15
Gambar 2.3 Reaktor <i>Fixed Bed</i>	16
Gambar 2.4 Reaktor <i>Fluidized Bed</i>	17
Gambar 2.5 Reaktor <i>Rotary Kiln</i>	17
Gambar 2.6 Reaktor <i>Ablative</i>	18
Gambar 2.7 Distribusi produk pirolisis	20
Gambar 2.8 Ilustrasi arah perpindahan panas konduksi.....	23
Gambar 2.9 Konduksi Pada Silinder	25
Gambar 2.10 Ilustrasi konveksi paksa dan bebas.....	26
Gambar 2.11 Diagram neraca panas pirolisis.....	29
Gambar 3.1 Reaktor Pirolisis <i>Type Fixed Tubular</i>	34
Gambar 3.2 <i>Temperatur Recorder Datalogger</i>	36
Gambar 3.3 Gas LPG 3 kg	36
Gambar 3.4 Timbangan digital	37
Gambar 3.5 <i>Water pump</i>	37
Gambar 3.6 Kunci pipa, pas dan ring.....	38
Gambar 3.7 Plastik PP.....	38
Gambar 3.8 Diagram Alur Penelitian.....	39
Gambar 3.9 Titik pengukuran saat pengujian	41
Gambar 4.1 Analisis termal dinding silinder pirolisis.....	45
Gambar 4.2 Diagram <i>sankey</i> energi <i>losses</i> pirolisis.....	51
Gambar 4.3 <i>Heat losses</i> saat pengujian.....	53
Gambar 4.4 Grafik temperatur T1, T2, T3,dan T4 terhadap.....	54
Gambar 4.5 Grafik temperatur T5, T6, T7,dan T8 terhadap.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik termoplastik.....	7
Tabel 2.2 Hasil pirolisis dari tiga jenis plastik.....	9
Tabel 2.3 Hasil pirolisis pengujian sampah plastik PP	10
Tabel 2.4 Parameter dan hasil produk untuk tiga proses pirolisis.....	14
Tabel 3.1 Spesifikasi reaktor pirolisis tipe <i>fixed</i> tubular.....	35
Tabel 4.1 Data pengamatan pada proses pengujian berlangsung.....	43
Tabel 4.2 Data energi <i>input, output, losses</i> selama pengujian pirolisis	44

DAFTAR NOTASI

\dot{Q}_{cond}	= Laju perpindahan panas konduksi (Watt)
\dot{Q}_{conv}	= Panas konveksi (Watt)
\dot{Q}_{rad}	= Panas radiasi (Watt)
\dot{Q}_{losses}	= Panas yang hilang (Watt)
m	= Massa (kg)
k	= Konduktivitas Termal (Watt/m °C)
h	= Koefisien perpindahan panas konveksi (Watt/m ² °C)
Δx	= Perubahan jarak (m)
ΔT	= Perubahan temperatur (°C)
T_s	= Temperatur permukaan (°C)
T_a	= Temperatur lingkungan (°C)
HHV	= <i>High heating value</i> (kJ/kg)
LHV	= <i>Low heating value</i> (kJ/kg)
C_p	= Kalor jenis (kJ/kg.K)
Q	= Debit (m ³)
t	= Waktu (detik)
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m ³)
\dot{m}	= Laju aliran massa fluida (kg/s)
A	= Luas penampang rambat panas (m ²)
σ	= Konstanta Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m ² .K)
ϵ	= Emisivitas

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Plastik merupakan salah satu bahan yang paling banyak digunakan secara global, dan jumlah sampah plastik berpotensi mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, seiring dengan peningkatan jumlah penduduk. Indonesia menghasilkan 34,45 juta ton sampah pada tahun 2022. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melaporkan bahwa 37,3% sampah di Indonesia berasal dari kegiatan rumah tangga, 39,8% dari sampah makanan, dan sampah plastik memiliki proporsi 17% (Solekah dkk, 2022). Tingkat daur ulang plastik sangat bervariasi antar negara dan masih 9% yang dilaksanakan di seluruh dunia sehingga sebagian besar sampah plastik berakhir diekspor, tempat pembuangan sampah, pabrik insinerasi, dan tidak dikelola dan terbuang di lingkungan (Wen dkk, 2021).

Salah satu alternatif untuk memanfaatkan sampah plastik menjadi produk yang bermanfaat adalah dengan proses pirolisis. Pirolisis ini bertujuan untuk menghasilkan bahan bakar cair yang dapat menjadi alternatif sumber energi (Akhtar, 2012). Pirolisis adalah dekomposisi termokimia yang menguraikan biomassa atau plastik menjadi bahan bakar cair. Proses termokimia pirolisis merupakan fenomena multi fisika yang melibatkan tidak hanya perubahan kimiawi, tetapi juga perubahan fisika (panas) selama proses berlangsung (Wijayanti dkk, 2021). Proses pirolisis terjadi dengan menggunakan alat yang disebut reaktor. Reaktor merupakan suatu alat proses terjadinya reaksi berlangsung, di dalam reaktor ini lah terjadinya reaksi suatu bahan berubah ke bentuk bahan lainnya dengan bantuan energi panas (Batidzirai dkk, 2013).

Reaktor pirolisis akan memberikan efek termal untuk proses perengkahan bahan baku dan mentransfer distribusi temperatur di dalam reaktor pirolisis untuk menentukan efektivitas suhu optimal dalam proses. Dengan demikian salah satu yang perlu diperhatikan dalam proses pirolisis adalah kesetimbangan energi dalam sistem pirolisis. Kesetimbangan energi adalah persamaan matematis yang menyatakan interaksi antara jumlah energi yang masuk ke sistem dengan jumlah energi yang keluar dari sistem berdasarkan satuan waktu operasi (Sirait dkk, 2020). Dalam pirolisis energi yang masuk kedalam sistem yaitu pemanasan bahan baku, sedangkan energi yang keluar dari sistem yaitu berbentuk produk pirolisis dan panas.

Proses pirolisis membutuhkan energi yang besar untuk mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar, namun jika energi yang dibutuhkan untuk saat proses pirolisis lebih besar daripada energi yang dihasilkan, maka proses pirolisis menjadi tidak efektif. Menurut Koderia dkk. (2016), Kesetimbangan energi panas pirolisis bertujuan mengevaluasi berapa banyak energi yang dihasilkan dan di konsumsi. Pemeriksaan keseimbangan panas yang tepat diperlukan untuk pengembangan dan evaluasi pemulihan energi biomassa atau bahan baku, dengan mempertimbangkan panas pirolisis, panas penguapan produk dan kehilangan panas pirolisis. Kehilangan panas atau *heat losses* ini terjadi melalui panas dari permukaan tungku pirolisis ke sekelilingnya melalui konveksi, konduksi, dan radiasi alami.

Penelitian yang dilakukan Sirait, dkk (2020) Kesetimbangan energi pada reaktor pirolisis dengan tipe reaktor *batch* dengan material *stainless steel* selama dua jam percobaan, temperatur maksimal 300°C, dan konsumsi pemakaian gas LPG sebanyak 6 kg, didapatkan perhitungan keseimbangan energi pada reaktor. Perhitungan kesetimbangan energi menjadi faktor penting dalam proses untuk mengetahui kapasitas energi yang terserap dan dilepas pada sistem ini, sehingga proses pirolisis dapat bekerja dengan

maksimal. Sebuah reaktor pirolisis yang baik, memiliki tingkat *heat loss* yang rendah. Ukuran partikel sampel juga berpengaruh dalam perpindahan panas dalam reaktor pirolisis, partikel yang berukuran kecil mendukung keseragaman perpindahan panas keseluruhan dalam distribusi panas di dalam reaktor (Suriapparao dkk, 2022).

Besar energi masuk dan keluar digunakan untuk mengetahui seberapa besar energi yang hilang (*heat losses*) pada pengujian, sehingga dilakukan kajian tentang kesetimbangan energi pada reaktor pirolisis dengan harapan potensi *heat losses* dapat dimanfaatkan sehingga pengujian selanjutnya lebih maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka penelitian mengidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan *heat losses* pada reaktor pirolisis untuk meningkatkan efisiensinya
2. Bagaimana cara untuk mengoptimalkan energi pada alat pirolisis
3. Bagaimana untuk mengetahui energi *yieldnya*
4. Bagaimana mengurangi dan memanfaatkan *heat losses*

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang didapatkan berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan sebagai berikut:

1. Mengetahui *heat balance* yang terjadi pada reaktor pirolisis
2. Mendapatkan potensi *heat losses* untuk meningkatkan efisiensi reaktor pirolisis
3. Menghitung energi *yield*

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah yang tidak dapat dihindari oleh penulis dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Sampel plastik yang digunakan adalah jenis plastik *Polypropylene* (PP) dalam bentuk cacahan yang tidak seragam dengan ukuran berkisar 1 sampai 2 cm
2. Reaktor yang digunakan pada sistem pirolisis ini menggunakan sumber pemanas LPG.
3. Temperatur reaktor pirolisis yang diuji pada penelitian ini yakni sekitar 400°C sampai 500°C
4. Nilai kalor dari *Liquefied Petroleum gas* (LPG) dan nilai kalor dari plastik jenis PP.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang masalah secara jelas, tujuan yang memaparkan diadakannya penelitian ini, batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini agar hasil penelitian lebih terarah, sistematika penulisan berupa format yang dipakai pada penulisan laporan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memuat teori yang berkaitan dengan penelitian tentang tinjauan umum yang meliputi: Penjelasan tentang plastik, karakteristik fuel dari sampah plastik pirolisis, reaktor pirolisis, perpindahan panas dan kesetimbangan energi.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini terdiri atas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu tempat penelitian, bahan penelitian, peralatan, dan prosedur pengujian perhitungan *heat losses*.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan hasil dan pembahasan yang membahas dari data-data yang diperoleh saat pengujian dilakukan meliputi: Mengukur energi yang terpakai tiap satuan waktu, mengukur suhu pada bagian (reaktor, dinding reaktor, pipa keluar dan masuk air pendingin, dan pipa kondensor.

BAB V: SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi hal-hal yang disimpulkan dan saran-saran yang ingin disampaikan dari penelitian ini

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Plastik

Plastik merupakan senyawa polimer yang tersusun atas hidrokarbon, sebagai unsur utamanya yang memiliki molekul yang sangat besar yang terdiri dari unit-unit kecil yang disebut monomer yang tergabung menjadi satu dalam sebuah rantai melalui sebuah proses yang disebut polimerisasi. Polimer umumnya mengandung karbon dan hidrogen namun juga terdapat unsur lainnya seperti oksigen, nitrogen, klorin atau *fluor* (Astuti dkk, 2020). Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah karbon dan hidrogen, untuk membuat plastik bahan yang sering digunakan salah satunya adalah naphtha, yaitu bahan yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi (Permana dkk, 2019). Plastik juga terbuat dari berbagai jenis polimer sintesis dan semi sintesis yang berasal dari destilasi gas alam dan minyak bumi jenis naphtha dengan titik didih maksimal 36°C hingga 270°C (Yona dkk, 2021).

Berdasarkan sifat-sifat fisik yang dimiliki, plastik digolongkan menjadi 2 (dua) yaitu:

1. Termoplastik adalah jenis polimer yang akan meleleh jika dipanaskan di atas titik leleh nya dan akan mengeras kembali setelah dingin serta dapat di daur ulang. Susunan kimia di dalamnya tidak mengalami perubahan yang selanjutnya dapat dicetak menjadi bentuk lain dan kembali mengeras pada suhu kamar (*reversible*) contohnya: *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Low Density Polyethylene* (LDPE), *High Density Polyethylene* (HDPE), *Poly Styrene* (PS), *Polypropylene* (PP), *Polyvinyl chloride* (PVC) dan lain-lain.

2. *Thermosets* adalah polimer yang tahan terhadap panas tidak dapat dilebur kembali dan tidak akan dapat di daur ulang. Bahan plastik yang telah dibuat dalam bentuk padat, tidak dapat dilelehkan kembali dengan cara dipanaskan (sekali pembentukan). Jika dipanaskan akan mengeras dan menjadi arang. Jenis plastik ini jika dipanaskan akan menyebabkan kerusakan pada molekul- molekulnya. Umumnya jenis plastik ini digunakan pada usaha otomotif maupun elektronik contohnya: melamin, silikon, dan epoksi (Astuti dkk, 2022).

Berdasarkan sifat kedua plastik di atas, termoplastik merupakan jenis polimer yang dapat di daur ulang. Jenis plastik yang dapat di daur ulang dapat diketahui pada tabel 2.1 dibawah ini jenis- jenis termoplastik beserta karakteristiknya.

Tabel 2.1 Karakteristik termoplastik

Kode	Jenis plastik	Titik leleh (°C)	Contoh penggunaan
 PETE	<i>Polyethylene Terephthalate</i>	250	Botol air mineral
 HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>	200-280	Botol sampo, dan <i>tupperware</i>
 PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>	160-180	Pipa saluran
 LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i>	160-240	Berbagai jenis plastik tipis
 PP	<i>Polypropylene</i>	200-300	Tutup botol plastik, kotak makanan

 6 PS	<i>Poly Styrene</i>	180-260	<i>Styrofoam</i> dan kotak CD
 7 OTHER	<i>Polycarbonate,</i> <i>nylon, ABS</i> <i>acrylonitrile,</i> <i>styrene</i> <i>acrylonitrile</i>	180-240	Alat-alat rumah tangga, bungkus pasta gigi

(Sumber : Darmayanti dkk, 2023)

2.2 Karakteristik *Fuel* dari Sampah Plastik

Menurut banyak penelitian tentang pirolisis sampah plastik menyebutkan mengenai metode pada kualitas minyak pirolisis yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai parameter. Parameter tersebut antara lain yaitu, temperatur, lama waktu pirolisis, ukuran bahan baku, dan jenis sampah plastik yang akan digunakan. Penggunaan katalis juga berpengaruh untuk meningkatkan hasil proses dan kualitas minyak pirolisis dan menghambat produksi sebuah produk yang tidak diinginkan. Adapun jenis plastik yang digunakan dalam proses pirolisis juga dapat mempengaruhi kualitas dan karakteristik *fuel* yang dihasilkan (Miandat dkk, 2017). Jenis-jenis plastik yang umum digunakan pada proses pirolisis antara lain plastik PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, dan PS dengan jumlah produk hasil yang berbeda-beda (Vijayakumar & Sebastian, 2018).

Rachmawati (2015) melakukan penelitian pirolisis dengan menggunakan sampah plastik berjenis HDPE, PE, dan PS dengan temperatur yang digunakan pada reaktor sebesar 500°C selama 30 menit dan berat bahan baku plastik yang digunakan sebesar 500 gram pada tabel 2.2. Plastik HDPE memiliki titik leleh 200°C - 280°C dan dapat ter dekomposisi pada temperatur 495°C. Sampel plastik HDPE yang telah di pirolisis

menghasilkan *char* yang mengandung *paraffin* dan *1-olefins*. *Paraffin* mengandung hidrokarbon rantai panjang yang biasanya terdapat pada bahan bakar yang berbentuk seperti lilin. Plastik PET memiliki titik leleh pada temperatur 250°C – 260°C dan ter dekomposisi pada temperatur 480°C. Penelitian pirolisis yang dilakukan tidak menghasilkan gas yang terkondensasi karena PET memiliki sifat dasar mudah menyublim. Produk *char* hasil pirolisis PET mengandung karbon sekitar 84,9%. Pirolisis dengan bahan PET di dominasi hasil gas karena sifat dasar kimia PET yang mudah menyublim. PS memiliki titik leleh pada temperatur 180°C - 260°C dan dapat ter dekomposisi pada temperatur 420°C dan pada kandungan bahan bakunya di dominasi oleh stirena.

Tabel 2.2 Hasil pirolisis dari tiga jenis plastik

Jenis Plastik	Gas (%)	Bio-oil (%)	Arang (%)
HDPE	14,60	69,91	15,49
PET	45,40	39,4	12,8
PS	16,20	52,27	31,53

(Sumber: Rachmawati, 2015)

Penelitian yang telah dilakukan oleh Hidayat (2022) dengan menggunakan plastik jenis PP dengan temperatur 400°C dan massa plastik yang digunakan 1200 gram. Pada penelitian tersebut plastik PP akan dipanaskan sampai suhu 400°C lalu hasil minyak dari proses pirolisis akan diuji dan di analisis densitas dan nilai kalor nya menggunakan bom kalorimeter dan alat Gas *Chromatography* (GC). Dari pengujian tersebut diketahui pada tabel 2.3 berikut ini:

Tabel 2.3 Hasil pirolisis pengujian sampah plastik PP

Plastik <i>Polypropylene</i> (PP)	
Massa Plastik	1200 gram
Massa minyak	65 gram
Densitas	0,882 kg/m ³
Nilai kalor	11480,6 k kal/kg

(Sumber: Hidayat, 2022)

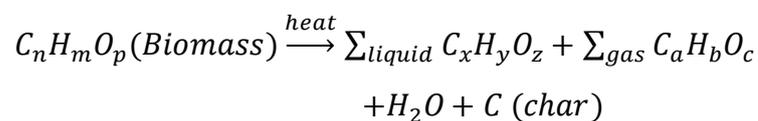
2.3 Pirolisis

Menurut (Basu, 2018) proses pirolisis adalah dekomposisi termokimia atau perengkahan dari suatu bahan menjadi produk yang bermanfaat, tanpa adanya oksigen sebagai oksidator tetap. Pirolisis merupakan proses pemecahan molekul hidrokarbon kompleks yang besar dari biomassa atau bahan baku terurai menjadi molekul yang relatif kecil dan lebih sederhana dalam bentuk gas, arang, dan cairan. Proses pirolisis biasanya dilakukan pada temperatur yang relatif rendah dibandingkan dengan gasifikasi, yaitu sekitar 300°C sampai 650°C. Pirolisis adalah teknik degradasi termal, dilakukan tanpa adanya oksigen dan dilakukan pada kisaran suhu 400-600°C. Tidak seperti pembakaran dan gasifikasi, pirolisis menghasilkan tiga produk yaitu gas, arang, dan *bio-oil* tergantung pada kondisi operasi yang akan menghasilkan dari salah satu produk tersebut (Hu dan Gholizadeh, 2019).

Metode pirolisis disarankan oleh banyak peneliti karena proses ini mampu mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dalam jumlah yang besar hingga 80% (Vijayakumar dan Sebastian, 2018). Metode pirolisis bertujuan untuk mengubahnya menjadi bahan bakar dengan memanaskan sampah plastik di dalam reaktor yang terbatas oksigen. Sampah plastik yang sudah melebur pada temperatur tertentu akan

menghasilkan uap atau gas. Proses tersebut mengakibatkan terpotongnya rantai panjang hidrokarbon menjadi rantai yang pendek. Selanjutnya uap akan mengalir melewati pipa pendinginan sehingga uap akan terkondensasi dan menghasilkan cairan. Cairan yang dihasilkan dari proses kondensasi ini akan menjadi minyak bahan bakar (Permana dkk, 2020). Proses pirolisis terdiri dari 2 unsur utama yaitu reaktor yang berfungsi sebagai tempat pemanasan sampah plastik hingga menjadi uap, dan kondensor sebagai tempat kondensasi gas uap yang dihasilkan. Gas panas yang dihasilkan oleh reaktor akan dipindahkan ke suhu yang lebih rendah, yaitu air dalam kondensor yang membantu proses kondensasi. Proses pemanasan dan pendinginan ini sangat penting untuk menghasilkan bahan bakar yang berkualitas (Yasa dkk, 2022). Pirolisis menghasilkan produk berupa residu, gas dan minyak. *Paraffin*, *olefin*, naphthalene dan aromatik merupakan kandungan yang ada pada hasil minyak pirolisis (Mufidah dkk, 2022).

Pirolisis umumnya diklasifikasikan sebagai pirolisis lambat, cepat dan kilat tergantung pada laju pemanasan, suhu, lama waktu yang digunakan, persyaratan produk dan jenis reaktor yang digunakan. Proses pirolisis sangat kompleks yang melibatkan banyak reaksi dan mengarah pada pembentukan lebih dari seratus produk. Dalam sistem reaktor pirolisis, terdapat suatu padatan, cair, gas, dan perpindahan panas dan massa (Liu dkk, 2022). Reaksi pirolisis dapat digambarkan dengan reaksi sebagai berikut:



Gambar 2.1 Reaksi Pirolisis (Basu, 2018)

Dalam proses pirolisis, rantai panjang senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen memecahkan molekul besar menjadi beberapa molekul yang lebih kecil menjadi tiga principal jenis yaitu:

1. Cairan/*Liquid* (bi-oil, tar, hidrokarbon yang lebih berat, dan air)
2. Padat/*Solid* (Kebanyakan arang atau karbon)
3. Gas (CO_2 , H_2O , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_6H_6)

Tingkat dekomposisi dari komponen-komponen tersebut tergantung pada beberapa faktor termasuk laju pemanasan dan suhu akhir yang dicapai oleh bahan baku nya.

2.4 Klasifikasi Pirolisis

Tergantung pada kondisi operasi nya, pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama yaitu sebagai berikut:

2.4.1 Pirolisis Lambat

Pirolisis lambat atau biasa disebut pirolisis konvensional adalah pirolisis untuk menghasilkan produk seperti *char* dan sedikit *bio-oil*, yang hanya menggunakan temperatur yang rendah dan laju pemanasan berkisar antara 0,1 hingga 1 °C/s. Pada proses ini waktu tinggal uap terlalu tinggi dan komponen – komponen dalam fasa uap terus bereaksi satu sama lain yang mengakibatkan terbentuknya *char* dan cairan lainnya. Pirolisis lambat tidak dianjurkan untuk menghasilkan suatu produk *bio-oil* yang berkualitas karena keterbatasan teknologi nya. Pemecahan atau *cracking* pada proses *slow pyrolysis* terjadi dalam waktu tinggal yang lama sehingga berdampak buruk pada hasil dan kualitas *bio-oil*. Selain itu proses yang lama dan perpindahan panas yang rendah membutuhkan energi input yang besar (Hasan dkk, 2021).

2.4.2 Pirolisis Cepat

Pirolisis cepat menghasilkan produk *bio-oil* yang lebih tinggi dibandingkan dengan proses lainnya. Pirolisis cepat adalah proses berkelanjutan dan terjadi pada temperatur 400 sampai 700 °C.

Menurut penelitian terdahulu bio-oil dengan kualitas yang tinggi dapat diperoleh pada temperatur reaksi 500°C. Tujuan dari proses ini adalah untuk mencegah produk pirolisis terurai lebih lanjut menjadi senyawa yang tidak dapat terkondensasi (Hasan dkk, 2021).

Pada proses pirolisis cepat, produk yang dihasilkan yaitu 60-75% produk oil yang terdiri dari minyak dan cairan lainnya, dengan 15%-25% produk pada seperti bio-*char* dan 10%-20% fase gas tergantung pada bahan baku yang digunakan. Menurut Jahirul (2012), karakteristik utama dari pirolisis cepat adalah perpindahan panas dan laju pemanasan yang tinggi, waktu tinggal yang cepat, pendinginan uap yang cepat dan kontrol dari temperatur yang presisi.

2.4.3 Pirolisis Kilat

Pada proses pirolisis kilat, biomassa atau bahan baku dipanaskan dengan cepat tanpa adanya oksigen pada temperatur yang relatif sedang yaitu sekitar 450°C sampai 650°C (Basu, 2018). Ukuran partikel bahan baku harus sekecil mungkin karena proses ini membutuhkan laju pemanasan yang sangat tinggi. Sekitar 80% energi yang terkandung dalam bahan baku dapat diubah menjadi produk energi yang berbeda pada proses ini dan densitas energi dalam produk yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan bahan baku mentah (Maliutina dkk, 2017). Namun, bio-oil yang dihasilkan dari proses ini mengandung oksigen dalam jumlah tinggi yang mengindikasikan sifat korosif minyak, padatan dalam minyak dan ketidakstabilan produk.

Hasan dkk, (2021) melakukan penelitian mengenai hasil pirolisis dengan tiga tahap proses yang dapat dilihat pada tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Parameter dan hasil produk untuk tiga proses pirolisis

Proses pirolisis	Reaksi temperatur (C)	Ukuran sampel (mm)	Waktu tinggal	Hasil produk (%)		
				Oil	arang	Gas
Lambat	300	5-50	25 min	10-30	25-65	10-50
Cepat	400-700	<1	0.5-2 s	40-70	15-25	10-20
Kilat	700-900	<0.2	<0.5 s	10-20	10-15	60-80

(Sumber : Hasan dkk, 2021)

2.5 Reaktor Pirolisis

Reaktor merupakan suatu alat proses tempat terjadinya reaksi berlangsung, pengurai senyawa-senyawa kimia, di dalam reaktor ini lah terjadinya reaksi suatu bahan berubah ke bentuk bahan lainnya dengan bantuan energi panas (Batidzirai dkk, 2013). Reaktor pirolisis merupakan alat yang digunakan untuk membuat bahan bakar biomassa dengan memanfaatkan pemanasan tanpa oksigen, dalam proses pirolisis yang mana bahan baku diubah menjadi bahan bakar minyak, seperti gambar 2.2. Untuk mendapatkan tingkatan panas yang tinggi dengan gradien termal yang rendah di dalam partikel, ukuran partikel bahan baku harus lebih rendah. Ini juga mendukung pemompaan biomassa atau bahan baku yang mudah kedalam reaktor pirolisis (Suriapparao dkk, 2022).



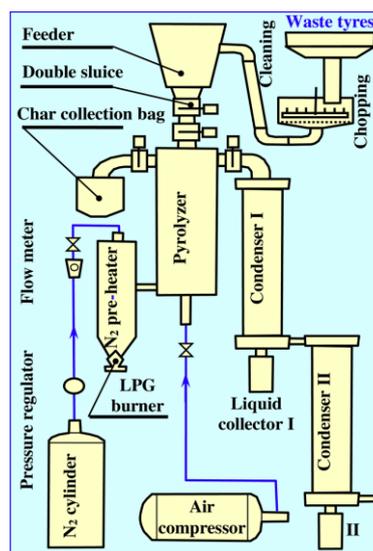
Gambar 2.2 Alat Pirolisis (dokumen penulis)

Dalam reaktor pirolisis konvensional, panas di pasok ke reaktor dan bahan baku dengan pemanas yang berasal dari pembakaran gas untuk mencapai suhu yang diinginkan. Pada proses ini memerlukan waktu tinggal yang lama dan perpindahan panas yang rendah dan komponen dalam fase uap terus bereaksi satu sama lain yang mengakibatkan terbentuknya arang dan cairan minyak. Pengoperasian pirolisis dapat menyesuaikan laju pemanasan, waktu pirolisis, dan suhu pirolisis. Perpindahan panas dan massa yang lebih baik dapat dicapai dengan konfigurasi reaktor yang sesuai pada skala yang lebih besar. Studi yang dilakukan oleh Lewandowski dkk, (2019) menyebutkan bahwa terdapat beberapa jenis teknologi reaktor, antara lain :

2.5.1 Reaktor *Fixed Bed*

Reaktor tipe *fixed bed* adalah reaktor dengan konstruksi yang sangat sederhana, bagian utamanya terdiri dari pasir kuarsa atau bisa terbuat dari *stainless steel* dan proses nya dapat dilakukan dengan ada atau tidaknya gas *inert*. Reaktor ini merupakan jenis reaktor berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut. Reaktor ini mempunyai laju pemanas (*heating Rate*) yang rendah dan *residence time* yang lama sehingga koefisien

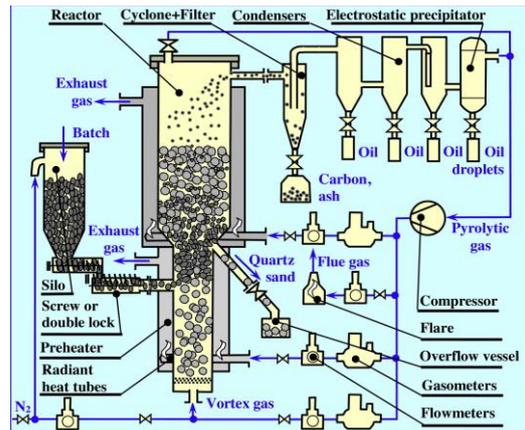
perpindahan panas yang terjadi rendah sehingga tidak cocok untuk pirolisis cepat (Bok dkk, 2014). Reaktor *fixed bed* sering digunakan untuk mengidentifikasi parameter pengatur yang mempengaruhi kandungan produk yang akan di pirolisis (Chen dkk, 2014). Keuntungan dari reaktor ini meliputi: reaktor berjalan secara kontinu, reaktor bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas yang lebih besar, dan sintetik gas yang mudah be reformasi. Bentuk reaktor *fixed bed* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Reaktor *Fixed Bed* (Lewandowski dkk, 2019)

2.5.2 Reaktor *Fluidized Bed*

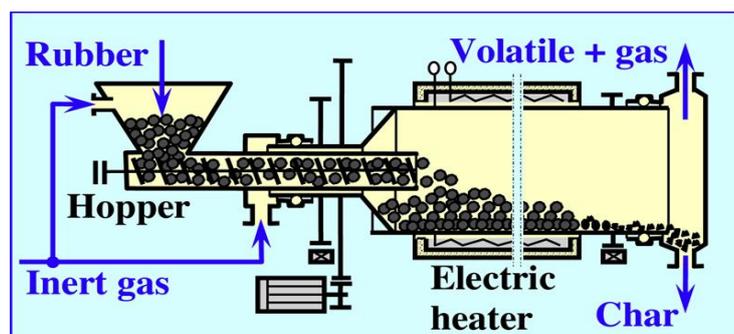
Reaktor *fluidized bed* merupakan reaktor yang mempunyai kapasitas besar karena laju transfer yang tinggi dan pencampuran yang seragam. Kondisi pirolisis cepat dapat dicapai dengan mencairkan bahan baku dengan partikel pasir untuk mencapai distribusi panas yang seragam. Pada gambar 2.4 lapisan pasir yang bersirkulasi dipanaskan baik dengan pembakaran melalui gas dan produk arang yang dihasilkan dalam pirolisis ini. *Residence time* yang singkat, efisiensi, dan desain yang sederhana merupakan keuntungan dari reaktor ini (Bok dkk, 2014).



Gambar 2.4 Reaktor *Fluidized Bed* (Lewandowski dkk, 2019)

2.5.3 Reaktor Rotary Kiln

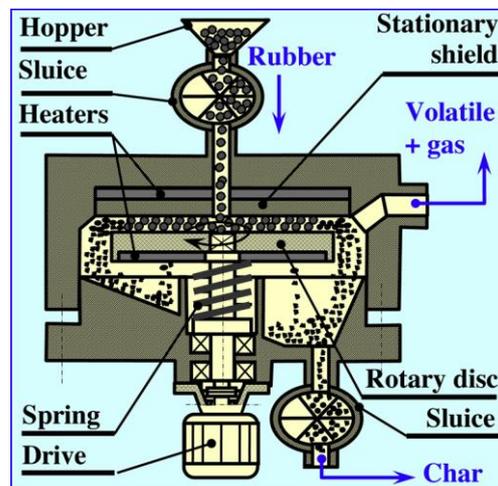
Reaktor tipe *rotary kiln* mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dari pada reaktor *Fixed bed*. Putaran yang lambat dari tempat pembakaran (*kiln*) memungkinkan pencampuran yang baik dari material dalam reaktor. Reaktor ini mulai banyak digunakan dalam pirolisis secara konvensional. Dalam beberapa penelitian tingkat pemanasan (*heating rate*) yang terjadi tidak lebih tinggi dari $100^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dan *residence time* hingga 1 jam, hal ini disebabkan selama proses pirolisis hanya dinding luar yang mengangkat panas dari luar untuk bahan. Selain itu permukaan dinding kecil yang distribusi ke satuan massa bahan baku dan ukuran partikel yang kasar menghasilkan *heating rate* yang rendah. Bentuk dari reaktor ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Reaktor *Rotary Kiln* (Lewandowski dkk, 2019)

2.5.4 Reaktor *Ablative*

Reaktor *Ablative* adalah metode baru dan orisinal dari pirolisis cepat dimana panas dipindahkan melalui kontak langsung antara kerucut dan partikel material yang dipanaskan. Pirolisis *Ablative* dapat didefinisikan sebagai peleburan atau abrasi termal substrat organik tanpa adanya pengoksidasi. Dalam reaktor *Ablative*, bahan ditekan ke dinding reaktor yang panas, laju devolatilisasi sangat dipengaruhi oleh kecepatan bahan baku, menekan kekuatan pada biomassa terhadap dinding panas, dan suhu. Meskipun partikel ukuran besar dapat diproses, erosi termal, ukuran, dan parameter pemberian umpan adalah yang terpenting. Menurut Surapparao and Tejasvi, (2022) ukuran yang disarankan hingga 20 mm untuk dapat di umpan ke reaktor dan peningkatan laju perpindahan panas sangat penting untuk mencapai konversi yang diinginkan.



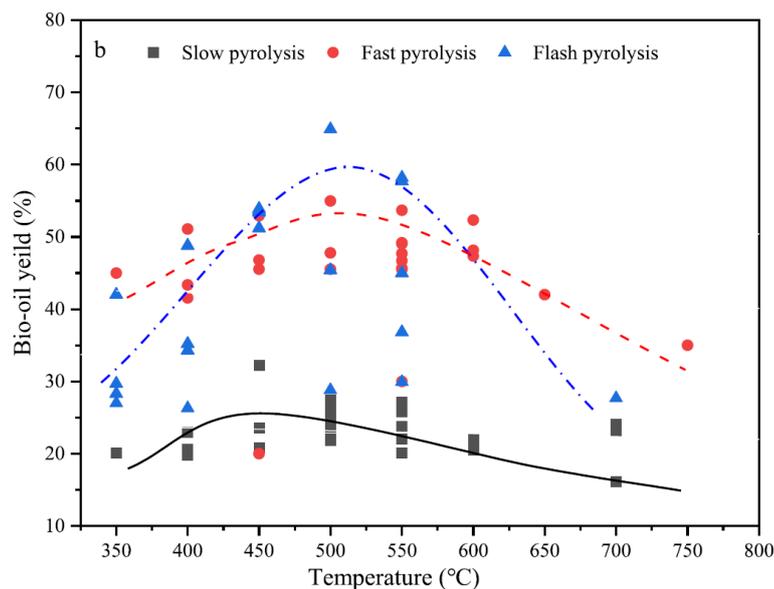
Gambar 2.6 Reaktor *Ablative* (Lewandowski dkk, 2019)

2.6 Parameter Pirolisis

2.6.1 Reaksi Temperatur

Reaksi temperatur adalah salah satu parameter kunci yang mempengaruhi proses pirolisis cepat, karena proses pirolisis terutama bersifat endotermis, suhu reaksi memainkan peranan penting dalam pirolisis. Temperatur adalah parameter yang kritis untuk mendapatkan hasil *bio-oil* yang tinggi, dan memiliki kisaran suhu pada 450°C - 550°C ditemukan sebagai suhu yang optimal oleh beberapa penelitian. Dengan peningkatan suhu pirolisis, konversi biomassa menjadi fraksi cair ditingkatkan tetapi pada suhu tinggi, perengkahan (*cracking*) sekunder hasil pirolisis primer dalam pembentukan gas (Isahak dkk, 2012).

Menurut (Singh dkk, 2020) Pada suhu pirolisis dengan temperatur dibawah 300°C efisiensi konversinya rendah (<20%), sedangkan konversi dari proses pirolisis yang signifikan terjadi pada suhu 300-600°C, terhitung dari 90-80% dari konversi total. Pada gambar 2.7 dapat dilihat bahwa hasil *bio-oil* pertama kali meningkat mencapai nilai maksimumnya pada suhu antara 400-500°C, hal ini terjadi pada pirolisis lambat, cepat dan kilat (Liu dkk, 2022). Oleh karena itu, sehubungan dengan produk pirolisis, dapat dikatakan bahwa suhu rendah (<400°C) menghasilkan produk *bio char* lebih tinggi, dan suhu tinggi menguntungkan untuk pelepasan volatil dan menyebabkan produksi lebih banyak *bio-oil*. Penyesuaian suhu pirolisis sangat penting dan bervariasi dengan jenis bahan baku yang digunakan dan mode operasi yang dijalankan. Hasil produk pirolisis secara signifikan terkait dengan suhu pirolisis dan komposisi bahan baku. Bahan baku adalah ukuran yang berguna untuk optimalisasi suhu pirolisis.



Gambar 2.7 Distribusi produk pirolisis (Liu dkk, 2022)

2.6.2 Laju Pemanasan

Laju pemanasan adalah faktor kunci yang mempengaruhi distribusi suhu, dan yang akan menghasilkan variasi produk. Laju pemanasan yang cepat kondusif untuk fragmentasi produk pirolisis cepat, menghasilkan fasa volatil dalam jumlah yang sangat besar dengan residu padat yang rendah. Dibawah kondisi pemanasan cepat, suhu meningkat dengan cepat, dan sejumlah besar volatil dilepaskan seketika. *Residence time* volatil dalam reaktor yang cepat dan partikel bahan baku yang kecil, sehingga banyak senyawa besar yang terbentuk, dan hasil *bio-oil* juga meningkat karena pengurangan massa dan keterbatasan perpindahan panas dan periode reaksi sekunder yang lebih pendek (Kan dkk, 2016). Pada Laju pemanasan yang tinggi, reaksi pirolisis terjadi secara instan, dan ketahanan terhadap perpindahan massa atau panas dalam partikel bahan baku harus cepat diatasi dalam waktu yang singkat, sedangkan reaksi yang sangat lambat akan bertahan lama pada laju pemanasan yang lebih rendah (Li dkk, 2019).

Pada tingkat pemanasan yang tinggi, *bio-oil* memiliki kualitas yang lebih baik dan kadar air yang rendah. Oksigen yang terkandung di dalam *bio-oil* berkurang ke tingkat yang lebih tinggi karena laju pemanasan cepat yang mendukung reaksi dekarboksilasi dan dekarbonisasi untuk menghasilkan CO₂ dan CO yang tinggi (Akhtar and Saidina, 2012). Untuk mempertahankan laju pemanasan yang tinggi, sumber pemanas dan ukuran partikel bahan baku memiliki peranan penting. Karena konduktivitas termal biomassa rendah (0.003-0.16 W/m. K), pencampuran cepat bahan baku dalam zona panas reaktor sangat penting untuk perpindahan panas yang baik.

2.6.3 Jenis Biomassa

Biomassa sangat mempengaruhi proses pirolisis, terutama pada jenis-jenis biomassa tertentu. Komposisi biomassa bervariasi berdasarkan asal tanaman, sifat tanah, lingkungan tumbuh, dan metode budidaya. Komponen organik dan anorganik di dalam biomassa juga mempengaruhi distribusi produk pirolisis. Dimana kandungan volatil yang tinggi menunjukkan porsi selulosa dan hemiselulosa yang tinggi, bertanggung jawab untuk pembentukan fraksi gas dan cair (Suriapparao dan Tejasvi, 2022). Biomassa dengan kandungan abu tinggi menghasilkan *bio-oil* yang rendah dan fraksi gas yang tinggi. Bahan volatil tinggi, unsur karbon tinggi, kadar air rendah, karbon tetap rendah, oksigen rendah, dan hidrogen dalam biomassa secara umum terbukti meningkatkan hasil *bio-oil* (Lim dkk, 2016).

2.6.4 Residence Time (Waktu Tinggal)

Waktu tinggal yang lebih singkat mendukung produksi *bio-oil* karena mempercepat uap yang terkondensasi dari reaktor untuk meminimalkan reaksi sekunder. Konduktivitas termal biomassa rendah yaitu (0.03-0.16 W/m. K). Oleh karena itu, waktu tinggal yang lama menyebabkan reaksi perengkahan sekunder termasuk karbonisasi, gasifikasi, dan perengkahan termal, yang pada akhirnya

menyebabkan penurunan hasil produk cair. Dalam pirolisis sekam padi, disimpulkan bahwa peningkatan waktu tinggal pirolisis dari 1 sampai 2 menit meningkatkan hasil minyak, sedangkan peningkatan lebih lanjut dalam waktu sedikit menurunkan hasil (Tsai dkk, 2007). Rancangan reaktor pirolisis didasarkan pada tingkat konversi dan total waktu yang dihabiskan oleh senyawa yang berevolusi. Senyawa berevolusi yang tidak dikeluarkan dari reaktor dalam waktu yang singkat, partikel arang di sekitarnya akan meng katalis reaksi perengkahan sekunder. Waktu tinggal yang lama membutuhkan energi input yang tinggi, begitu pun biaya pemrosesan keseluruhan. Untuk fraksi *bio-oil* berkualitas tinggi, waktu tinggal yang lama diperlukan untuk meningkatkan deoksigenasi, yang pada akhirnya menghasilkan gas tinggi karena oksigen dalam bahan baku dipindahkan ke fase gas.

2.6.5 Ukuran Partikel Bahan Baku

Ukuran partikel bahan baku mempengaruhi dalam mengatur suatu panas maupun mekanisme perpindahan massa dalam proses pirolisis. Untuk mencapai devolatilisasi lengkap bahan baku menjadi produk yang diinginkan, laju perpindahan panas harus dikontrol dengan baik, dan waktu penghilangan produk pirolisis harus dioptimalkan. Bahan baku yang berukuran kecil mendukung keseragaman perpindahan panas keseluruhan dalam distribusi panas, hal ini juga menyebabkan hasil *bio-oil* yang tinggi karena dekomposisi uap yang lebih cepat melalui perengkahan sekunder menjadi produk yang lebih ringan.

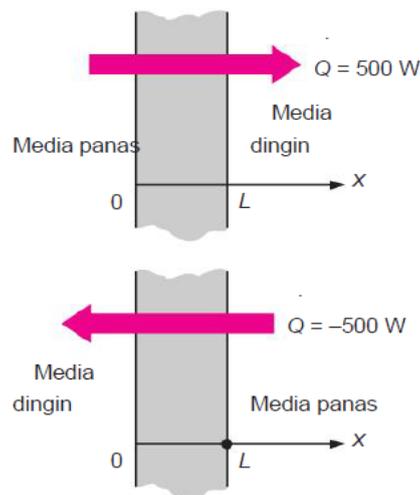
2.7 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah proses proses pertukaran energi termal antara dua sistem yang terjadi karena terdapat perbedaan suhu sistem tersebut. Panas akan berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur yang rendah. Aspek teknik perpindahan panas umumnya berkaitan dengan perhitungan laju

pertukaran, energi panas yang terjadi serta distribusi temperatur dan perhitungan *fluks* panas. Analisis perpindahan panas adalah kunci dalam desain dan pengembangan penukar panas misalnya (kondensor, evaporator, radiator, dll). Perpindahan panas terjadi melalui tiga cara yaitu konduksi, konveksi dan radiasi (Cengel, 2011).

2.7.1 Konduksi

Konduksi merupakan salah satu cara perpindahan panas dimana kalor mengalir dalam suatu zat akibat adanya pertukaran energi antar molekul yang memiliki tingkat energi yang berbeda karena berada pada daerah dengan temperatur berbeda. Jika pada suatu benda terdapat perbedaan suhu, maka pada benda tersebut akan terjadi perpindahan panas dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah dalam satu medium (padat, cair atau gas) yang bersinggungan secara langsung. Berikut adalah arah perpindahan panas pada konduksi yang di ilustrasi kan pada gambar 2.8 berikut (Cengel, 2011).



Gambar 2.8 Ilustrasi arah perpindahan panas konduksi (Cengel, 2011)

Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan temperatur, arah perpindahan panas terjadi pada daerah ber temperatur tinggi ke daerah temperatur rendah. Transfer panas ini berlanjut hingga mencapai titik temperatur yang sama. Besarnya beda suhu antara kedua permukaan (ΔT) maka makin cepat perpindahan kalor dan besar laju perpindahan panas (Q) berbanding lurus dengan luas permukaan bidang. Laju konduksi dapat ditulis dengan persamaan (1) berikut:

$$\dot{Q}_{cond} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (1)$$

Keterangan:

\dot{Q}_{cond} = Laju perpindahan panas, (watt)

k = Konduktivitas termal, (W/m.°C)

A = Luas Penampang panas, (m²)

ΔT = Temperatur, (°C)

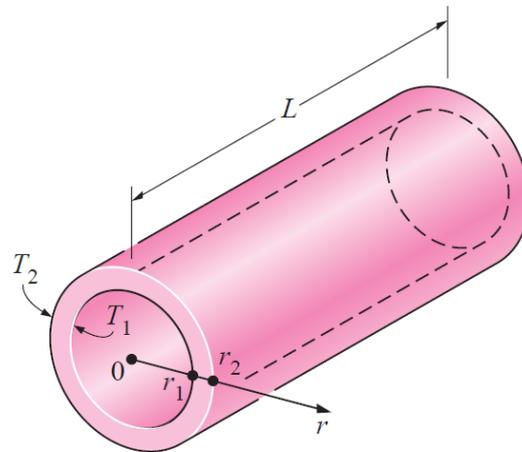
Δx = Perubahan jarak (m)

Tanda negatif di dalam persamaan untuk menjamin bahwa perpindahan panas dalam arah x positif adalah sebuah nilai positif.

Konduksi panas terjadi karena adanya interaksi antar molekul dalam semua zat, seperti padatan, cairan, dan gas, hanya saja konduktivitas terbesar itu terjadi pada padatan. Konduktivitas termal adalah sifat bahan yang menunjukkan seberapa cepat bahan tersebut dapat menghantarkan panas, atau kata lain nilai konduktivitas thermal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Jika nilai konduktivitas thermal suatu bahan makin besar, maka makin besar juga panas yang mengalir melalui benda tersebut. Karena itu, bahan yang harga k-nya besar adalah penghantar panas yang baik, sedangkan bila k-nya kecil bahan itu kurang menghantar atau merupakan isolator.

2.7.2 Konduksi Pada Silinder

Arah perpindahan panas pada suatu benda yang berbentuk silinder seperti tabung atau pipa adalah radial. Pada gambar 2.9 ditunjukkan suatu silinder panjang berongga dengan jari-jari dalam (r_2) dan jari-jari luar (r_1), dan panjang (L) dialiri panas sebesar (Q). Perbedaan suhu dalam dan suhu permukaan luar adalah $\Delta T = T_1 - T_2$.



Gambar 2.9 Konduksi Pada Silinder (Cengel, 2011)

Aliran panas hanya berlangsung ke arah radial (arah r) saja. Secara matematis perpindahan panas konduksi silinder dapat ditulis dengan persamaan (2) berikut:

$$\dot{Q} = 2\pi k L \frac{\Delta T}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

Dimana:

- \dot{Q} = Laju perpindahan panas, (watt)
- ΔT = Perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- r = Jari –jari lingkaran, (m)
- k = Konduktivitas Thermal, ($\text{W}/\text{m } ^{\circ}\text{C}$)

2.7.3 Konveksi

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida di sekitarnya yaitu pertukaran panas dari permukaan padat ke fluida yang bergerak disebut konveksi atau perpindahan panas yang terjadi pada permukaan benda padat karena fluida di sekitarnya (Cengel, 2011) Perpindahan panas konveksi dibedakan menjadi dua yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Pada gambar 2.10 Perpindahan panas konveksi bebas, yaitu apabila tidak ada elemen gaya dari luar dan gerak fluida disebabkan oleh variasi densitas akibat perbedaan temperatur. Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa atau eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa. Rumus untuk perpindahan panas secara konveksi adalah sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{conv} = hA (T_s - T_a) \quad (3)$$

Keterangan:

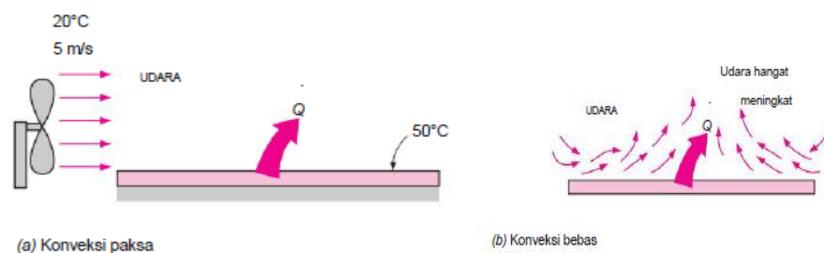
\dot{Q}_{conv} = Laju perpindahan panas konveksi (watt)

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

A = Luas penampang (m^2)

T_s = Temperatur Permukaan ($^\circ C$)

T_a = Temperatur lingkungan ($^\circ C$)



Gambar 2.10 Ilustrasi konveksi paksa dan bebas (Cengel, 2011)

2.7.4 Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan ke segala arah dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Perpindahan panas radiasi berlangsung dengan panjang gelombang pada interval tertentu. Perpindahan panas radiasi berbeda dengan perpindahan panas konduksi maupun konveksi yang membutuhkan medium untuk perantaranya. Setiap benda memiliki pancaran radiasi yang berbeda berdasarkan temperatur dan permukaan benda itu sendiri (Cengel, 2011). Untuk mengetahui laju perpindahan panas radiasi adalah sebagai berikut:

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (4)$$

Dimana:

\dot{Q} = kalor yang dipancarkan setiap detik (J/s)

ϵ = emisivitas benda ($0 < \epsilon < 1$)

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

A = luas permukaan (m^2)

T = suhu permukaan benda (K)

2.8 *Liquefied Petroleum Gas (LPG)*

LPG adalah salah satu jenis bahan bakar fosil yang banyak digunakan di seluruh dunia sebagai sumber energi. LPG terdiri dari campuran gas propilena, propane, butane, dan isobutene yang dihasilkan dari pemrosesan minyak bumi atau gas alam. Nilai kalor atau (*heating value*) merupakan jumlah panas yang terlepas untuk tiap satu satuan massa bahan bakar, dan merupakan sifat penting yang menentukan kandungan energi dan menentukan penggunaan energi suatu bahan bakar. Jumlah energi yang dilepaskan pada proses pembakaran dinyatakan sebagai entalpi pembakaran yang merupakan beda entalpi antara produk dan reaktan. Entalpi pembakaran ini dapat dinyatakan sebagai *Higher Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). HHV diperoleh ketika seluruh air hasil

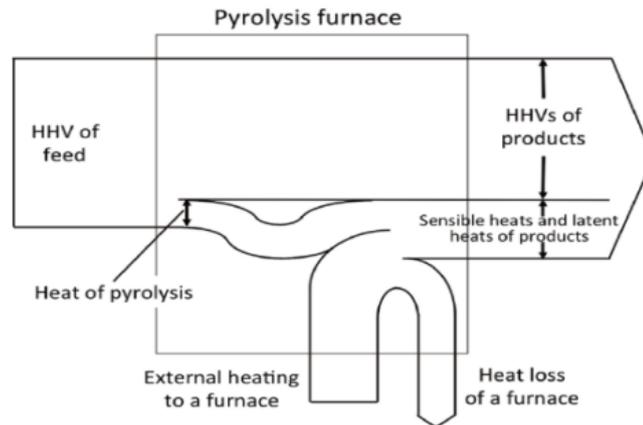
pembakaran dalam wujud cair sedangkan LHV diperoleh ketika seluruh air pembakaran dalam bentuk uap (Hernowo dkk, 2017). Nilai kalor LPG adalah jumlah energi yang dihasilkan dari pembakaran yang diukur dalam satuan kJ/kg.

2.9 Keseimbangan Energi

Keseimbangan energi atau keseimbangan panas adalah kondisi dimana energi panas yang masuk ke dalam suatu sistem sama dengan energi panas yang meninggalkan atau keluar dari sistem tersebut. *Heat balance* menggunakan hukum pertama termodinamika. Hukum pertama termodinamika adalah kekekalan energi, yaitu energi tidak dapat dimusnahkan atau dibuat hanya dapat diubah bentuknya. Studi dari penelitian (Atsonios dkk, 2015) untuk melakukan kesetimbangan energi dalam pirolisis, panas pirolisis ditentukan setelah perhitungan neraca panas berturut-turut di sekitar alat pirolisis. Dari neraca panas pertama, entalpi total gas pirolisis (produk uap pirolisis) diperkirakan yang digunakan pada neraca panas kedua untuk perhitungan panas pirolisis. Dalam mengevaluasinya beberapa parameter diukur seperti laju aliran massa bahan baku dan produk, nilai panasnya, temperatur di berbagai titik reaktor, dan aliran air pendingin.

Pada gambar 2.11 menunjukkan kesetimbangan energi panas di sekitar tungku pirolisis. Input panas meliputi nilai kalor lebih tinggi (HHV) dan panas sensibel bahan baku. Keluaran panas meliputi HHV, panas sensibel produk gas, cair, arang, dan panas yang hilang dari tungku pirolisis. HHV adalah nilai dibawah suhu dan tekanan lingkungan standar. Temperatur setiap produk yang dikeluarkan dari tungku dianggap sama dengan temperatur pirolisis. Perhitungan kesetimbangan energi pada tungku pirolisis menunjukkan bahwa panas eksternal diperlukan untuk mengkompensasi konsumsi panas dari panas sensibel dan laten produk serta

kehilangan panas dari suatu produk (Kodera dkk, 2016).



Gambar 2.11 Diagram neraca panas pirolisis (Kodera dan Kaiho, 2016)

Kesetimbangan energi mempunyai tujuan untuk mengukur tingkat efektivitas energi yang nantinya dapat digunakan untuk mengetahui berapa besar *heat losses* yang terjadi selama proses pengujian. *Heat balance* pada reaktor melibatkan beberapa komponen seperti Energi masuk (Q_{in}) dan energi keluar (Q_{out}). Energi masuk yang terjadi selama proses pengujian reaktor tubular ini meliputi: Q_{Gas} , $Q_{plastik}$ dan Q_{air} , sedangkan energi yang keluar pada proses pengujian ini meliputi massa sampel pirolisis dan temperatur air panas. Kemudian setelah dilakukan perbandingan antara besar energi masuk dengan energi keluar maka di dapatlah berapa besar *heat losses* yang terjadi, ini lah yang disebut dengan *heat balance* pada reaktor pirolisis. Berikut adalah persamaan untuk mencari *heat balance* pada pengujian ini:

$$(Q_{in}) = (Q_{out}) + (Q_{loss}) \quad (5)$$

Dimana: (Q_{in}) = Energi *input*, (kJ)

(Q_{out}) = Energi *output*, (kJ)

(Q_{Loss}) = Energi *losses*, (kJ)

2.9.1 Energi Input

Energi input merupakan energi total yang masuk saat proses pengujian berlangsung. Terdapat tiga komponen energi masuk yaitu energi gas (LPG) yang diperlukan untuk menaikkan temperatur sistem, energi bahan baku (plastik yang akan di pirolisis), dan Energi air yang diserap sebagai proses pendinginan kondensor. Untuk mencari energi masuk maka digunakan rumus sebagai berikut:

$$Q_{gas} = HHV_{gas} \cdot M_{gas} \quad (6)$$

Keterangan:

HHV = Heat Heating Value (kJ/kg)

M = Massa suatu zat (kg)

$$Q_{plastik} = HHV_{plastik} \cdot M_{sampel} \quad (7)$$

Keterangan:

HHV = Heat Heating Value (kJ/kg)

M = Massa sampel (kg)

Laju aliran massa air yang digunakan saat proses pirolisis yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\dot{m}_{air} = Q \cdot \rho \quad (8)$$

Keterangan:

\dot{m} = Laju aliran Massa (kg/s)

Q = Debit air (m³/s)

ρ = Massa jenis air (kg/m³)

Kemudian mencari massa air yang mengalir sebagai proses pendinginan pirolisis selama 50 menit yaitu sebagai berikut:

$$M_{air} = \dot{m} \cdot t \quad (9)$$

Keterangan:

M_{air} = Massa (kg)

t = Waktu (s)

Energi air yang diserap sebagai proses pendinginan kondensor pirolisis yaitu dengan menggunakan rumus:

$$Q = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (10)$$

Keterangan:

Q = Panas total (J)

M = Massa (kg)

C_p = Kalor jenis zat (kJ/kg. °C)

ΔT = Beda temperatur air (°C)

2.9.2 Energi Output

Energi keluar pada reaktor pirolisis dimana energi yang memanaskan plastik pada temperatur normal hingga mencapai uap gas yang menghasilkan minyak. Produk/output yang diperoleh selama proses pirolisis berlangsung tidak hanya berbentuk minyak (bio-oil) namun juga arang (*char*) plastik yang masih tersisa di dalam reaktor.

$$Q_{plastik} = HHV_{sampel\ pirolisis} \cdot M_{bahan\ baku} \quad (11)$$

$$Q_{char} = HHV_{char\ pirolisis} \cdot M_{bahan\ baku} \quad (12)$$

2.9.3 Energi Losses

Terdapat kerugian atau kehilangan energi setiap sistem yang memerlukan energi. Energi *losses* merupakan panas yang hilang dari suatu sistem yang mengakibatkan kerugian pada perpindahan panas karena adanya rambatan termal pada suatu sistem. Semakin tinggi energi *losses* maka semakin besar kerugian energi seiring lamanya penggunaan sistem tersebut. Energi losses pada dinding tabung pirolisis dapat dihitung dengan persamaan 3 (rumus konveksi).

2.9.4 Mass Yield

Mass yield merupakan fraksi massa komponen biomassa atau bahan baku lainnya yang ada di dalam produk torefaksi atau pirolisis (Basu, 2018). Dengan meningkatkan temperatur dan waktu tinggal, maka produk pirolisis berupa arang menurun, sedangkan hasil uap yang mudah menguap meningkat, menghasilkan padatan dengan kandungan karbon tinggi, kandungan oksigen yang menurun dan mudah menguap seperti peningkatan kepadatan energi. Kemudian hasil energi atau *energy yield* adalah nilai kuantitatif dari energi yang tersimpan dari bahan baku setelah torefaksi atau pirolisis. Namun terlepas dari hasil massa, hasil energi atau kepadatan energi, semuanya tergantung pada bahan baku, temperatur pirolisis, waktu tinggal dan jenis reaktor. Berdasarkan definisi hasil massa, hasil energi dan kepadatan energi yaitu pada persamaan berikut:

$$\text{Mass Yield} \rightarrow MY_{daf} = \frac{M_{Pyrolysis}}{M_{raw}} \quad (13)$$

Keterangan:

MY_{daf} = *Mass Yield*

$M_{Pyrolysis}$ = Massa total bahan baku ter pirolisis

M_{raw} = Massa total bahan baku mentah

$$\text{Energy Yield} \rightarrow Mass_{yield} \times \frac{HHV_{pyrolysis}}{HHV_{raw}} \quad (14)$$

Keterangan:

$HHV_{pyrolysis}$ = Energi produk hasil pirolisis

HHV_{raw} = Energi bahan baku

2.10 Diagram *Sankey*

Diagram *Sankey* adalah jenis diagram alir khusus yang untuk fokus pada aliran energi dan distribusinya di berbagai sistem energi. Diagram *sankey* digunakan untuk menunjukkan sebuah aliran atau proses dalam bentuk tanda panah, yang besarnya mewakili besarnya aliran dan di setiap ujungnya menunjukkan sebuah alur kerja (Soundararajan dkk, 2014). Diagram *Sankey* merupakan diagram untuk memvisualisasikan energi yang masuk dan keluar, serta pemanfaatannya tentang kerugian dan tidak efisien dalam sistem (Lupton dan Allwood, 2017). Diagram *sankey* berbentuk panah atau garis arah dan memiliki cabang. Panah atau garis arah digunakan untuk mewakili setiap besarnya aliran dengan ketebalan panah atau garis arah sebanding dengan besarnya aliran energi.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan Penelitian

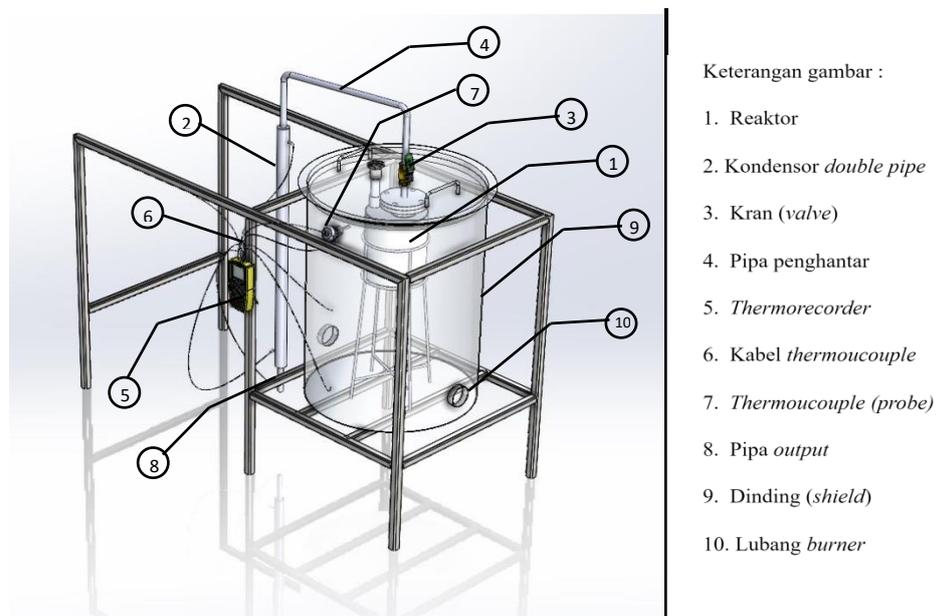
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei sampai dengan bulan Juli 2023. Lokasi penelitian ini dilakukan di TPST (Tempat Pembuangan Sampah Terpadu) Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

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

1. Reaktor pirolisis tipe *fixed* tubular

Reaktor pirolisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah pirolisis reaktor tipe *fixed* tubular, seperti pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Reaktor Pirolisis *Type Fixed* Tubular

Berikut adalah spesifikasi lengkap alat pirolisis seperti pada table 3.2

Tabel 3.1 Spesifikasi reaktor pirolisis tipe *fixed* tubular

Reaktor	
Diameter dalam tabung	220 mm
Tinggi tabung dalam	250 mm
Kapasitas maksimum	9,5 kg
Kondensor	
Panjang	980 mm
Diameter pipa luar	48,3 mm
Diameter pipa dalam	21,3 mm
Diameter <i>flow</i> (inlet dan outlet)	7,8 mm
Tebal pipa	2 mm
Tabung Pembakaran	
Diameter	600 mm
Tinggi	820 mm
Tebal dinding tahan api	40 mm
Konstruksi	
Reaktor, <i>Frame</i> , Kondensor	<i>Stainless Steel</i>
Sistem Pembakaran	
Ruang bakar	Vertikal <i>burner</i>
Bahan bakar	<i>Liquid Petroleum Gas</i> (LPG)
Sistem Kontrol	
Temperatur	<i>Thermocouple Type K</i> <i>Thermometer</i>
Waktu	<i>Stopwatch</i>
Sistem Pendinginan	
Sistem sirkulasi air	<i>Water pump</i>

2. *Temperatur Recorder Data logger*

Temperatur recorder data logger pada gambar 3.2 memiliki fungsi yaitu sebagai alat ukur temperatur 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°C/1°C/, 0,1°F/1°F.



Gambar 3.2 *Temperatur Recorder Data logger*

3. Gas LPG

Bahan bakar yang digunakan sebagai sumber pemanas pada penelitian ini adalah gas LPG. Contoh gas LPG yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3.3 Gas LPG 3 kg

4. Timbangan Digital

Pada penelitian ini timbangan digital digunakan untuk memudahkan penulis menentukan berat dari bahan baku yang akan masuk dan keluar dari reaktor dan juga digunakan menimbang LPG saat pengujian berlangsung untuk mengetahui gas LPG yang terpakai, dapat dilihat pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Timbangan digital

5. *Water pump*

Water pump digunakan untuk mengalirkan air kedalam sistem pipa kondensor untuk mendinginkan uap agar menjadi bentuk cair (*bio-oil*) atau disebut dengan kondensasi



Gambar 3.5 *Water pump*

6. Kunci pipa, pas dan ring

Peralatan seperti kunci ini digunakan untuk membuka dan menutup baut penghubung antara bagian-bagian pipa dengan reaktor pirolisis, sedangkan untuk kunci pas atau ring digunakan untuk membuka dan menutup bagian penutup reaktor, yang dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut:



Gambar 3.6 Kunci pipa, pas dan ring

7. Bahan

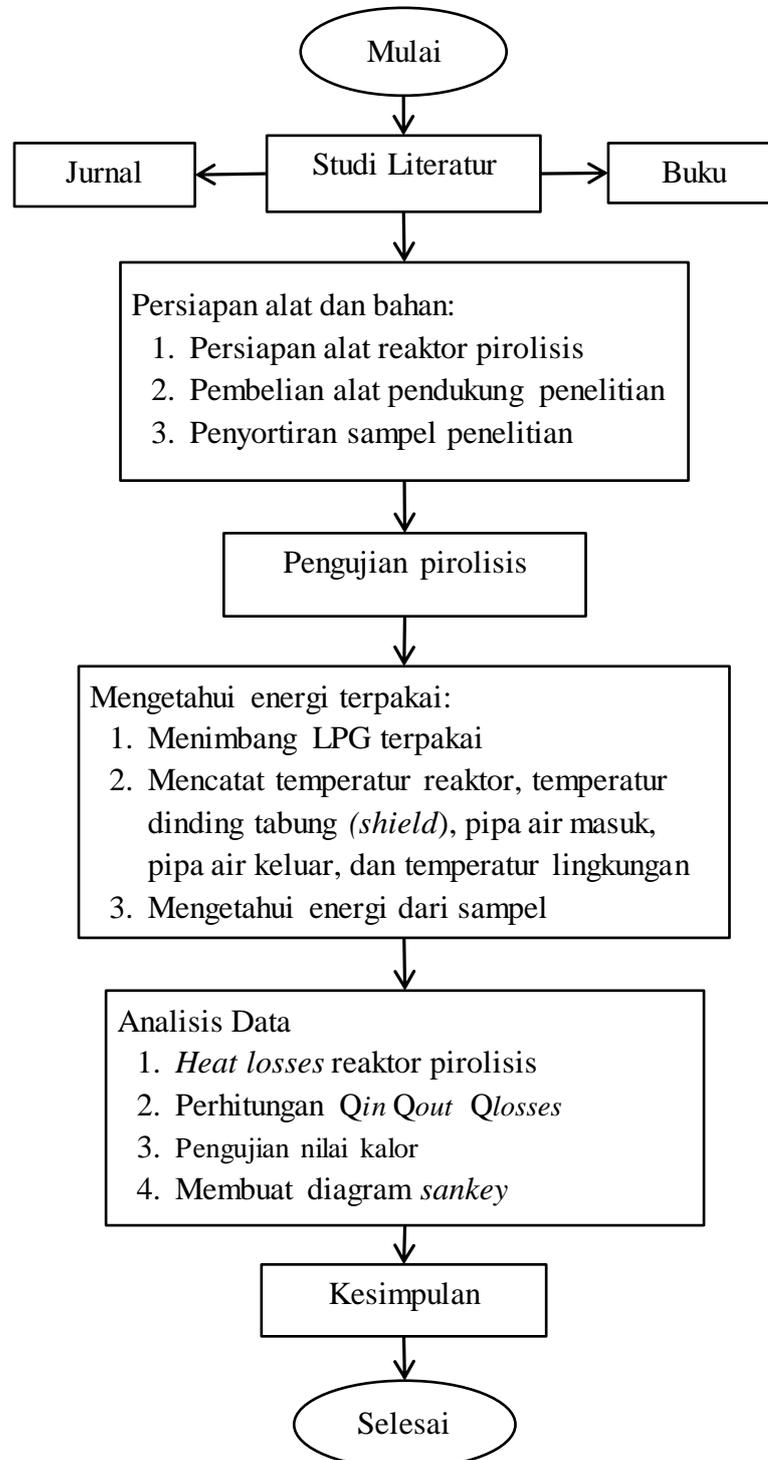
Bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu sampah plastik jenis PP (*Polypropylene*) pada gambar 3.7 yang sudah dibersihkan dan dikeringkan kemudian di cacah dengan ukuran yang tidak seragam yaitu sekitar 1 sampai 2 cm untuk kemudian siap dimasukkan kedalam reaktor



Gambar 3.7 Plastik PP

3.3 Alur Tahapan Penelitian

Alur tahapan penelitian ini disampaikan dalam bentuk *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Diagram Alur Penelitian

3.4 Skema Penelitian

Subtansi dari penelitian ini adalah melakukan analisa terkait dengan kesetimbangan energi yang dilakukan proses pembakaran melalui reaktor pirolisis tipe *fixed bed*, dimana hasil dari proses pembakaran dari produk pirolisis untuk mengetahui *mass yield* dan *heat losses* dari mesin pirolisis. Beberapa tahapan yang dilalui pada penelitian ini sebagai berikut:

3.4.1 Studi Literatur

Beberapa tahapan yang dilalui pada penelitian ini di antaranya adalah tahap studi literatur dari beberapa referensi, meliputi:

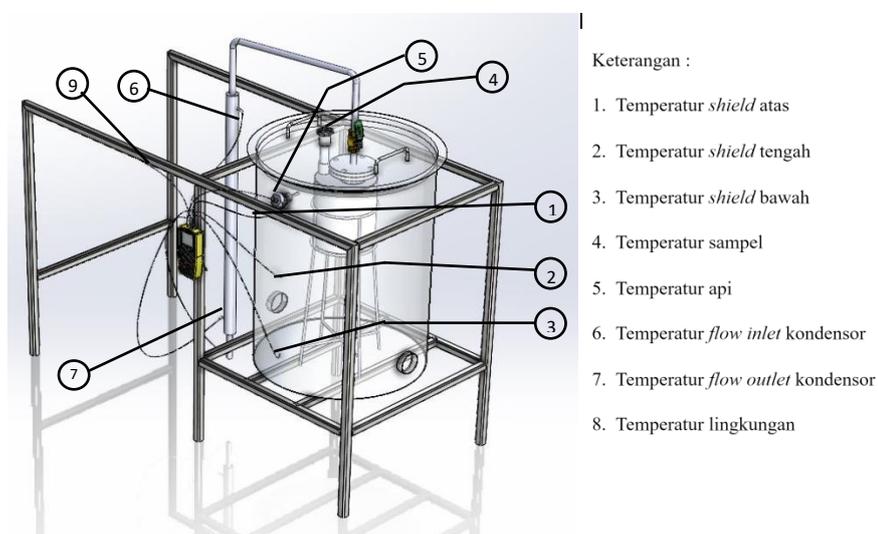
- a. Studi tentang potensi energi dari sampah plastik dan pemanfaatannya
- b. Studi tentang pirolisis serta macam-macam reaktor pirolisis
- c. Studi mengenai kesetimbangan energi di dalam sistem pirolisis
- d. Studi produk hasil pirolisis yang telah dilakukan sebelumnya
- e. Studi tentang penelitian-penelitian pirolisis yang telah dilakukan sebelumnya.

3.4.2 Persiapan

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

3.4.3 Pelaksanaan

- a. Memasukkan bahan baku sampah plastik kedalam reaktor yang dengan berat 1 kg.
- b. Memasukkan reaktor kedalam tungku pembakaran atau biasa disebut reaktor ruang proses pembakaran.
- c. Menghubungkan reaktor dengan pipa penghantar bagian kondensor
- d. Menghubungkan *thermocouple type K* pada bagian mesin pirolisis seperti gambar 3.9 ke alat *temperature recorder data logger* untuk merekam temperatur tiap satuan waktu.
- e. Melakukan uji coba awal untuk menentukan kondisi operasi pirolisis yang optimal, seperti temperatur, waktu tinggal, dan jenis bahan pendukung lainnya.
- f. Meletakkan LPG di atas timbangan digital untuk mengukur energi yang terpakai tiap satuan waktu.
- g. Memanaskan reaktor pirolisis hingga mencapai suhu yang diperlukan yaitu berkisar $450-500^{\circ}\text{C}$, dan biarkan sampah plastik mengalami pirolisis selama waktu yang telah ditentukan.
- h. Mengumpulkan produk pirolisis yang dihasilkan dari reaktor pirolisis seperti minyak, atau arang.



Gambar 3.9 Titik pengukuran saat pengujian

3.4.4 Energi Terpakai

- a. Mengukur energi yang terpakai/digunakan dengan mencatat jumlah energi gas LPG yang terpakai saat proses pembakaran.
- b. Mengetahui temperatur dari ke sembilan titik pengukuran pada alat pirolisis.
- c. Mengetahui *energy yield* dari sampel.

3.4.5 Analisis Hasil Pengujian

- a. Setelah semua data terkumpul, tahapan selanjutnya adalah menganalisis kesetimbangan energi reaktor pirolisis dengan menghitung energi yang masuk, keluar, dan *losses*.
- b. Memvisualisasikan hasil dari penelitian dengan menggunakan diagram *sankey*.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan hasil perhitungan yang sudah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Proses pirolisis terdapat tiga komponen energi yang terjadi yaitu energi input (Q_{in}), energi output (Q_{out}), dan energi losses (Q_{loss}). Pada energi input (Q_{in}) didapatkan energi gas sebesar 26.237,12 kJ, plastik *polypropylene* 19.535,1 kJ, dan Air 2.834,04 kJ. Energi output (Q_{out}) didapatkan energi dari bio-oil 5.274,47 kJ, sisa arang (*char*) selama pengujian sebesar 2.923,75 kJ. Selanjutnya energi losses yang didapatkan selama pengujian pada dinding *shield* adalah sebesar 793,71 kJ.
2. Proses Pirolisis selama 50 menit membutuhkan energi total ($Q_{in\ total}$) sebesar 48.606,26 kJ (100%), kemudian energi keluar (Q_{out}) sebesar 15.708,42 kJ (32,2%). Energi *losses* (Q_{loss}) dinding *shield* sebesar 793,71 kJ (1,63%) dan sisanya (Q_{loss}) lain-lain sebesar 32.104,13 kJ (66,05%), yang dimaksud dengan (Q_{loss}) lain-lain adalah energi yang hilang selama proses pengujian berlangsung yang tidak terindikasi karena keterbatasan alat ukur, sehingga energi yang terbuang tersebut dapat dimanfaatkan, salah satunya digunakan sebagai media pemanas sampel pirolisis yang masih belum basah dengan memodifikasi alat pirolisis tersebut agar lebih efisien.

3. Pengujian pirolisis ini menghasilkan suatu produk yaitu bio-oil dengan massa 332 ml dan dengan densitas 0,882 kg/l, sehingga diperoleh nilai *mass yield* dan *energy yield* yang sama sebesar 29,28 %. Nilai *mass yield* dan *energy yield* digunakan untuk mengetahui seberapa efisien alat pirolisis ini bekerja dalam menghasilkan produk pirolisis.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk kemajuan dan perkembangan penelitian pirolisis adalah sebagai berikut:

1. Selama pengujian berlangsung energi yang terbuang memiliki rasio nilai terbesar, semestinya hal ini dapat dimanfaatkan. salah satu contohnya digunakan sebagai media pemanas untuk sampel yang masih dalam keadaan masih basah
2. Perlu dilakukan pengembangan dan inovasi alat pirolisis, terutama pada tutup tabung pemanas yang terjadi *heat losses* yang tinggi, karena perlu dibuka sedikit untuk masuknya udara pada proses pemanasan. Sehingga perlu dibuatkan lubang atau cerobong untuk men suplai udara pembakaran sehingga dapat me minimalisir *heat losses*.
3. Perlu dilakukan pengembangan pada reaktor agar lebih baik lagi, yaitu dengan memodifikasi baut penutup reaktor agar lubang berulir nya disatukan atau di las langsung dengan reaktor, agar mempermudah saat dibuka maupun ditutup reaktor nya tanpa banyak menggunakan bantuan alat.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhtar, J., & Amin, N. S. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(7), 5101-5109.
- Astuti, A. D., Wahyudi, J., Ernawati, A., & Aini, S. Q. (2020). Kajian pendirian usaha biji plastik di kabupaten Pati, Jawa Tengah. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan Dan IPTEK, 16*(2), 95-112.
- Atsonios, K., Panopoulos, K., Bridgwater, A., & Kakaras, E. (2015). Biomass fast pyrolysis energy balance of a 1kg/h test rig. *International journal of thermodynamics, 18*(4), 267-275.
- Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press.
- Batidzirai, B., Mignot, A.P.R., Schakel, W.B., Junginger, H.M., Faaij, A.P.C. 2013. *Biomass Torrefaction Technology: Techno-economic Status and Future Prospect*. *Energy 62* (2013) 196-214.
- Bok, J. P., Choi, Y. S., Choi, S. K., & Jeong, Y. W. (2014). Fast pyrolysis of Douglas fir by using tilted-slide reactor and characteristics of biocrude-oil fractions. *Renewable energy, 65*, 7-13.
- Boundy, B., Diegel, W. S., Wright, L., Davis, C. Stacy. (2011). BIOMASS ENERGY DATA BOOK : EDITION 4. *Energy efficiency & Renewable Energy*.

- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. *Waste management*, *34*(12), 2466-2486.
- 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.
- Hasan, M. M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., & Jahirul, M. I. (2021). Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *145*, 111073.
- Hernowo, P., Astuti, N., Prabowo, M. A., & Sutoyo, Y. (2017). Pengukuran nilai kalor biomasa bahan baku biofuel. *Jurnal Teknologi Vol*, *6*(2).
- Hidayat, F., & Siregar, I. H. (2022). Uji Karakteristik Minyak Pirolisis Berbahan Baku Limbah Plastik Polypropylene. *Jurnal Teknik Mesin*, *10*(01), 13-20.
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, *39*, 109-143.
- Isahak, W. N. R. W., Hisham, M. W., Yarmo, M. A., & Hin, T. Y. Y. (2012). A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method. *Renewable and sustainable energy reviews*, *16*(8), 5910-5923.
- Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and sustainable energy reviews*, *57*, 1126-1140.
- Kodera, Y., & Kaiho, M. (2016). Model calculation of heat balance of wood pyrolysis. *Journal of the Japan Institute of Energy*, *95*(10), 881-889.

- Lewandowski, W. M., Januszewicz, K., & Kosakowski, W. (2019). Efficiency and proportions of waste tyre pyrolysis products depending on the reactor type—A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *140*, 25-53.
- Lim, C. H., Mohammed, I. Y., Abakr, Y. A., Kazi, F. K., Yusup, S., & Lam, H. L. (2016). Novel input-output prediction approach for biomass pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, *136*, 51-61.
- Li, J., Qiao, Y., Zong, P., Qin, S., Wang, C., & Tian, Y. (2019). Fast pyrolysis characteristics of two typical coastal zone biomass fuels by thermal gravimetric analyzer and down tube reactor. *Bioresource technology*, *283*, 96-105.
- Liu, J., Chen, X., Chen, W., Xia, M., Chen, Y., Chen, H., ... & Yang, H. (2022). Biomass pyrolysis mechanism for carbon-based high-value products. *Proceedings of the Combustion Institute*.
- Lupton, R. C., & Allwood, J. M. (2017). Hybrid Sankey diagrams: Visual analysis of multidimensional data for understanding resource use. *Resources, Conservation and Recycling*, *124*, 141-151.
- Maliutina, K., Tahmasebi, A., Yu, J., & Saltykov, S. N. (2017). Comparative study on flash pyrolysis characteristics of microalgal and lignocellulosic biomass in entrained-flow reactor. *Energy Conversion and Management*, *151*, 426-438.
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International biodeterioration & biodegradation*, *119*, 239-252.

- Mufidah, A., & Siregar, I. (2022). Uji Karakteristik Minyak Pirolisis Berbahan Baku Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(03), 143-150.
- Permana, Y. A., Mulyadi, S., Sutjahjono, H., & Rosyadi, A. A. (2020). Pengaruh Temperatur dan waktu pemanasan pada proses pirolisis PET/PP terhadap karakteristik bahan bakar. *ROTOR*, 12(2), 1-4.
- Rachmawati, V. (2015). Simulasi perpindahan panas pada lapisan tengah pelat menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), A13-A18.
- Singh, S., Chakraborty, J. P., & Mondal, M. K. (2020). Pyrolysis of torrefied biomass: Optimization of process parameters using response surface methodology, characterization, and comparison of properties of pyrolysis oil from raw biomass. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122517.
- Sirait, R., Maulana, E., & Mahardika, D. (2020, December). Analisis Keseimbangan Energi pada Reaktor Pirolisis Kapasitas 75 Kg/Jam. In *Prosiding Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ* (Vol. 2020).
- Solekah, N. A., Handriana, T., & Usman, I. (2022). Millennials' Deals with Plastic: The Effect of Natural Environmental Orientation, Environmental Knowledge, and Environmental Concern on Willingness to Reduce Plastic Waste. *Journal of Consumer Sciences*, 7(2), 115-133.
- Soundararajan, K., Ho, H. K., & Su, B. (2014). Sankey diagram framework for energy and exergy flows. *Applied energy*, 136, 1035-1042.

- Suriapparao, D. V., & Tejasvi, R. (2022). A review on role of process parameters on pyrolysis of biomass and plastics: Present scope and future opportunities in conventional and microwave-assisted pyrolysis technologies. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 435-462.
- Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, Y. M. (2007). Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions. *Bioresource technology*, 98(1), 22-28.
- 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. 396, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.
- Wen, Z., Xie, Y., Chen, M., & Dinga, C. D. (2021). China's plastic import ban increases prospects of environmental impact mitigation of plastic waste trade flow worldwide. *Nature communications*, 12(1), 425.
- Wijayanti, W., Sasongko, M. N., & Kusumastuti, R. (2021). Modelling analysis of pyrolysis process with thermal effects by using Comsol Multiphysics. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101625.
- Yasa, M., & Siregar, I. (2023). Pengaruh Jumlah Lilitan Pipa Kondensor Terhadap Kuantitas Minyak Pirolisis Sampah Plastik. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(01), 71-78.
- Yona, D., Zahran, M. F., Fuad, M. A. Z., Prananto, Y. P., & Harlyan, L. I. (2021). *Mikroplastik di Perairan: Jenis, Metode Sampling, dan Analisis Laboratorium*. Universitas Brawijaya Press.