

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Plastik telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan manusia dan sulit untuk dihindari. Sejak penemuannya pada tahun 1907, penggunaan plastik telah meningkat pesat. Di Indonesia, permintaan plastik mencapai 200 ton per tahun. Seiring dengan bertambahnya penggunaan plastik, volume sampah plastik juga meningkat. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) tahun 2021, rata-rata setiap orang di Indonesia menghasilkan 0,8 kg sampah per hari, yang berjumlah sekitar 189 ribu ton sampah harian. Dari total tersebut, sekitar 15% adalah sampah plastik, setara dengan 28,4 ribu ton sampah plastik setiap harinya (Nofendri, 2021).

Indonesia merupakan penyumbang terbanyak sampah plastik nomor 2 di dunia, tetapi cara penanganannya masih rendah dan tanggung jawab perusahaan terhadap sampah plastik mereka pun masih rendah (Syahni, 2019). Plastik adalah bahan anorganik yang terdiri dari senyawa-senyawa kimia berbahaya bagi lingkungan. Sampah plastik sangat sulit terurai secara alami. Untuk bisa terdegradasi sempurna, sampah plastik memerlukan waktu hingga 80 tahun. (Kurniawan, 2015).

Jumlah sampah yang dihasilkan oleh berbagai sektor di Indonesia terus meningkat setiap tahun, termasuk dari sektor industri besar. Peningkatan volume sampah ini memerlukan pengelolaan yang efektif. Di antara berbagai jenis sampah, botol plastik merupakan salah satu yang paling signifikan. Plastik itu sendiri memiliki beberapa kategori berdasarkan sifatnya. Botol plastik yang terbuat dari Polietilena Tereftalat (PETE) memerlukan perhatian khusus karena sangat sulit terurai secara alami.

Oleh karena itu, penting untuk mencari alternatif dalam mendaur ulang sampah plastik. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pirolisis dan co-pirolisis. Pirolisis adalah proses penguraian bahan organik dan non-organik melalui pemanasan dalam kondisi minim atau tanpa oksigen, tanpa melibatkan reagen lain (Nofendri, 2021). Sama seperti pirolisis, co-pirolisis hanya berbeda di bahannya saja, co- pirolisis dapat menggunakan 2 bahan sekaligus.

Dengan metode ini sampah plastik bisa menjadi bahan bakar alternatif dari fosil ini untuk produk *liquid*. Sedangkan, padatan atau *char* bisa dijadikan karbon aktif. Karbon aktif tersebut bisa menjadi absorben, absorben itu bisa menguap zat berbahaya pada suatu limbah cair. Selain sampah plastik, biomassa juga bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil. Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui fotosintesis, baik dalam bentuk produk maupun limbah. Biomassa mirip dengan bahan bakar fosil karena keduanya berasal dari makhluk hidup (Parinduri, 2020).

Kopi adalah tanaman perkebunan yang telah lama dibudidayakan dan memiliki nilai ekonomi yang signifikan (Khusna, 2015). Lampung merupakan salah satu kota penghasil kopi sehingga di Lampung banyak yang memproduksi kopi. Dari produksi kopi tersebut menghasilkan limbah ampas kopi dan ampas kopi dapat ditemukan di mana saja. Ampas kopi tersebut dapat dimanfaatkan untuk keperluan sumber energi terbarukan.

Dengan adanya kebijakan energi nasional, penggunaan batubara diperkirakan akan menjadi semakin dominan. Di sisi lain, produksi energi fosil lainnya seperti minyak bumi dan gas alam mengalami penurunan karena cadangannya semakin berkurang. Selain itu, data menunjukkan bahwa bauran energi nasional masih didominasi oleh bahan bakar minyak, yang diperkirakan harganya akan terus naik. Oleh karena itu, mengingat potensi batubara yang besar di Indonesia, penggantian dan diversifikasi dari bahan bakar minyak dan gas alam menjadi sangat relevan.

Sehingga penelitian ini akan dilakukan dengan metode co-pirolisis untuk menjadi bahan bakar energi terbarukan dengan menggunakan bahan berupa sampah plastik jenis PETE, biomassa, dan ampas kopi. Sampah plastik jenis PETE dapat diuraikan lebih cepat dengan menggunakan bantuan batubara, ampas kopi dapat menaikkan nilai guna ampas tersebut dan sumber dapat diperbarui, dan terakhir yaitu batubara dapat menaikkan nilai kalor.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan *%yield* hasil co-pirolisis campuran plastik PETE, batubara, dan ampas kopi.
2. Menentukan nilai kalor padatan (*char*) dari hasil co-pirolisis campuran plastik PETE, batubara, dan ampas kopi.
3. Mengidentifikasi senyawa kimia pada *bio-oil* yang dihasilkan melalui metode co- pirolisis dengan analisis GC-MS.
4. Menentukan densitas dan viskositas hasil co-pirolisis campuran plastik PETE, ampas kopi dan batubara.

1.3. Kerangka Pikiran

PETE adalah jenis resin poliester yang memiliki daya tahan tinggi, kekuatan, dan ringan, serta mudah dibentuk saat dipanaskan, dengan densitas antara 1,35 hingga 1,38 gram/mL. Rumus molekul PETE adalah $(-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_5-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$. Plastik PETE sering digunakan dalam laminasi, terutama pada permukaan luar kemasan, untuk meningkatkan ketahanan kemasan terhadap abrasi dan robekan.

Batubara dapat dimanfaatkan untuk membuat bahan bakar dan dapat menaikkan nilai kalor. Ampas kopi merupakan suatu limbah dari pengolahan kopi, ampas kopi ini bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif melalui metode co-pirolisis.

1.4. Kontribusi

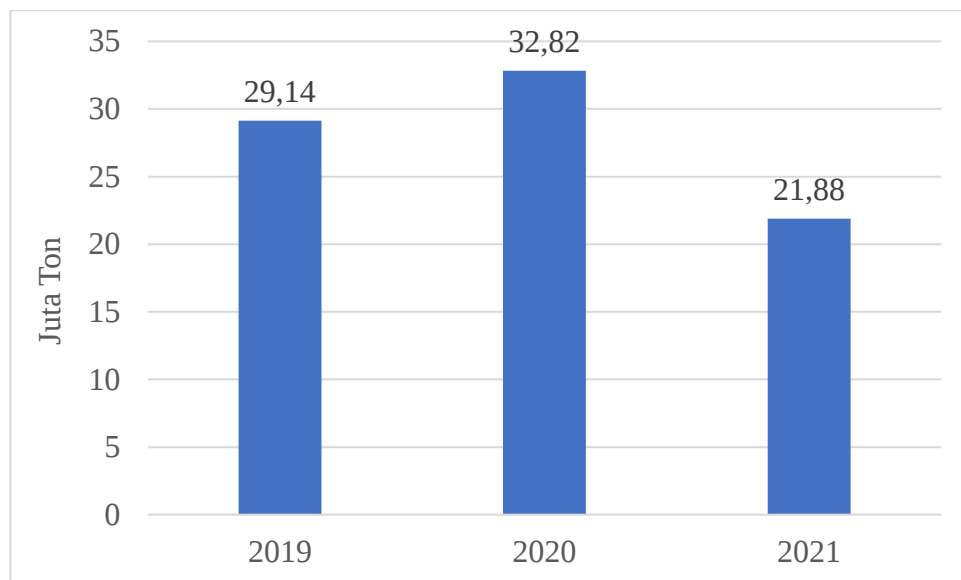
Dengan dicapainya tujuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan berbagai kontribusi diantaranya:

1. Mengurangi pencemaran lingkungan yang berujung kerusakan pada ekosistem.
2. Memanfaatkan limbah menjadi bahan yang lebih berguna.
3. Salah satu alternatif penanganan limbah plastik yang susah diuraikan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sampah Plastik Di Indonesia

Di Indonesia, penggunaan plastik sekali pakai masih marak. Namun, pengelolaan sampah plastik di negara ini belum berjalan dengan baik. Sampah plastik menjadi masalah utama pencemaran lingkungan, baik di darat maupun di laut, karena sifatnya yang sulit terurai. Pada tahun 2021, Indonesia menghasilkan 21,88 juta ton sampah plastik, jumlah ini menurun sebesar 33,33% dari tahun sebelumnya yang mencapai 32,82 juta ton. Berikut Gambar 1. tentang data sampah di Indonesia.



Gambar 1. Data Sampah Di Indonesia (Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021).

2.2. Metode Pengolahan Sampah Plastik

Pengolahan sampah merupakan salah satu aspek dari penanganan sampah dan, menurut UU Republik Indonesia No. 18 Tahun 2008, diartikan sebagai proses yang mengubah bentuk, karakteristik, komposisi, dan jumlah sampah. Proses ini bertujuan untuk mengurangi volume sampah serta memanfaatkan nilai yang ada di dalamnya, seperti bahan daur ulang, produk baru, dan energi.

Pengolahan sampah dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti pengomposan, daur ulang (*recycling*), pembakaran (*insinerasi*), dan metode

lainnya. Secara umum, pengolahan sampah adalah proses transformasi sampah yang melibatkan perubahan fisik, kimia, atau biologis. Berikut adalah definisi dari masing-masing proses transformasi tersebut:

1. Transformasi Fisik

Perubahan sampah secara fisik dapat dilakukan melalui beberapa metode, yaitu:

- a) Pemisahan komponen sampah dapat dilakukan melalui metode manual atau mekanis untuk memisahkan sampah heterogen menjadi bagian-bagian yang lebih seragam. Proses ini penting untuk memfasilitasi daur ulang. Selain itu, sampah yang mengandung bahan berbahaya dan beracun, seperti sisa zat kimia dari laboratorium, perlu dipisahkan dari jenis sampah lainnya dan kemudian dibawa ke tempat pembuangan khusus.
- b) Mengurangi volume sampah dapat dilakukan dengan metode pemadatan atau kompaksi yang menggunakan tekanan. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk mengurangi kebutuhan ruang, sehingga memudahkan penyimpanan, pengangkutan, dan pembuangan sampah. Selain itu, pengurangan volume juga berfungsi untuk menekan biaya transportasi dan pembuangan. Biasanya, sampah yang membutuhkan reduksi volume meliputi kertas, karton, plastik, dan kaleng.
- c) Pengurangan ukuran sampah dapat dicapai melalui proses pencacahan. Tujuan dari proses ini serupa dengan kompaksi, yaitu untuk mengurangi volume sampah serta meningkatkan luas permukaan kontak dari setiap komponen.

2. Transformasi Kimia

Transformasi sampah secara kimiawi dapat dilakukan melalui pembakaran atau insinerasi. Proses ini mengubah sampah padat menjadi fasa gas, cair, dan produk padat yang terkonversi, sambil menghasilkan energi panas.

Proses pembakaran sangat dipengaruhi oleh karakteristik dan komposisi sampah, yaitu:

- a) Nilai kalor sampah berpengaruh pada kemudahan proses pembakaran; semakin tinggi nilai kalor, semakin mudah sampah terbakar. Agar sampah dapat terbakar dengan baik, nilai kalor minimum yang diperlukan adalah 4500 kJ/kg.
- b) Kadar air dalam sampah mempengaruhi proses pembakaran; semakin rendah kadar air, semakin mudah proses pembakaran berlangsung.

c) Ukuran partikel juga mempengaruhi kemudahan pembakaran; semakin luas permukaan kontak partikel sampah, semakin mudah sampah terbakar.

Jenis pembakaran dapat dibagi menjadi pembakaran stoikiometri, di mana udara atau oksigen disuplai dalam jumlah yang tepat untuk mencapai pembakaran sempurna. Contohnya termasuk:

- a) Pembakaran dengan udara berlebih adalah proses di mana udara disuplai dalam jumlah yang melebihi kebutuhan untuk mencapai pembakaran sempurna.
- b) Gasifikasi adalah proses pembakaran sebagian dengan kondisi substoikiometri, yang menghasilkan gas-gas seperti CO, H₂, dan hidrokarbon.
- c) Pirolisis adalah proses pembakaran yang terjadi tanpa adanya tambahan udara.

3. Transformasi Biologi

Perubahan bentuk sampah melalui aktivitas mikroorganisme untuk mendekomposisi sampah menjadi bahan yang lebih stabil, seperti kompos, dikenal sebagai metode biotransformasi. Teknik biotransformasi yang sering digunakan meliputi:

- a) Komposting aerobik adalah metode di mana sampah diuraikan oleh mikroorganisme dalam kehadiran oksigen, yang menghasilkan produk berupa kompos.
- b) Dalam penguraian anaerobik, produk yang dihasilkan meliputi gas metana, CO₂, serta gas-gas lain, bersama dengan humus atau lumpur. Sebelum digunakan sebagai kondisioner tanah, humus, lumpur, atau kompos yang dihasilkan sebaiknya distabilisasi terlebih dahulu melalui proses aerobik (Pengolahan Sampah UNDIP, 2018).

2.3. Jenis-Jenis Plastik

Plastik adalah tipe makromolekul yang terbentuk melalui proses polimerisasi. Polimerisasi merupakan reaksi kimia di mana molekul-molekul sederhana (monomer) bergabung membentuk molekul yang lebih besar (makromolekul atau polimer). Plastik adalah senyawa polimer yang sebagian besar terdiri dari karbon dan hidrogen. Salah satu bahan baku utama untuk produksi plastik adalah naphta, yang didapat dari penyulingan minyak bumi atau gas alam. Plastik umumnya dikategorikan dalam dua kelompok utama, yaitu:

1. *Thermoplastic* adalah jenis plastik yang akan meleleh dan dapat dibentuk ulang saat dipanaskan hingga suhu tertentu.
2. *Thermosetting* adalah jenis plastik yang, setelah mengeras dalam bentuk padat, tidak dapat mencair kembali meskipun dipanaskan.

Menurut karakteristik kedua jenis plastik, thermoplastik adalah jenis plastik yang dapat didaur ulang. Plastik yang dapat didaur ulang seringkali diberi kode nomor untuk mempermudah identifikasi dan penggunaan. Kode tersebut biasanya tercantum pada produk-produk plastik, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Nomor Kode Plastik (Sumber: UNEP, 2019).

Jenis plastik dan penggunaan plastik berdasarkan nomor dari Gambar 2 dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Jenis Plastik dan Penggunaan Plastik (Sumber: Kurniawan, 2012).

No Kode	Jenis	Penggunaan
1	PETE (<i>polyethylene terephthalate</i>)	Botol untuk air minum, botol obat-obatan, dan botol produk kecantikan.
2	HDPE (<i>high density polyethylene</i>)	Botol untuk obat, botol susu cair, jerigen untuk pelumas, dan botol untuk produk kecantikan.
3	PVC (<i>polyvinyl chloride</i>)	Selang air, pipa konstruksi, dan mainan.
4	LDPE (<i>low density polyethylene</i>)	Tas plastik, tutup botol, dan plastik tipis lainnya.

5	PP (<i>polypropylene</i>)	Gelasan plastik, penutup botol plastik, mainan anak-anak, dan margarin.
6	PS (<i>polystyrene</i>)	Sendok dan garpu sekali pakai, gelas plastik, wadah makanan dari styrofoam, serta wadah makan plastik bening.
7	<i>Other (O)</i> , jenis plastik lainnya selain nomor 1-6	Botol susu untuk bayi, kemasan plastik, galon air minum, komponen kendaraan, serta perangkat elektronik.

1. PETE (*Polyethylene Terephthalate*)

Plastik PETE umumnya ditandai dengan logo daur ulang yang menunjukkan angka 1 di tengahnya, serta label PETE. Plastik ini dirancang untuk sekali pakai. Penggunaan berulang, terutama untuk menyimpan air hangat atau panas, dapat menyebabkan lapisan polimer pada botol meleleh dan mengeluarkan zat yang dapat menyebabkan kanker seiring waktu.

2. HDPE (*High Density Polyethylene*)

Plastik HDPE biasanya ditandai dengan logo daur ulang yang menampilkan angka 2 di tengahnya, serta label HDPE. Plastik HDPE dikenal karena keamanannya, berkat kemampuannya mencegah reaksi kimia antara plastik dan makanan atau minuman yang dikemas di dalamnya.

3. PVC (*Polyvinyl Chloride*)

Plastik PVC umumnya ditandai dengan logo daur ulang yang menampilkan angka 3 di tengahnya, sering kali berwarna merah, dan disertai label V untuk *Polyvinyl Chloride* (PVC). PVC dikenal sebagai salah satu jenis plastik yang paling sulit untuk didaur ulang. Menggunakan PVC dalam kemasan makanan dapat menimbulkan reaksi yang berpotensi membahayakan ginjal, hati, serta berat badan.

4. LDPE (*Low Density Polyethylene*)

Plastik LDPE biasanya memiliki logo daur ulang dengan angka 4 di tengahnya, disertai tulisan LDPE. Jenis plastik ini dibuat dari minyak bumi dan sering digunakan dalam berbagai produk seperti kemasan makanan, botol yang fleksibel, dan plastik pembungkus.

5. PP (*Polypropylene*)

Plastik PP memiliki logo daur ulang dengan angka 5 dan tulisan PP. Plastik ini terkenal karena ringan dan kuat, dengan permeabilitas uap yang rendah, ketahanan terhadap lemak yang baik, dan kestabilan pada suhu tinggi. Plastik PP sering dianggap sebagai salah satu jenis plastik yang paling unggul.

6. PS (*Polystyrene*)

Plastik PS ditandai dengan logo daur ulang yang mencantumkan angka 6 dan tulisan PS. Plastik ini ditemukan secara kebetulan oleh Eduard Simon, seorang apoteker dari Jerman, pada tahun 1839. Sebagai polimer aromatik, plastik PS dapat melepaskan styrene ke dalam makanan saat terjadi kontak. Selain ditemukan dalam kemasan makanan, *styrene* juga terdapat dalam asap rokok, asap kendaraan, dan bahan konstruksi. Bahan ini harus dihindari karena dapat membahayakan kesehatan otak, mengganggu hormon estrogen pada wanita, yang dapat menyebabkan masalah reproduksi, pertumbuhan, dan sistem saraf, serta sulit untuk didaur ulang. Proses daur ulang plastik PS memerlukan waktu yang sangat lama.

7. Other (O)

Kategori plastik 7 Other mencakup empat jenis, yaitu SAN (*styrene acrylonitrile*), ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), PC (*polycarbonate*), dan nilon. SAN dan ABS dikenal karena ketahanannya yang tinggi terhadap reaksi kimia dan suhu, serta memiliki kekuatan, kekakuan, dan kekerasan yang superior. Plastik jenis 7, terutama SAN dan ABS, merupakan pilihan yang sangat baik untuk digunakan dalam kemasan makanan dan minuman.

2.4. Plastik PETE

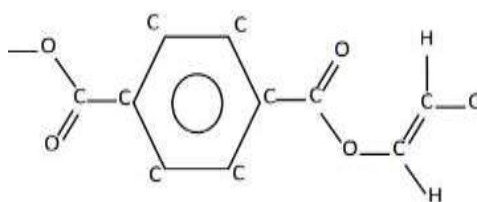
PETE adalah resin poliester yang dikenal karena ketahanannya, kekuatan, ringannya, dan kemudahan dalam pembentukan saat dipanaskan, dengan densitas 1,35-1,38 gram/mL. Rumus molekul PETE adalah $(-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_5-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n$ (Ariyadi, 2019). Plastik PETE sering digunakan dalam laminasi, khususnya pada bagian luar kemasan, untuk meningkatkan daya tahan kemasan terhadap abrasi dan robekan. PETE memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a) Trasparan (tembus pandang), jernih, bersih.
- b) Memiliki struktur yang kaku, tebal, mengilap, dan kuat.

- c) Kadar permeabilitas untuk uap air dan gas sangat minim.
- d) Resisten terhadap pelarut organik, termasuk asam yang terdapat dalam buah-buahan.
- e) Tidak tahan terhadap asam kuat seperti fenol dan benzil alkohol.
- f) Plastik PETE memiliki kekuatan yang tinggi dan tidak mudah robek.

Sifat-sifat fisika dan kimia Polietilen Tereftalat (PETE):

- Struktur kimia: Struktur kimia PETE dapat dilihat pada Gambar 3. berikut.



Gambar 3. Struktur Molekul PETE (Sumber: <http://eprints.polsri.ac.id>)

- Rumus molekul : n-C₁₀H₈O₄
- Densitas : 1370 kg/m³
- *Modulus young* : 2800-3100 Mpa
- *Tensile strength* : 55-75 Mpa
- *Temperature glass* : 75°C
- Titik leleh : 260°C
- Konduktivitas thermal : 0,24 W/(m.K)
- Panas spesifik : 1,0 KJ/(Kg.K)
- Penyerapan air : 0,16
- Viskositas intrinstik : 0,629 dl/g
- Batas elastisitas : 50 – 150%

2.5. Pirolisis

Pirolisis adalah proses pemecahan bahan dengan panas tanpa adanya oksigen, yang sering disebut juga devolatilisasi. Proses ini menghasilkan tiga produk utama: arang, minyak, dan gas. Arang yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar atau karbon aktif, sementara bio-oil, yang terbentuk melalui kondensasi gas, bisa digunakan sebagai aditif atau campuran dalam bahan bakar. Gas yang dihasilkan dapat langsung dibakar (Adoe, 2016). Dalam pirolisis

biomassa, gas dan arang adalah hasil utama, sementara bio-oil terbentuk dari kondensasi gas. Berikut adalah Tabel 2 yang menunjukkan penelitian sebelumnya yang menggunakan metode pirolisis:

Tabel 2. Penelitian Terdahulu Dengan Menggunakan Metode Pirolisis.

NO	Nama Peneliti/Tahun	Judul	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	Dominggus G.H Adoe, dkk 2016.	Pirolisis Sampah Plastik PP (<i>Polypropylene</i>) Menjadi Minyak Pirolisis Sebagai Bahan Bakar Primer.	Penelitian dilakukan menggunakan plastik <i>Polypropylene</i> (PP), reaktor yang digunakan adalah reaktor sederhana dengan temperatur reaktor diatur pada suhu 2500°C dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam dan 3 jam.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kalor minyak pirolisis berkisar antara 10.296 kal/gr hingga 11.670 kal/gr, dibandingkan dengan nilai kalor bensin yang sekitar 8.356 kal/gr. Massa jenis minyak pirolisis berada di rentang 0,7678 – 0,78023 kg/l, sedangkan massa jenis bensin adalah 0,68 kg/l. Selain itu, viskositas minyak pirolisis berkisar antara 0,65 cP hingga 0,78 cP, sementara viskositas bensin adalah 0,652 cP.
2	Nasrun, dkk 2015.	Pengolahan Limbah Kantong Plastik Jenis Kresek Menjadi Bahan Bakar Menggunakan Proses Pirolisis.	Menggunakan metode pirolisis dan tahap analisis adalah tahap menganalisa nilai kalor, titik nyala (<i>flash point</i>), kadar abu, kadar air dan analisa komposisi	Nilai kalor pembakaran yang diperoleh adalah 10.541,75 Kcal/Kg. Titik nyala tertinggi tercatat pada suhu 260°C dengan hasil 63,9°C setelah 15 menit, sedangkan titik nyala terendah tercapai pada suhu 300°C dengan hasil

yang terkandung dalam produk bahan bakar.	57,5°C setelah 60 menit. Kadar abu tertinggi terdeteksi pada suhu 300°C setelah 60 menit, yakni sebesar 0,26%, sedangkan kadar abu terendah ditemukan pada suhu 260°C setelah 15 menit, yaitu 0,01%. Kadar air terendah diperoleh pada suhu 300°C setelah 60 menit, mencapai 0,01%. Analisis komposisi mengungkapkan bahwa $C_{12}H_{24}$ memiliki persentase tertinggi, yaitu 41,9%. Di antara semua variabel yang diteliti, suhu menunjukkan dampak paling besar. Konstanta kecepatan reaksi dipengaruhi oleh suhu sesuai dengan persamaan Arrhenius, dengan energi aktivasi sebesar 10.106,77 kJ/mol.
---	--

3	Yos Nofendri dan Agus Haryanto, 2021.	Perancangan Alat Pirolisis Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar.	Pirolisis plastik adalah metode sederhana untuk mengubah limbah plastik menjadi bahan bakar. Dalam penelitian ini, dirancang reaktor pirolisis tipe batch dengan kapasitas 1 kg, menggunakan bahan bakar gas LPG. Reaktor ini memiliki jari-jari 0,15 m dan tinggi 0,3 m, serta dilengkapi dengan kondensor berpanjang total 0,5 m. Sampah plastik yang digunakan dalam proses ini adalah plastik HDPE.	Proses pirolisis pada penelitian ini terdapat 2 jenis kondensat, yaitu kondensat cair dan kondensat padat. Kondensat cair yang didapat paling banyak 68mL dari 1 percobaan, sedangkan kondensat padat yang didapat paling sedikit sebanyak 200gr rata-rata. Minyak yang dihasilkan dari pirolisis sampah plastik HDPE dapat digunakan sebagai bahan bakar setelah melalui beberapa tahap pengujian, karena memiliki kesamaan dengan bensin.
4	Junaedi Hidayatullah, 2020.	Produksi Bahan Bakar Hasil Pirolisis Sampah Plastik LDPE Dengan Variasi Pendinginan.	Metode penelitian ini, menggunakan plastik jenis (LDPE) berat 500 gram, dengan variasi pendingin dan tanpa pendingin selama 30 dan 60 menit.	Hasil analisis proses pirolisis sampah plastik menunjukkan bahwa waktu dan suhu sangat mempengaruhi jumlah minyak yang dihasilkan. Penggunaan atau ketidakgunaan pendingin juga memengaruhi warna dan kualitas bahan bakar yang

				dihasilkan. Panjang lintasan menuju tabung kondensor mempengaruhi aliran bahan bakar; semakin panjang lintasannya, semakin lama proses kondensasi, sehingga bahan bakar yang dihasilkan juga memerlukan waktu lebih lama. Selain itu, bahan bakar yang dihasilkan cenderung lebih jernih jika menggunakan sistem pendinginan dibandingkan tanpa pendingin.
5	Lisa Kusuma Wardhany dan Riandrika Imam Setyono, 2018.	Bahan Bakar Alternatif Dari Limbah Plastik <i>Polypropylene</i> Menggunakan Metode Pirolisis <i>Microwave</i>.	Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor tertutup berkapasitas 500 mL dan beroperasi pada tekanan 1 atm. Sampel limbah plastik <i>polypropylene</i> yang digunakan sebanyak 30 gram dan menggunakan katalis karbon aktif dari tempurung kelapa dengan variabel 3 dan 6 gram. Sampel dipanaskan pada suhu 230, 250, 275, dan 300°C, dengan	Dari penelitian ini didapatkan <i>yield</i> produk tertinggi, yaitu pada suhu 275°C, dengan penambahan katalis sebanyak 3 gram (rasio PP : katalis 10:1 gram/gram) dan waktu reaksi 15 menit, produk cair yang dihasilkan mencapai 63,82%, dengan kandungan parafin sebesar 28% dan <i>cycloparaffin</i> sebesar 0,89%. Produk gas mencapai 28,81%, dengan kandungan metana sebesar 2,7%, sementara <i>yield</i> residu hanya 7,36%.

durasi waktu 10 dan 15 menit. Produk cair dianalisis menggunakan *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC-MS), sedangkan massa produk gas dianalisis dengan GC.

2.6. Co-Pirolisis

Co-pirolisis adalah proses pirolisis yang melibatkan lebih dari satu jenis bahan baku. Dari co-pirolisis, biasanya dihasilkan tiga produk utama: minyak, padatan, dan gas. Tabel 3 berikut ini menunjukkan penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan metode co-pirolisis:

Tabel 3. Penelitian Terdahulu Dengan Menggunakan Metode Co-Pirolisis

NO	Nama Peneliti/Tahun	Judul	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	Dieni Mansur, dkk 2020.	Co-Pyrolysis Cangkang Kelapa Sawit dan Limbah Plastik Kemasan.	Dalam penelitian ini dilakukan proses co-pirolisis limbah biomassa, yakni cangkang kelapa sawit (CKS) dengan limbah industri plastik kemasan, jenis polietilen tereptalat (PETE), dan polietilen (PE) untuk meningkatkan yield dan kualitas <i>bio-oil</i> sebagai sumber energi alternatif.	Hasil penelitian dari produk <i>liquid</i> dari co-pirolisis dipisahkan menjadi <i>bio-oil</i> dan <i>pyroligneous acid</i> . Untuk campuran CKS-PET, <i>bio-oil</i> paling banyak dihasilkan pada rasio 90/10, yaitu sebesar 11,12%. Sementara itu, untuk campuran CKS-PE, persentase tertinggi <i>bio-oil</i> diperoleh pada rasio 70/30, yaitu 10,21%. Di sisi lain, asam

				<i>pyroligneous</i> terbesar dihasilkan dari pirolisis campuran CKS-PETE dengan rasio 90/10, mencapai 39,95%.
2	Mitha Puspitasari, 2015	Studi Kinetika Reaksi Co-Pirolisis Enceng Gondok dan Ban Bekas.	Percobaan dilakukan pada reactor batch dengan proses non-isothermal. Analisis dilakukan dalam rentang suhu 400-700°C pada kondisi atmosferis. Co-pirolisis umumnya menghasilkan tiga produk: <i>bio-oil</i> , <i>char</i> , dan gas. Penilaian bahan baku serta produk dilakukan menggunakan metode analisis <i>proximate</i> , <i>ultimate</i> , dan <i>Gas Chromatograph</i> (GC).	Dari hasil perhitungan didapat kinetika reaksi pembentukan gas $k_1=0,8935e^{-9469,801/RT}$, <i>bio-oil</i> $k_2=0,4115e^{-7576,415/RT}$, dan <i>char</i> $k_3=0,1223e^{-3624,802/RT}$.
3	Rizal Nazarrudin, 2022.	Pengaruh Variasi Daya Microwave Oven Terhadap Proses Co-Pirolisis Cangkang Kelapa Sawit dan Polistirena	Dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian penggunaan daya yang tepat dengan bantuan gelombang mikro sebagai reaktor proses co-pirolisis cangkang kelapa sawit dan plastik polistirena. Pengujian dilakukan	Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya optimal untuk menghasilkan minyak pirolisis adalah 600 W, yang menghasilkan produk minyak sebesar 17,6%. Minyak tersebut memiliki viskositas rendah sebesar 2,55 mPa.s dan pH sebesar 6,6.

				menggunakan oven microwave dengan variasi daya 300W, 450W, 600W, dan 800W, serta penambahan katalis. Campuran cangkang kelapa sawit dan plastik polistirena dengan rasio 1:1 dan massa total 105 gram, menggunakan arang cangkang kelapa sebagai absorber karbon aktif. Pirolisis dilakukan pada suhu 500°C dengan aliran gas nitrogen 1,5 LPM selama 60 menit. Setelah itu, sifat fisik produk minyak pirolisis dianalisis melalui pengukuran densitas, keasaman, dan viskositas.	
4	Azzalya Athala, 2020.	P. dkk	Analisa Eksperimental Terhadap Distribusi Produk Co-Pirolisis Limbah Sarung Tangan Medis dan Limbah Biomassa.	Pada penelitian ini dilakukan co-pirolisis sarung tangan medis yang digabungkan dengan limbah biologis (limbah makanan, limbah kebun dan limbah kertas) dengan persentase massa 100:0, 25:75, 50:50, 75:25, 0:100(%).	Hasil co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah biologis berupa produk minyak, arang dan gas. Minyak dengan kadar tertinggi diperoleh dari co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kertas dengan rasio massa 75:25%, mencapai 40%. Produk arang

terbanyak, yaitu 55%, dihasilkan dari co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kebun dengan rasio massa 75:25%. Sementara itu, kadar gas tertinggi, mencapai 45%, diperoleh dari penggabungan sarung tangan medis dan limbah makanan dengan rasio massa yang sama, yaitu 75:25%.

2.7. Biomassa

Biomassa adalah bahan yang berasal dari tumbuhan atau kotoran hewan, yang terutama terdiri dari unsur karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, serta elemen anorganik dalam jumlah kecil. Pada biomassa tumbuhan, komponen utama meliputi selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang masing-masing memiliki tingkat dekomposisi yang berbeda-beda. Proses dekomposisi setiap komponen ini dipengaruhi oleh suhu reaksi dan jenis reaktornya. Dalam pirolisis, hemiselulosa adalah komponen yang paling mudah terurai, diikuti oleh selulosa, sementara lignin adalah yang paling sulit untuk terdegradasi (Rahman, 2019).

2.8. Ampas Kopi

Limbah ampas kopi menjadi masalah besar karena dapat mengisi tempat pembuangan sampah. Selain itu, ampas kopi mengandung karbon yang, jika menumpuk, bisa berkontribusi pada efek rumah kaca. Walaupun tampaknya hanya dua sendok teh ampas kopi tidak berpengaruh besar terhadap lingkungan, penumpukan limbah ini jika tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan dampak lingkungan yang signifikan.

Pemanfaatan ampas kopi sebagai sumber bahan bakar alternatif dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Di samping itu, ini juga

menyediakan cara untuk mengolah limbah yang melimpah di lingkungan kita, mengingat ampas kopi sering kali belum dimanfaatkan secara maksimal. Bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari ampas kopi ini dikenal sebagai biodiesel.

Biodiesel merupakan sumber energi yang dapat diperbarui dan diharapkan tidak akan habis. Selain itu, biodiesel memiliki karakteristik yang setara dengan bahan bakar fosil konvensional dan sering kali memiliki angka energi pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan petrodiesel, yaitu di atas 60. Ini membuat proses pembakaran lebih efisien dan mengurangi emisi karbon jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Hendra, 2019).

Limbah ampas kopi memiliki lebih dari seribu senyawa seperti kafein, karbohidrat, protein, tanin, serat, selulosa, polifenol, hemiselulosa, lignin, polisakarida, dll. Nilai kalor limbah ampas kopi basah berkisar 2006 kal/g sedangkan nilai kalori ampas kopi kering berkisar 4610 – 5947 kal/g (Atabani, 2019).

Penelitian Yeongseu (2021) menyimpulkan bahwa pembakaran pelet yang terbuat dari limbah ampas kopi yang dicampur dengan bahan bakar dapat menghasilkan biomassa dengan kandungan nitrogen yang rendah dan efektif mengurangi emisi NO_x berkat efek sinergis dalam proses pembakaran. Penelitian tersebut juga akan mengeksplorasi penggunaan campuran limbah ampas kopi dengan batubara.

2.9. Batubara

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil batubara terbesar di dunia. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, jika produksi batubara berlanjut pada tingkat saat ini, cadangan batubara di negara ini diperkirakan akan habis dalam waktu sekitar 83 tahun. Sekitar 60 persen dari total cadangan batubara Indonesia adalah batubara berkualitas rendah, yang memiliki nilai kalori di bawah 6.100 kal/gram dan dijual dengan harga yang kompetitif di pasar global (Afin, 2021).

Penggunaan batubara oleh manusia sebagai sumber energi telah dilakukan sejak 1.100 SM dan terus berlangsung hingga saat ini dengan teknologi pada pemanfaatannya masih terus berkembang menuju ke arah yang lebih ramah

lingkungan dengan mengurangi emisi dan polusi serta limbah dari pemanfaatan batubara tersebut. Secara umum penggunaan batubara terdiri dari empat pemanfaatan pokok dengan proses satu dan lainnya dapat berupa rangkaian yang saling terkait, yaitu; Pembakaran langsung atau *combustable*, Pencairan atau *liquefaction*, Gasifikasi atau *gasification*, Karbonisasi atau *carbonization* (Tanggara, 2020).

Batubara dapat dikelompokkan berdasarkan dari mutu atau tingkatannya menjadi kelas:

1. Lignit

Lignit adalah batubara dengan peringkat rendah yang berada di antara gambut dan batubara dalam sistem klasifikasinya. Batubara ini memiliki warna hitam dan tekstur yang menyerupai kayu. Beberapa ciri khas dari batubara lignit meliputi:

- Memiliki warna hitam dan sangat mudah pecah.
- Memiliki nilai kalor yang rendah dan kandungan karbon yang sedikit.
- Mengandung kadar air dan abu yang tinggi.
- Mengandung sulfur dalam jumlah yang signifikan.

2. Sub-Bitumine

Batubara ini merupakan transisi antara lignit dan batubara bitumine. Batubara sub-bitumine berwarna hitam dan memiliki kadar air, zat terbang, serta oksigen yang tinggi, sementara kandungan karbonnya relatif rendah. Karakteristik ini menandakan bahwa batubara sub-bitumine termasuk dalam kategori batubara dengan kualitas yang lebih rendah. Sifat-sifat batubara sub-bitumine meliputi:

- Berwarna hitam berkilau.
- Memiliki nilai kalori yang tinggi.
- Mengandung sedikit air dan abu.
- Mengandung sulfur dalam jumlah rendah.

3. Bitumine

Batubara jenis ini berwarna hitam dan memiliki tekstur ikatan yang solid. Ciri-ciri batubara bitumine adalah:

- Berwarna hitam berkilau.
- Memiliki nilai kalori yang tinggi.

- Mengandung sedikit air dan abu.
- Mengandung sulfur dalam jumlah rendah.

4. Antrasit

Batubara antrasit adalah jenis batubara dengan peringkat tertinggi, yang mengandung lebih dari 93% karbon dan kurang dari 10% zat terbang. Antrasit umumnya memiliki kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi serta sering kali berwarna hitam mengkilap, mirip kaca. Ciri-ciri batubara antrasit adalah:

- Memiliki warna hitam yang sangat mengkilap.
- Memiliki nilai kalori yang sangat tinggi.
- Mengandung kadar air dan abu yang sangat rendah.
- Mengandung sulfur dalam jumlah yang sangat kecil.