

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sampah plastik menjadi salah satu jenis limbah domestik dan industri yang volumenya paling tinggi seiring dengan meningkatnya penggunaan plastik dalam berbagai sektor kegiatan manusia, mulai dari kebutuhan individu hingga aktivitas komersial dan industri skala besar (Widiyasari et al., 2021). Plastik merupakan makromolekul yang terbentuk melalui proses polimerisasi dari bahan-bahan mentah monomer seperti karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen, dan beberapa unsur kimia lainnya. Namun, sifat plastik yang praktis tersebut membuat produksi dan konsumsi plastik sangat tinggi khususnya barang sekali pakai yang berkontribusi pada peningkatan jumlah sampah plastik. Hal ini sangat berisiko menyebabkan berbagai masalah terutama kesehatan bagi lingkungan dan makhluk hidup akibat pencemaran sampah plastik (Emilia & Ferza, 2020).

Polimer yang menyusun plastik menciptakan sifat plastik yaitu sulit terdegradasi atau membutuhkan waktu yang sangat lama untuk dapat terurai dengan estimasi ratusan hingga ribuan tahun. Beberapa produk seperti kantong plastik dan kemasan makanan membutuhkan rentang waktu 10 hingga 1.000 tahun agar dapat terurai, sedangkan botol plastik memerlukan sekitar 450 tahun untuk sepenuhnya terurai (Lovina et al., 2024). Sampah plastik sekali pakai yang sulit terurai tersebut akan tertimbun dan menyebabkan penumpukan sampah yang mengancam ekosistem dan kehidupan makhluk hidup. Plastik mengandung bahan tambahan seperti ftalat dan bisphenol yang berpengaruh terhadap gangguan endokrin, masalah reproduksi, dan masalah kesehatan lainnya bagi manusia dan satwa liar. Selain itu, akumulasi mikroplastik di lingkungan menimbulkan kekhawatiran tentang potensi bioakumulasi dan transfer melalui rantai makanan yang berimplikasi pada kesehatan manusia (Adekanmbi et al., 2024).

Berdasarkan *Global Plastic Outlook 2022*, sampah plastik atau *plastic waste* yang dihasilkan dunia hingga 2019 mencapai 353 juta ton yang menandakan adanya peningkatan dua kali lipat dari tahun 2000 yaitu 156 juta ton. Hampir seperempat atau sekitar 88 juta ton sampah plastik tersebut tidak dikelola dengan baik dan sebanyak 22 juta ton sampah plastik ditemukan tersebar di lingkungan seperti sungai, danau, pantai, hingga lautan dengan sembarangan. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat banyak sampah plastik yang tidak didaur ulang bahkan tidak disimpan di tempat pembuangan akhir yang aman (OECD, 2022). Banyaknya sampah plastik yang dihasilkan semakin mengalami peningkatan setiap tahunnya. Hasil penelitian menyatakan bahwa penggunaan plastik secara global diperkirakan akan meningkat dari 464 juta ton pada tahun 2020 menjadi 884 juta ton pada tahun 2050 dengan total sampah plastik terakumulasi sebanyak 4,725 miliar ton pada tahun 2050 dari tahun 2000 (Dokl et al., 2024).

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) melalui Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) menunjukkan bahwa sampah plastik menjadi kontributor terbesar setelah sampah organik pada total timbunan sampah di Indonesia. Komposisi sampah plastik di Indonesia pada tahun 2023 sebanyak 19,12% atau sekitar 7 juta ton dari total timbunan sampah yaitu sebanyak 40,8 juta ton dengan sampah rumah tangga sebagai penyumbang terbesar (KLHK, 2024). Data Asosiasi Industri Plastik Indonesia (INAPLAS) dan Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2019, menunjukkan bahwa total sampah plastik per hari di Indonesia mencapai 175.000 ton atau sekitar 64 juta ton per tahun. Selain itu, sebanyak 85.000 ton kantong plastik per tahun terbuang ke lingkungan tanpa pengolahan (Badan Informasi Geospasial, 2020).

Sebagaimana dengan Indonesia, Provinsi Sulawesi Selatan berdasarkan data KLHK 2023 menyumbang sampah plastik sebanyak 15,97% dari timbunan sampah yang dihasilkan atau setara dengan 252 ribu ton. Jumlah ini mengalami peningkatan dari tahun 2022 yang berjumlah sekitar 179 ribu ton atau 13,61% dari total jumlah sampah yaitu 1,3 juta ton. Timbunan sampah plastik di Sulawesi Selatan mayoritas berasal Kota Makassar yang berkontribusi sekitar 60 ribu ton sampah plastik dari total timbunan sampah sebanyak 376 ribu ton pada tahun 2023 atau sekitar 16% setiap tahunnya. Berdasarkan sumbernya, sampah di Sulawesi Selatan selama lima tahun terakhir didominasi oleh rumah tangga dengan rata-rata presentase 64,12% dari total sumber sampah (KLHK, 2024).

Rumah tangga menjadi penghasil sampah plastik paling banyak di dunia dengan penggunaan plastik sekali pakai yang tinggi terutama pada wadah makanan, peralatan rumah tangga, dan kemasan produk (Patuwo et al., 2020). Umumnya plastik-plastik tersebut termasuk dalam jenis plastik *Polyethylene* atau polietilena yang merupakan plastik dengan polimer yang ringan dan lentur. *American Society for Testing and Materials* (ASTM) membagi plastik menjadi tujuh kategori dengan kode identifikasi resin atau *Resin Identification Code* (RIC) berdasarkan formulasi polimernya yang menunjukkan karakteristik, penggunaan, cara pembuangan ataupun metode daur ulang yang berbeda-beda. Secara berurutan berdasarkan kodenya, plastik terbagi menjadi *Polyethylene Terephthalate* (PETE atau PET), *High-Density Polyethylene* (HDPE), plastik ketiga *Polyvinyl Chloride* (PVC), kemudian *Low-Density Polyethylene* (LDPE), lalu *Polypropylene* (PP), dan *Polystyrene* (PS) serta kategori "*Others*" atau lainnya mencakup berbagai plastik seperti polikarbonat, nilon, dan akrilik (ASTM, 2021). Plastik jenis PE dan PP sering digunakan untuk botol minuman, botol cairan kimia, wadah penyimpanan makanan dan minuman, kemasan sekali pakai, dan kantong plastik, sedangkan jenis lainnya seperti PVC, PS, dan "*Others*" banyak dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi dan perabotan (Ramos et al., 2024).

Plastik berjenis *Polyethylene* (PE) terbagi atas HDPE dan LDPE yang menjadi jenis sampah plastik paling mendominasi di dunia akibat banyaknya penggunaan jenis plastik tersebut dalam berbagai produk karena produksinya yang mudah dan murah. Karakteristik plastik HDPE yang bersifat kuat, keras, dan tahan terhadap zat kimia menjadikannya plastik yang dimanfaatkan sebagai

jerigen, botol pembersih, dan botol susu ataupun obat (Telehala, 2023). Jenis sampah plastik ini disarankan hanya untuk digunakan sekali pakai, karena terjadi pelepasan senyawa berupa antimon trioksida yang dapat meningkat seiring waktu. Tak hanya itu, plastik jenis HDPE cenderung sulit untuk diolah karena tidak mudah bereaksi dengan bahan kimia, sehingga sampah plastik jenis HDPE sulit untuk didaur ulang dan tidak memiliki nilai jual yang menjadi sumber pencemaran lingkungan (Bratha & Putri, 2023).

High-Density Polyethylene (HDPE) merupakan jenis plastik yang menyumbang sekitar 46% sampah kemasan di dunia pada tahun 2018 (Shaker et al., 2024). Sejak 2015 hanya sekitar 10% sampah HDPE yang didaur ulang di dunia (Thiounn & Smith, 2020). Produksi plastik HDPE mencapai 40 juta ton pada tahun 2022 dengan produk paling banyak berupa kemasan berbahan tebal yang digunakan pada botol penyimpanan bahan cair (Li et al., 2024). Sekitar 17% dari 350 juta ton sampah plastik yang dihasilkan setiap tahun merupakan sampah plastik jenis HDPE. Fenomena sampah plastik HDPE yang tidak diolah dengan baik sangat berpotensi memberikan dampak kerusakan lingkungan dan masalah kesehatan bagi makhluk hidup secara khusus manusia (Gandhi et al., 2021; Dhamayanthi et al., 2024).

Keberadaan sampah plastik menyebabkan perubahan sifat fisik dan kimia terhadap komponen lingkungan. Pada tanah terjadi perubahan nilai pH, salinitas, *Soil Organic Matter* (SOM), *Total Organic Carbon* (TOC), serta unsur hara tanah. Selain itu, polusi plastik juga berdampak negatif terhadap pertumbuhan tanaman, yang ditunjukkan dari penurunan biomassa dan efisiensi fotosintesis (W. Zhao et al., 2024). Plastik sebagai salah satu penyumbang utama polusi di perairan khususnya dalam bentuk mikroplastik yang merusak keseimbangan ekosistem perairan dan membahayakan kehidupan makhluk akuatik. (Farhan et al., 2023). Berdasarkan hasil analisis literatur yang dilakukan Thushari (2020), sekitar 43% mamalia laut, 44% burung laut, dan 86% penyu, serta berbagai jenis ikan dan krustasea terdampak pencemaran plastik di lautan. Dampak yang ditimbulkan mencakup tertelannya plastik, terjatuh, gangguan pergerakan dan aktivitas makan, hilangnya habitat, menurunnya kemampuan reproduksi, munculnya luka atau infeksi, hingga berujung pada kematian (Thushari & Senevirathna, 2020).

Bahaya sampah plastik juga ditunjukkan dari keberadaan mikroplastik yang tersuspensi di udara dan berkontribusi terhadap partikulat yang ada di atmosfer. Sumber pelepasan mikroplastik ke udara terdiri dari aktivitas industri dan rumah tangga khususnya pembakaran sampah berperan signifikan dalam meningkatkan konsentrasi mikroplastik di lingkungan. Ditemukannya mikroplastik di sekitar manusia mengindikasikan bahwa transportasi udara merupakan jalur utama penyebaran polutan yang dapat memberikan dampak buruk bagi kesehatan (Baeza-Martínez et al., 2022). Paparan mikroplastik melalui inhalasi udara dalam maupun luar ruangan menimbulkan kekhawatiran akan dampak kesehatannya. Jika partikel ini melewati membran paru-paru atau dinding usus dan masuk ke dalam aliran darah, risikonya semakin besar. Toksisitas mikroplastik berkaitan dengan

sifat fisik dan kimianya, termasuk persistensi di atmosfer, hidrofobisitas, serta kemampuannya mengganggu transportasi oksigen. Penelitian juga menunjukkan bahwa mikroplastik dapat terakumulasi di hati, ginjal, dan usus, memicu stres oksidatif, gangguan metabolisme, dan efek neurotoksik (Akanyange et al., 2021).

Sifat sampah plastik yang kuat membuat bahan plastik sulit untuk terurai atau memerlukan ratusan tahun untuk hancur sepenuhnya yang menyebabkan penumpukan sampah plastik di lingkungan. Timbunan sampah plastik mengganggu kondisi lingkungan secara kesehatan maupun estetika. Pengolahan sampah plastik dapat dilakukan dalam beberapa metode, yaitu *landfill*, 3R (*reduce, reuse, recycle*), dan *thermal* (Ali et al., 2021). Namun, sampah plastik yang menumpuk cenderung dibakar sebagai jalan pintas menghilangkan sampah plastik tersebut, karena kelebihannya yang dapat mengurangi sampah dengan volume yang banyak dalam waktu yang singkat sehingga dianggap sebagai alternatif utama untuk menyelesaikan permasalahan sampah plastik. Asap hasil pembakaran sampah plastik memberikan dampak pencemaran yang lebih berbahaya yaitu pelepasan zat kimia, polusi udara, serta risiko penyakit pernapasan (Saila et al., 2024).

Open burning masih menjadi praktik yang umum dilakukan di banyak negara terutama yang berada di belahan bumi selatan. Hal ini disebabkan adanya peningkatan produksi serta konsumsi plastik di seluruh dunia, sehingga praktik diperkirakan akan semakin sering terjadi dan meluas jangkauannya (Lau et al., 2020). Diperkirakan sekitar 50 juta ton per tahun sampah plastik di dunia dibakar secara terbuka (*open burning*), sementara 10 juta ton per tahun masuk ke lingkungan perairan laut. Sekitar 90% dari sampah plastik tersebut berkontribusi pencemaran di lautan (Ragossnig & Agamuthu, 2021).

Pembakaran sampah di negara berpendapatan rendah dan menengah diperkirakan memiliki skala berkisar antara 40% hingga 65% dari total sampah kota yang dihasilkan per tahunnya. Hal ini semakin diperkuat dengan penelitian etnografi yang dilakukan Pathak dan kawan-kawan di lapangan yang mencakup negara-negara seperti India, Indonesia, Filipina, dan Zambia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa masyarakat di negara-negara tersebut masih sangat bergantung pada metode pembakaran terbuka. Ketergantungan ini terus berlangsung meskipun telah ada peraturan perundang-undangan yang secara tegas melarang praktik tersebut secara khusus Indonesia (Pathak et al., 2024).

Survei Kesehatan Indonesia (SKI) tahun 2023 mencatat bahwa 57,2% rumah tangga di Indonesia membakar sampah sebagai cara utama mengelola sampahnya, sehingga menjadikan metode tersebut sebagai cara yang paling sering digunakan dibandingkan dengan sembilan metode penanganan sampah lainnya, termasuk daur ulang. Kementerian Kesehatan Indonesia (Kemenkes) menggolongkan kegiatan membakar sampah sebagai kategori “tidak baik” bersama dengan metode pembuangan sampah sembarangan, karena berisiko merusak kesehatan lingkungan secara signifikan. Kondisi ini semakin mengkhawatirkan, secara khusus di Sulawesi Selatan, karena sebesar 58,7%

rumah tangga masih membakar sampahnya. Sementara itu, hanya 0,1 % rumah tangga di Sulawesi Selatan yang secara khusus menerapkan metode daur ulang sampah terutama sampah plastik (Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023) Banyak masyarakat membakar sampah plastik sebagai upaya mengurangi volume limbah, meskipun tindakan ini menghasilkan gas beracun yang dapat mencemari lingkungan (Riandis et al., 2021).

Sampah plastik yang dibakar berpotensi menghasilkan gas-gas seperti nitrogen oksida (NO_x), Nitrogen monoksida (NO), Nitrogen Dioksida (NO_2), Dinitrogen Monoksida (N_2O), Sulfur Dioksida (SO_2), karbon monoksida (CO), Karbon Dioksida (CO_2), Asam Klorida (HCl), metana (CH_4), *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAHs), Hidrogen Sianida (HCN), senyawa *Volatile Organic Compound* (VOC), partikel halus (PM_{2.5} dan PM₁₀) dan logam berat serta polutan dioksin dan furan secara bebas yang dapat menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan. Proses pembakaran *polyurethane foam* dan plastik juga memicu pelepasan senyawa isosianat, amina, serta asap berwarna kuning (S. Nugroho et al., 2020; Aini, et al., 2022; Erika & Gusmira, 2024). Gas dan partikulat tersebut terlepas akibat proses pembakaran yang tidak sempurna, terutama pada suhu rendah dan tanpa sistem kontrol emisi yang memadai, sehingga rantai polimer terurai menjadi senyawa beracun dan persisten yang bersifat toksik dan dapat mencemari udara, tanah, serta rantai makanan (Muchlisinalahuddin & Kesuma, 2020).

Proses pembakaran sampah tanpa sistem pengendalian emisi menyebabkan gas dan partikulat dilepaskan langsung ke udara ambien, sehingga meningkatkan risiko pencemaran udara. Berdasarkan penelitian di Kelurahan Karang Joang mengenai emisi gas rumah kaca dari tahapan pengelolaan sampah, pembakaran sampah plastik menghasilkan emisi ekuivalen karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen monoksida (N_2O) dan logam berat lainnya. Kandungan karbon fosil yang tinggi pada plastik, yakni sekitar 75%, menjadikan sampah plastik sebagai penyumbang utama emisi CO dan CO_2 pada proses pembakaran terbuka yang memiliki dampak signifikan terhadap perubahan iklim (Anifah et al., 2021). Akumulasi residu dihasilkan dari proses pembakaran sampah plastik berbahaya bagi permukaan tanah dan perairan yang menyebabkan degradasi kualitas lingkungan abiotik seperti kesuburan tanah dan perubahan pH air. Proses ini dapat menyebabkan kematian mikroorganisme tanah dan organisme akuatik lainnya, serta memicu penurunan keanekaragaman hayati (Handayani et al., 2023).

Polutan sampah plastik tersebut menjadi racun yang terakumulasi di dalam tubuh sehingga menimbulkan gangguan kesehatan seperti penyakit kulit, kanker, masalah imunologi, dan cacat lahir. Beberapa efek kesehatan dari senyawa-senyawa ini termasuk merusak sistem saraf, menyebabkan iritasi mata, saluran pernapasan dan efek karsinogenik yang berdampak buruk pada sumsum tulang, hati, dan sistem kekebalan tubuh serta masalah kesehatan lainnya. Pembakaran

plastik secara terbuka juga dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit jantung, masalah pernapasan, dan gangguan neurologis (Pathak et al., 2024).

Kejadian ISPA yang disebabkan perilaku membakar sampah plastik dapat dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Setiawan et al. (2020) di Kelayan Timur, Banjarmasin, menunjukkan bahwa 27 orang (54%) dari responden memiliki perilaku membakar sampah secara terbuka, yang dikategorikan sebagai tindakan buruk dalam pengelolaan sampah. Dari kelompok yang memiliki kebiasaan membakar sampah tersebut, sebanyak 11 orang (40,7%) tercatat memiliki riwayat sering mengalami Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA). Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya hubungan antara kejadian ISPA dengan paparan polusi udara, terutama yang disebabkan oleh emisi karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen dioksida (NO₂) yang dilepaskan selama pembakaran dapat memicu inflamasi pada jaringan paru, sehingga meningkatkan risiko terjadinya ISPA pada masyarakat yang terpapar (Setiawan et al., 2020).

Karbon Monoksida (CO) adalah gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau, dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna seperti kendaraan bermotor (Sitanggang et al., 2024). Gas ini mengganggu penyaluran oksigen oleh hemoglobin, menyebabkan hipoksia yang dapat merusak organ dan berujung pada kematian (Jusuf et al., 2023). Nitrogen oksida (NO_x), yang meliputi Nitrogen monoksida (NO) dan Nitrogen dioksida (NO₂), terbentuk dari pembakaran bersuhu tinggi (Purnama et al., 2021). Paparannya dalam jangka panjang dapat menurunkan fertilitas, mengganggu perkembangan janin, dan meningkatkan risiko kanker serta kematian. Selain dampak kesehatan, NO_x juga memicu terbentuknya ozon troposferik (O₃), komponen utama kabut asap. Keberadaan ozon ini memperburuk kualitas udara di wilayah perkotaan (Arsyada & Tyasnurita, 2025). Sulfur dioksida (SO₂) berasal dari pembakaran batu bara, minyak bumi, dan belerang (Laili et al., 2025). Gas ini dapat membentuk hujan asam yang merusak lingkungan serta menurunkan jarak pandang karena membentuk kabut. Paparan SO₂ juga menyebabkan iritasi saluran napas dan menurunkan fungsi paru-paru, terutama bagi penderita asma. Konsentrasi SO₂ mencerminkan intensitas aktivitas manusia dan menjadi indikator kualitas udara (Tiwa et al., 2024).

Pengelolaan sampah plastik memerlukan pendekatan yang tepat melalui teknologi yang efisien dan mudah diterapkan guna menekan volume limbah domestik. Salah satu metode yang umum digunakan adalah daur ulang mekanik yang mengubah limbah plastik menjadi produk baru. Namun, pendekatan ini tidak menyelesaikan akar permasalahan karena produk hasil daur ulang tetap akan kembali menjadi limbah setelah habis masa pakainya. Oleh karena itu, diperlukan alternatif lain yang lebih tuntas dalam menanggulangi akumulasi plastik terutana teknologi termal seperti insinerasi, gasifikasi, serta pirolisis. Pemanfaatan teknologi termal seperti pirolisis dinilai efektif dan efisien karena mampu mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif, sekaligus mengurangi volume limbah secara signifikan (Indra et al., 2021; Riandis et al., 2021).

Pirolisis merupakan teknik daur ulang tersier yang mengubah polimer organik dengan berat molekul tinggi menjadi produk cair berupa minyak, padatan seperti arang (*char*), dan gas pada suhu tinggi melalui dekomposisi termal atau katalitik tanpa membakar polimer tersebut secara langsung (Gebre et al., 2021). Pirolisis sampah plastik merujuk pada proses pemanasan limbah plastik dalam suasana tanpa oksigen (vakum) pada suhu tinggi (300–900 °C) hingga rantai molekulnya terputus (depolimerisasi), menghasilkan serangkaian produk dengan massa molekul yang relatif kecil (Thiounn & Smith, 2020). Teknologi pirolisis ini menjadi alternatif opsi yang ekonomis karena tingkat pemanfaatan sumber dayanya yang tinggi, tingkat polusi yang rendah, serta efisiensi yang tinggi, menjadikannya salah satu teknologi daur ulang limbah plastik yang paling menjanjikan (X. Zhao et al., 2024).

Keunggulan utama dari metode pirolisis adalah kemampuannya mengubah sampah plastik termoplastik maupun termoset menjadi produk berkualitas tinggi bahkan energi. Selain itu, teknologi ini dapat digunakan untuk mengolah limbah campuran yang tidak dicuci dan tidak disortir tanpa melepaskan zat beracun ke atmosfer. Pirolisis terhadap berbagai jenis limbah plastik menghasilkan rata-rata 45–50% minyak, 35–40% gas, dan 10–20% arang, tergantung pada teknologi pirolisis yang digunakan. Laporan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa lebih dari 80% bobot minyak dapat diperoleh dari pirolisis plastik tunggal, yang nilainya lebih tinggi dibandingkan pirolisis biomassa berbasis kayu (Gebre et al., 2021).

Metode pirolisis termasuk dalam pengolahan sampah secara termal sehingga dipengaruhi oleh suhu, waktu, dan rangkaian alat yang tepat. Proses pirolisis terjadi pada suhu tinggi yang umumnya berkisar di atas 200°C dengan waktu 4 – 7 jam, namun dapat kondisi tersebut dapat disesuaikan dengan alat pirolisisnya, jenis sampah plastiknya, dan kuantitas dari sampah plastik yang diolah (Haidar et al., 2023). Alat pirolisis terbagi menjadi beberapa komponen utama yaitu tungku pembakaran, reaktor, pipa penghubung, dan kondensor. Prinsip rangkaian alat yang sederhana membuat pirolisis mudah untuk diterapkan pada berbagai skala baik dari rumah tangga, industri, hingga pengolahan sampah masyarakat secara umum (Supu et al., 2021).

Meskipun pirolisis merupakan teknologi pengolahan limbah yang dianggap efektif dan efisien, proses ini tetap berisiko menimbulkan dampak lingkungan, terutama akibat emisi gas buang yang dihasilkan (Garcia-Garcia et al., 2024). Penelitian yang dilakukan pada pirolisis sampah plastik jenis *Polyethylene* (PE) terdiri atas 18,3% gas yang tidak dapat dikondensasi, 81,7% produk cair, dan kurang dari 1% karbon murni. Fase gas dari proses pirolisis ini mengandung senyawa H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , $n-C_4H_{10}$, dan C_5H_{12} . Gas-gas tersebut memiliki potensi sebagai bahan bakar karena mengandung senyawa mudah terbakar seperti metana, propana, etana, dan butana, meskipun masih terdapat komponen pengotor yang menjadi gas buang seperti CO dan CO_2 yang dapat mengganggu efisiensi pembakaran serta senyawa lain seperti sulfur nitrogen dan logam berat lainnya. Oleh karena itu, analisis karakteristik gas hasil

pirolisis dilakukan dalam penelitian ini untuk memahami komposisinya secara lebih mendalam (Aviandharie et al., 2020).

Proses pirolisis yang dilakukan oleh Firdausy (2023) terhadap plastik jenis HDPE dengan 500 gram sampah plastik yang dilakukan pada suhu 400°C selama satu jam sebanyak dua kali. Sebesar 24,7% (m/m) atau sekitar 328 mL minyak pirolisis yang dihasilkan HDPE dengan densitas 0,751 g/mL. Minyak pirolisis dari HDPE memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendekati bahan bakar bensin dan solar. Berdasarkan hasil tersebut, minyak pirolisis dari HDPE menunjukkan keseimbangan antara efisiensi hasil dan kesesuaian spesifikasi bahan bakar, sehingga memiliki prospek signifikan dalam konversi energi dari limbah plastik (Firdausy et al., 2023).

Char sebagai salah satu produk utama pirolisis sampah plastik juga diteliti pada pirolisis jenis plastik HDPE pada suhu 500°C - 700°C selama 90 menit. Dari 3 kg plastik dihasilkan *char* atau padatan sebanyak 1,272 kg dari plastik HDPE menunjukkan kecenderungan HDPE menghasilkan residu padat lebih besar dibandingkan dibandingkan plastik lainnya. Pada skala campuran, kombinasi 2 kg HDPE dengan 1 kg PET menghasilkan *char* sebanyak 0,928 kg. Sementara itu, pencampuran seimbang antara 1,5 kg HDPE dan 1,5 kg PET menghasilkan *char* dalam jumlah yang jauh lebih rendah, yakni 0,326 kg. Temuan ini memperkuat bahwa semakin dominan proporsi HDPE, maka semakin besar pula potensi terbentuknya *char* dalam pirolisis limbah plastik (Sabitha et al., 2024).

Pirolisis menjadi salah satu teknologi yang layak untuk dikembangkan karena efektivitasnya dalam menangani persoalan sampah, meskipun masih mengandung risiko tertentu. Di berbagai negara seperti Amerika Serikat, Kanada, dan Jerman telah menerapkan metode ini tidak hanya terbatas pada pengelolaan sampah, tetapi juga dimanfaatkan untuk mengolah limbah pertanian dan kehutanan menjadi *biofuel*, *biochar*, serta produk bernilai lainnya. Di Tiongkok, prinsip pirolisis konvensional telah dikembangkan menjadi perangkat untuk mengolah limbah padat perkotaan dan limbah medis menjadi produk bernilai dengan gas buang yang aman, sehingga memenuhi standar emisi internasional. Melihat perkembangan tersebut, Indonesia memiliki potensi besar untuk mengadaptasi dan mengembangkan teknologi pirolisis dalam sistem pengelolaan sampah nasional (Pramaningtyas et al., 2024).

Berdasarkan data SIPSN dari KLHK dari tahun 2021–2024 fasilitas pengolahan sampah plastik secara pirolisis di Indonesia hanya terdapat 13 fasilitas yang tersebar di 13 kabupaten/kota di 10 provinsi dari 38 provinsi yang ada. Provinsi Kalimantan Selatan, Kalimantan Barat, Jawa Tengah, Jawa Barat, dan Bengkulu menjadi provinsi dengan fasilitas pirolisis yang tercatat masih aktif sepanjang tiga tahun terakhir dengan 6 fasilitas yang aktif pada tahun 2024. Fasilitas pirolisis di Sulawesi Selatan berdasarkan SIPSN hanya ditemukan di Kabupaten Enrekang dengan nama “Pirolisis Destilasi” yang dapat menerima sampah masuk hingga 3,65 ton pada tahun 2021, tetapi tidak ada data yang menjelaskan jumlah sampah yang dikelola dengan metode tersebut. Selain itu, fasilitas pirolisis tersebut tercatat hanya aktif hingga tahun 2021 dan tidak ada

penjelasan lebih lanjut mengenai fasilitas pirolisis di Kabupaten Enrekang, padahal metode pirolisis menjadi salah satu pengolahan yang efektif untuk mengurangi sampah plastik di Sulawesi Selatan. Hal ini menunjukkan bahwa metode pirolisis kurang dimanfaatkan untuk mengolah limbah plastik terutama di kota dan provinsi besar yang banyak menghasilkan sampah plastik (KLHK, 2024).

Metode pirolisis yang belum luas dimanfaatkan masyarakat maupun pemerintah dan semakin meningkatkannya keberadaan sampah plastik menunjukkan bahwa penting untuk memahami metode pirolisis dalam pengolahan sampah plastik yang ramah lingkungan. Selain itu, produk dari metode pirolisis perlu untuk diteliti lebih lanjut karena minimnya penelitian mengenai produk pirolisis terutama gas buang yang dihasilkan, serta untuk melihat keefektifan dan keamanan hasil proses pirolisis bagi lingkungan. Oleh karena itu, peneliti tertarik melakukan penelitian yang berkaitan dengan metode pirolisis pada sampah plastik secara khusus jenis HDPE. Penelitian dilakukan untuk menganalisis kandungan emisi dari gas buang, produk cair, dan padatan berupa char yang dihasilkan pada pengolahan sampah plastik jenis HDPE dengan metode pirolisis di Kota Makassar tahun 2025.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu “Bagaimana karakteristik alat dan produk yang dihasilkan dari penerapan teknologi pirolisis sebagai metode pengolahan sampah plastik *High-Density Polyethylene* (HDPE)”?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Untuk membuat alat pirolisis sebagai metode pengolahan sampah plastik dan menganalisis hasil pirolisis (gas buang, produk cair, dan produk padatan) pada plastik jenis *high density polyethylene* (HDPE).

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Untuk menganalisis kandungan gas buang NO_x dari hasil proses pirolisis pada sampah plastik jenis HDPE.
2. Untuk menganalisis kandungan gas buang NO₂ dari hasil proses pirolisis pada sampah plastik jenis HDPE.
3. Untuk menganalisis kandungan gas buang SO₂ dari hasil proses pirolisis pada sampah plastik jenis HDPE.
4. Untuk menganalisis kandungan gas buang CO dari hasil proses pirolisis pada sampah plastik jenis HDPE.
5. Untuk menganalisis volume produk cair setelah proses pirolisis pada plastik jenis HDPE.
6. Untuk menganalisis massa padatan setelah proses pirolisis pada plastik jenis HDPE.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Ilmiah

Penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan ilmu pengetahuan mengenai pengolahan sampah plastik dengan metode pirolisis dan

residu yang dihasilkan berupa emisi gas buang, produk cair, dan padatan (*char*) dari sampah plastik HDPE. Hasil penelitian dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya pada bidang kesehatan lingkungan secara khusus pengolahan sampah plastik.

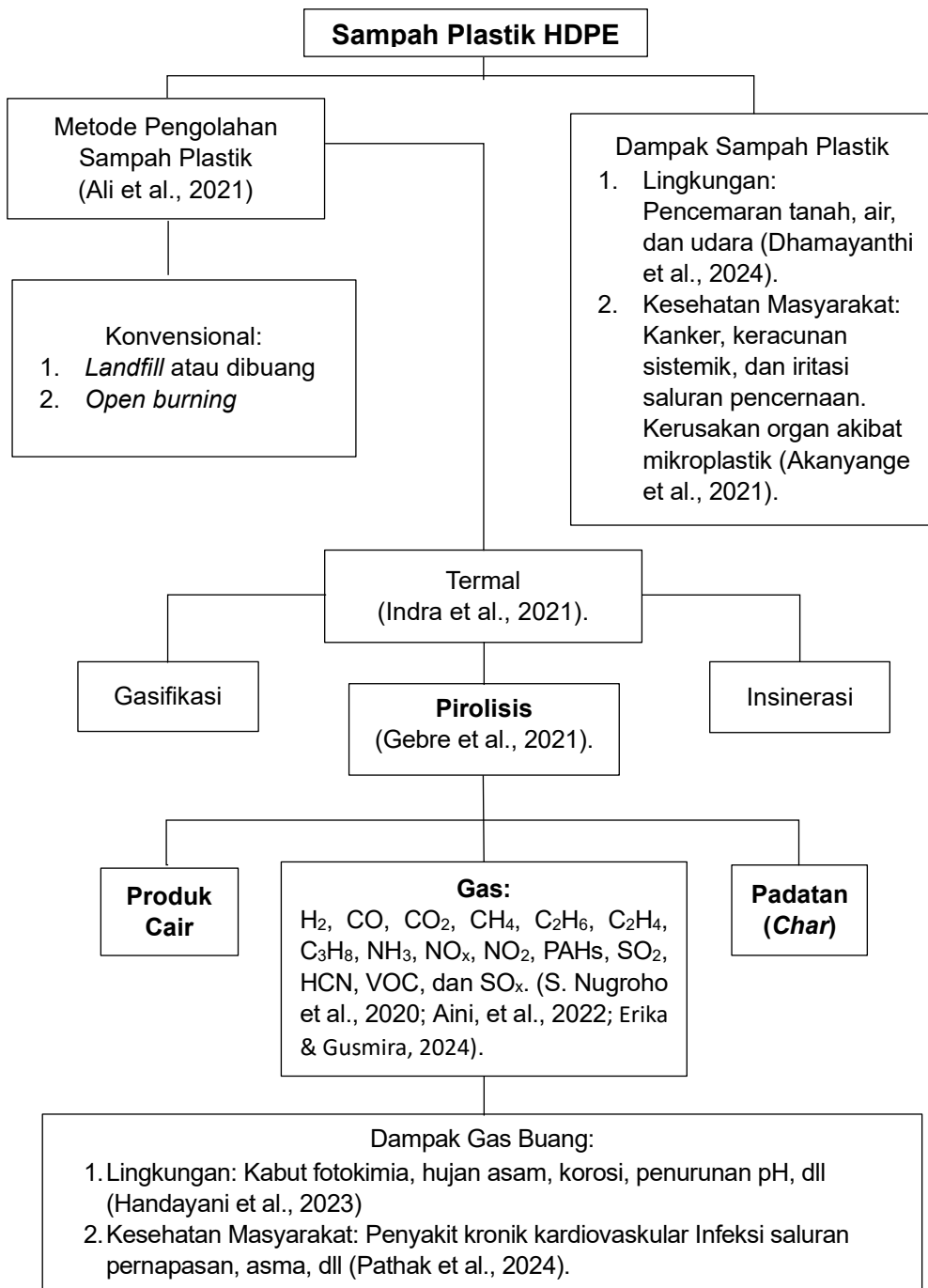
1.4.2 Manfaat Institusi

Hasil penelitian ini diharapkan dapat berguna bagi pihak-pihak pengelola sampah plastik untuk menggunakan metode pirolisis sebagai salah satu upaya pengolahan sampah plastik yang efektif dan menghasilkan produk guna memelihara kualitas lingkungan. Selain itu, diharapkan dapat menjadi referensi untuk kebijakan yang lebih tegas dan berkelanjutan mengenai permasalahan sampah plastik di Kota Makassar.

1.4.3 Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan baru dan pengalaman bagi peneliti mengenai pengolahan sampah plastik dengan metode pirolisis serta menjadi sarana penerapan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang didapatkan selama proses perkuliahan.

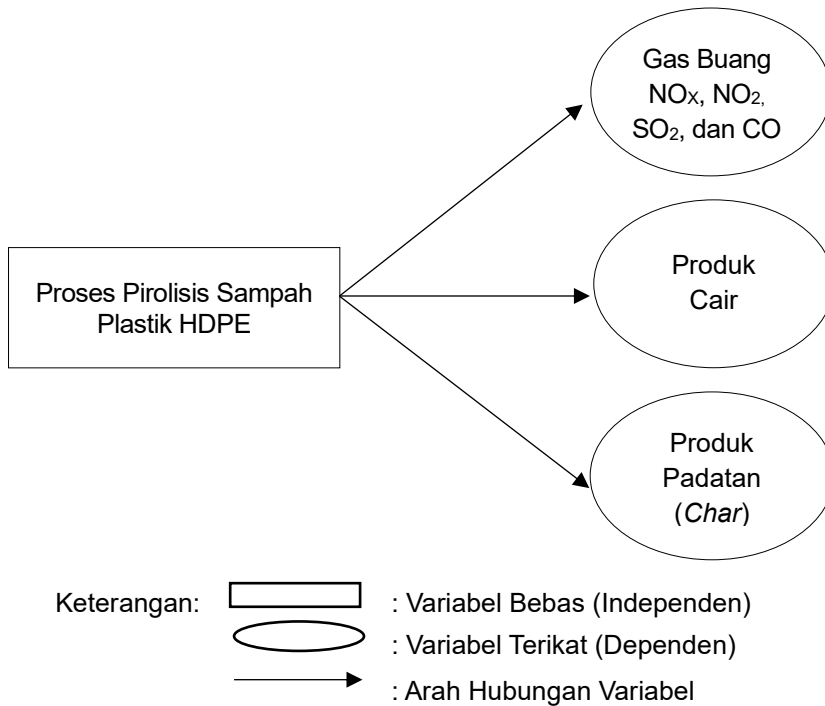
1.5 Kerangka Teori



Gambar 1.1 Kerangka Teori Penelitian

Sumber: Dimodifikasi dari Ali et al., (2021) dan Gebre et al., (2021).

1.6 Kerangka Konsep Penelitian



Gambar 1.2 Kerangka Konsep Penelitian

1.7 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

Tabel 1.1 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

No.	Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Kriteria Objektif	Skala Pengukuran
1.	Sampah Plastik HDPE	Plastik jenis HDPE yang dimaksud kode RIC angka 2, keras, relatif tebal, cenderung tidak tembus pandang dan banyak dijumpai berwarna putih susu hingga buram, namun terdapat warna lain. Contoh plastik jenis HDPE yaitu botol obat, botol minuman tempat makan, botol cairan pembersih, dan jerigen. Sampah plastik didapatkan dari Bank	Timbangan Duduk	-	Rasio

No.	Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Kriteria Objektif	Skala Pengukuran
		Sampah Unit lalu dicuci dan dicacah agar ukuran menjadi dengan massa sampah 500 gram.			
2.	Gas Buang NO _x	Gas buang NO _x merupakan kandungan nitrogen oksida yang dikeluarkan selama proses pirolisis pada satu jam pertama, satu jam kedua, satu jam ketiga, dan satu jam keempat dari proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE.	Spektrofotometer	Permen LHK RI No. 70 Tahun 2016 Lampiran I Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal dengan batas maksimum usulan 470 mg/Nm ³ .	Rasio
3.	Gas Buang NO ₂	Gas buang NO ₂ merupakan kandungan nitrogen dioksida yang dikeluarkan selama proses pirolisis pada satu jam pertama, satu jam kedua, satu jam ketiga, dan satu jam keempat dari proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE.	Spektrofotometer	Peraturan Pemerintah RI No. 22 Tahun 2021 Lampiran VII Baku Mutu Udara Ambien dengan baku mutu 200 µg/Nm ³ .	Rasio
4.	Gas Buang SO ₂	Gas buang SO ₂ merupakan kandungan sulfur oksida yang dikeluarkan selama proses pirolisis pada satu jam pertama, satu jam kedua, satu jam ketiga, dan satu jam keempat dari proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE.	Spektrofotometer	Permen LHK RI No. 70 Tahun 2016 Lampiran I Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal dengan batas maksimum usulan 210 µg/Nm ³ .	Rasio
5.	Gas Buang CO	Gas buang CO merupakan kandungan karbon monoksida yang dikeluarkan selama proses pirolisis pada satu jam pertama, satu jam kedua, satu jam ketiga, dan satu jam	Carbon monoxide analyzer	Permen LHK RI No. 70 Tahun 2016 Lampiran I Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara	Rasio

No.	Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Kriteria Objektif	Skala Pengukuran
		keempat dari proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE.		Termal dengan batas maksimum usulan 625 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.	
6.	Produk Cair	Produk cair merupakan hasil pirolisis berbentuk cair yang tertampung dalam penampungan minyak selama 4 jam proses pirolisis. Produk cair diukur volumenya dalam satuan mililiter (mL).	Gelas Ukur	-	Rasio
7.	Produk Padatan (<i>Char</i>)	Produk padatan merupakan hasil pirolisis yang berbentuk padat terdapat dalam reaktor setelah proses pirolisis selesai. Char dikumpulkan dari reaktor dan diukur menggunakan timbangan dengan satuan gram.	Timbangan Duduk	-	Rasio

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1. Metode, Jenis dan Desain Penelitian

Metode penelitian yang digunakan yaitu pendekatan penelitian kuantitatif eksperimen. Jenis penelitian yang dilakukan merupakan penelitian eksperimen semu (*Quasy experimental*). Penelitian eksperimen digunakan untuk mengetahui dampak atau akibat tertentu dari perlakuan kepada variabel yang diteliti dalam keadaan yang dikendalikan. Namun, penelitian *true experimental* memiliki beberapa karakteristik yang bersifat *rigid* atau kaku di antaranya *random assignment*, kelompok kontrol, dan manipulasi perlakuan. Penelitian yang dilakukan belum dapat memenuhi kaidah eksperimen murni atau *true experiment* sehingga penelitian harus dilakukan dengan penelitian kuasi eksperimen. Kuasi eksperiment didefinisikan sebagai eskperimen yang memiliki perlakuan, pengukuran dampak, unit eksperimen tidak menggunakan penugasan acak (Abraham, & Supriyati, 2022).

Selain itu, kuasi eksperimen memiliki kelompok kontrol yang tidak sepenuhnya untuk mengontrol variabel luar sehingga seringkali tidak menggunakan kelompok kontrol karena sulitnya mendapatkan kelompok kontrol. Pada penelitian ini, hanya memerlukan satu kelompok saja yaitu kelompok eksperimen berupa gas buang, produk cair, dan sisa padatan sampah dari hasil proses pirolisis sampah plastik HDPE (Ramdhan, 2021).

2.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan pada bulan Mei-Juli 2025. Variabel dependen yaitu plastik HDPE didapatkan dari Bank Sampah Unit di Kota Makassar. Pengambilan dan pengukuran sampel dilakukan di Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM).

2.3. Populasi dan Sampel

2.3.1 Populasi

Hasil proses pembakaran pirolisis adalah terdiri dari produk cair, produk padatan, dan gas. Emisi gas yang diteliti adalah gas buang yang merupakan gas tidak terkondensasi untuk memahami komposisi kimianya serta potensi dampaknya terhadap lingkungan. Oleh karena itu, populasi dalam penelitian ini yaitu seluruh produk dan seluruh jenis gas buang yang dikeluarkan dari proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE.

2.3.2 Sampel

Sampel dalam penelitian ini yaitu produk cair, produk padatan, dan gas buang NO_x , NO_2 , SO_2 , dan CO dari proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE. Produk cair dan produk padatan diambil setelah seluruh proses pirolisis selesai dilakukan. Sampel produk padat diukur berdasarkan jumlah atau massa dalam gram menggunakan timbangan duduk. Sementara itu, produk cair diukur menggunakan gelas ukur

berdasarkan volume (mL). Pengambilan dan pengukuran sampel produk cair dan padatan dilakukan oleh peneliti.

Proses pirolisis dilakukan selama empat jam, sehingga sampel gas buang akan diambil selama satu jam pertama, satu jam kedua, satu jam ketiga, dan satu jam keempat dari sampah plastik HDPE. Sampel pada penelitian ini sebanyak 4 sampel yang terbagi menjadi empat jam pada gas buang NO_x, gas buang NO₂, gas buang SO₂, dan gas buang CO dari pirolisis sampah plastik HDPE. Pengambilan dan pengukuran sampel dilakukan oleh Petugas Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM).

2.4. Alat, Bahan, dan Cara Kerja

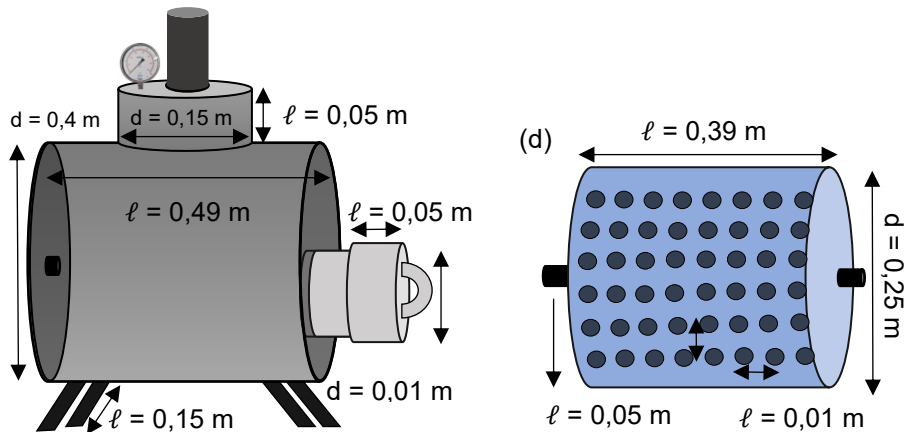
2.4.1 Alat

Alat pirolisis terbagi menjadi beberapa bagian yang terdiri dari cerobong asap, kondensor air 2 buah, penampung minyak, pipa penghubung, reaktor, tabung penggiling, tabung gas, selang gas, *thermometer*, dan tungku pembakaran berupa kompor *high pressure*. Bahan alat pirolisis terbuat dari baja karbon/baja tahan panas, pipa galvanis, dan tembaga atau *stainless steel* dan air yang digunakan pada kondensor. Rangkaian dan cara kerja alat dijelaskan pada Gambar 4.1 Desain Alat Pirolisis.

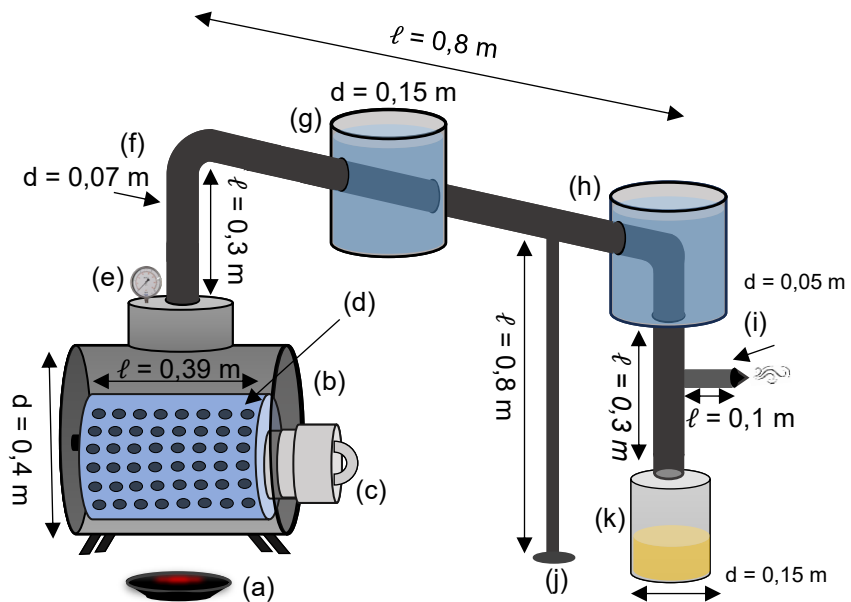
2.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian yaitu sampah plastik jenis HDPE yang telah dicuci bersih dan dikeringkan agar tidak mengganggu proses pembakaran sampah plastik, serta dicacah hingga ukuran ± 2 cm x 2 cm agar memudahkan proses pirolisis. Bahan plastik *High-Density Polyethylene* (HDPE) sebanyak 500 gram dengan ciri-ciri yaitu berkode RIC angka 2, keras, relatif tebal dan cenderung tidak tembus pandang. Jenis HDPE yang digunakan campuran tutup botol minuman, botol sampo, dan jerigen. Selain itu, kondensasi menggunakan air yang ditambahkan es batu secukupnya. Bahan bakar yang digunakan untuk pemanasan yaitu *Liquefied Petroleum Gas* (LPG).

2.4.3 Rangkaian Alat



Gambar 2.1a Desain Alat Pirolisis



Gambar 2.1b Desain Alat Pirolisis

Sumber: Dimodifikasi dari (Kholili & Hindratmo, 2023;
Purwo Wijayanto et al., 2024)

Keterangan gambar:

Alat pirolisis terbagi mejadi beberapa bagian yang terdiri dari tungku pembakaran (a), reaktor (b), pintu reaktor (c), tabung penggiling (d), *thermometer* (e), pipa penghubung (f), kondensor 1 (g), kondensor 2 (h), cerobong asap (i), tiang penyangga (j), dan penampung produk cair (k).

2.4.4 Cara Kerja Pirolisis

1. Disiapkan bahan sampah plastik dalam keadaan bersih, kering dan sudah tercacah dengan ukuran $\pm 2\text{cm} \times 2\text{cm}$.
2. Dimasukan sampah plastik HDPE sebanyak 500 gram ke dalam reaktor lalu ditutup pintu reaktor hingga kedap udara.
3. Dipanaskan reaktor hingga suhu titik leleh plastik kurang lebih 300 - 600°C.
4. Dipertahankan suhu pembakaran selama waktu yang ditentukan dengan menggunakan termometer suhu. Reaktor dibuat dengan tahan suhu panas yang tinggi dan tanpa kehadiran oksigen sehingga proses pirolisis dapat berlangsung.
5. Gas hasil pirolisis yang terbentuk mengalir melalui pipa penghubung ke kondensor.
6. Gas panas mengalami pendinginan di dalam kondensor 1. Pada bagian ini, sebagian besar uap air dan minyak akan mengembun dan terpisah dari gas. Proses ini memisahkan produk cair dari gas yang tidak terpakai.
7. Dialirkan gas yang belum sepenuhnya terkondensasi ke kondensor 2. Proses pendinginan dilanjutkan untuk menghasilkan lebih banyak minyak dari gas yang tersisa, sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan produk.
8. Diukur kandungan gas buang yang keluar pada cerobong asap sesuai dengan gas yang diperiksa. Gas buang yang keluar merupakan gas yang tidak dapat terkondensasi.
9. Ditunggu proses pirolisis sesuai waktu yang ditentukan selama 4 jam lalu dimatikan tungku pembakaran.
10. Diambil produk cair yang keluar dari pipa penghubung yang tertampung pada penampung. Produk cair lalu disimpan untuk diukur, dan dicatat hasilnya.
11. Dikeluarkan produk padatan yang ditinggalkan lalu diukur, dan dicatat hasil yang didapatkan lalu alat dibersihkan.

2.4.5 Prosedur Pengambilan dan Pengukuran Sampel

1. Prosedur Sampel Gas Buang NO_x

Pengambilan sampel gas buang NO_x dilakukan dengan larutan penjerap menggunakan labu vakum dengan metode *Phenol Disulphonic Acid* (PDS). Pengambilan sampel dilakukan oleh Staff Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM). Pengukuran dilakukan berdasarkan standar yang ditetapkan Kementerian Lingkungan Hidup yaitu standar SNI 19-7117.5-2005 Emisi Gas Buang Sumber Tidak Bergerak Bagian 5: Cara Uji Oksida-oksida Nitrogen (NO_x). Pengujian sampel dilakukan oleh Staff Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM).

2. Prosedur Sampel Gas Buang Nitrogen Dioksida (NO_2)

Pengambilan sampel gas buang NO_2 dilakukan dengan larutan penjerap menggunakan *impinger fritted bubbler* dengan metode

(*Griess Saltzam*). Pengujian dilakukan Pengukuran menggunakan spektrofotometer yang dilakukan berdasarkan standar SNI 19-7119.2-2005 Udara Ambien - Bagian 2: Cara Uji kadar nitrogen dioksida (NO_2) yang ditetapkan Kementerian Lingkungan Hidup. Pengambilan dan pengujian sampel dilakukan oleh Staff Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM).

3. Prosedur Sampel Gas Buang Sulfur Dioksida (SO_2)

Sampel gas SO_2 diambil menggunakan larutan penjerap pada *midget impinger* dengan metode pararosanilin. Pengujian dilakukan menggunakan spektrofotometer. Pengambilan dan pengujian dilakukan dengan standar yang ditetapkan Kementerian Lingkungan Hidup yaitu standar SNI 19-7119.2-2005 Udara ambien – Bagian 7: Cara uji kadar sulfur dioksida (SO_2). Sampel udara diambil dan diuji oleh Staff Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM).

4. Prosedur Sampel Gas Buang Karbon Monoksida (CO)

Sampel CO diambil menggunakan kantong udara (*Tedlar bag*) dan pengujian dilakukan *Non Dispersive Infra Red* (NDIR). Pengukuran dilakukan menggunakan *Carbon monoxide analyzer* dengan standar yang ditetapkan Kementerian Lingkungan Hidup yaitu standar SNI 7119.10:2011 Udara ambien – Bagian 10: Cara uji kadar karbon monoksida (CO) menggunakan metode *Non Dispersive Infra Red* (NDIR). Pengambilan dan pengujian sampel dilakukan oleh Staff Balai Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar (BLKMM).

5. Sampel Produk Cair

Produk cair hasil kondensasi terkumpul dalam wadah penampungan minyak. Setelah alat dingin, sampel diambil lalu dipindahkan dalam botol tertutup. Pengukuran sampel produk cair dilakukan dengan gelas ukur 25 mL lalu angka dicatat dalam satuan mililiter (mL). Pengambilan dan pengukuran sampel produk cair dilakukan oleh peneliti di Laboratorium Kimia Biofisik Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin.

6. Sampel Produk Padat

Pengambilan produk padat dilakukan setelah reaktor didinginkan. Lalu diambil produk padat berupa sisa sampah plastik atau residu padat yang tertinggal secara manual menggunakan alat bantu. Padatan kemudian ditampung dalam wadah lalu ditimbang menggunakan timbangan duduk oleh peneliti. Nilai massa padatan dicatat dalam satuan gram sebagai data produk padat. Sampel padat disimpan di wadah tertutup.

2.5. Pengumpulan Data

2.5.1 Data Primer

Data primer yang digunakan dalam penelitian terdiri dari gas buang, produk padatan (*char*), dan produk cair. Padatan berupa berat massa sampah plastik sebelum dan sesudah pengolahan pirolisis. Volume produk cair hasil pirolisis menjadi data primer yang digunakan. Gas buang yang dimaksud merupakan gas buang NO_x , gas buang NO_2 , gas buang SO_2 , dan gas buang CO yang diambil per satu jam dari empat jam waktu proses pirolisis sampah plastik jenis HDPE, sehingga total data primer pada gas buang sebanyak 16 data gas buang.

2.5.2 Data Sekunder

Data sekunder yang diperoleh untuk penelitian ini yaitu melalui penelusuran literatur, seperti jurnal dan buku, serta literatur lain yang berkaitan dengan penelitian. Sumber-sumber ini dipilih berdasarkan relevansi dan kredibilitasnya untuk mendukung analisis dari variabel penelitian. Temuan literatur tersebut dimanfaatkan untuk mendukung yang teori dan hasil dalam penelitian.

2.6. Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan dan analisis data yang dilakukan menggunakan statistik deskriptif. Data yang didapatkan diolah secara manual dengan mendeskripsikan data sampel eksperimen dan membuat kesimpulan hanya untuk sampel saja. Statistik deskriptif ini tidak menarik kesimpulan bagi populasi sampel atau secara umum. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk memberikan keterangan atau mengurai keadaan yang didapatkan dari eksperimen yang dilakukan (Harefa et al., 2023).

2.7. Penyajian Data

Hasil analisis data penelitian disajikan dalam bentuk tabel, gambar, dan grafik yang disertai dengan narasi interpretasi sehingga hasil penelitian dapat dipahami dengan baik. Penyajian data ini bertujuan untuk mempermudah pembaca dalam memahami hasil dan tren yang ditemukan. Selain itu, narasi interpretasi memberikan penjelasan mendalam terkait makna dari setiap data yang ditampilkan.