

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akumulasi limbah plastik di seluruh dunia telah mencapai tingkat kritis yang mengancam keseimbangan ekologi, sehingga mendorong komunitas global untuk mengevaluasi kembali pendekatan konvensional dalam pengelolaan limbah. Pertumbuhan populasi yang cepat sejalan dengan pola konsumsi masyarakat modern yang sangat bergantung pada plastik sekali pakai, sehingga menciptakan ketidakharmonisan antara volume sampah yang dihasilkan dan kapasitas pengolahan yang ada. Plastik, terutama jenis polimer sintetis berbasis minyak bumi, memiliki stabilitas kimia dan ketahanan tinggi yang membuatnya sangat tahan terhadap degradasi biologis. Akibatnya, bahan ini mencemari ekosistem daratan dan laut dalam waktu yang panjang, bahkan terpecah menjadi mikroplastik yang membahayakan rantai makanan (Hoseini & Bond, 2022).

Di Indonesia, tantangan ini menjadi lebih rumit akibat infrastruktur daur ulang yang belum merata serta kesadaran pemilahan sampah yang rendah di tingkat rumah tangga. Peran produsen dan konsumen dalam rantai pasok plastik belum sepenuhnya terintegrasi dalam upaya mengurangi sampah, sehingga volume timbulan sampah terus meningkat secara eksponensial setiap tahun (Zainuddin, 2023). Di antara berbagai jenis plastik yang beredar, Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) atau Low-Density Polyethylene (LDPE) mendominasi komposisi sampah rumah tangga. Hal ini disebabkan oleh sifat mekanisnya yang superior dan fleksibel, menjadikannya bahan utama untuk kemasan makanan, kantong belanja, dan wadah sehari-hari (Dhamayanthi et al., 2024). Tanpa intervensi teknologi yang sesuai, sebagian besar limbah polimer ini hanya akan menumpuk di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), memperpendek masa pakai lahan TPA, atau lebih parah lagi, dibakar secara terbuka yang melepaskan emisi karsinogenik (R. Siregar & Acmi, 2022). Salah satu metode teknologi yang paling potensial untuk mengatasi krisis ini sekaligus memulihkan energi yang terkandung dalam plastik adalah konversi termokimia melalui

pirolisis. Berbeda dari insinerasi yang hanya menghancurkan massa, pirolisis beroperasi dengan mendegradasi rantai polimer makromolekul panjang menjadi molekul hidrokarbon yang lebih pendek melalui pemanasan intensif dalam kondisi anoksik (tanpa oksigen). Proses ini menghasilkan tiga fraksi utama: padatan (arang), gas yang tidak dapat dikondensasi, dan produk cair (bio-oil) yang berpotensi besar sebagai bahan bakar alternatif pengganti fosil (D. T. L. Arielle et al., 2024). Berbagai penelitian eksperimental telah menunjukkan kelayakan teknis konversi limbah PP menjadi bahan bakar cair dengan karakteristik rantai karbon yang mirip fraksi bensin dan solar (Wajdi & Others, 2020). Namun, penerapan pirolisis termal murni (tanpa katalis) sering kali menghadapi masalah efisiensi yang signifikan. Proses ini memerlukan input energi termal yang tinggi (suhu operasional ekstrem) dan waktu retensi yang panjang untuk memutus ikatan kovalen C-C yang kuat. Selain itu, produk cair dari perengkahan termal acak (random scission) cenderung memiliki distribusi rantai karbon yang luas, mengandung banyak fraksi berat (lilin/wax) serta senyawa olefin yang tidak stabil, sehingga menghasilkan viskositas tinggi dan kualitas pembakaran yang rendah (Sabitah et al., 2024).

Untuk mengatasi keterbatasan termodinamika dan meningkatkan kualitas produk akhir dalam pirolisis termal, pengintegrasian katalis ke dalam reaktor merupakan langkah penting. Dalam hal ini, zeolit alam Indonesia muncul sebagai bahan katalis yang strategis karena ketersediaannya yang berlimpah dan biaya yang lebih ekonomis dibandingkan katalis sintesis berbasis aluminosilikat murni (seperti HZSM-5 atau FCC) (Bani, 2024). Zeolit alam memiliki struktur kerangka kristal berpori yang unik, dilengkapi dengan situs asam Bronsted dan Lewis. Situs aktif ini berperan dalam memfasilitasi reaksi perengkahan (catalytic cracking) melalui mekanisme ion karbonium, yang memungkinkan pemutusan rantai karbon pada suhu lebih rendah dengan selektivitas produk yang lebih terarah (Vargas & Others, 2021). Penggunaan katalis zeolit tidak hanya mengurangi energi aktivasi reaksi, tetapi juga secara efektif mengubah fraksi lilin menjadi hidrokarbon cair rantai ringan yang bernilai, seperti fraksi bensin (gasoline) dan diesel. Penelitian sebelumnya oleh Mayora, Arifin, and Nugraheni. (2023) serta Hermanto, Bahri,

and PN. (2022) telah mengonfirmasi bahwa penambahan zeolit dapat meningkatkan karakteristik fisik produk cair secara signifikan dibandingkan proses non-katalitik, membuat minyak pirolisis lebih cair dan jernih.

Meskipun efektivitas zeolit alam telah diakui luas, masih ada kesenjangan pengetahuan yang besar terkait optimasi rasio beban katalis terhadap umpan plastik. Menentukan jumlah katalis yang optimal adalah kunci keseimbangan proses; penggunaan katalis yang terlalu sedikit (misalnya di bawah 5%) mungkin tidak menyediakan situs aktif yang cukup untuk menangani seluruh uap polimer, sehingga menyisakan banyak fraksi berat yang lolos sebagai lilin. Sebaliknya, penggunaan katalis yang berlebihan dapat memicu reaksi sekunder yang tidak diinginkan, seperti over-cracking yang mengubah produk cair potensial menjadi gas permanen, atau mempercepat pembentukan kokas (coke) yang menyumbat pori katalis dan menurunkan yield minyak secara drastis (Pieter & Halimatuddahlia, 2025), dan (Wardhana & Others, 2022). Oleh karena itu, penyelidikan mendalam terhadap variasi konsentrasi katalis pada rentang spesifik—yaitu 5%, 10%, dan 15%—sangat penting untuk menentukan titik optimum di mana konversi minyak maksimal dan pembentukan produk samping minimal. Rentang ini dianggap krusial karena mewakili keseimbangan antara efisiensi teknis dan kelayakan ekonomis operasional.

Selain itu, evaluasi keberhasilan teknologi waste-to-energy ini tidak boleh hanya fokus pada jumlah minyak yang dihasilkan (yield), tetapi juga harus mencakup aspek fungsionalitas bahan bakar dalam mesin, yaitu laju pembakaran (burning rate). Laju pembakaran adalah parameter penting yang menunjukkan kecepatan pelepasan energi kimia menjadi energi panas di ruang bakar. Karakteristik ini sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan bakar, adanya senyawa aromatik atau rantai bercabang dari perengkahan katalitik akan mengubah profil nyala api secara signifikan. Bahan bakar dengan densitas dan viskositas yang buruk akan sulit teratomisasi di injektor, menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan kerak mesin. Meskipun literatur terkini mulai menekankan pentingnya uji karakteristik fisikokimia seperti nilai kalor dan indeks

setana/oktana (Iskandar et al., 2021), penelitian yang secara menyeluruh menghubungkan variasi beban katalis zeolit alam (5%, 10%, 15%) langsung dengan laju pembakaran dan estimasi densitas pada campuran PP-LDPE masih sangat terbatas.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase katalis zeolit alam (5%, 10%, 15%, dan murni) terhadap yield minyak hasil pirolisis campuran PP-LDPE?
2. Bagaimana pengaruh variasi persentase katalis zeolit alam (5%, 10%, 15%, dan murni) terhadap densitas, laju pembakaran dan nilai kalor minyak hasil pirolisis campuran PP-LDPE?
3. Berapa persentase katalis zeolit alam yang paling optimal untuk menghasilkan yield minyak tertinggi dengan densitas, laju pembakaran dan nilai kalor terbaik dari pirolisis campuran PP-LDPE?

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini menggunakan limbah plastik gelas air mineral yang terbuat dari PP (Polipropilena) dan plastik *bubble wrap* transparan yang terbuat dari LDPE (*Low Density Polyethylene*).
2. Menggunakan variasi katalis zeolit alam 5%, 10%, 15%, dan 0% (murni)
3. Minyak ini berfokus pada uji yield minyak, densitas, laju pembakaran, dan nilai kalor.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh variasi persentase katalis zeolit alam (5%, 10%, 15%, dan murni) terhadap yield minyak hasil pirolisis campuran PP-LDPE.
2. Mengetahui pengaruh variasi persentase katalis zeolit alam (5%, 10%, 15%, dan murni) terhadap densitas, laju pembakaran dan nilai kalor minyak hasil pirolisis campuran PP-LDPE.
3. Mengetahui persentase katalis zeolit alam yang paling optimal untuk menghasilkan yield minyak tertinggi dengan densitas, laju pembakaran dan nilai kalor terbaik dari pirolisis campuran PP-LDPE.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mengembangkan teknologi pengolahan limbah plastik PP dan LDPE menjadi energi terbarukan.
2. Menambah khazanah ilmu pengetahuan mengenai pemanfaatan katalis zeolit alam dalam proses pirolisis.
3. Memberikan alternatif solusi pengelolaan sampah plastik yang ramah lingkungan.

1.6 Hipotesis

1. Variasi persentase katalis zeolit alam dalam proses pirolisis campuran PP-LDPE memberikan dampak yang signifikan terhadap hasil produksi minyak, di mana kenaikan persentase katalis akan menaikkan produksi minyak hingga mencapai puncak optimal, sebelum akhirnya mengalami penurunan karena efek over-cracking.
2. Persentase katalis zeolit alam yang berbeda-beda secara nyata memengaruhi kecepatan pembakaran serta densitas dari minyak hasil pirolisis campuran PP-LDPE, dengan pemilihan katalis yang tepat mampu meningkatkan efisiensi pembakaran dan ketahanan bahan bakar.
3. Terdapat persentase optimal katalis zeolit alam dalam rentang 5% hingga 15% yang dapat menghasilkan kombinasi produksi minyak tertinggi bersama dengan kecepatan pembakaran dan densitas terbaik dari proses pirolisis campuran PP-LDPE.