OPTIMASI PRODUKSI MINYAK PIROLISIS SAMPAH PLASTIK BERDASARKAN VARIASI TEMPERATUR, WAKTU, DAN BAHAN BAKU

Muhammad Fadhil Zulfan[1], M. Rafli Sebatra[1*], Chalidia Nurin Hamdani[1]
[1]Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38Cepu, Blora, 58311
**E-mail*: raflisebatra173@gmail.com

ABSTRAK

Kajian ini disusun untuk menelaah bagaimana temperatur, lama proses, dan ragam bahan baku berpengaruh terhadap perolehan minyak pirolisis sampah plastik, sekaligus merumuskan kondisi operasi paling menguntungkan dari himpunan temuan penelitian sebelumnya. Pendekatan yang dipakai berupa telaah pustaka (*literature review*) bercorak deskriptif-analitis, yakni menghimpun lalu membandingkan artikel ilmiah seputar pirolisis sampah plastik. Perbandingan diarahkan pada empat besaran: temperatur, lama proses, kelompok plastik, dan perolehan minyak baik dalam satuan volume maupun rendemen. Telaah tersebut memperlihatkan peran temperatur yang menonjol pada dekomposisi termal plastik; selama kenaikannya belum melewati titik optimum, perolehan minyak ikut naik, namun di atas titik itu muncul *secondary cracking* yang mengubah sebagian fraksi cair menjadi gas. Angka 400°C paling sering muncul sebagai titik optimum, khususnya pada polypropylene (PP) dan low-density polyethylene (LDPE) dengan rendemen konversi berturut-turut 78,3% dan 83,4%. Lama proses pun ikut menentukan, dan nilai optimumnya tidak seragam antarplastik: pada kondisi penelitian yang ditelaah, PP memerlukan sekitar 60 menit sementara HDPE cukup 30 menit. Pada sisi bahan baku, PP memberi volume minyak absolut terbanyak dibandingkan HDPE dan LDPE bila kondisi operasinya setara, tetapi rendemen konversi LDPE justru melampaui PP. Karena itu bahan baku terbaik ditentukan oleh indikator yang dipilih, apakah volume produksi atau efisiensi konversi. Dari keseluruhan telaah, perpaduan plastik poliolefin, temperatur di kisaran 400°C, dan lama proses yang disetel menurut karakter bahan baku merupakan kondisi paling menjanjikan untuk memaksimalkan produksi minyak pirolisis sampah plastik.

Kata kunci: pirolisis, sampah plastik, temperatur, waktu proses, minyak pirolisis

1. PENDAHULUAN

Timbulan sampah plastik termasuk persoalan lingkungan yang penanganannya makin mendesak, sebab bahan ini sukar hancur secara alami sedangkan pemakaiannya terus bertambah di hampir semua aktivitas warga. Ketika pengelolaannya belum memadai, beban tempat pemrosesan akhir membengkak dan pencemaran menjalar ke tanah, air, serta lingkungan di sekitarnya. Situasi semacam ini menuntut teknologi pengolahan yang bukan sekadar menyusutkan volume sampah, melainkan juga melahirkan produk bernilai guna dan bernilai ekonomi. Pirolisis termasuk pilihan yang layak dikembangkan: bahan polimer diuraikan secara termal pada temperatur tinggi dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan oksigen sangat terbatas, lalu menghasilkan minyak, gas, dan residu padat[1][2].

Daya tarik pirolisis bersumber pada asal-usul plastik itu sendiri, yaitu senyawa hidrokarbon dengan kandungan energi yang relatif besar. Pemanasan memecah rantai

polimer menjadi hidrokarbon berantai lebih pendek, dan sebagian produk gasnya dapat dikondensasikan sehingga diperoleh minyak pirolisis[3]. Pengolahan sampah plastik lewat jalur ini karenanya menjawab dua kebutuhan sekaligus: menekan persoalan limbah dan memperoleh energi alternatif. Penelitian pada LDPE melaporkan bahwa minyak hasil pirolisisnya mempunyai karakteristik yang mendekati bahan bakar tertentu, sehingga pengembangan lanjutan sebagai cara valorizasi sampah plastik cukup terbuka[4].

Capaian proses pirolisis bergantung erat pada kondisi operasional, dan temperatur menempati posisi paling menentukan. Besaran ini mengatur seberapa jauh rantai polimer terpecah serta bagaimana produk terdistribusi sepanjang proses. Sunyoto pada 2024 melaporkan bahwa pirolisis LDPE dengan temperatur divariasikan menghasilkan volume dan karakteristik minyak yang berlainan, dengan perolehan tertinggi 90 mL pada 400°C[5]. Temuan pada sistem pirolisis LDPE lainnya sejalan: menaikkan temperatur sampai 400°C menambah volume minyak sekaligus memangkas residu padat, sehingga pengendalian temperatur menjadi kunci bagi hasil pirolisis yang optimal[6].

Di samping temperatur, lama proses menentukan seberapa tuntas dekomposisi termal berlangsung. Durasi pirolisis yang kelewat singkat membuat pemecahan polimer belum tuntas, sedangkan durasi yang terlampau panjang menambah kebutuhan energi tanpa selalu diikuti pertambahan minyak yang sepadan[7]. Pengujian terdahulu pada PP dan HDPE memperlihatkan waktu optimum yang berbeda menurut jenis plastiknya, yaitu 60 menit bagi PP dan 30 menit bagi HDPE pada kondisi penelitian tersebut. Kaitan antara lama proses dan perolehan minyak dengan demikian tidak dapat dilepaskan dari karakter bahan baku yang dipakai[8].

Ragam bahan baku plastik ikut menentukan kuantitas maupun karakter minyak yang terbentuk. Struktur dan komposisi polimer yang berbeda membuat perilaku dekomposisi termalnya pun berbeda. Telaah pengelolaan sampah plastik di TPA Kedungdowo, Kabupaten Nganjuk, menyebut LDPE dan PP sebagai dua kelompok yang layak dipakai sebagai umpan pirolisis[1]. Pada sisi lain, pengujian konversi PP dan LDPE di temperatur reaktor 200°C selama 120 menit mencatat rendemen 16,07% untuk PP dan 13,33% untuk LDPE, sehingga pada temperatur rendah itu PP lebih unggul[6]. Arah perbandingan tersebut bukan kaidah umum, karena pada temperatur operasi yang lebih tinggi beberapa penelitian justru mencatat rendemen LDPE di atas PP. Pengaruh bahan baku terhadap produktivitas proses karenanya bersifat bergantung pada kondisi operasi yang diterapkan.

Arah penelitian mutakhir bergeser ke optimasi proses, tidak lagi berhenti pada pengujian satu faktor secara terpisah. Salsabila, sebagai contoh, memakai Response Surface Methodology (RSM) untuk mengoptimalkan pirolisis LDPE dengan laju pemanasan dan berat katalis sebagai variabel. Kondisi optimal yang diperolehnya adalah laju pemanasan 10°C/menit dengan katalis 24,04 g, prediksi yield minyak 52,38%, dan model kuadratik bernilai R^2 0,9394. Yield di penelitian tersebut dinyatakan sebagai persentase perolehan minyak terhadap massa umpan plastik. Capaian itu menandakan pendekatan optimasi memberi gambaran kondisi proses yang lebih utuh ketimbang membandingkan hasil antarperlakuan tunggal[9].

Potensi pirolisis sebagai penghasil minyak dari sampah plastik sudah banyak dibuktikan, namun pengkajian kondisi operasi secara terpadu, yakni menimbang temperatur, lama proses, dan ragam bahan baku sekaligus, masih dibutuhkan. Sebagian penelitian terdahulu memusatkan perhatian pada variasi temperatur atau pada karakter satu jenis plastik saja, sementara penelitian lain menambahkan katalis maupun parameter tertentu. Dari situ terbuka ruang untuk mencari paduan kondisi operasi yang memberi produksi minyak lebih optimal tanpa mengabaikan pengaruh bahan baku dan durasi proses. Kajian optimasi

produksi minyak pirolisis berdasarkan variasi temperatur, waktu, dan bahan baku karenanya penting untuk menyediakan dasar operasional yang lebih tepat dalam memanfaatkan sampah plastik sebagai energi alternatif.

Bertolak dari uraian di atas, kajian ini dikerjakan untuk menjawab kebutuhan pengolahan sampah plastik yang lebih berdaya guna sekaligus menaikkan nilai hasil konversinya menjadi minyak pirolisis. Sasarannya adalah menelaah pengaruh variasi temperatur, lama proses, dan ragam bahan baku terhadap perolehan minyak pirolisis sampah plastik serta menetapkan paduan parameter yang memberi produksi minyak paling optimal. Keluarannya diharapkan menjadi acuan teknis mengenai kondisi operasi yang lebih berdaya guna dan bahan pertimbangan bagi pengembangan teknologi pirolisis sampah plastik, baik sebagai jalur pengelolaan limbah maupun sebagai sumber energi bernilai guna.

2. METODE

Kajian ini disusun sebagai telaah pustaka (literature review) bercorak deskriptif-analitis guna menilai optimasi produksi minyak pirolisis sampah plastik dari sisi variasi temperatur, lama proses, dan ragam bahan baku. Sumber dihimpun dari Google Scholar, Portal Garuda, dan Sinta untuk terbitan dalam negeri, serta ScienceDirect untuk terbitan internasional. Kata kunci yang dipakai meliputi pirolisis sampah plastik, minyak pirolisis, variasi temperatur, waktu pirolisis, LDPE, PP, HDPE, dan optimasi produksi minyak, berikut padanannya dalam bahasa Inggris. Rentang terbitan yang ditelaah adalah 2017–2026; terbitan 2024–2026 diposisikan sebagai rujukan utama, sedangkan terbitan lebih lama tetap dipakai apabila memuat data proses yang masih berguna sebagai pembanding. Penelusuran tersebut menyaring 16 artikel yang lolos kriteria: 8 artikel menyajikan data proses kuantitatif dan menjadi pijakan perbandingan temperatur, lama proses, serta perolehan minyak; 6 artikel menopang landasan konsep, karakter bahan baku, dan mekanisme dekomposisi termal; dan 2 artikel dipakai untuk membahas aspek ekonomi dan lingkungan. Artikel diterima apabila (1) secara eksplisit menyajikan data proses pirolisis sampah plastik, mencakup variabel proses, jenis bahan baku, kondisi temperatur dan/atau waktu, serta perolehan minyak dalam satuan volume atau rendemen; (2) terbit di jurnal ilmiah atau prosiding ber-ISSN yang dapat dilacak secara daring; dan (3) memaparkan metode secara cukup rinci sehingga kondisi operasinya dapat diperiksa. Artikel yang tidak menyertakan data kuantitatif perolehan minyak, begitu pula sumber yang identitas penerbitnya tidak terlacak, tidak dijadikan dasar klaim kuantitatif.

Analisis dilakukan dengan menyandingkan temperatur, lama proses, jenis plastik, dan perolehan minyak yang dicatat setiap penelitian. Data dari tiap artikel dipilah menurut jenis bahan baku dan kondisi operasi, kemudian ditelaah untuk menemukan pola kondisi yang memberi rendemen minyak tertinggi. Temuan terdahulu memperlihatkan keterkaitan erat antara temperatur dan hasil pirolisis, tetapi temperatur yang lebih tinggi tidak otomatis menambah minyak, sebab panas berlebih memicu *secondary cracking* yang mengalihkan produk cair menjadi gas. Atas dasar itu, temuan lintas pustaka dibandingkan secara runtut untuk menetapkan pola paduan temperatur, waktu, dan bahan baku yang paling berpeluang mengoptimalkan produksi minyak pirolisis.

3. PEMBAHASAN

A. Pengaruh Temperatur dan Waktu Proses terhadap Produksi Minyak Pirolisis Sampah Plastik

Keberhasilan pirolisis dalam mengubah sampah plastik menjadi produk cair berupa minyak terutama ditentukan oleh dua parameter, yaitu temperatur dan lama proses. Telaah pustaka memperlihatkan bahwa perubahan temperatur berpengaruh nyata pada pemutusan rantai polimer menjadi molekul hidrokarbon yang lebih sederhana. Makin tinggi temperatur, makin besar energi panas yang diterima bahan baku, sehingga dekomposisi termal berjalan lebih intensif dan fraksi cair yang terbentuk bertambah. Kendati demikian, temperatur yang terus dinaikkan tidak menjamin minyak bertambah, karena panas berlebih dapat memicu *secondary cracking*, yakni pemecahan lanjutan hidrokarbon cair menjadi gas yang tidak lagi dapat dikondensasikan[10][11].

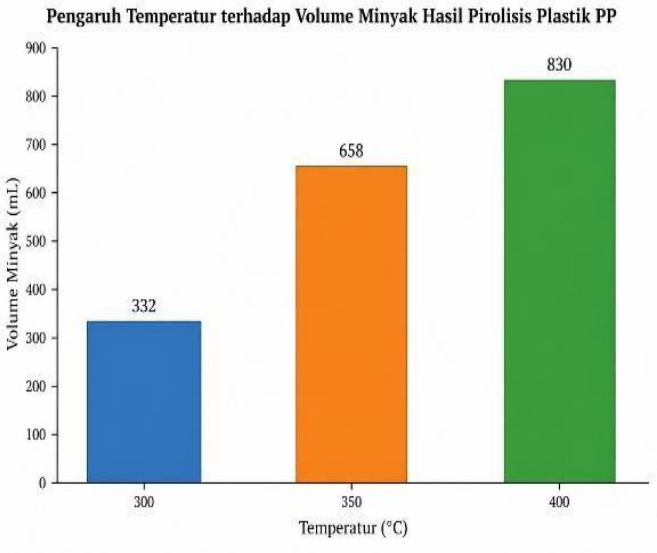
Arta et al. mencatat hubungan positif antara temperatur dan volume minyak pirolisis plastik polypropylene (PP). Volume minyak 332 mL pada 300°C naik menjadi 658 mL pada 350°C dan mencapai 830 mL pada 400°C. Pola kenaikan ini menempatkan 400°C sebagai kondisi yang lebih optimal, karena degradasi rantai polimer PP menjadi lebih kuat dan fraksi hidrokarbon yang beralih menjadi produk cair pun bertambah[12].

Tabel 1. Pengaruh Temperatur terhadap Produksi Minyak Pirolisis Plastik PP

No	Jenis Plastik	Temperatur pirolisis	Volume minyak
1.	PP	300ºC	332 mL
2.	PP	350ºC	658 mL
3.	PP	400ºC	830 mL

Sumber: Arta et al. [12]

Hubungan temperatur dengan perolehan minyak dari data tersebut divisualisasikan pada grafik berikut.



Gambar 1. Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Volume Minyak Pirolisis PP

Kurva pada grafik naik seiring bertambahnya temperatur. Kenaikan volume minyak di rentang 300–400°C tergolong besar, menandakan bahwa energi panas yang diberikan sudah

cukup untuk memutus ikatan karbon pada rantai polimer secara efektif. Pada temperatur rendah, dekomposisi belum tuntas sehingga sebagian plastik masih berupa rantai panjang dan belum beralih menjadi fraksi minyak. Perlu dicatat bahwa Gambar 1 berasal dari satu penelitian dengan massa umpan 3 kg[12]; pola tersebut mencerminkan satu konfigurasi reaktor dan bukan agregasi lintas penelitian. Pola yang searah juga dilaporkan Minduro et al., dengan volume minyak PP 921 mL pada temperatur reaktor 400°C[13].

Penelitian Sunyoto pada LDPE memberi konfirmasi serupa: perolehan minyak tertinggi juga muncul pada 400°C, yaitu 90 mL[5]. Angka tersebut memang jauh di bawah hasil PP di Tabel 1 dan di bawah hasil LDPE dari penelitian lain (lihat Tabel 3), tetapi polanya tetap sama, yakni volume minyak bertambah sejalan dengan kenaikan temperatur sampai 400°C. Selisih volume yang cukup besar antarpenelitian ini besar kemungkinan bersumber dari skala reaktor dan massa umpan yang tidak sama, sehingga volume absolut antarstudi perlu dibandingkan dengan hati-hati dan sebaiknya ditemani data rendemen (%) sebagai pembanding yang lebih setara.

Waktu tinggal (*residence time*) juga berperan penting, baik bagi jumlah maupun mutu minyak yang terbentuk. Durasi yang lebih panjang memberi kesempatan bagi molekul plastik untuk terurai lebih sempurna, namun durasi yang berlebihan memperbesar peluang reaksi sekunder yang mengubah sebagian produk cair menjadi gas. Pada LDPE, variasi temperatur dan lama proses terbukti memengaruhi mutu minyak pirolisis. Di temperatur tertentu, memperpanjang proses menaikkan rendemen minyak, sedangkan temperatur yang terlampau tinggi mengubah karakter minyak, misalnya viskositas meningkat dan nilai kalor menurun[11].

Tabel 2 memuat rentang temperatur 520–580°C dari Rijadi et al., lebih tinggi daripada rentang 300–400°C yang lazim disebut optimal oleh studi-studi lain dalam artikel ini. Selisih tersebut kemungkinan berhubungan dengan desain reaktor dan fokus penelitiannya, yang menyoroti pengaruh waktu tinggal terhadap mutu produk (viskositas dan nilai kalor) pada temperatur lebih tinggi, bukan mencari volume maksimum. Data Tabel 2 karena itu dipakai untuk menunjukkan pola umum interaksi temperatur dan waktu terhadap mutu minyak, dan tidak ditujukan untuk dibandingkan langsung dengan temperatur optimum 400°C pada studi lain.

Tabel 2. Hubungan Temperatur dan Waktu Proses terhadap Hasil Pirolisis LDPE

No.	Jenis Plastik	Temperatur	Waktu proses	Hasil Pengamatan
1.	LDPE	520°C	90 menit	Rendemen minyak meningkat dengan waktu lebih lama
2.	LDPE	550°C	90-120 menit	Produksi minyak meningkat
3.	LDPE	580°C	120 menit	Kualitas minyak berubah akibat peningkatan temperatur

Sumber: Rijadi et al. [11]

Lama proses tidak hanya berkaitan dengan mutu, tetapi juga dengan durasi yang diperlukan untuk mencapai hasil optimum, dan durasi ini ternyata berbeda menurut jenis plastik. Wajdi et al. mencatat waktu tercepat menuju hasil optimal sebesar 60 menit bagi PP dan 30 menit bagi HDPE[8]. Selisih itu memperlihatkan bahwa struktur polimer ikut mengatur laju dekomposisi termal, sehingga lama proses optimal tidak dapat disamaratakan untuk semua plastik dan harus disetel menurut bahan baku yang dipakai.

Dari telaah ini tampak bahwa kondisi optimum pirolisis bukan semata soal temperatur tertinggi, melainkan paduan temperatur dan lama proses yang menyeimbangkan pembentukan minyak dengan sesedikit mungkin gas. Kajian terbaru atas beragam plastik rumah tangga juga mencatat bahwa rentang 300–500°C sanggup memberi rendemen minyak pirolisis yang tinggi, terlebih pada kelompok poliolefin seperti PP dan LDPE. Pada temperatur optimum 400°C, LDPE mencapai rendemen minyak 83,4%, sedangkan PP berkisar 78,3%[10].

Karakter bahan baku yang berlainan juga memunculkan respons berbeda terhadap temperatur. PP dan LDPE lebih mudah membentuk fraksi cair karena struktur hidrokarbonnya sederhana dan tidak mengandung gugus polar yang kompleks. PET dan PVC, sebaliknya, memberi rendemen minyak lebih kecil sebab penguraiannya lebih banyak menghasilkan gas dan residu padat. Pemilihan jenis plastik karenanya sama pentingnya dengan pengaturan temperatur dan lama proses.

Secara ringkas, telaah pustaka memperlihatkan bahwa menaikkan temperatur sampai batas tertentu menambah perolehan minyak pirolisis, tetapi temperatur yang terlalu tinggi belum tentu memberi hasil terbaik. Kisaran 400°C paling sering tercatat sebagai titik optimum bagi PP dan LDPE karena menghasilkan minyak dalam jumlah tinggi dengan konversi yang efektif. Lama proses pun perlu disetel agar penguraian berlangsung sempurna tanpa menambah produk gas dari reaksi sekunder.

B. Analisis Kondisi Optimum Produksi Minyak Pirolisis Berdasarkan Jenis Plastik dan Parameter Operasi

Telaah pustaka menunjukkan bahwa optimasi produksi minyak pirolisis tidak cukup dilihat dari temperatur dan lama proses; karakter plastik yang dijadikan bahan baku juga sangat menentukan. Struktur rantai polimer yang tidak sama membuat kemampuan degradasi termal dan jumlah produk cairnya pun tidak sama. Kelompok poliolefin, yaitu polypropylene (PP), low-density polyethylene (LDPE), dan high-density polyethylene (HDPE), dikenal lebih berpotensi menghasilkan fraksi minyak karena rantai hidrokarbonnya sederhana sehingga ikatan karbonnya lebih mudah terputus selama pirolisis[13].

Temuan terbaru menempatkan PP dan LDPE di atas jenis plastik lain dalam hal perolehan minyak. Kajian optimasi pirolisis limbah plastik rumah tangga pada 300–500°C mencatat rendemen minyak 83,4% untuk LDPE dan 78,3% untuk PP pada temperatur optimum sekitar 400°C. HDPE menghasilkan rendemen di bawah LDPE dan PP, sementara PET dan PVC cenderung memberi minyak lebih sedikit karena gas dan residu padat yang terbentuk selama degradasi termal lebih banyak[10].

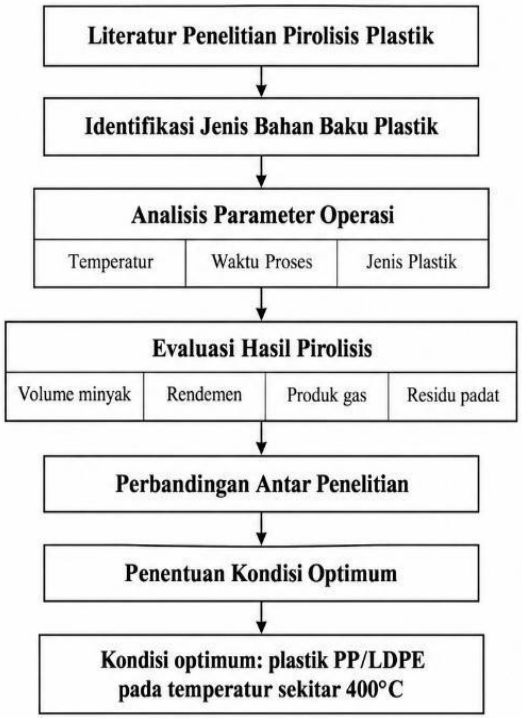
Tabel 3. Perbandingan Produksi Minyak Berdasarkan Jenis Plastik [10]

No	Jenis Plastik	Temperatur Optimum	Hasil Minyak/Rendemen	Karakteristik Produk
1	LDPE	±400°C	83,4%	Menghasilkan fraksi hidrokarbon berat (C16–C22)
2	PP	±400°C	78,3%	Menghasilkan fraksi ringan (C6–C10)
3	HDPE	±400°C	72,6%	Potensial sebagai bahan bakar diesel
4	PS	±400°C	69,1%	Menghasilkan hidrokarbon aromatik
5	PET	>400°C	8,9%	Lebih banyak menghasilkan gas/residu

No	Jenis Plastik	Temperatur Optimum	Hasil Minyak/Rendemen	Karakteristik Produk
6	PVC	>400°C	12,5%	Lebih banyak menghasilkan gas/residu dan senyawa berklorin

Tabel 3 memperlihatkan bahwa plastik berbasis polyethylene dan polypropylene adalah bahan baku paling menjanjikan untuk minyak pirolisis. Struktur kimia keduanya didominasi ikatan karbon–karbon dan karbon–hidrogen, yang lebih mudah mengalami pemutusan rantai (*chain scission*) ketika dipanaskan. PET berbeda karena strukturnya lebih kompleks dan mengandung gugus ester, sehingga degradasinya lebih banyak menghasilkan produk samping ketimbang fraksi minyak; rendemen minyaknya hanya 8,9%. PVC memberi rendemen 12,5% dan terurai terutama menjadi gas dan residu padat. Kedua plastik ini dengan demikian kurang cocok dijadikan bahan baku bahan bakar cair[10].

Keterkaitan antara jenis plastik, temperatur, dan perolehan minyak dalam penetapan kondisi optimum dirangkum dalam alur analisis berikut.



Gambar 2. Flowchart Penentuan Kondisi Optimum Produksi Minyak Pirolisis

Mengikuti flowchart tersebut, kondisi optimum ditetapkan secara bertahap: bahan baku diidentifikasi, parameter operasi dievaluasi, kemudian perolehan minyak dari tiap penelitian dibandingkan. Alur ini menegaskan bahwa kondisi optimum tidak ditentukan oleh temperatur tertinggi, tetapi oleh kecocokan jenis plastik dengan kondisi operasi yang memberi fraksi minyak paling banyak.

Minduro et al. menguatkan temuan itu lewat pengujian HDPE, LDPE, dan PP pada temperatur reaktor 400°C. Volume minyak tertinggi diperoleh dari PP, yaitu 921 mL, disusul LDPE 449 mL dan HDPE 400 mL. Urutan ini memperlihatkan besarnya pengaruh karakter rantai polimer terhadap jumlah minyak yang terbentuk selama pirolisis[13].

Tabel 3 dan hasil Minduro et al. menunjukkan arah perbandingan yang berlawanan. Tabel 3 menempatkan LDPE pada rendemen tertinggi (83,4%) di atas PP (78,3%), sedangkan Minduro et al. justru mendapati PP memberi volume minyak terbesar (921 mL)

dibandingkan LDPE (449 mL) meskipun keduanya diuji di temperatur identik. Sumber perbedaannya terletak pada besaran yang diukur. Volume absolut (mL) amat bergantung pada massa umpan plastik di tiap percobaan, sehingga angkanya tidak selalu dapat dibandingkan langsung antarpenelitian yang skala umpannya berbeda. Rendemen (%), sebaliknya, menormalkan perolehan minyak terhadap massa umpan dan karena itu lebih mewakili efisiensi konversi antarjenis plastik maupun antarpenelitian. Artinya, keunggulan PP terletak pada jumlah minyak yang dihasilkan untuk skala umpan tertentu (seperti temuan Minduro et al.), sementara keunggulan LDPE terletak pada proporsi massa plastik yang berhasil diubah menjadi minyak (seperti terlihat di Tabel 3).

Tabel 4. Ringkasan Normalisasi Hasil Pirolisis ke Satuan Rendemen (%)

No	Sumber	Jenis Plastik	Temperatur	Waktu Proses	Massa Umpan	Hasil Minyak	Rendemen (%)
1	Andalia et al. [10]	LDPE	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	—	83,4
2	Andalia et al. [10]	PP	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	—	78,3
3	Andalia et al. [10]	HDPE	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	—	72,6
4	Andalia et al. [10]	PS	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	—	69,1
5	Salsabila [9]	LDPE (katalis zeolit)	200–300°C	tidak dilaporkan	1 kg	523,83 mL**	52,38**
6	Rijadi et al. [11]	LDPE	520°C	120 menit	0,25 kg	—	59,20
7	Arta et al. [12]	PP	400°C	tidak dilaporkan	3 kg	830 mL	tidak dapat dihitung*
8	Minduro et al. [13]	PP	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	921 mL	tidak dapat dihitung*
9	Minduro et al. [13]	LDPE	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	449 mL	tidak dapat dihitung*
10	Minduro et al. [13]	HDPE	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	400 mL	tidak dapat dihitung*
11	Sunyoto [5]	LDPE	400°C	tidak dilaporkan	tidak dilaporkan	90 mL	tidak dapat dihitung*

**Studi ini tidak mencantumkan massa umpan plastik dan/atau densitas minyak, padahal keduanya dibutuhkan untuk mengubah volume menjadi massa, sehingga rendemennya tidak dapat dihitung. **Volume 523,83 mL merupakan titik optimum yang diprediksi model RSM untuk laju pemanasan 10°C/menit dan katalis 24,04 g. Dalam percobaan, volume tertinggi yang benar-benar terukur ialah 516,7 mL (51,67%), dicapai pada laju pemanasan 20°C/menit memakai katalis 20 g. Sumber menyatakan angka 52,38% sebagai rasio volume minyak per 1 kg umpan, tidak diturunkan dari konversi massa dengan densitas terukur; karena itu nilainya tidak sepenuhnya sebanding dengan rendemen massa di baris lain.*

Tabel 4 menyetarakan data antarstudi ke satuan rendemen (%) agar perbandingannya berdiri di atas basis yang sama. Penyetaraan itu hanya berhasil sebagian. Kebanyakan studi yang ditelaah melaporkan hasil sebagai volume (mL) saja, tanpa massa umpan dan densitas minyak, sehingga rendemen massanya mustahil dihitung kembali secara sahih. Dari data yang ada, perbandingan paling setara melibatkan rendemen 83,4% (LDPE) dan 78,3% (PP) pada 400°C [10], rendemen 52,38% dari pirolisis LDPE berkatalis zeolit dengan umpan 1 kg [9], serta rendemen 59,20% pada 520°C selama 120 menit dengan umpan 0,25 kg [11]. Data volume dari Arta et al. [12], Minduro et al. [13], dan Sunyoto [5] tetap dimuat karena memperlihatkan pola pengaruh temperatur dan jenis plastik, tetapi angkanya tidak disandingkan dengan nilai rendemen. Khusus angka 52,38%, nilai itu diturunkan dari volume optimum hasil prediksi RSM dibagi massa umpan, maka penyandingannya dengan rendemen massa studi lain menuntut kehati-hatian. Kekurangan pelaporan ini sekaligus

menegaskan perlunya standar pelaporan hasil pirolisis yang paling tidak memuat massa umpan, massa minyak, dan densitas produk, supaya hasil antarpenelitian dapat dibandingkan secara kuantitatif.

Di luar jenis plastik, pengendalian temperatur berperan besar dalam menjaga keseimbangan pembentukan minyak dan gas[14]. Bila temperatur terlalu rendah, pemutusan rantai polimer tidak tuntas sehingga sebagian bahan tertinggal sebagai residu padat. Bila terlalu tinggi, molekul hidrokarbon terpecah lebih jauh sehingga fraksi cair menyusut dan beralih menjadi gas (*secondary cracking*).

Dari seluruh pustaka yang ditelaah, kondisi operasi paling menjanjikan bagi produksi minyak pirolisis adalah temperatur di kisaran 400°C dengan bahan baku PP atau LDPE. PP menonjol dalam volume minyak, sedangkan LDPE menonjol dalam rendemen berbasis persentase konversi. Pemilihan bahan baku karenanya perlu mengikuti tujuan produksi, apakah mengejar jumlah minyak atau mutu fraksi hidrokarbon tertentu.

Kelayakan pirolisis di skala industri tidak hanya bergantung pada parameter teknis, tetapi juga pada pertimbangan ekonomi dan lingkungan. Kajian tekno-ekonomi dan lingkungan atas produk pirolisis plastik mencatat bahwa minyak pirolisis berpeluang menggantikan solar dengan biaya produksi kira-kira 25% di bawah solar fosil; dampak daur hidup well-to-tank-nya pun turun 54% untuk kategori kesehatan manusia dan 40% untuk kategori ekosistem [15]. Gambaran berbeda muncul dari unit pengolahan berskala kecil di Indonesia, yang Benefit Cost Ratio (BCR)-nya kurang dari 1; pendapatan dari penjualan minyak belum mampu menanggung ongkos operasi, terlebih ongkos energi untuk memanaskan reaktor [16]. Dari kedua temuan itu terlihat bahwa untung-rugi pirolisis mudah bergeser mengikuti kapasitas reaktor, efisiensi pemakaian energi, dan seragam tidaknya bahan baku. Dalam kerangka tersebut, operasi pada kisaran 400°C dengan bahan baku poliolefin berpeluang menguntungkan secara ekonomi, sebab rendemen tinggi pada temperatur yang relatif rendah dapat mengurangi konsumsi energi proses untuk setiap satuan minyak. Besarnya penghematan itu belum dapat dipastikan dari data yang ada dan masih perlu dibuktikan melalui analisis neraca energi proses.

Optimasi produksi minyak pirolisis, dengan demikian, bertumpu pada tiga faktor pokok: ketepatan memilih jenis plastik, penetapan temperatur optimum, dan pengendalian lama proses. Paduan ketiganya dapat menaikkan efisiensi konversi sampah plastik menjadi produk cair berenergi sekaligus meredam dampak lingkungan dari menumpuknya limbah plastik.

4. SIMPULAN

Telaah pustaka tentang optimasi produksi minyak pirolisis sampah plastik dari sisi variasi temperatur, lama proses, dan ragam bahan baku menghasilkan kesimpulan bahwa ketiga parameter itu memengaruhi jumlah maupun karakter minyak yang diperoleh. Temperatur adalah faktor paling menentukan bagi efektivitas dekomposisi termal: kenaikannya sampai titik optimum menambah fraksi cair, sedangkan temperatur berlebih menurunkan hasil karena secondary cracking. Kisaran 400°C paling sering tercatat sebagai kondisi optimal bagi PP dan LDPE. Pada pirolisis PP, menaikkan temperatur dari 300°C ke 400°C menambah volume minyak dari 332 mL menjadi 830 mL.

Lama proses juga berperan penting dan bersifat khas menurut bahan baku; waktu optimum yang dilaporkan sekitar 60 menit bagi PP dan 30 menit bagi HDPE, sedangkan waktu tinggal 90–120 menit memengaruhi mutu minyak LDPE pada temperatur yang lebih tinggi. Pada sisi bahan baku, PP memberi volume minyak absolut terbanyak dibandingkan

HDPE dan LDPE pada kondisi operasi yang sama, tetapi rendemen konversi (%) LDPE lebih tinggi daripada PP. Penentuan bahan baku terbaik karenanya bergantung pada indikator yang diutamakan, yakni volume minyak atau efisiensi konversi massa. Kelompok poliolefin seperti PP dan LDPE tetap menjadi bahan baku paling menjanjikan bagi minyak pirolisis. Paduan antara bahan baku yang dipilih sesuai indikator prioritas, temperatur operasi di kisaran 400°C, dan lama proses yang disetel menurut jenis plastik merupakan strategi efektif untuk mengoptimalkan produksi minyak pirolisis, baik sebagai jalur pengolahan sampah plastik maupun sebagai sumber energi bernilai guna.

Kajian ini memiliki keterbatasan. Seluruh temuan bersumber dari sintesis data sekunder penelitian terdahulu tanpa eksperimen konfirmasi, sehingga kondisi optimum yang diajukan masih bersifat indikatif. Skala reaktor, massa umpan, dan kelengkapan laporan yang tidak seragam antarstudi juga menyebabkan sebagian data gagal dikonversi menjadi rendemen. Untuk menguji rekomendasi kondisi operasi dalam kajian ini, masih dibutuhkan eksperimen skala laboratorium pada rentang 350–450°C yang mencatat massa umpan serta rendemen secara lengkap.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] L. Fitriyah and Pradisty S. Ardisty Sitogasa, “Identifikasi Pengelolaan Sampah Plastik Dengan Metode Pirolisis di TPA Kedungdowo, Kabupaten Nganjuk,” *J. EnviScience (Environment Sci.)*, vol. 9, no. 1, pp. 96–104, May 2025, doi: 10.30736/jev.v9i1.802.

[2] M. H. F. Febriansyah, “Pemanfaatan limbah plastik jenis LDPE (low density polyethylene) sebagai bahan bakar alternatif melalui proses pirolisis,” J. Tek. *Mesin*, vol. 14, no. 03, pp. 113–118, 2025.

[3] R. P. Liestiono, M. S. Cahyono, W. Widyawidura, A. Prasetya, and M. Syamsiro, “Karakteristik minyak dan gas hasil proses dekomposisi termal plastik jenis low density polyethylene (LDPE),” *J. Offshore Oil, Prod. Facil. Renew. Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 2017.

[4] W. Kartika, “Pemanfaatan sampah plastik jenis HDPE dan PET sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar minyak alternatif menggunakan metode pirolisis dengan katalis zeolit alam,” *Agroindustrial Technol. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 106–117, Nov. 2022, doi: 10.21111/atj.v6i2.8591.

[5] S. Sunyoto, “Pengaruh Temperatur pada Proses Pirolisis Plastik LDPE pada Pembuatan Bahan Bakar Alternatif,” *PRESISI*, vol. 26, no. 2, pp. 23–31, Jul. 2024. [Online]. Available: https://journal.istn.ac.id/index.php/presisi/article/view/1990

[6] A. R. H. Ansyah, H. Ma’mun, and M. Safi’i, “Rancang Bangun Mesin Konversi Sampah Plastik Menjadi Minyak Mentah Dengan Variasi Material Plastik PP Dan LDPE,” *J. Kolaborasi Sains dan Ilmu Terap.*, vol. 5, no. 1, pp. 339–351, 2026.

[7] B. Megaprastio, M. Syamsiro, M. A. Saputro, and F. Rina, “Teknologi pirolisis untuk konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak: Kajian literatur,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 18, no. 2, pp. 229–240, 2023.

[8] B. Wajdi, S. Sapiruddin, B. A. Novianti, and L. Zahara, “Pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak (BBM) dengan metode pirolisis sebagai energi alternatif,” *Kappa J.*, vol. 4, no. 1, pp. 100–112, 2020.

[9] A. N. A. Salsabila and Kusmiyati, "Optimasi proses pirolisis pada sampah plastik LDPE (low density polythylene [sic]) menggunakan pendekatan RSM (response surface methodology) menjadi bahan bakar minyak," *J. Teknol. dan Manaj. Ind. Terap.*, vol. 4, no. 3, pp. 976–983, Sep. 2025, doi: 10.55826/jtmit.v4i3.1078.

[10] W. Andalia, I. Pratiwi, B. D. Afrah, I. Akbar, and M. I. Ammarullah, "Optimized pyrolysis of household plastic waste in Indonesia for oil production: Hydrocarbon profiling, fuel alternative, and potential biomedical application," *Results Chem.*, vol. 15, p. 102247, 2025, doi: 10.1016/j.rechem.2025.102247.

[11] D. R. R. Rijadi, E. I. Rhofita, and S. W. Auvaria, "Pengaruh temperatur dan waktu proses terhadap kualitas minyak pirolisis limbah plastik low density polyethylene," Sci. J. *Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 10, no. 1, pp. 70–80, Apr. 2025, doi: 10.20527/sjmekinematika.v10i1.326.

[12] I. A. Arta, I. N. Suarnadwipa, and K. Astawa, "Pengaruh Variasi Temperatur Kerja Reaktor terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis pada Jenis Plastik PP," *Tek. Desain Mek.*, vol. 13, no. 2, Apr. 2024. [Online]. Available: https://ojs.unud.ac.id/index.php/mekanika/article/view/118376

[13] M. Minduro, I. N. Suarnadwipa, and K. Astawa, "Pengaruh Variasi Sampah Plastik Jenis High Density Polyethylene (HDPE), Low Density Polythylene (LDPE), dan Polypropylene (PP) Terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis," *Tek. Desain Mek.*, vol. 13, no. 3, Jul. 2024. [Online]. Available: https://ojs.unud.ac.id/index.php/mekanika/article/view/118430

[14] S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. W. Daud, and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 308–326, May 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.037.

[15] A. Pacheco-López, F. Lechtenberg, A. Somoza-Tornos, M. Graells, and A. Espuña, "Economic and Environmental Assessment of Plastic Waste Pyrolysis Products and Biofuels as Substitutes for Fossil-Based Fuels," *Front. Energy Res.*, vol. 9, Jun. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.676233.

[16] M. M. Sari, I. Y. Septiariva, R. Rofiah, I W. K. Suryawan, and S. Suhardono, "Potensi Ekonomi Pirolisis Sampah Plastik untuk Pengelolaan Berkelanjutan: Studi Kasus Plastik Pembungkus Paket," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 22, no. 4, pp. 941–950, 2024, doi: 10.14710/jil.22.4.941-950.