STUDI TERMODINAMIKA DAN KINETIKA GASIFIKASI SAMPAH PLASTIK MENJADI GAS SINTETIK (*SYNGAS*)

Salsa Haura Zahra Wibowo[1], Tun Sriana[1*]
[1]Program Studi Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, 58315
E-mail: tun.sriana@gmail.com

ABSTRAK

Peningkatan volume sampah plastik di berbagai wilayah, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia, telah menjadi ancaman serius terhadap lingkungan. Pengelolaan limbah plastik konvensional melalui penimbunan dan pembakaran terbuka tidak hanya tidak efisien, tetapi juga menimbulkan dampak negatif seperti pencemaran udara dan tanah. Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya melalui konversi termokimia dalam bentuk gasifikasi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan reaktor batch tipe fixed bed pada suhu 600°C, 700°C, dan 800°C. Agen gasifikasi yang digunakan adalah udara dan uap air, dengan variasi equivalence ratio (ER) antara 0,2 hingga 0,4. Komposisi gas hasil dianalisis menggunakan kromatografi gas (GC). Selain itu, data eksperimen digunakan untuk menghitung parameter kinetika reaksi (konstanta laju dan energi aktivasi) serta efisiensi konversi energi kimia menjadi syngas. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 600°C menjadi 800°C diikuti oleh peningkatan kandungan H_2 dari 18% menjadi 28% dan CO dari 12% menjadi 21% dalam syngas. Penggunaan uap air sebagai agen gasifikasi berpotensi meningkatkan pembentukan H_2 melalui reaksi reforming dan water-gas shift. Berdasarkan nilai konstanta laju reaksi yang dilaporkan, yaitu 0,003–0,007 s^{-1}, perhitungan menggunakan persamaan Arrhenius menghasilkan energi aktivasi sebesar 33,12 kJ/mol. Nilai kalor rendah (lower heating value/LHV) syngas tertinggi yang dilaporkan sebesar 15 MJ/Nm^3 pada suhu 800°C, tetapi masih memerlukan verifikasi basis komposisi gas, dengan efisiensi konversi energi kimia yang dilaporkan sebesar 71,2% pada penggunaan agen uap air dan ER 0,3; nilai efisiensi ini belum dapat diverifikasi dari data yield gas dan nilai kalor bahan baku yang disajikan. Studi ini memberikan pemahaman mengenai pengaruh kondisi operasi terhadap karakteristik gasifikasi plastik serta potensinya dalam pengelolaan limbah berkelanjutan dan produksi energi alternatif.

Kata kunci: ***Gasifikasi, Sampah Plastik, Syngas, Termodinamika, Energi Terbarukan***

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan industri dan konsumsi masyarakat modern telah menyebabkan peningkatan drastis dalam produksi plastik global. Plastik menjadi bahan pilihan karena sifatnya yang ringan, tahan lama, mudah dibentuk, serta biaya produksinya yang relatif rendah. Namun, keunggulan ini juga menjadi masalah utama ketika plastik telah mencapai akhir siklus hidupnya dan berubah menjadi limbah. Sifat plastik yang sulit terurai menyebabkan akumulasi limbah plastik di lingkungan dalam jangka waktu yang sangat lama. Permasalahan tersebut mendorong perlunya pengembangan teknologi pengolahan limbah plastik yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Permasalahan sampah plastik tidak hanya berkaitan dengan volume yang terus meningkat, tetapi juga dengan dampaknya terhadap ekosistem, seperti pencemaran sungai dan laut serta pembentukan mikroplastik yang berpotensi membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, pengelolaan limbah plastik menjadi isu strategis yang perlu ditangani melalui

pendekatan yang terintegrasi dan inovatif. Salah satu pendekatan yang potensial dan mulai dikembangkan di berbagai negara adalah konversi termokimia, khususnya proses gasifikasi.

Gasifikasi merupakan proses konversi bahan yang mengandung karbon menjadi gas sintetik (*syngas*) melalui reaksi termokimia dengan suplai oksigen terbatas atau menggunakan agen gasifikasi seperti udara, uap air, dan oksigen murni. Berbeda dengan pembakaran sempurna yang terutama menghasilkan panas, gasifikasi bertujuan menghasilkan campuran gas yang mengandung komponen mudah terbakar, terutama hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), dan metana (CH_4). Gas tersebut berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar maupun bahan baku proses sintesis kimia. Saebea et al. [1] telah mengkaji gasifikasi limbah plastik untuk produksi gas sintetik, sedangkan Bashir et al. [2] membahas potensinya dalam produksi hidrogen rendah karbon.

Dalam konteks gasifikasi plastik, terdapat tantangan dan peluang yang unik. Plastik memiliki nilai kalor yang tinggi karena kandungan karbon dan hidrogennya yang besar, sehingga berpotensi menghasilkan syngas dengan kandungan energi yang tinggi. Namun, karakteristik termal dan struktur kimia plastik menimbulkan tantangan dalam hal desain reaktor, pengendalian suhu, serta pengaturan kondisi operasi. Temperatur, jenis agen gasifikasi, dan *equivalence ratio* (ER) merupakan beberapa parameter yang dapat memengaruhi komposisi dan kualitas syngas. Penggunaan uap air dapat mendorong pembentukan hidrogen melalui reaksi *steam reforming* dan *water-gas shift*, sedangkan penggunaan udara dapat menyebabkan pengenceran syngas oleh nitrogen. Kajian Okati et al. [3] menunjukkan pentingnya pengaturan parameter operasi dalam produksi syngas kaya hidrogen melalui proses ko-gasifikasi.

Penelitian terdahulu telah membahas gasifikasi plastik melalui pendekatan simulasi termodinamika maupun kajian terhadap pengaruh kondisi operasi. Saebea et al. [1] mengkaji produksi syngas dari limbah plastik, sedangkan Bashir et al. [2] mengulas perkembangan teknologi gasifikasi plastik untuk produksi hidrogen rendah karbon. Selain itu, Karadag et al. [4] melakukan kajian perbandingan produksi hidrogen melalui gasifikasi polietilena, polipropilena, serta campurannya dengan residu biomassa. Meskipun penelitian tersebut memberikan informasi mengenai potensi gasifikasi plastik, analisis yang menghubungkan perubahan temperatur, jenis agen gasifikasi, komposisi syngas, nilai kalor, dan parameter kinetika tetap diperlukan untuk memahami karakteristik proses secara lebih menyeluruh.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi aspek termodinamika dan kinetika proses gasifikasi sampah plastik, khususnya jenis polietilena (PE) dan polipropilena (PP), yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Penelitian dilakukan menggunakan reaktor fixed bed tipe batch dengan variasi temperatur 600°C, 700°C, dan 800°C, agen gasifikasi udara dan uap air, serta equivalence ratio (ER) sebesar 0,2; 0,3; dan 0,4. Fokus utama penelitian ini adalah menganalisis pengaruh kondisi operasi terhadap komposisi syngas yang dihasilkan, mengevaluasi nilai kalor dan efisiensi konversi energi kimia proses, serta menentukan parameter kinetika reaksi berupa konstanta laju, energi aktivasi, dan faktor pra-eksponensial. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai karakteristik konversi termokimia sampah plastik serta menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan limbah plastik yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium termokimia dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suhu operasi dan jenis agen gasifikasi terhadap komposisi gas sintetik (syngas), karakteristik kinetika reaksi, nilai kalor, serta efisiensi konversi energi kimia proses gasifikasi sampah plastik. Bahan baku yang digunakan adalah polietilena (PE) dan polipropilena (PP), dengan variasi suhu operasi 600°C,

700°C, dan 800°C. Agen gasifikasi yang digunakan berupa udara atmosferik dan uap air, sedangkan variasi equivalence ratio (ER) yang dilaporkan dalam penelitian adalah 0,2; 0,3; dan 0,4. Analisis dilakukan berdasarkan hasil pengukuran komposisi gas dan parameter proses yang tersedia.

A. Bahan Baku dan Karakteristiknya

Jenis plastik yang digunakan dalam penelitian ini adalah polietilena (PE) dan polipropilena (PP). Kedua jenis plastik tersebut dipilih karena banyak digunakan sebagai bahan kemasan dan produk rumah tangga. Plastik dikumpulkan dari sampah rumah tangga, kemudian dicuci menggunakan air panas dan deterjen untuk menghilangkan minyak serta kotoran yang menempel. Setelah pencucian, plastik dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk mengurangi kandungan kelembapan. Selanjutnya, plastik dicacah menjadi ukuran 1–2 cm untuk memperoleh ukuran bahan yang lebih seragam dan memperbesar luas permukaan kontak dengan agen gasifikasi.

Massa bahan baku yang digunakan dalam setiap percobaan adalah 100 gram. Karakteristik bahan baku menjadi salah satu faktor yang perlu diperhatikan karena perbedaan struktur kimia PE dan PP dapat memengaruhi proses dekomposisi termal. Namun, data karakterisasi awal berupa analisis proksimat, analisis ultimat, dan nilai kalor masing-masing plastik belum tercantum dalam hasil penelitian yang tersedia sehingga tidak digunakan sebagai dasar perbandingan kuantitatif.

Untuk membandingkan pengaruh PE dan PP secara kuantitatif, diperlukan data karakterisasi awal masing-masing bahan, termasuk komposisi unsur dan nilai kalor. Karena hasil karakterisasi tersebut belum tersedia dalam naskah, perbandingan kinerja kedua jenis plastik tidak ditetapkan berdasarkan asumsi sifat bahan.

B. Agen Gasifikasi

Dua jenis agen gasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah udara atmosferik dan uap air. Udara atmosferik memiliki komposisi utama sekitar 21% oksigen (O_2), 78% nitrogen (N_2), dan 1% gas lainnya. Sementara itu, uap air dihasilkan melalui pemanasan air pada suhu sekitar 100°C dan dialirkan menuju reaktor.

Pada gasifikasi menggunakan udara, jumlah oksigen yang disuplai dapat dinyatakan melalui *equivalence ratio* (ER), yaitu perbandingan antara jumlah oksigen aktual dan kebutuhan oksigen stoikiometris untuk pembakaran sempurna bahan baku. Secara matematis, ER dinyatakan sebagai berikut:

$$ER = \frac{n(O_2,aktual)}{n(O_2,stoikiometris)} \quad (1)$$

Variasi ER yang dilaporkan dalam penelitian adalah 0,2; 0,3; dan 0,4. Kebutuhan oksigen stoikiometris ditentukan berdasarkan komposisi unsur bahan baku, sedangkan jumlah oksigen aktual berkaitan dengan suplai udara selama proses berlangsung. Pada gasifikasi menggunakan uap air tanpa suplai oksigen, ER tidak dapat diterapkan dengan definisi yang sama. Kondisi tersebut lebih tepat dinyatakan berdasarkan laju alir uap atau rasio massa uap terhadap bahan baku. Oleh karena itu, penggunaan ER pada kondisi agen uap perlu dikonfirmasi berdasarkan konfigurasi suplai agen gasifikasi yang sebenarnya.

Keterlacakan variasi ER memerlukan pencatatan kebutuhan oksigen stoikiometris berdasarkan komposisi unsur PE dan PP serta laju alir udara aktual pada setiap percobaan. Data laju alir dan komposisi unsur tersebut belum disajikan, sehingga nilai ER yang dilaporkan

belum dapat dihitung ulang. Untuk percobaan menggunakan uap air, laju alir uap atau rasio uap terhadap bahan baku perlu dilaporkan secara terpisah.

C. Peralatan dan Sistem Reaktor

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas reaktor gasifikasi, pemanas listrik, termokopel, sistem pengaturan aliran agen gasifikasi, alat analisis gas, dan sistem kondensasi. Reaktor yang digunakan berupa tabung *stainless steel* tipe *fixed-bed batch* dengan volume ruang reaksi sebesar 3 liter. Pemanasan dilakukan menggunakan pemanas listrik berbasis elemen tahanan yang dilengkapi sistem kontrol suhu digital *proportional-integral-derivative* (PID) untuk menjaga suhu operasi sesuai dengan kondisi yang ditentukan.

Pemantauan suhu selama proses berlangsung dilakukan menggunakan termokopel tipe K yang dipasang di dalam reaktor. Aliran agen gasifikasi diatur menggunakan rotameter dan katup pengatur. Analisis komposisi gas dilakukan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) Shimadzu GC-2014 yang dilengkapi detektor *thermal conductivity detector* (TCD) dan kolom analisis untuk mengidentifikasi kandungan H_2, CO, CO_2, dan CH_4.

Sistem kondensasi terdiri atas pipa logam berpendingin dan wadah penampung yang digunakan untuk memisahkan tar serta air dari aliran gas hasil reaksi. Gas yang telah melewati kondensor kemudian ditampung dalam kantong gas untuk selanjutnya dianalisis menggunakan GC.

D. Prosedur Eksperimen

1) Penyiapan Reaktor

Tahap awal eksperimen dilakukan dengan membersihkan reaktor dan memeriksa kondisi peralatan untuk memastikan tidak terdapat kebocoran. Setelah reaktor dipastikan dalam kondisi baik, sebanyak 100 gram plastik dimasukkan ke dalam ruang reaksi. Reaktor kemudian ditutup rapat dan divakumkan terlebih dahulu untuk mengurangi keberadaan oksigen sebelum proses pemanasan.

2) Proses Pemanasan

Setelah tahap penyiapan selesai, reaktor dipanaskan hingga mencapai suhu target, yaitu 600°C, 700°C, dan 800°C. Setelah suhu mencapai kondisi yang ditentukan dan stabil, agen gasifikasi berupa udara atau uap air dialirkan ke dalam reaktor dengan laju yang diatur menggunakan rotameter dan katup pengatur.

Penelitian melaporkan variasi ER sebesar 0,2; 0,3; dan 0,4. Pada penggunaan udara, ER berkaitan dengan jumlah oksigen yang disuplai terhadap kebutuhan oksigen stoikiometris. Sementara itu, untuk penggunaan uap air, kondisi operasi perlu dinyatakan berdasarkan suplai uap aktual atau kombinasi agen gasifikasi apabila terdapat penambahan udara. Reaksi berlangsung selama 30 menit pada suhu operasi dan pengaturan aliran yang dijaga tetap.

3) Pengumpulan dan Analisis Produk

Gas hasil reaksi dialirkan melalui pipa keluaran menuju kondensor untuk memisahkan fraksi tar dan uap air. Setelah proses kondensasi, gas ditampung dalam kantong gas untuk selanjutnya dianalisis menggunakan GC. Analisis dilakukan terhadap komponen H_2, CO, CO_2, dan CH_4.

Komposisi gas yang disajikan dalam hasil penelitian mencakup keempat komponen tersebut. Basis komposisi gas perlu diperjelas, terutama apakah persentase yang dilaporkan merupakan komposisi gas kering total atau hasil normalisasi terhadap komponen yang terukur. Pada penggunaan udara sebagai agen gasifikasi, keberadaan

nitrogen (N_2) perlu diperhitungkan karena dapat memengaruhi komposisi dan nilai kalor syngas.

Selain produk gas, residu padat yang terbentuk setelah proses gasifikasi digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi sisa bahan baku. Persentase residu padat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Residu\ padat\ (\%) = \left(\frac{m_{residu}}{m_{plastik}}\right) x100\% \quad (2)$$

dengan mresidu merupakan massa residu padat setelah proses gasifikasi dan mplastik merupakan massa bahan baku awal. Data penelitian melaporkan residu padat sebesar 11% pada suhu 600°C dan 6% pada suhu 800°C. Nilai residu pada suhu 700°C belum disajikan dalam hasil penelitian.

Setiap eksperimen dilaporkan dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk mengevaluasi konsistensi data yang diperoleh.

4) Pengolahan Data Eksperimen

Data hasil eksperimen dianalisis berdasarkan variasi suhu operasi, jenis plastik, dan agen gasifikasi. Parameter yang dievaluasi meliputi komposisi syngas, konstanta laju reaksi, nilai kalor rendah, efisiensi termal, dan residu padat.

Untuk pengukuran yang dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan, hasil dapat dinyatakan sebagai nilai rata-rata dan simpangan baku (*mean* ± *standard deviation*). Nilai rata-rata dihitung menggunakan persamaan:

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{n} \quad (3)$$

Sedangkan simpangan baku sampel dihitung menggunakan persamaan:

$$SD = \sqrt{\left[\frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}\right]} \quad (4)$$

Hasil tiga kali pengulangan belum tersedia dalam bentuk data individual per kondisi operasi. Oleh karena itu, nilai rata-rata, simpangan baku, dan error bar tidak dihitung atau ditampilkan sebagai hasil pengukuran pada naskah ini.

E. Analisis Kinetika dan Termodinamika

1) Analisis Kinetika Reaksi

Analisis kinetika dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh suhu terhadap konstanta laju reaksi gasifikasi plastik. Penelitian menggunakan pendekatan model kinetika orde satu yang dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\ln\left(\frac{C_o}{C_t}\right) = kt \quad (5)$$

dengan C_0 merupakan konsentrasi reaktan awal, Ct merupakan konsentrasi reaktan pada waktu t, k merupakan konstanta laju reaksi (s^{-1}), dan t merupakan waktu reaksi (s).

Nilai konstanta laju yang dilaporkan dalam penelitian adalah 0,003 s^{-1} pada suhu 600°C, 0,005 s^{-1} pada 700°C, dan 0,007 s^{-1} pada 800°C. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar analisis pengaruh suhu terhadap kinetika reaksi. Kesesuaian model orde satu perlu dievaluasi melalui regresi $\ln(C_0/Ct)$ terhadap waktu beserta koefisien determinasi (R^2). Karena data konsentrasi terhadap waktu belum ditampilkan, kesesuaian model orde satu belum dapat dibuktikan secara langsung.

Selanjutnya, energi aktivasi (Ea) dan faktor pra-eksponensial (A) ditentukan menggunakan persamaan Arrhenius:

$$k = A\exp(-\frac{Ea}{RT}) \quad (6)$$

Persamaan tersebut dilinierkan menjadi:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R}(\frac{1}{T}) \quad (7)$$

dengan R merupakan konstanta gas ideal sebesar 8,314 J/mol·K dan T merupakan suhu absolut dalam Kelvin.

Perhitungan dilakukan menggunakan nilai konstanta laju pada suhu 873,15 K, 973,15 K, dan 1073,15 K. Nilai energi aktivasi diperoleh dari kemiringan grafik ln k terhadap 1/T, sedangkan faktor pra-eksponensial diperoleh dari intersep regresi. Hasil regresi berupa persamaan linier, koefisien determinasi, energi aktivasi, dan faktor pra-eksponensial digunakan untuk mengevaluasi konsistensi parameter kinetika yang dilaporkan.

2) Analisis Nilai Kalor Syngas

Nilai kalor rendah (*lower heating value*/LHV) syngas digunakan untuk mengevaluasi kandungan energi gas hasil gasifikasi. Secara teoritis, LHV campuran gas dapat dihitung berdasarkan fraksi volume komponen gas yang mudah terbakar, terutama H_2, CO, dan CH_4, menggunakan persamaan:

$$LHV_{syngas} = y_{H_2}LHV_{H_2} + y_{CO}LHV_{CO} + y_{CH_4}LHV_{CH_4} \quad (8)$$

dengan yi merupakan fraksi volume masing-masing komponen gas dan LHVi merupakan nilai kalor rendah setiap komponen pada kondisi acuan volume yang sama.

Nilai LHV yang dilaporkan dalam penelitian adalah 9 MJ/Nm³ pada suhu 600°C, 12 MJ/Nm³ pada 700°C, dan 15 MJ/Nm³ pada 800°C. Nilai tersebut digunakan sebagai hasil yang dilaporkan dalam penelitian, sedangkan verifikasi perhitungannya memerlukan informasi mengenai basis komposisi gas dan komponen gas lain yang mungkin terdapat dalam produk gasifikasi.

3) Analisis Efisiensi Konversi Energi Termal

Efisiensi konversi energi kimia dievaluasi melalui perbandingan energi kimia dalam syngas terhadap energi kimia bahan baku plastik. Definisi ini setara dengan cold gas efficiency (CGE) apabila energi panas eksternal tidak dimasukkan dalam penyebut. Perhitungannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\eta_{gas} = \frac{V_{syngas}xLHV_{syngas}}{m_{plastik}xLHV_{plastik}}x100\% \quad (9)$$

Perhitungan ulang efisiensi memerlukan yield atau volume syngas pada basis normal yang terukur, nilai kalor masing-masing bahan baku, dan kejelasan kondisi operasi untuk angka 71,2%. Tanpa data tersebut, nilai yang dilaporkan tidak dapat dipastikan sebagai efisiensi tertinggi dari seluruh variasi percobaan.

Dengan ηgas adalah efisiensi konversi energi kimia menjadi syngas (%), Vsyngas adalah volume total syngas pada kondisi normal (Nm³), LHVsyngas adalah nilai kalor rendah syngas (MJ/Nm³), mplastik adalah massa plastik (kg), dan LHVplastik adalah nilai kalor rendah bahan baku (MJ/kg).

Volume total syngas dan nilai kalor bahan baku diperlukan untuk menghitung energi keluaran dan energi masukan. Penelitian melaporkan efisiensi tertinggi sebesar 71,2% pada suhu 800°C dengan agen uap air dan ER 0,3. Akan tetapi, volume syngas dan nilai kalor

awal plastik belum tercantum sehingga angka tersebut belum dapat diverifikasi dari persamaan (9).

Penggunaan ER pada kondisi uap air harus mengikuti konfigurasi suplai oksigen aktual, sebagaimana telah dijelaskan pada poin B. Jika gasifikasi hanya menggunakan uap tanpa oksigen, kondisi lebih tepat dinyatakan dengan rasio uap terhadap bahan baku. Oleh karena itu, angka 71,2% dipertahankan sebagai nilai yang dilaporkan, bukan sebagai kondisi optimum yang telah terverifikasi secara menyeluruh. Karena sistem menggunakan pemanas listrik, evaluasi efisiensi termal total juga memerlukan data energi panas eksternal.

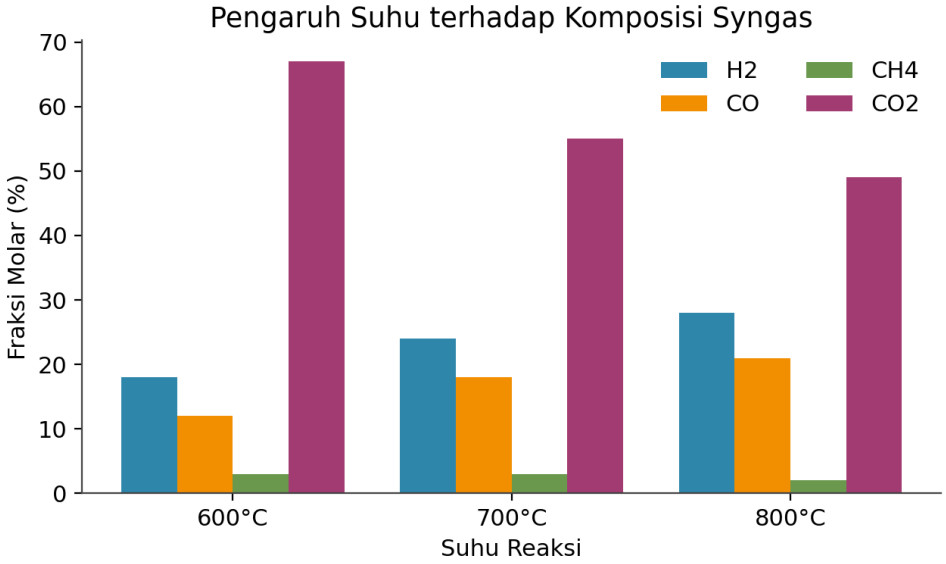
3. PEMBAHASAN

A. Pengaruh Suhu terhadap Komposisi Syngas

Berdasarkan Tabel 1, fraksi H_2 meningkat dari 18% pada 600°C menjadi 24% pada 700°C dan 28% pada 800°C. Fraksi CO juga meningkat dari 12% menjadi 18% dan 21%, sedangkan CO_2 menurun dari 67% menjadi 55% dan 49%. Fraksi CH_4 tercatat 3%, 3%, dan 2%. Dengan demikian, data yang disajikan menunjukkan kecenderungan perubahan komposisi gas seiring peningkatan suhu. Namun, tabel belum memisahkan hasil menurut jenis plastik (PE dan PP), agen gasifikasi (udara dan uap), serta ER (0,2; 0,3; dan 0,4). Karena itu, angka tersebut belum dapat diatribusikan pada kombinasi kondisi operasi tertentu atau digunakan untuk membuktikan kondisi optimum.

Tabel 1. Komposisi Syngas pada Berbagai Suhu Gasifikasi

Suhu (°C)	H2 (%)	CO (%)	CH4 (%)	CO2 (%)
600	18	12	3	67
700	24	18	3	55
800	28	21	2	49



Gambar 1. Grafik Komposisi Syngas (H2, CO, CH4, CO2) terhadap Suhu Gasifikasi

Peningkatan fraksi H_2 dan CO pada suhu yang lebih tinggi secara teoritis dapat berkaitan dengan reaksi perengkahan termal dan reforming. Penjelasan ini merupakan interpretasi mekanistik, bukan bukti langsung bahwa laju setiap reaksi meningkat, karena laju pembentukan masing-masing gas tidak diukur. Jumlah empat komponen pada Tabel 1 mencapai 100% pada setiap suhu; hal ini mengindikasikan kemungkinan normalisasi terhadap gas yang dianalisis. Basis gas kering atau basah dan kontribusi N_2, khususnya pada gasifikasi dengan udara, perlu dikonfirmasi sebelum komposisi dibandingkan sebagai fraksi syngas total. Data tiga kali pengulangan belum disajikan secara individual sehingga rerata dan simpangan baku tidak dapat dihitung ulang.

B. Pengaruh Agen Gasifikasi

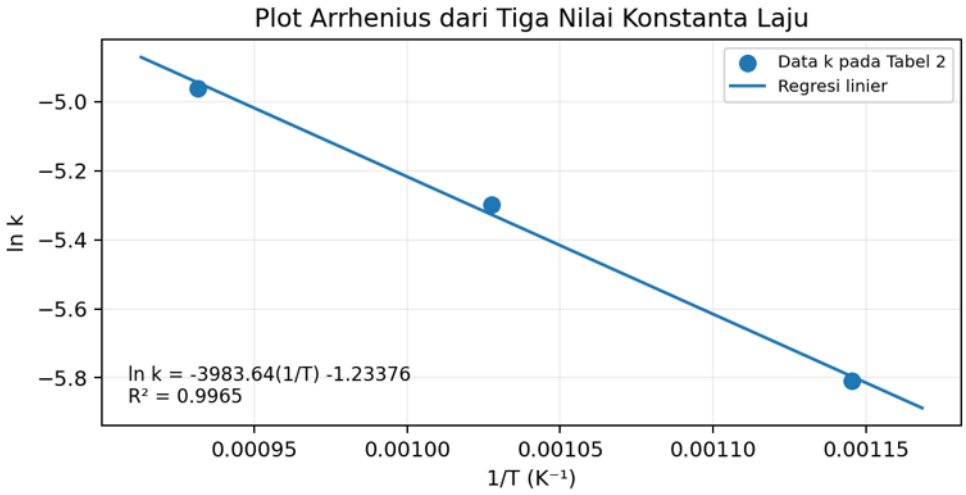
Penelitian menggunakan udara dan uap air sebagai agen gasifikasi. Secara teoritis, penggunaan udara dapat mengencerkan gas produk karena kandungan N_2, sedangkan uap air berpotensi meningkatkan pembentukan H_2 melalui reaksi *reforming* dan *water-gas shift*. Akan tetapi, hasil yang tersedia belum menyajikan tabel komposisi gas terpisah untuk kedua agen pada suhu, jenis plastik, dan ER yang sama. Oleh sebab itu, keunggulan uap dibandingkan udara belum dapat dinyatakan sebagai temuan kuantitatif penelitian ini. Pada operasi uap tanpa suplai oksigen, parameter ER tidak dapat digunakan menurut definisi ER pada bagian metode B; diperlukan informasi laju alir uap, rasio uap terhadap bahan baku, atau bukti adanya suplai udara tambahan.

Interpretasi mengenai pengaruh agen gasifikasi tersebut sejalan secara konseptual dengan kajian mengenai gasifikasi plastik dan pengaturan parameter operasi [1]–[4]. Meskipun demikian, kesesuaian dengan literatur tidak menggantikan kebutuhan data pembanding eksperimen untuk menilai efek agen gasifikasi dalam penelitian ini.

C. Karakteristik Kinetika Reaksi

Nilai konstanta laju reaksi pada suhu 600°C, 700°C, dan 800°C masing-masing sebesar 0,003; 0,005; dan 0,007 s^{-1} (Tabel 2). Regresi linier antara ln k dan 1/T pada suhu absolut 873,15; 973,15; dan 1073,15 K menghasilkan persamaan $\ln k = -3983{,}64(1/T) - 1{,}23376$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9965. Berdasarkan kemiringan dan intersep persamaan Arrhenius, diperoleh energi aktivasi (Ea) sebesar 33,12 kJ/mol dan faktor pra-eksponensial (A) sebesar 0,2912 s^{-1}. Hasil ini menunjukkan konsistensi hubungan antara konstanta laju dan suhu berdasarkan tiga nilai k yang tersedia, tetapi belum membuktikan kesesuaian model kinetika orde satu.

Pengujian model kinetika orde satu memerlukan data konsentrasi atau konversi reaktan terhadap waktu untuk mengevaluasi linearitas $\ln(C_0/Ct)$ terhadap t beserta kesesuaian modelnya. Data deret waktu tersebut belum disajikan. Selain itu, konstanta laju belum dirinci berdasarkan jenis plastik, agen gasifikasi, dan ER. Dengan demikian, parameter Ea dan A hanya mewakili regresi dari tiga nilai konstanta laju yang dilaporkan dan belum dapat digunakan untuk menyimpulkan mekanisme reaksi pada seluruh kondisi percobaan.

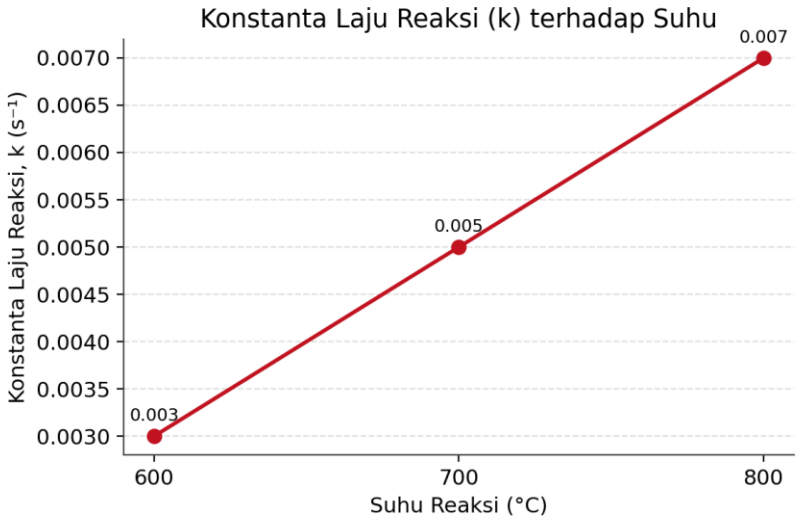


Gambar 2. Plot Arrhenius ln k terhadap 1/T berdasarkan nilai konstanta laju pada Tabel 2

Grafik Arrhenius menunjukkan hubungan regresi dari tiga nilai k yang dilaporkan (R^2 = 0,9965). Grafik ini tidak menggantikan pengujian kesesuaian kinetika orde satu melalui data konsentrasi terhadap waktu.

Tabel 2. Konstanta Laju pada Berbagai Suhu dan Parameter Arrhenius Hasil Regresi Tiga Suhu

Suhu (°C)	Konstanta Laju, k (s^{-1})	Energi Aktivasi, Ea (kJ/mol)	Faktor Pre-eksponensial, A (s^{-1})
600	0,003	33,12	0,2912
700	0,005		
800	0,007		



Gambar 3. Grafik Konstanta Laju Reaksi (k) terhadap Suhu Gasifikasi

D. Efisiensi Konversi Energi Kimia dan Nilai Kalor Syngas

Berdasarkan Tabel 3, nilai kalor rendah (*lower heating value*/LHV) syngas mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan suhu gasifikasi. Pada suhu 600°C, nilai LHV yang dilaporkan sebesar 9 MJ/Nm³, kemudian meningkat menjadi 12 MJ/Nm³ pada suhu 700°C dan mencapai 15 MJ/Nm³ pada suhu 800°C. Peningkatan tersebut menunjukkan kecenderungan bertambahnya kandungan energi syngas pada suhu operasi yang lebih tinggi. Namun, nilai LHV yang dilaporkan masih perlu ditinjau kembali berdasarkan komposisi gas pada Tabel 1. Perhitungan menggunakan fraksi H_2 sebesar 28%, CO sebesar 21%, dan CH_4 sebesar 2% pada suhu 800°C menghasilkan nilai LHV teoritis sekitar 6,3 MJ/Nm³, lebih rendah dibandingkan nilai yang dilaporkan. Perbedaan ini menunjukkan perlunya verifikasi terhadap basis komposisi gas, keberadaan komponen lain seperti N_2, serta kondisi acuan yang digunakan dalam perhitungan LHV.

Selain nilai kalor, efisiensi konversi energi kimia juga menjadi parameter penting dalam mengevaluasi kinerja proses gasifikasi. Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi sebesar 71,2% dilaporkan pada suhu 800°C dengan penggunaan agen gasifikasi uap air dan ER 0,3. Meskipun demikian, nilai tersebut masih memerlukan verifikasi melalui data volume syngas yang dihasilkan dan nilai kalor bahan baku PE maupun PP. Apabila evaluasi mencakup efisiensi termal keseluruhan sistem, energi yang digunakan oleh pemanas listrik juga perlu diperhitungkan. Selain itu, belum tersedianya data efisiensi pada variasi kondisi operasi lainnya menyebabkan penentuan kondisi optimum belum dapat dilakukan secara menyeluruh. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh menunjukkan potensi peningkatan kinerja energi gasifikasi pada suhu tinggi, tetapi masih memerlukan kelengkapan data untuk memastikan efisiensi proses secara kuantitatif.

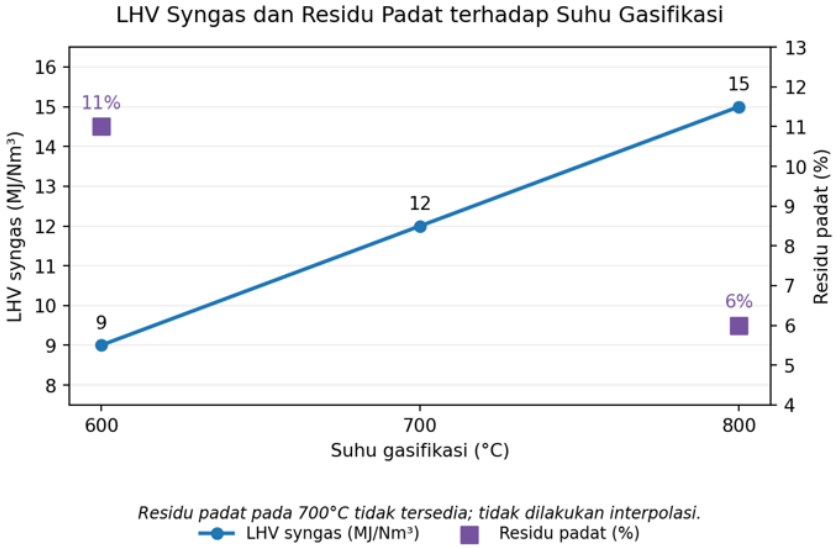
E. Pembentukan Residu Padat

Berdasarkan Tabel 3, persentase residu padat yang dihasilkan selama proses gasifikasi menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan suhu operasi. Pada suhu 600°C, residu padat yang dihasilkan sebesar 11%, kemudian menurun menjadi 6% pada suhu 800°C. Dengan massa awal bahan baku sebesar 100 gram, persentase tersebut setara dengan 11 gram dan 6 gram residu padat. Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu dapat mendorong proses dekomposisi termal plastik sehingga jumlah bahan yang tertinggal dalam bentuk residu padat menjadi lebih sedikit. Namun, penurunan residu tersebut belum dapat digunakan untuk menentukan besarnya konversi plastik menjadi syngas karena distribusi massa produk gas, tar, dan cairan belum dianalisis secara menyeluruh. Selain itu, data residu padat pada suhu 700°C belum tersedia sehingga evaluasi perubahan residu hanya didasarkan pada hasil pengukuran suhu 600°C dan 800°C. Dengan demikian, peningkatan suhu gasifikasi menunjukkan potensi dalam mengurangi pembentukan residu padat, meskipun diperlukan analisis neraca massa untuk mengetahui distribusi produk hasil gasifikasi secara lebih lengkap.

Tabel 3. Nilai LHV, Efisiensi Konversi Energi Kimia, dan Residu Padat pada Berbagai Suhu

Suhu (°C)	LHV Syngas (MJ/Nm³)	Efisiensi Termal (%)	Residu Padat (%)
600	9	-	11

700	12	-	-
800	15	71,2 (ER 0,3, agen uap)	6



Gambar 3. Grafik LHV Syngas dan Residu Padat terhadap Suhu Gasifikasi

F. Analisis Perbandingan Polietilene dan Polipropilena

Polietilena (PE) dan polipropilena (PP) merupakan jenis plastik yang digunakan sebagai bahan baku dalam penelitian ini. Kedua jenis plastik tersebut memiliki karakteristik struktur molekul yang berbeda sehingga dapat memengaruhi proses dekomposisi termal dan pembentukan syngas. PE memiliki struktur rantai karbon yang relatif sederhana, sedangkan PP memiliki gugus metil pada rantai utamanya. Perbedaan struktur tersebut dapat memengaruhi karakteristik pemutusan rantai polimer dan pembentukan produk selama proses gasifikasi.

Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan suhu gasifikasi dari 600°C hingga 800°C menunjukkan kecenderungan peningkatan kandungan H_2 dan CO serta nilai kalor syngas. Namun, data yang disajikan pada Tabel 1 hingga Tabel 3 belum memisahkan hasil pengujian berdasarkan jenis plastik. Oleh karena itu, perbedaan karakteristik gasifikasi antara PE dan PP belum dapat dianalisis secara kuantitatif, baik dari segi komposisi syngas, konstanta laju reaksi, maupun tingkat konversi bahan baku. Nilai LHV tertinggi yang dilaporkan sebesar 15 MJ/Nm³ pada suhu 800°C juga belum dapat digunakan untuk membandingkan kualitas syngas yang dihasilkan oleh masing-masing jenis plastik.

Secara teoritis, perbedaan karakteristik PE dan PP berpotensi menghasilkan respons yang berbeda terhadap perubahan suhu operasi. Akan tetapi, penentuan jenis plastik yang memiliki kinerja gasifikasi lebih baik memerlukan data pengujian pada kondisi operasi yang sama, termasuk komposisi syngas, jumlah produk gas yang dihasilkan, nilai kalor, dan residu padat. Selain itu, hasil pengulangan eksperimen diperlukan untuk mengevaluasi konsistensi serta perbedaan hasil antara kedua jenis plastik.

Penggunaan PE dan PP sebagai bahan baku juga membuka peluang pengembangan proses gasifikasi untuk pengolahan limbah plastik campuran. Meskipun demikian, penerapan kedua jenis plastik secara bersamaan masih memerlukan pengujian lebih lanjut dengan variasi rasio campuran dan kondisi operasi yang terkontrol. Analisis neraca massa dan energi juga diperlukan untuk mengevaluasi karakteristik produk serta efisiensi proses. Dengan demikian,

hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan kajian gasifikasi PE dan PP, khususnya dalam menentukan pengaruh jenis bahan baku terhadap kualitas syngas dan potensi penerapannya pada pengolahan limbah plastik campuran.

G. Implikasi Industri dan Lingkungan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses gasifikasi sampah plastik memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai teknologi konversi limbah menjadi sumber energi alternatif. Syngas yang dihasilkan mengandung komponen gas mudah terbakar, seperti hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), dan metana (CH_4), yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar maupun bahan baku dalam proses industri. Peningkatan kandungan H_2 dan CO seiring dengan kenaikan suhu gasifikasi dari 600°C hingga 800°C menunjukkan bahwa pengaturan suhu operasi berperan penting dalam menentukan karakteristik syngas yang dihasilkan. Meskipun demikian, penerapan teknologi ini pada skala industri masih memerlukan kajian lebih lanjut mengenai jumlah syngas yang dihasilkan, kebutuhan energi proses, kestabilan operasi, serta pengendalian tar dan komponen pengotor yang dapat memengaruhi kualitas gas.

Dari aspek lingkungan, proses gasifikasi menunjukkan potensi dalam mengurangi jumlah residu padat yang dihasilkan dari pengolahan sampah plastik. Berdasarkan hasil penelitian, persentase residu padat menurun dari 11% pada suhu 600°C menjadi 6% pada suhu 800°C. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa suhu operasi yang lebih tinggi dapat mendukung proses dekomposisi termal sehingga jumlah bahan yang tersisa dalam bentuk padatan menjadi lebih sedikit. Namun, hasil ini belum dapat digunakan untuk menentukan besarnya pengurangan volume sampah secara keseluruhan karena diperlukan analisis neraca massa dan pengukuran volume sebelum serta sesudah proses gasifikasi. Selain itu, evaluasi dampak lingkungan melalui pengukuran emisi dan analisis daur hidup diperlukan untuk mengetahui manfaat lingkungan yang dapat diperoleh dibandingkan dengan metode pengolahan limbah lainnya.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan gambaran awal mengenai potensi gasifikasi sampah plastik sebagai salah satu alternatif pengolahan limbah yang menghasilkan produk gas bernilai energi. Kecenderungan peningkatan kandungan H_2 dan CO, peningkatan nilai LHV yang dilaporkan, serta penurunan residu padat menunjukkan bahwa suhu operasi merupakan salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik proses gasifikasi. Meskipun demikian, evaluasi lebih lanjut masih diperlukan melalui pemisahan hasil berdasarkan jenis plastik, agen gasifikasi, dan variasi *equivalence ratio* (ER), serta penyajian hasil pengulangan eksperimen. Verifikasi perhitungan nilai kalor, efisiensi proses, dan parameter kinetika juga diperlukan untuk memperkuat hasil penelitian. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan teknologi gasifikasi sampah plastik yang lebih efisien, khususnya dalam mendukung pemanfaatan limbah sebagai sumber energi alternatif pada skala yang lebih luas.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu operasi pada proses gasifikasi sampah plastik polietilena (PE) dan polipropilena (PP) berkaitan dengan perubahan komposisi dan karakteristik energi syngas yang dihasilkan. Pada rentang suhu 600°C hingga 800°C, kandungan hidrogen (H_2) meningkat dari 18% menjadi 28% dan karbon monoksida (CO) dari 12% menjadi 21%, sedangkan karbon dioksida (CO_2) menurun dari 67% menjadi 49%. Nilai kalor rendah (*lower heating value*/LHV) yang dilaporkan juga meningkat dari 9 MJ/Nm³ menjadi 15 MJ/Nm³, meskipun masih diperlukan verifikasi terhadap basis komposisi gas dan perhitungannya. Dari aspek kinetika, konstanta laju reaksi meningkat dari 0,003 s^{-1} pada suhu 600°C menjadi 0,007 s^{-1} pada suhu 800°C. Perhitungan ulang menggunakan persamaan

Arrhenius menghasilkan energi aktivasi sebesar 33,12 kJ/mol dan faktor pra-eksponensial sebesar 0,2912 s^{-1}. Namun, kesesuaian model kinetika orde satu masih memerlukan pembuktian melalui data konsentrasi reaktan terhadap waktu.

Efisiensi sebesar 71,2% dilaporkan pada suhu 800°C dengan agen gasifikasi uap air dan *equivalence ratio* (ER) 0,3, tetapi nilai tersebut belum dapat diverifikasi secara menyeluruh karena keterbatasan data pendukung perhitungan. Sementara itu, persentase residu padat menurun dari 11% pada suhu 600°C menjadi 6% pada suhu 800°C, yang menunjukkan berkurangnya jumlah bahan yang tersisa dalam bentuk padatan pada suhu lebih tinggi. Secara keseluruhan, hasil penelitian memperlihatkan potensi gasifikasi sebagai alternatif pengolahan sampah plastik menjadi syngas yang memiliki nilai energi. Namun, pemisahan hasil berdasarkan jenis plastik, agen gasifikasi, dan variasi ER, serta penyajian data pengulangan eksperimen masih diperlukan untuk memperkuat analisis dan menentukan kondisi operasi yang paling efektif. Verifikasi nilai kalor, efisiensi proses, dan parameter kinetika juga menjadi aspek penting dalam pengembangan penelitian selanjutnya, khususnya untuk mengevaluasi kelayakan penerapan teknologi gasifikasi pada skala yang lebih luas.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] D. Saebea, P. Ruengrit, A. Arpornwichanop, and Y. Patcharavorachot, "Gasification of plastic waste for synthesis gas production," *Energy Reports*, vol. 6, Suppl. 1, pp. 202–207, Feb. 2020.

[2] M. A. Bashir, T. Ji, J. Weidman, Y. Soong, M. Gray, F. Shi, and P. Wang, "Plastic waste gasification for low-carbon hydrogen production: A comprehensive review," *Energy Advances*, vol. 4, no. 3, pp. 330–363, 2025.

[3] A. Okati, M. R. Khani, B. Shokri, E. Monteiro, and A. Rouboa, "On the operating parameters for hydrogen-rich syngas production in a plasma co-gasification process of municipal solid wastes and polypropylene using a constrained model in Aspen Plus," *Journal of the Energy Institute*, vol. 107, p. 101173, Apr. 2023.

[4] B. C. Karadag, A. Atas, N. Javani, and O. Yucel, "Comparative investigation of hydrogen production from polyethylene, polypropylene, and garden residues and their blends by gasification," *Energies*, vol. 19, no. 17, p. 4229, Sep. 2026.

[5] R. Hakiki, "Inventarisasi faktor keberlanjutan reduksi sampah plastik melalui proses pirolisis," *Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, vol. 7, no. 1, pp. 80–89, Jan. 2022.

[6] H. A. Azis and H. B. Rante, "Produksi bahan bakar cair dari limbah plastik polypropylene (PP) metode pirolisis," *Journal of Chemical Process Engineering*, vol. 6, no. 1, 2021.

[7] K. J. A. Hutagaol and M. Halim, "Pabrik gasifikasi berbasis edukasi dan rekreasi air sebagai solusi pencemaran sampah plastik Sungai Citarum Kabupaten Bandung," *Jurnal Sains, Teknologi, Urban, Perancangan, Arsitektur (Stupa)*, vol. 3, no. 2, pp. 2333–2346, Oct. 2021.

[8] I. Nurfadhilah, L. Marliana, L. Lutfiah, and S. F. Zahra, "Optimasi pembangkit listrik tenaga sampah berbasis teknologi co-gasifikasi thermal dengan refuse derived-fuel sebagai solusi permasalahan sampah dan lingkungan," *COMSERVA Indonesian Jurnal of Community Services and Development*, vol. 1, no. 10, pp. 850–858, 2022.

[9] L. T. Pratama and I. H. Siregar, "Rancang bangun dan uji kinerja kondensor tipe pipa 12U dengan variasi jumlah baris pipa terhadap produksi minyak gasifikasi," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, pp. 127–136, 2023.

[10] Saifuddin, R. Usman, and Zuhaimi, "Pembuatan gelas dengan bahan polypropylene dengan menggunakan cetakan plastik," *Jurnal Polimesin*, vol. 16, no. 2, pp. 30–38, Aug. 2018.

[11] L. W. Utomo and S. Arfiana, "Pemanfaatan limbah plastik daur ulang dari polietilen tereftalat (PET) sebagai bahan tambahan dalam pembuatan nanokomposit, semen mortar, dan aspal," *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, vol. 11, no. 1, pp. 164–179, 2023.