

Produksi *Bio-oil* dari *Co-pyrolysis* Pelepah Kelapa Sawit dan Plastik *Polyethylene Terephthalate* Menggunakan Katalis *Fly Ash* Batu Bara

Production of Bio-oil from the Co-pyrolysis of Oil Palm Fronds and Polyethylene Terephthalate Using Coal Fly Ash Catalyst

Nadya Cahaya Putri¹, Suci Rahmadini¹, Nurfatihayati^{1,*}, Sunarno¹, Panca Setia Utama¹, Anisa Mutamima^{1,2}

¹ Jurusan Teknik Kimia, Universitas Riau, Jl. H.R. Subrantas Km 12,5 Pekanbaru, 28293, Indonesia

² Department of Applied Chemistry & Environmental Science, School of Science, RMIT University, Melbourne, VIC, 3000, Australia

*Email: nurfatihayati@lecturer.unri.ac.id

Article history:

Diterima : 16 Juni 2026
Direvisi : 14 September 2026
Disetujui : 15 September 2026
Mulai online : 29 September 2026

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Nadya Cahaya Putri, Suci Rahmadini, Nurfatihayati, Sunarno, Panca Setia Utama, Anisa Mutamima. (2026). Produksi *Bio-oil* dari *Co-pyrolysis* Pelepah Kelapa Sawit dan Plastik *Polyethylene Terephthalate* Menggunakan Katalis *Fly Ash* Batu Bara. Jurnal Teknik Kimia USU, 15(2), 84-93.

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji produksi *bio-oil* melalui *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit (PKS) dan plastik *polyethylene terephthalate* (PET) menggunakan katalis *fly ash* batu bara. Proses berlangsung dalam reaktor *fixed-bed* pada 350°C selama 60 menit. Hasil menunjukkan rasio optimum PKS dan PET 75:25 menghasilkan *yield bio-oil* 20,48%. Penambahan *fly ash* sebesar 10% berhasil memaksimalkan *yield* hingga 27,04%, namun konsentrasi 15% memicu reaksi *over-cracking* sehingga *yield* turun. Sebaliknya, nilai kalor tertinggi mencapai 31,46 MJ/kg (memenuhi standar ASTM D7544-12) pada konsentrasi katalis 15%. Terdapat *trade-off* antara kondisi optimum untuk kuantitas (10% katalis) dan kualitas *bio-oil* (15% katalis). Analisis GC-MS mengonfirmasi dominasi senyawa fenolik, furan, dan asam karboksilat, yang menegaskan potensi campuran ini sebagai alternatif energi terbarukan.

Kata kunci: *bio-oil*, *co-pyrolysis*, *fly ash*, pelepah kelapa sawit, PET

ABSTRACT

This study investigates bio-oil production via the co-pyrolysis of oil palm fronds (OPF) and polyethylene terephthalate (PET) plastics using a coal fly ash catalyst. The process was conducted in a fixed-bed reactor at 350°C for 60 minutes. Results showed that an optimum OPF to PET ratio of 75:25 yielded 20.48% bio-oil. The addition of 10% fly ash maximized the yield to 27.04%, whereas a 15% catalyst concentration triggered over-cracking reactions, thereby decreasing the yield. Conversely, the highest heating value of 31.46 MJ/kg (meeting the ASTM D7544-12 standard) was achieved at the 15% catalyst concentration. This highlights a trade-off between the optimum conditions for bio-oil quantity (10% catalyst) and quality (15% catalyst). GC-MS analysis confirmed the dominance of phenolic compounds, furans, and carboxylic acids, affirming the potential of this mixture as a renewable energy alternative.

Keyword: *bio-oil*, *co-pyrolysis*, *fly ash*, oil palm frond, PET



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v15i2.26026>

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi global terus berlangsung seiring bertambahnya jumlah penduduk, pesatnya perkembangan industri, serta kemajuan teknologi [1], [2]. Sampai saat ini, bahan bakar fosil seperti minyak bumi masih menjadi sumber utama dalam memenuhi kebutuhan energi dunia. Akan tetapi, minyak bumi merupakan sumber daya yang tidak dapat diperbarui sehingga cadangannya terus berkurang akibat eksploitasi

yang berkelanjutan. Selain itu, penggunaan energi fosil dalam skala besar turut memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti meningkatnya emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, dan kerusakan ekosistem [3], [4]. Oleh sebab itu, pengembangan energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan menjadi sangat penting untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [5].

Selain permasalahan energi, akumulasi limbah biomassa dan plastik juga menjadi tantangan lingkungan yang semakin kompleks [6], [7]. Indonesia sebagai salah satu negara penghasil kelapa sawit terbesar menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah melimpah, salah satunya berupa pelepah kelapa sawit. Pelepah kelapa sawit mengandung komponen lignoselulosa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku energi terbarukan [8], [9]. Di sisi lain, limbah plastik *polyethylene terephthalate* (PET) terus meningkat akibat tingginya penggunaan kemasan berbasis plastik, terutama pada produk minuman dan kebutuhan rumah tangga. Plastik PET memiliki sifat sulit terurai secara alami sehingga dapat bertahan di lingkungan dalam waktu yang sangat lama [4], [10]. Apabila tidak ditangani secara tepat, limbah biomassa dan plastik tersebut dapat menyebabkan pencemaran tanah, air, maupun udara.

Selain karena volumenya yang besar dan sifatnya yang sulit terurai, PET dipilih sebagai bahan *co-pyrolysis* karena karakteristik dekomposisi termalnya berbeda secara mendasar dari plastik poliolefin (PE, PP) yang lebih umum dikaji dalam literatur *co-pyrolysis* biomassa-plastik. PE memiliki struktur rantai bercabang panjang yang terdekomposisi melalui mekanisme *random chain scission* sehingga membutuhkan suhu degradasi lebih tinggi, sedangkan PET terdekomposisi melalui *random scission* pada ikatan ester yang menghasilkan oligomer [11]. Perbedaan mekanistik ini menjadikan interaksi PET dengan radikal bebas hasil degradasi biomassa lignoselulosa berpotensi menghasilkan pola sinergi dan distribusi produk yang berbeda dari sistem biomassa-poliolefin yang telah banyak diteliti, sehingga *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit-PET dengan katalis *fly ash* masih menjadi celah penelitian yang relevan untuk dikaji.

Salah satu metode konversi termokimia yang berpotensi untuk mengolah limbah biomassa dan plastik menjadi bahan bakar alternatif adalah *co-pyrolysis*. Teknologi ini merupakan proses dekomposisi termal dua atau lebih material tanpa kehadiran oksigen yang menghasilkan produk berupa *bio-oil*, *biochar*, dan gas [12]. Pada proses *co-pyrolysis*, biomassa yang kaya akan kandungan oksigen dikombinasikan dengan plastik yang kaya akan hidrogen sehingga menghasilkan efek sinergis yang mampu meningkatkan mutu dan hasil *bio-oil* dibandingkan dengan pirolisis tunggal [4], [7]. Biomassa berperan sebagai sumber senyawa volatil oksigenat, sedangkan plastik bertindak sebagai donor hidrogen yang membantu menstabilkan radikal bebas selama degradasi termal. Interaksi tersebut dapat menurunkan pembentukan senyawa oksigenat dan meningkatkan pembentukan hidrokarbon dengan nilai kalor yang lebih tinggi [3], [8], [13].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah melaporkan pemanfaatan teknologi *co-pyrolysis* biomassa dan plastik untuk menghasilkan *bio-oil*. [3] melaporkan bahwa *co-pyrolysis* cangkang kernel sawit hasil torrefaksi dengan batu bara menggunakan katalis *fly ash* mampu menghasilkan *bio-oil* dengan nilai kalor sebesar 23,9 MJ/kg dan efisiensi energi sebesar 26,57% pada rasio optimum 60:40 dengan konsentrasi katalis 10%. Penelitian [8] menunjukkan bahwa *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan *expanded polystyrene* (EPS) menghasilkan *bio-oil* dengan nilai kalor mencapai 41,56 MJ/kg pada suhu optimum 395°C, yang mendekati karakteristik bahan bakar *gasoline*. [14] telah melakukan *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit (PKS) dan plastik *polypropylene* (PP) menggunakan katalis bifungsional NiCu/CaO pada suhu 500°C dengan variasi rasio PKS:PP (1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1) dan variasi konsentrasi katalis (2%, 3%, 4%, dan 5%). Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio PKS:PP sebesar 1:3 menghasilkan *yield bio-oil* tertinggi, sedangkan penambahan katalis NiCu/CaO sebesar 5% menghasilkan *bio-oil* dengan nilai kalor terbaik sebesar 38,05 MJ/kg, densitas 0,82 g/mL, dan *yield* 62,80%, yang nilainya sebanding dengan bahan bakar diesel konvensional. Sementara itu, [4] menyatakan bahwa penggunaan katalis pada proses *co-pyrolysis* mampu meningkatkan selektivitas produk melalui reaksi *cracking*, deoksigenasi, dan aromatisasi [2], [15]. Dalam kajian tersebut juga disebutkan bahwa katalis berbasis mineral berharga murah seperti *fly ash* batu bara memiliki potensi sebagai alternatif pengganti katalis zeolit yang relatif mahal [16].

Pemilihan *fly ash* batu bara sebagai katalis tidak hanya didasarkan pada aspek ekonomis dan ketersediaannya yang melimpah, tetapi juga pada karakteristik mineralnya. *Fly ash* batu bara secara alami tersusun dari oksida logam dengan urutan konsentrasi $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$, yang menunjukkan sifat aluminosilikat dengan konsentrasi CaO lebih tinggi dibandingkan dengan Fe_2O_3 . Sifat aluminosilikat inilah yang menjadikan *fly ash* cocok digunakan pada berbagai proses adsorpsi, katalisis, dan ekstraksi tanpa memerlukan sintesis kompleks seperti pada katalis zeolit komersial atau katalis logam/bimetalik (misalnya NiCu/CaO) [17]. Di Indonesia, *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) hasil pembakaran batu bara pada PLTU juga telah dikeluarkan dari kategori limbah B3 melalui PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan ditetapkan sebagai limbah non-B3 terdaftar [18],

sehingga pemanfaatannya sebagai katalis *co-pyrolysis* menjadi opsi yang relevan secara regulatif sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular yang menjadi fokus penelitian ini

Penelitian Nurfatihayati, dkk. (2025) telah memberikan kontribusi penting dalam pengembangan *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dengan plastik menggunakan katalis, tetapi penelitian tersebut masih terbatas pada penggunaan plastik PP dan katalis NiCu/CaO yang memerlukan sintesis kompleks dan biaya relatif tinggi [14]. Penelitian mengenai *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dengan plastik PET menggunakan katalis *fly ash* batu bara sebagai alternatif yang lebih ekonomis masih belum banyak dilakukan, khususnya terkait pengaruh variasi konsentrasi katalis terhadap *yield*, nilai kalor, dan komposisi senyawa *bio-oil*. Padahal, pelepah kelapa sawit, PET, dan *fly ash* batu bara merupakan limbah yang tersedia melimpah di Indonesia dan belum dimanfaatkan secara optimal.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji proses *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan plastik PET dengan memanfaatkan katalis *fly ash* batu bara dalam produksi *bio-oil*. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi rasio campuran bahan baku serta variasi konsentrasi katalis terhadap karakteristik *bio-oil* yang dihasilkan, meliputi *yield*, densitas, viskositas, pH, nilai kalor, dan komposisi kimia berdasarkan analisis GC-MS [9], [13]. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi konversi limbah menjadi energi terbarukan yang berkelanjutan sekaligus mendukung implementasi konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah biomassa, plastik, dan limbah industri secara terpadu.

2. Metode

2.1. Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan tiga bahan utama, yaitu pelepah kelapa sawit, plastik *polyethylene terephthalate* (PET), dan *fly ash* batu bara sebagai katalis. Pelepah kelapa sawit diperoleh dari perkebunan kelapa sawit di Kecamatan Mandau, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau. Plastik PET bersumber dari botol air mineral bekas yang dikumpulkan dari limbah domestik. *Fly ash* batu bara diperoleh dari *platform e-commerce*. Bahan pendukung yang digunakan meliputi asam asetat glasial pro analisis produksi Merck dengan kemurnian 99% yang diencerkan menjadi konsentrasi 0,25%, NaOH pro analisis produksi Merck yang dilarutkan dalam akuades hingga konsentrasi 1 M, dan akuades.

2.2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahap utama, yaitu *pretreatment* bahan baku, aktivasi katalis *fly ash*, proses *co-pyrolysis*, dan karakterisasi *bio-oil*.

1. *Pretreatment* pelepah kelapa sawit

Pelepah kelapa sawit dicuci dengan air bersih, dijemur di bawah sinar matahari, kemudian dipotong menjadi ukuran 1–2 cm. Selanjutnya, sampel direndam dalam larutan asam asetat 0,25% pada suhu 50°C selama 2 jam. Perlakuan ini bertujuan untuk melarutkan sebagian hemiselulosa dan mengurangi kandungan alkali pengotor pada permukaan biomassa, sehingga meningkatkan reaktivitas bahan baku selama proses *co-pyrolysis* [19]. Setelah *pretreatment*, sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C hingga dicapai berat konstan.

2. *Pretreatment* plastik PET

Plastik PET dari botol air mineral bekas dibersihkan dengan air bersih, dikeringkan di bawah sinar matahari, kemudian dipotong menjadi ukuran 1–2 cm untuk memastikan distribusi ukuran yang seragam selama proses pirolisis.

3. Aktivasi katalis *fly ash* batu bara

Fly ash diayak menggunakan saringan 100 *mesh* untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Aktivasi dilakukan dengan merendam *fly ash* dalam larutan NaOH 1 M dengan rasio 1:4 (b/v), kemudian dipanaskan pada suhu 110°C dengan pengadukan selama 3 jam. Proses ini bertujuan melarutkan silika dari struktur *fly ash* sehingga meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif katalis [4]. Campuran kemudian disaring dan dicuci dengan air deionisasi hingga pH netral, lalu dikeringkan pada suhu 110°C dan dikalsinasi pada suhu 500°C selama 3 jam untuk menghilangkan senyawa organik pengotor dan menstabilkan struktur katalis.

4. Proses *co-pyrolysis*

Proses *co-pyrolysis* dilakukan dalam reaktor *fixed-bed* berbahan baja tahan karat. Campuran pelepah kelapa sawit dan plastik PET dengan basis 50 g dimasukkan ke dalam reaktor dengan variasi rasio 100:0, 75:25, 50:50, dan 25:75 (b/b). Sistem dialiri gas nitrogen secara kontinu dengan laju alir 50 mL/menit untuk menciptakan atmosfer bebas oksigen. Reaktor dipanaskan hingga suhu 350°C selama 60 menit untuk memastikan dekomposisi termal yang lengkap. Uap yang dihasilkan dikondensasi melalui sistem pendingin air dan dikumpulkan sebagai *bio-oil* cair. Setelah diperoleh rasio bahan baku dengan *yield bio-oil* tertinggi, proses *co-*

pyrolysis diulang dengan penambahan katalis *fly ash* pada variasi 5%, 10%, dan 15% (b/b) terhadap total bahan baku. *Yield bio-oil* dihitung menggunakan persamaan (1).

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{Bobot bio-oil (g)}}{\text{Bobot bahan baku (g)}} \times 100\% \quad (1)$$

5. Karakterisasi *bio-oil*

Bio-oil yang dihasilkan dikarakterisasi berdasarkan sifat fisika dan kimia.

- a. Densitas diukur menggunakan piknometer dengan persamaan (2).

$$\rho = \frac{W - W_0}{V} \quad (2)$$

ρ adalah densitas *bio-oil* (g/mL), W_0 adalah massa piknometer kosong (g), W adalah massa piknometer yang berisi *bio-oil* (g), dan V adalah volume piknometer (mL).

- b. Viskositas kinematik diukur menggunakan viskometer *Ostwald* pada suhu 40°C mengacu pada metode ASTM D-445 dengan persamaan (3).

$$\mu = \mu_0 \frac{t \cdot \rho}{t_0 \cdot \rho_0} \quad (3)$$

μ adalah viskositas *bio-oil* (cSt), μ_0 adalah viskositas air (cSt), t dan t_0 masing-masing adalah waktu aliran dan air (s), serta ρ dan ρ_0 masing-masing adalah massa jenis *bio-oil* dan air (g/mL).

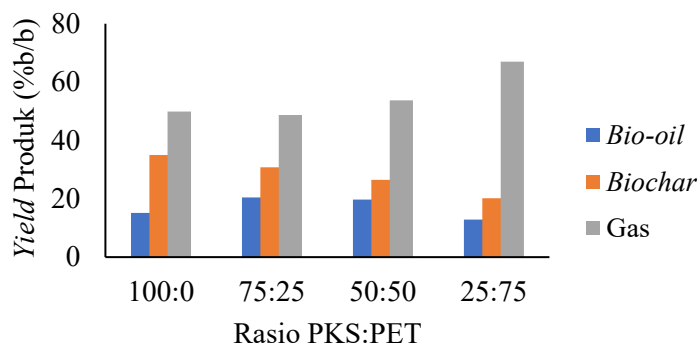
- c. Nilai pH diukur menggunakan pH meter digital yang telah dikalibrasi dengan larutan *buffer* standar.
d. Nilai kalor ditentukan menggunakan *bomb calorimeter* Parr 6775 yang mengacu pada standar ASTM D240.
e. Komposisi kimia *bio-oil* dianalisis menggunakan *gas chromatograph-mass spectrometry* (GC-MS) yang terdiri dari *gas chromatograph* Agilent 7890 dan *mass spectrometry* Agilent 5977B Series MSD, dengan kolom kapiler DB-5MS berukuran 30 m × 250 μm × 0,25 μm. Program suhu oven dimulai pada 40°C tanpa *holding time*, kemudian dinaikkan dengan laju 15°C/menit hingga mencapai 290°C dan ditahan selama 24 menit, dilanjutkan dengan *post-run* pada suhu 300°C. Sampel diinjeksi sebanyak 1 μL dengan rasio *split* 100:1. Gas helium *ultra-high purity* (He UHP) digunakan sebagai gas pembawa dengan tekanan 7,1 psi dan *solvent delay* selama 3 menit

3. Hasil

3.1. Pengaruh rasio pelepah kelapa sawit (PKS) dan PET terhadap *yield bio-oil*

Hasil *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit (PKS) dan plastik PET pada rasio 100:0, 75:25, 50:50, dan 25:75 pada suhu 350°C dengan *pretreatment* asam asetat 0,25% disajikan pada Gambar 1. Rasio 75:25 menghasilkan *yield bio-oil* tertinggi sebesar 20,48%, sedangkan rasio 25:75 menghasilkan *yield* terendah sebesar 12,84%.

Yield tertinggi pada rasio 75:25 disebabkan oleh interaksi sinergis antara biomassa dan PET, dimana PET berperan sebagai donor hidrogen yang menstabilkan radikal bebas hasil degradasi termal biomassa melalui mekanisme transfer hidrogen, sehingga menekan pembentukan senyawa oksigenat dan mendorong terbentuknya hidrokarbon alifatik yang lebih mudah terkondensasi menjadi fraksi cair [19]. Hal ini konsisten dengan temuan [20], yang juga melaporkan bahwa rasio biomassa dan PET 75:25 menghasilkan *yield bio-oil* (28,02%) yang lebih tinggi dibandingkan dengan pirolisis biomassa murni (27,44%), mengonfirmasi efektivitas PET dalam memaksimalkan konversi cair pada rasio tersebut.



Gambar 1. Grafik *yield* produk terhadap variasi rasio bahan baku

Meskipun PET berperan sebagai donor hidrogen, kandungan hidrogennya yang hanya ~4,65% berat jauh lebih rendah dibandingkan dengan PP (~14% berat) [9], sehingga efek sinergisnya bersifat terbatas dan optimal hanya pada komposisi biomassa yang dominan. Kondisi ini berbeda dengan sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa

sawit dan PP, dimana *yield bio-oil* tertinggi justru diperoleh pada rasio PKS:PP 1:3 yang didominasi plastik dengan *yield* mencapai 78,82% [14]. Perbedaan tren ini disebabkan oleh tingginya kandungan hidrogen PP yang memungkinkan ketersediaan hidrogen semakin melimpah seiring meningkatnya proporsi PP, sehingga mampu menstabilkan lebih banyak radikal bebas oksigenat dari biomassa dan mendorong pembentukan fraksi cair yang lebih besar [7], [15], sementara rantai hidrokarbon PP yang panjang juga mudah terdekomposisi menjadi fraksi cair pada suhu pirolisis sehingga peningkatan proporsinya secara langsung meningkatkan *yield bio-oil* [21]. Sebaliknya, meskipun PET memiliki *volatile matter* tinggi (94,36%), suhu operasi 350°C berada di bawah suhu dekomposisi termal PET yang umumnya dilaporkan pada 380–400°C, sehingga dekomposisi PET dalam penelitian ini diperkirakan belum berlangsung secara ekstensif. Fraksi PET yang terdekomposisi pada kondisi ini lebih mungkin melepaskan CO₂ dan CO sebagai produk primer melalui reaksi dekarboksilasi dan dekarbonilasi pada gugus ester, sementara struktur aromatiknnya yang kaku membatasi konversi fragmen menjadi fraksi cair, sehingga peningkatan proporsi PET justru menurunkan *yield bio-oil* sebagaimana ditunjukkan pada rasio 25:75 [9].

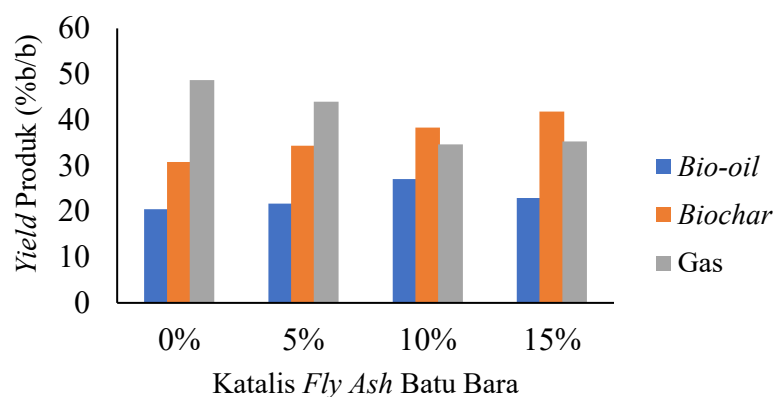
Selain *bio-oil*, proses *co-pyrolysis* juga menghasilkan *biochar* dan gas. Berdasarkan Gambar 1, gas merupakan produk paling dominan pada seluruh variasi rasio dengan kisaran 48,72%–66,96%, diikuti *biochar* sebesar 20,20%–35,00%, sedangkan *bio-oil* konsisten menjadi produk dengan *yield* terendah, yakni 12,84%–20,48%. Kondisi ini berbeda dengan sistem *co-pyrolysis* PKS dan PP pada suhu 500°C, dimana *bio-oil* menjadi produk dominan dengan *yield* mencapai 78,82% [14]. Nilai fraksi gas pada penelitian ini dihitung melalui pendekatan neraca massa, yaitu selisih antara 100% dengan *yield bio-oil* dan *biochar* yang diperoleh. Dengan pendekatan ini, fraksi gas secara komposisi turut merepresentasikan uap organik ringan termasuk senyawa golongan furan dan fenolik yang terkonfirmasi dominan pada komposisi *bio-oil* melalui analisis GC-MS (Tabel 2), selain gas permanen non-kondensabel itu sendiri. Dominasi gas dalam penelitian ini terutama dikaitkan dengan tingginya kandungan *volatile matter* pelepah kelapa sawit (67,17%), yang menghasilkan jumlah uap total besar selama pirolisis, serta rendahnya kandungan hidrogen PET yang membatasi kapasitas donor hidrogen dalam menstabilkan radikal bebas oksigenat biomassa, sehingga sebagian volatil tidak terstabilkan menjadi fraksi cair dan pada rasio 25:75 gas mencapai nilai tertinggi sebesar 66,96% [9].

3.2. Pengaruh rasio bahan baku dan katalis *fly ash* batu bara terhadap *yield bio-oil*

Pengaruh variasi katalis *fly ash* batu bara (0%, 5%, 10%, dan 15% b/b) terhadap *yield bio-oil* pada rasio bahan baku 75:25 disajikan pada Gambar 2. *Yield bio-oil* meningkat dari 20,48% tanpa katalis menjadi 27,04% pada *loading* katalis 10%, kemudian menurun menjadi 22,90% pada *loading* 15%.

Yield bio-oil meningkat dari 20,48% tanpa katalis menjadi 27,04% pada konsentrasi katalis 10%, kemudian menurun menjadi 22,90% pada konsentrasi katalis 15%, menunjukkan adanya kondisi optimum dimana penambahan katalis yang berlebihan justru bersifat kontraproduktif terhadap pembentukan *bio-oil*. *Fly ash* batu bara pada dasarnya didominasi oleh senyawa SiO₂ dan Al₂O₃ dalam bentuk *amorf* maupun kristalin, yang menjadi prekursor esensial dalam pembentukan struktur aluminosilikat [22]. Melalui proses aktivasi menggunakan NaOH, gugus hidroksil dalam larutan alkali mendorong pelarutan sebagian ion Si dan Al dari struktur *fly ash* [23], yang kemudian mengalami reorganisasi membentuk gel aluminosilikat dan situs aktif tetrahedral Si–O–Al yang berperan sebagai pusat katalitik. Proses aktivasi ini turut menginduksi perubahan struktur mikro pada *fly ash* yang meningkatkan reaktivitas dan porositasnya, sebagaimana dikonfirmasi melalui karakterisasi XRF, SEM, dan XRD pada berbagai studi aktivasi *fly ash* berbasis NaOH [24], [25]. Struktur berpori dan situs aktif hasil aktivasi ini diduga mendukung interaksi yang lebih efektif antara katalis dan uap pirolisis, meskipun karakterisasi komposisi dan struktur *fly ash* pasca-aktivasi tidak dilakukan secara langsung dalam penelitian ini, sehingga mekanisme yang diusulkan bersifat indikatif berdasarkan literatur dan memerlukan konfirmasi lebih lanjut pada penelitian mendatang, terutama melalui karakterisasi XRF, SEM, dan XRD.

Peningkatan *yield bio-oil* hingga konsentrasi katalis 10% disebabkan oleh kemampuan *fly ash* dalam mempercepat reaksi dekomposisi termal dan *cracking*, memecah senyawa berat menjadi senyawa volatil yang lebih ringan sehingga lebih mudah terkondensasi, sekaligus memfasilitasi reaksi dehidrasi, dekarbonilasi, dan dealkilasi yang menghasilkan senyawa volatil lebih stabil, serta menurunkan kandungan oksigen melalui reaksi deoksigenasi seperti dekarboksilasi dan dehidrasi [20]. Hal ini sejalan dengan temuan [20], yang melaporkan peningkatan *yield bio-oil* dari 28,02% menjadi 39,33% pada konsentrasi katalis 10%. Tren yang sama juga ditemukan pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP menggunakan katalis NiCu/CaO, dimana *yield bio-oil* meningkat secara konsisten hingga mencapai kondisi optimum pada konsentrasi 5% dengan *yield* 62,80% [14], yang mengonfirmasi bahwa penambahan katalis dalam jumlah yang tepat secara konsisten berperan positif dalam meningkatkan *yield bio-oil* pada berbagai sistem *co-pyrolysis* berbasis pelepah kelapa sawit terlepas dari jenis katalis yang digunakan.



Gambar 2. Grafik yield produk terhadap variasi katalis fly ash batu bara

Penurunan *yield bio-oil* pada konsentrasi katalis 15% dapat dijelaskan oleh fenomena *over-loading* katalis, dimana jumlah situs aktif *fly ash* yang berlebih mendorong reaksi polimerisasi dan kondensasi senyawa volatil secara berlebihan pada permukaan katalis, sehingga sebagian senyawa yang semula berpotensi menjadi fraksi cair justru mengalami repolimerisasi lebih lanjut membentuk residu padat (koka) pada permukaan katalis [19]. Hal ini konsisten dengan tren peningkatan *yield biochar* yang terus berlanjut hingga konsentrasi katalis 15% (41,84%), mengindikasikan bahwa kelebihan katalis lebih mengarahkan produk ke fase padat dibandingkan fase gas. Selain itu, penumpukan katalis yang berlebih juga berpotensi menutupi sebagian situs aktif dan menghambat akses uap pirolisis ke permukaan katalis secara merata, sehingga menurunkan efisiensi konversi menjadi fraksi cair. Fenomena penurunan *yield bio-oil* pada konsentrasi katalis berlebih ini juga dilaporkan oleh yang mengamati penurunan *yield bio-oil* dari 76,59% pada konsentrasi katalis 5% menjadi 65,44% pada konsentrasi 15% dalam sistem *co-pyrolysis* pelepah nipah/PP (PN/PP) dengan katalis *fly ash*. Hal ini juga tercermin pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP, dimana *yield bio-oil* pada konsentrasi katalis 4% (54,84%) lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi 3% (57,50%) [14], yang mengindikasikan bahwa fenomena penurunan *yield* akibat kelebihan katalis bersifat konsisten pada berbagai sistem *co-pyrolysis* terlepas dari jenis katalis maupun jenis plastik yang digunakan.

3.3. Karakteristik fisika *bio-oil*

Karakteristik sifat fisika *bio-oil* pada berbagai *loading* katalis disajikan pada Tabel 1. Densitas *bio-oil* meningkat secara bertahap dari 1,005 g/mL tanpa katalis hingga 1,049 g/mL pada konsentrasi katalis 15%, mengindikasikan terbentuknya senyawa dengan berat molekul lebih tinggi akibat reaksi sekunder selama *co-pyrolysis*, meskipun kenaikannya yang relatif kecil menunjukkan bahwa fraksi berat belum terbentuk secara dominan [9]. Rentang densitas yang diperoleh (1,005–1,049 g/mL) masih berada di bawah standar umum *bio-oil* (1,10–1,30 g/cm³) [20], sehingga *bio-oil* masih memerlukan proses *upgrading* lebih lanjut. Tren peningkatan densitas seiring bertambahnya konsentrasi katalis juga teramati pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP menggunakan katalis NiCu/CaO dengan rentang 0,79–1,16 g/mL [14]. Namun, rentang densitas yang lebih rendah pada sistem tersebut disebabkan oleh dominasi fraksi hidrokarbon alifatik ringan dari PP dibandingkan dengan PET yang kaya akan struktur aromatik sehingga menghasilkan *bio-oil* dengan densitas yang relatif lebih tinggi pada sistem PKS-PET [9].

Tabel 1. Pengaruh variasi katalis terhadap karakteristik fisika *bio-oil*

Katalis	Densitas (g/mL)	Viskositas (cSt)	pH	Nilai Kalor (MJ/kg)
0%	1,005	17,97	2,49	21,99
5%	1,043	21,99	2,53	25,98
10%	1,048	33,77	2,59	28,97
15%	1,049	51,32	2,60	31,46

Viskositas *bio-oil* meningkat secara signifikan dari 17,97 cSt menjadi 51,32 cSt seiring penambahan katalis, yang mencerminkan terbentuknya senyawa aromatik dan hidrokarbon rantai panjang melalui proses oligomerisasi pada permukaan katalis. Meskipun demikian, seluruh nilai viskositas yang diperoleh masih berada dalam rentang standar *bio-oil* (4–78 cSt), sehingga *bio-oil* tetap memiliki sifat alir yang memadai sebagai bahan bakar cair. Nilai viskositas yang lebih rendah dilaporkan pada sistem *co-pyrolysis* pelepah

kelapa sawit dan PP dengan rentang 1,01–1,33 cSt [14], yang disebabkan oleh dominasi fraksi hidrokarbon alifatik ringan dari PP yang menghasilkan interaksi antarmolekul lebih lemah, berbeda dengan sistem PKS-PET yang menghasilkan lebih banyak senyawa aromatik berat dari dekomposisi termal PET sehingga viskositas *bio-oil* relatif lebih tinggi [9]. Perbedaan ini secara konsisten menegaskan pengaruh jenis plastik yang digunakan terhadap karakteristik fisika *bio-oil* yang dihasilkan.

Nilai pH *bio-oil* berada pada kisaran 2,49–2,60, mencerminkan sifat asam khas *bio-oil* akibat keberadaan asam organik dan senyawa fenolik hasil degradasi biomassa. Penambahan katalis *fly ash* secara bertahap meningkatkan pH melalui reaksi deoksigenasi yang mengonversi senyawa asam menjadi senyawa yang lebih stabil, yang konsisten dengan temuan [19] yang melaporkan peningkatan pH dari 3,20 menjadi 5,05 pada konsentrasi katalis 15%. Nilai pH yang sedikit lebih tinggi (2,65–2,75) dilaporkan pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP [14], yang dapat dikaitkan dengan kandungan oksigen PET yang lebih tinggi (~32,53% berat) dibandingkan dengan PP sehingga menghasilkan lebih banyak senyawa asam organik selama dekomposisi termal dan menyebabkan *bio-oil* pada sistem PKS-PET cenderung memiliki pH lebih rendah. Meskipun terjadi peningkatan pH, nilai yang masih tergolong rendah mengindikasikan perlunya proses *upgrading* lebih lanjut sebelum *bio-oil* dapat diaplikasikan sebagai bahan bakar komersial [19].

Nilai kalor *bio-oil* meningkat konsisten dari 21,99 MJ/kg tanpa katalis menjadi 31,46 MJ/kg pada konsentrasi katalis 15%, yang berkorelasi langsung dengan berkurangnya kandungan oksigenat akibat reaksi deoksigenasi seperti dekarboksilasi, dekarbonilasi, dan dehidrasi yang difasilitasi oleh katalis, sehingga fraksi hidrokarbon dalam *bio-oil* meningkat dan berdampak langsung pada kenaikan densitas energi produk [19]. Nilai kalor tertinggi yang diperoleh sebesar 31,46 MJ/kg telah melampaui batas minimum standar ASTM D7544-12 sebesar 15 MJ/kg, namun masih lebih rendah dibandingkan dengan biodiesel konvensional (42–46 MJ/kg) sehingga *bio-oil* masih memerlukan *upgrading* lanjutan [9]. Nilai kalor yang lebih tinggi (38,05 MJ/kg) dilaporkan pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP menggunakan katalis NiCu/CaO pada konsentrasi 5% [14], yang disebabkan oleh kombinasi PP yang kaya hidrogen dan aktivitas deoksigenasi NiCu/CaO yang jauh lebih tinggi dibandingkan *fly ash*, namun dengan mempertimbangkan ekonomisitas *fly ash* sebagai limbah industri yang mudah diperoleh dibandingkan katalis NiCu/CaO yang memerlukan sintesis kompleks, tren peningkatan nilai kalor yang konsisten ini tetap menunjukkan potensi positif penggunaan katalis *fly ash* dalam meningkatkan kualitas energetik *bio-oil*.

3.4. Karakteristik kimia *bio-oil*

Analisis GC-MS *bio-oil* pada kondisi katalis optimum 10% mengidentifikasi 21 senyawa yang terdistribusi ke dalam beberapa kelompok fungsional utama, sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Analisis GC-MS mengidentifikasi senyawa yang didominasi oleh golongan fenolik (34,85%), furan (35,14%), dan asam karboksilat (18,83%), dengan kontribusi lebih kecil dari golongan keton (2,99%), ester (3,12%), piran (1,60%), dan turunan selulosa (3,47%). Komposisi ini mencerminkan karakteristik khas *bio-oil* dari pirolisis biomassa lignoselulosa yang dikombinasikan dengan plastik PET, dimana komponen lignoselulosa pelepah kelapa sawit menjadi sumber utama senyawa furan dan fenolik, sementara PET berkontribusi pada pembentukan senyawa aromatik teroksidasi seperti asam benzoat dan turunannya, dengan tingginya kandungan senyawa oksigenat secara keseluruhan merupakan konsekuensi dari kandungan oksigen tinggi dalam komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin [9]. Penambahan PET dan katalis *fly ash* 10% telah terbukti mengarahkan komposisi *bio-oil* ke arah pembentukan senyawa furan dan fenolik yang lebih stabil melalui mekanisme transfer hidrogen dari PET dan reaksi *cracking* katalitik oleh *fly ash* [19].

Kelompok senyawa furan dengan total area 35,14% didominasi oleh 3-Furaldehyde (furfural, 27,77%), diikuti oleh 2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl- (3,29%), 2(5H)-Furanone (1,94%), Ethanone 1-(2-furanyl)- (0,84%), dan 5-Hydroxymethylfurfural (1,30%), yang merupakan indikasi kuat terjadinya dekomposisi termal selulosa dan hemiselulosa secara intensif melalui mekanisme dehidrasi dan *ring-opening* unit gula polimer selulosa [20]. Dominasi 3-Furaldehyde ini konsisten dengan temuan [20] yang melaporkan furfural sebagai senyawa dominan (32,04%) pada *bio-oil co-pyrolysis* PN/PET dengan katalis 10%, mengonfirmasi bahwa sistem *co-pyrolysis* biomassa-PET dengan katalis secara konsisten menghasilkan furfural sebagai produk dominan terlepas dari jenis katalis yang digunakan. Berbeda dengan hal tersebut, sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP justru menghasilkan hidrokarbon alifatik sebagai senyawa dominan, yakni 2,4-dimethyl-1-heptene (61,61%) [14], yang menunjukkan perbedaan mendasar antara sistem biomassa-PET dan biomassa-PP dimana PP yang kaya hidrogen mendorong pembentukan hidrokarbon alifatik melalui transfer hidrogen yang lebih efektif, sementara PET yang miskin hidrogen menghasilkan lebih banyak senyawa oksigenat aromatik dan furan. Senyawa furfural sendiri memiliki nilai komersial yang signifikan dalam industri manufaktur, perisa makanan, dan pestisida [26].

Tabel 2. Hasil analisis GC-MS *bio-oil* pada kondisi katalis 10%

No	Nama	Area (%)
1	3-Furaldehyde	27,77
2	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	0,75
3	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	0,84
4	2(5H)-Furanone	1,94
5	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	3,29
6	Phenol	20,00
7	4H-Pyran-4-one	1,60
8	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	2,24
9	Phenol, 2-methyl-	1,56
10	Phenol, 3-methyl-	3,63
11	Phenol, 2-methoxy-	1,79
12	Benzoic acid, methyl ester	0,96
13	Benzoic acid	15,78
14	Catechol	3,77
15	5-Hydroxymethylfurfural	1,30
16	Benzoic acid, 4-methyl-	1,41
17	Phenol, 2,6-dimethoxy-	2,50
18	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene	1,60
19	β -D-Glucopyranose, 1,6-anhydro-	3,47
20	Benzoic acid, 4-hydroxy-	1,64
21	1,4-Benzenedicarboxylic acid, methyl ester	2,16

Kelompok senyawa fenolik dengan total area 34,85% meliputi *Phenol* (20,00%), *Phenol 3-methyl-* (3,63%), *Catechol* (3,77%), *Phenol 2,6-dimethoxy-* (2,50%), *Phenol 2-methoxy-* (guaiacol, 1,79%), *Phenol 2-methyl-* (1,56%), dan *3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene* (1,60%), yang mencerminkan depolimerisasi lignin yang komprehensif melalui mekanisme demetilasi dan demetoksilasi, dimana *guaiacol* merupakan produk khas degradasi lignin tipe guaiasil dan siringol dari unit siringil lignin pelepah kelapa sawit [9]. *Catechol* (3,77%) terbentuk melalui demetilasi *guaiacol* di bawah pengaruh suhu dan katalis, sementara *phenol* sebagai komponen fenolik paling melimpah (20,00%) selaras dengan temuan [20] yang juga melaporkan *phenol* sebagai komponen fenolik dominan pada *bio-oil co-pyrolysis* NFFs/PET. Pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP, senyawa fenolik hanya teridentifikasi dalam jumlah sangat kecil [14], yang disebabkan oleh efektivitas transfer hidrogen PP yang jauh lebih tinggi sehingga mampu mengkonversi senyawa fenolik oksigenat menjadi hidrokarbon alifatik melalui reaksi hidredeoksigenasi, sedangkan pada sistem PKS-PET kemampuan transfer hidrogen yang terbatas menyebabkan senyawa fenolik dari lignin tidak terkonversi sepenuhnya dan tetap dominan dalam *bio-oil*.

Kelompok asam karboksilat (18,83%) didominasi oleh *Benzoic acid* (15,78%), *Benzoic acid 4-methyl-* (1,41%), dan *Benzoic acid 4-hydroxy-* (1,64%), yang bersumber dari dekomposisi termal PET yang menghasilkan fragmen aromatik teroksidasi termasuk asam tereftalat yang kemudian mengalami dekarboksilasi parsial maupun konversi katalitik menjadi asam benzoat [20]. Hal ini dikonfirmasi oleh terdeteksinya *1,4-Benzenedicarboxylic acid, methyl ester* (2,16%) yang merupakan turunan langsung monomer asam tereftalat dari PET, yang selaras dengan temuan [26]. Pada sistem *co-pyrolysis* pelepah kelapa sawit dan PP, senyawa asam benzoat tidak ditemukan sebagai komponen dominan [14], yang secara langsung mengonfirmasi bahwa keberadaan asam benzoat dan turunannya dalam *bio-oil* penelitian ini merupakan kontribusi spesifik dari dekomposisi termal PET sebagai bahan baku. Senyawa β -D-Glucopyranose, 1,6-anhydro- (levoglukosan, 3,47%) yang terdeteksi merupakan produk pirolisis primer khas dari depolimerisasi selulosa melalui mekanisme transglukosidasi, dengan proporsinya yang relatif kecil dibandingkan senyawa furan mengindikasikan bahwa sebagian besar selulosa telah terkonversi lebih lanjut menjadi senyawa furan akibat suhu pirolisis yang memadai dan pengaruh katalitik *fly ash* [20]. Secara keseluruhan, perbedaan komposisi kimia *bio-oil* antara sistem PKS-PET dan sistem PKS-PP [14] secara konsisten menunjukkan bahwa jenis plastik yang digunakan memiliki pengaruh yang sangat determinan terhadap distribusi senyawa dalam *bio-oil*, dimana PP mendorong pembentukan hidrokarbon alifatik sementara PET menghasilkan *bio-oil* yang didominasi oleh senyawa oksigenat aromatik seperti furan, fenolik, dan asam benzoat.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa rasio campuran pelepah kelapa sawit dan plastik PET serta variasi katalis *fly ash* batu bara memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik *bio-oil* hasil *co-pyrolysis*. Rasio pelepah kelapa sawit sebesar 75:25 menghasilkan *yield bio-oil* tertinggi, yang menunjukkan adanya interaksi sinergis antara biomassa dan PET melalui mekanisme transfer hidrogen selama proses degradasi termal. Penambahan katalis *fly ash* terbukti mampu meningkatkan kualitas *bio-oil*, terutama ditinjau dari peningkatan *yield* dan nilai kalor yang diperoleh. *Yield* optimum dicapai pada variasi katalis 10%, sedangkan kualitas energi terbaik diperoleh pada variasi katalis 15% dengan nilai kalor mencapai 31,46 MJ/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi sebagai katalis alternatif berbiaya rendah untuk meningkatkan performa proses *co-pyrolysis* biomassa dan plastik.

Karakterisasi sifat fisika menunjukkan bahwa *bio-oil* yang dihasilkan telah memenuhi rentang standar viskositas dan nilai kalor *bio-oil* berdasarkan ASTM D7544-12, meskipun densitas dan tingkat keasamannya masih menunjukkan perlunya proses *upgrading* lebih lanjut sebelum diaplikasikan sebagai bahan bakar komersial. Analisis GC-MS mengidentifikasi dominasi senyawa fenolik, furan, dan asam karboksilat yang menandakan terjadinya dekomposisi lignoselulosa biomassa dan depolimerisasi PET secara efektif selama proses *co-pyrolysis*. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis pengaruh rasio bahan baku dan variasi katalis terhadap *yield*, sifat fisika, dan sifat kimia *bio-oil* telah tercapai. Penelitian ini juga menunjukkan potensi pemanfaatan limbah biomassa, plastik PET, dan *fly ash* secara terpadu dalam pengembangan energi alternatif yang lebih berkelanjutan dan mendukung konsep ekonomi sirkular.

5. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) terkait publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] D. M. C. Chen, B. L. Bodirsky, T. Krueger, A. Mishra, and A. Popp, "The world's growing municipal solid waste: Trends and impacts," *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 7, pp. 1–12, 2020.
- [2] G. S. Ghodake, S. K. Shinde, A. S. Kadam, R. G. Saratale, G. D. Saratale, M. Kumar, R. R. Palem, H. A. Al-Shwaiman, A. M. Elgorban, A. Syed, and D-Y Kim, "Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy," *J. Clean. Prod.*, vol. 297, pp. 1–38, 2021.
- [3] L. K. Mangalla, R. R. Sisworo, and L. Pagiling, "Optimizing bio-oil production from waste biomass: synergistic catalytic co-pyrolysis of torrefied palm kernel shell and coal with fly ash," *International Journal on Energy Conversion*, vol. 13, no. 6, pp. 239–247, 2025.
- [4] A. H. Zulkafli, H. Hassan, M. A. Ahmad, A. T. M. Din, and S. M. Wasli, "Co-pyrolysis of biomass and waste plastics for production of chemicals and liquid fuel: A review on the role of plastics and catalyst types," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 16, no. 1, pp. 1–20, 2023.
- [5] T. Thiounn and R. C. Smith, "Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste," *Journal of Polymer Science*, vol. 58, no. 10, pp. 1347–1364, 2020.
- [6] N. Tripathi, C. D. Hills, R. S. Singh, and C. J. Atkinson, "Biomass waste utilisation in low-carbon products: Harnessing a major potential resource," *Climate and Atmospheric Science*, vol. 2, no. 35, pp. 1–10, 2019.
- [7] C. C. Seah, C. H. Tan, N. A. Arifin, R. S. R. M. Hafriz, A. Salmiaton, S. Nomanbhay, and A. H. Shamsuddin, "Co-pyrolysis of biomass and plastic: Circularity of wastes and comprehensive review of synergistic mechanism," *Results in Engineering*, vol. 17, pp. 1–10, 2023.
- [8] A. P. D. Takahasi, D. Mansur, W. D. Prasetyo, S. P. Simanungkalit, W. L. I. Purba, W. A. Rizal, A. Sarwono, and Y. A. Iskandar, "Optimization of liquid fuel production from co-pyrolysis of oil palm fronds and expanded polystyrene using response surface methodology," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 11, pp. 1–9, 2025.
- [9] L. M. Terry, C. Li, J. J. Chew, A. Aqsha, B. S. How, A. C. M. Lay, B. L. F. Chin, D. S. Khaerudini, N. Hameed, G. Guan, and J. Sunarso, "Bio-oil production from pyrolysis of oil palm biomass and the upgrading technologies: A review," *Carbon Resources Conversion*, vol. 4, pp. 239–250, 2021.
- [10] Y. H. V. Soong, M. J. Sobkowicz, and D. Xie, "Review recent advances in biological recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic wastes," *Bioengineering*, 9, 98, pp. 1–27, 2022.
- [11] R. Miandad, M. Rehan, M. A. Barakat, A. S. Aburiazzaiza, H. Khan, I. M. Ismail, J. Dhavamani, J. Gardy, A. Hassanpour, and A-S. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis-based biorefineries," *Front. Energy Res.*, vol. 7, no. 27, 2019.

- [12] M. S. Reza, Z. B. Iskakova, S. Afroze, K. Kuterbekov, A. Kabyshev, K. Z. Bekmyrza, M. M. Kubenova, M. S. A. Bakar, A. K. Azad, H. Roy, and M. S. Islam, "Influence of catalyst on the yield and quality of bio-oil for the catalytic pyrolysis of biomass: A comprehensive review," *Energies*, vol. 16, no. 14, pp. 1–39, 2023.
- [13] A. C. Dyer, M. A. Nahil, and P. T. Williams, "Catalytic co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a route to upgraded bio-oil," *Journal of the Energy Institute*, vol. 97, pp. 27–36, 2021.
- [14] N. Nurfatihayati, P. S. Utama, P. Padil, Azis, Yelmida, S. Sunarno, and J. Fikri, "Co-pyrolysis of oil palm fronds (OPF) and polypropylene plastic (PP) using NiCu/CaO catalyst for bio-oil production," *E3S Web of Conferences*, 2025, 678, 02003.
- [15] H. Anandaram, B. K. Srivastava, B. Vijayakumar, P. Madhu, M. V. Depoures, P. P. Patil, S. Chhabria, P. B. Patel, and S. Prabhakar, "Co-pyrolysis characteristics and synergistic interaction of waste polyethylene terephthalate and woody biomass towards bio-oil production," *J. Chem.*, vol. 2022, no. 6, pp. 1–9, 2022.
- [16] M. A. Al-Maari, M. A. Ahmad, A. T. M. Din, H. Hassan, and A. M. Alsobaai, "Co-pyrolysis of oil palm empty fruit bunch and oil palm frond with low-density polyethylene and polypropylene for bio-oil production," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 14, pp. 1–11, 2021.
- [17] M. Stanković, S. Pavlović, D. Marinković, M. Tišma, M. Gabrovska, and D. Nikolova, "Solid green biodiesel catalysts derived from coal fly ash," in *Renewable Energy - Resources, Challenges and Applications*, M. Al-Qubeissi, A. El-kharouf, and H. S. Soyhan, Eds., London: IntechOpen, 2020, pp. 185–210. doi: 10.5772/intechopen.91703.
- [18] P. R. Indonesia, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021*. Indonesia, 2021.
- [19] P. Padil, S. Sunarno, A. Mutamima, I. Purnama, N. Nurfatihayati, P. S. Utama, A. R. Noor, S. Sunariyo, and M. Aziz, "Optimized liquid hydrocarbon production via co-pyrolysis of nypa fronds and polypropylene using fly ash catalyst," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–14, 2025.
- [20] A. Mutamima, S. Sunarno, S. Bahri, A. R. Kusuma, R. A. Putri, C. D. Al'farisi, and A. A. Y. Habib, "Catalytic co-pyrolysis of formic acid pretreated nypa fruticans fronds and PET for sustainable bio-oil production," *E3S Web of Conferences*, 2025, 678, 02002.
- [21] M. Khatibi, M. A. Nahil, and P. T. Williams, "Improving the quality of bio-oil using the interaction of plastics and biomass through co-pyrolysis coupled with nonthermal plasma processing," *Energy and Fuels*, vol. 38, no. 2, pp. 1240–1257, 2024.
- [22] S. Eren, F. N. Türk, and H. Arslanoğlu, "Synthesis of zeolite from industrial wastes: a review on characterization and heavy metal and dye removal," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, pp. 41791–41823, 2024.
- [23] B. Makgabutlane, L. N. Nthunya, E. N. Nxumalo, N. M. Musyoka, and S. D. Mhlanga, "Microwave irradiation-assisted synthesis of zeolites from coal fly ash: An optimization study for a sustainable and efficient production process," *ACS Omega*, 2020, vol. 5, pp. 25000–25008, 2020.
- [24] P. Nowak, B. Muir, A. Solinska, M. Franus, and T. Bajda, "Synthesis and characterization of zeolites produced from low-quality coal fly ash and wet flue gas desulphurization wastewater," *Materials*, vol. 14, pp. 1–16, 2021.
- [25] D. E. Pranata, A. Syarif, and M. Yerizam, "Characterization of fly ash catalyst using XRD method for biofuel production from used cooking oil," *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, vol. 6, no. 3, pp. 90–95, 2020.
- [26] G. F. M. Cupertino, A. K. S. Pereira, J. G. M. Ucella-Filho, F. M. Delatorre, A. M. da Silva, K. C. A. da Silva, E. C. de Souza, L. A. Parreira, A. S. Pimenta, D. Saloni, R. Luqueh, and A. F. D. Junior, "Prospects for the utilization of bio-oil-derived chemicals generated via co-pyrolysis of biomass and polyethylene terephthalate (PET)," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 183, pp. 1–9, 2024.