

## **Studi Kualitas Bahan Bakar Cair Hasil Pirolisis Limbah Plastik dengan Penambahan Aditif Solketal**

**Noor Fitri<sup>1,2\*</sup>, Hafizh Royhan<sup>1,2</sup>, Nabila Ayu Maulidia<sup>2</sup>, Reydi Arman<sup>3</sup>, Ari Irawan<sup>3</sup>, Eko Supriadi<sup>3</sup>, Muhammad Jahiding<sup>4</sup>, Mashuni<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Magister Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Studi Minyak Atsiri, Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

<sup>3</sup>PT Arutmin Indonesia - Tambang Satui, Desa Sejahtera Mulia, Kecamatan Satui, Kabupaten Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan, Indonesia

<sup>4</sup>Pogram Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

<sup>5</sup>Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

\*Corresponding Email: noor.fitri@uii.ac.id

### **ABSTRAK**

Peningkatan volume limbah plastik global yang mencapai lebih dari 367 juta ton per tahun telah menimbulkan persoalan serius bagi lingkungan, khususnya di Indonesia yang menyumbang sekitar 17% dari total sampah nasional. Daur ulang mekanis maupun pembakaran langsung dinilai kurang optimal karena keterbatasan kualitas produk dan potensi pencemaran. Sebagai alternatif, pirolisis menjadi teknologi yang menjanjikan untuk mengkonversi limbah plastik menjadi bahan bakar cair (*pyrolysis oil*) dengan karakteristik mendekati bahan bakar konvensional. Penelitian ini memanfaatkan limbah plastik bernomor genap (HDPE, LDPE, PS) melalui pirolisis pada suhu 300 °C selama 45 menit dengan kapasitas reaktor 5 kg, menghasilkan 1 L minyak pirolisis per siklus. Hasil karakterisasi menunjukkan sebagian besar parameter bahan bakar telah memenuhi standar ASTM, seperti nilai total angka asam (0,02 mg KOH/g), titik nyala (61 °C), dan kadar sulfur (0,005%), meskipun masih terdapat deviasi pada kandungan air, residu karbon, dan angka setana. Untuk meningkatkan kualitasnya, ditambahkan aditif solketal sebesar 0,2%, yang terbukti signifikan memperbaiki performa mesin serta menurunkan emisi. Uji performa menggunakan mesin diesel D-4D menunjukkan konsumsi bahan bakar lebih efisien, sementara uji emisi memperlihatkan penurunan opasitas dan CO serta peningkatan pembakaran sempurna yang ditandai dengan emisi CO<sub>2</sub> lebih tinggi. Hasil ini menegaskan bahwa integrasi pirolisis dengan penambahan solketal mampu menghasilkan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan berpotensi untuk diaplikasikan pada skala industri energi berkelanjutan.

**Kata kunci:** aditif BBM, bahan bakar cair, limbah plastik, pirolisis, solketal, uji emisi

### **ABSTRACT**

*The increasing volume of global plastic waste, which has exceeded 367 million tons per year, has created a serious environmental problem, particularly in Indonesia, which contributes about 17% of the national waste. Mechanical recycling and direct incineration are considered less optimal due to limited product quality and potential pollution. As an alternative, pyrolysis offers a promising technology to convert plastic waste into liquid fuel (pyrolysis oil) with characteristics similar to conventional fuels. This study utilized even-numbered plastic wastes (HDPE, LDPE, PS) through pyrolysis at 300 °C for 45 minutes with a reactor capacity of 5 kg, producing 1 L of pyrolysis oil per batch. Characterization results indicated that most fuel parameters met ASTM standards, such as Total Acid Number (0.02 mg KOH/g), flash point (61 °C), and sulphur content (0.005%), although some deviations were found in water content, carbon residue, and cetane number. To improve its quality, 0.2% solketal was added as an oxygenated additive, which significantly enhanced engine performance and reduced emissions. Performance testing using a D-4D diesel engine*

*demonstrated improved fuel efficiency, while emission tests showed lower opacity and CO levels, along with more complete combustion indicated by higher CO<sub>2</sub> emissions. These findings confirm that integrating pyrolysis with solketal additives can produce a more efficient, environmentally friendly alternative fuel with potential for application in sustainable energy industries.*

**Keywords:** *emission test, fuel additive, liquid fuel, plastic waste, pyrolysis, solketal.*

## 1. Pendahuluan

Permasalahan lingkungan tak lepas dari limbah plastik yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi yang sejalan pola konsumsi masyarakat. Produksi plastik dunia telah mencapai lebih dari 367 juta ton per tahun, dan hanya sebagian kecil yang berhasil didaur ulang, sedangkan sisanya menumpuk di tempat pembuangan akhir atau mencemari ekosistem laut maupun darat (Jahiding dkk., 2024). Indonesia menghasilkan sekitar 34,8 juta ton sampah setiap tahun, dengan sekitar 32,7% telah dikelola, sementara sekitar 67,3% masih belum tertangani secara optimal (Kementerian Lingkungan Hidup, 2025).

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak limbah plastik. Pengelolaan sampah plastik hingga saat ini banyak dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu metode fisika dan kimia. Metode fisika umumnya meliputi proses pemilahan, pencucian, pencacahan, serta peleburan ulang menjadi pelet atau bahan baku baru. Proses ini relatif sederhana dan telah banyak diterapkan, yang mengolah plastik pasca konsumsi menjadi filamen untuk 3D printing melalui teknik daur ulang mekanis (Mawaddah dkk., 2024). Penelitian lain, berhasil mengonversi limbah PET, HDPE, LDPE, dan PP menjadi pelet plastik dengan kualitas tertentu (Chandara dkk., 2023). Namun, daur ulang mekanis seringkali terkendala oleh keterbatasan kualitas material hasil daur ulang, sedangkan pembakaran langsung berpotensi menghasilkan emisi berbahaya (Jahiding dkk., 2024). Oleh karena itu, dibutuhkan metode alternatif yang lebih ramah lingkungan sekaligus memberikan nilai tambah.

Salah satu metode yang berkembang adalah pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal material organik (termasuk plastik) pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen (Jahiding dkk., 2023; Wang dkk., 2021; Rahman dkk., 2020). Proses ini mampu mengubah limbah plastik menjadi produk cair (*fuel oil*), gas, dan residu padat (*char*). *Fuel oil* hasil pirolisis memiliki karakteristik yang mendekati bahan bakar minyak konvensional, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif (Mishra & Mohanty, 2020; Jahiding dkk., 2021). Selain mengurangi volume limbah plastik, teknologi ini juga berkontribusi pada diversifikasi energi dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Penelitian yang telah dilaksanakan mengkonversi limbah sampah plastik menjadi bahan bakar dan peningkatan kualitasnya dengan menggunakan aditif solketal yang merupakan turunan dari gliserol sebagai hasil samping (*by product*) reaksi pembuatan biodiesel. Bahan bakar yang dihasilkan dari proses pirolisis diuji coba performa dan uji emisi (Fitri dkk., 2022; 2024a).

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Bahan dan Alat

Bahan objek penelitian adalah limbah plastik bernomor genap (2, 4, dan 6) seperti sedotan plastik, tutup botol, styrofoam, dan botol *shampo*, elpiji, ketone, gliserol, aseton, PAC, etanol. Adapun alat yang digunakan GC-MS merk Shimadzu QP 2010 SE, GC merk Shimadzu 2010, kendaraan uji Innova diesel tahun 2010, mesin diesel D-4D (*Direct Injection 4 Cylinder Common Rail Diesel Engine*), alat uji emisi merk Stargas Tecnotest 898 dan Tecnotest Smokemeter Type 495/01, alat pirolisis dengan spesifikasi: ketebalan plat setebal 4mm/ boiler/reactor stainless steel 304 (tanki utama), pipa penguapan/pembuangan stainless steel 201 (0,8-1 mm), rangka penutup (*cover*) hollow 4×4 galvanis dengan penutup (*cover*) stainless steel 201 (0,8-1 mm), *gate Valve/Ball Valve* - Kuningan dan Stainless, penutup (*inlet*) dengan ketebalan 4-5 mm.

### 2.2 Prosedur Penelitian

#### 2.2.1 Penampilan (*Appearance*)

Pengujian *appearance* sesuai MU/7.2/APP. Lakukan dengan mengamati sampel secara visual untuk menilai warna, kejernihan, dan adanya partikel asing. Sampel cair diamati pada latar belakang putih dan hitam, sedangkan sampel padat ditempatkan di permukaan bersih dengan latar netral.

#### 2.2.2 Densitas

Pengujian *density* atau densitas ASTM D1298 sesuai Sampel dipanaskan dalam penangas air sesuai suhu uji, lalu hidrometer dimasukkan perlahan hingga mengapung bebas dan stabil di tengah. Suhu sampel dijaga agar tidak berubah lebih dari 0,25°C. Nilai densitas dan suhu yang diamati kemudian dikoreksi menggunakan ASTM Table 53B atau perangkat lunak untuk memperoleh densitas pada 15°C.

#### 2.2.3 Viskositas Kinematik

Pengujian viskositas kinematik sesuai ASTM D445 dilakukan dengan menggunakan viskometer kapiler. Sampel cair dimasukkan ke dalam tabung viskometer bersih, kemudian ditempatkan pada penangas termostat yang suhunya diatur sesuai kondisi uji. Setelah suhu sampel mencapai kestabilan, cairan dibiarkan mengalir melalui kapiler viskometer secara gravitasi. Waktu alir diukur dengan menggunakan stopwatch sejak batas atas hingga batas bawah yang ditentukan pada viskometer. Nilai viskositas kinematik diperoleh dengan mengalikan waktu alir dengan konstanta kalibrasi viskometer, kemudian hasilnya dinyatakan dalam satuan mm<sup>2</sup>/s (cSt).

#### 2.2.4 Total Angka Asam (TAN)

Pengujian *Total Acid Number* (TAN) sesuai ASTM D664 dilakukan dengan metode titrasi potensiometrik menggunakan indikator. Sejumlah sampel ditimbang dengan akurat, kemudian dilarutkan dalam campuran pelarut netral berupa toluena, isopropanol, dan sedikit air. Larutan sampel selanjutnya dititrasi dengan larutan standar kalium hidroksida (KOH) menggunakan indikator p-naphtholbenzein, hingga terjadi perubahan warna dari kuning menjadi hijau kebiruan yang menandakan titik akhir titrasi. Volume larutan KOH yang digunakan dicatat, kemudian dihitung sebagai jumlah miligram KOH yang diperlukan untuk menetralkan asam dalam satu gram sampel. Nilai tersebut dinyatakan sebagai Total Angka Asam (mg KOH/g sampel).

#### 2.2.5 Angka Asam Kuat (SAN)

Pengujian *Strong Acid Number* (SAN) sesuai ASTM D664 dilakukan untuk menentukan jumlah asam kuat, terutama asam mineral, dalam sampel minyak. Sejumlah sampel ditimbang dengan akurat, kemudian dilarutkan dalam campuran pelarut netral yang terdiri atas toluena, isopropanol, dan sedikit air. Larutan sampel dititrasi dengan larutan standar kalium hidroksida (KOH) menggunakan indikator p-naphtholbenzein. Titik akhir ditentukan ketika terjadi perubahan warna dari kuning menjadi jingga, yang menunjukkan netralisasi asam kuat dalam sampel. Volume titran yang digunakan dihitung sebagai miligram KOH per gram sampel, dan nilai tersebut dinyatakan sebagai angka asam kuat (mg KOH/g).

#### 2.2.6 Titik Nyala

Pengujian *flash point* atau titik nyala sesuai ASTM D93 dilakukan menggunakan metode *Pensky-Martens Closed Cup* (PMCC). Sampel cair dimasukkan ke dalam cawan uji hingga batas volume yang ditentukan, kemudian ditempatkan dalam alat PMCC. Suhu sampel dinaikkan secara bertahap dengan laju pemanasan yang terkontrol sesuai ketentuan metode. Pada interval suhu tertentu, api penguji (*test flame*) diarahkan ke permukaan sampel melalui penutup cawan. Titik nyala (*flash point*) ditentukan pada saat terjadi nyala singkat pada permukaan sampel akibat penguapan komponen mudah terbakar. Nilai suhu yang tercatat pada saat nyala muncul dicatat sebagai titik nyala (*flash point*).

#### 2.2.7 Kadar Air

Pengujian kadar air (*water content*) sesuai ASTM D6304 dilakukan dengan metode *Karl Fischer titration*. Sejumlah sampel cair ditimbang atau diukur volumenya secara akurat, kemudian dimasukkan ke dalam sel titrasi yang berisi reagen *Karl Fischer*. Proses titrasi dilakukan secara *volumetrik* atau *coulometric* hingga titik akhir tercapai, yang ditandai oleh perubahan potensial atau arus listrik sesuai dengan sistem deteksi pada instrumen. Jumlah reagen yang bereaksi dicatat secara otomatis oleh alat, kemudian dihitung sebagai kandungan air dalam sampel dan dinyatakan dalam satuan mg/kg atau ppm.

#### 2.2.8 Kadar Abu

Pengujian kadar abu (*ash content*) sesuai ASTM D482 dilakukan dengan cara membakar sampel hingga seluruh bahan organik terdekomposisi sempurna, sehingga tersisa residu anorganik dalam bentuk abu. Sejumlah sampel ditimbang secara akurat, kemudian ditempatkan dalam cawan porselen atau kuarsa yang telah dipijarkan dan ditimbang sebelumnya. Sampel dibakar secara perlahan untuk menghindari percikan, lalu dimasukkan ke dalam tungku pembakaran (*muffle furnace*) pada suhu tinggi hingga pembakaran selesai dan diperoleh residu yang konstan. Setelah pendinginan dalam desikator, cawan ditimbang kembali untuk menentukan massa abu yang tersisa. Nilai kadar abu dihitung sebagai persentase massa residu anorganik terhadap massa awal sampel.

#### 2.2.9 Titik Tuang

Pengujian titik tuang (*pour point*) sesuai ASTM D97 dilakukan untuk menentukan suhu terendah di mana sampel minyak masih dapat mengalir. Sampel cair dimasukkan ke dalam tabung uji hingga batas yang ditentukan, kemudian didinginkan secara bertahap dengan menggunakan media pendingin sesuai prosedur standar. Selama pendinginan, tabung uji diperiksa pada interval suhu tertentu dengan memiringkan tabung secara hati-hati untuk mengamati apakah sampel masih menunjukkan pergerakan. Suhu terendah pada saat sampel tidak lagi mengalir dicatat sebagai titik tuang (*pour point*) dan dilaporkan dalam satuan °C.

#### 2.2.10 Titik Kabut

Pengujian titik kabut (*cloud point*) sesuai ASTM D2500 dilakukan untuk menentukan suhu terendah ketika parafin atau komponen padat pertama kali mulai mengendap dari sampel minyak. Sampel dimasukkan ke dalam tabung uji hingga batas yang ditentukan, kemudian didinginkan secara bertahap dalam alat pendingin dengan laju sesuai prosedur standar. Selama proses pendinginan, tabung diperiksa secara berkala dengan cahaya terang untuk mengamati terbentuknya kekeruhan akibat kristal parafin. Suhu pada saat pertama kali terlihat kekeruhan tipis pada sampel dicatat sebagai titik kabut (*cloud point*) dan dilaporkan dalam satuan °C.

#### 2.2.11 Residu Karbon Conradson

Pengujian residu karbon sesuai ASTM D4530, dilakukan untuk menentukan kecenderungan sampel bahan bakar meninggalkan residu karbon setelah proses pemanasan tanpa udara. Sampel awal didistilasi hingga diperoleh 10% residu dari volume semula, kemudian residu tersebut dikumpulkan untuk analisis lebih lanjut. Residu ditempatkan dalam cawan porselen yang telah ditimbang, kemudian dipanaskan dalam tungku pembakaran (*conradson furnace*) dengan kondisi terkontrol hingga seluruh komponen volatil teruapkan dan hanya tersisa karbon. Setelah pendinginan dalam desikator, cawan ditimbang kembali untuk memperoleh massa residu karbon. Nilai residu karbon dihitung sebagai persentase massa residu karbon terhadap massa awal sampel residu distilasi 10%.

#### 2.2.12 Distilasi 90%

Pengujian distilasi sesuai ASTM D86 dilakukan untuk menentukan karakteristik titik didih sampel bahan bakar. Sejumlah sampel cair dimasukkan ke dalam labu distilasi bersih hingga volume yang ditentukan, kemudian dipanaskan dengan laju konstan sesuai prosedur standar. Uap hasil pemanasan dikondensasikan melalui pendingin dan ditampung dalam silinder penerima. Suhu dicatat secara berurutan pada saat volume destilat mencapai persentase tertentu, hingga diperoleh suhu distilasi pada 90% volume *recovery*. Nilai tersebut dilaporkan sebagai suhu distilasi 90% vol, yang menggambarkan fraksi berat dalam sampel.

#### 2.2.13 Kadar Sulfur (S)

Kadar *sulphur* atau sulfur ditentukan sesuai metode ASTM D5453 dengan menggunakan *spektrometri emisi plasma* (ICP-OES). Sampel oli terlebih dahulu diencerkan dengan pelarut organik yang sesuai, kemudian dianalisis pada panjang gelombang emisi sulfur di sekitar 180–183 nm. Kuantifikasi dilakukan berdasarkan kurva kalibrasi yang disiapkan dari larutan standar sulfur dengan matriks serupa, sehingga kandungan sulfur dalam sampel diperoleh dari hasil interpolasi sinyal emisi terhadap standar kalibrasi. Kadar sulfur ditentukan sesuai metode ASTM D5453 dengan menggunakan *spektrometri emisi plasma* (ICP-OES). Sampel oli terlebih dahulu diencerkan dengan pelarut organik yang sesuai, kemudian dianalisis pada panjang gelombang emisi sulfur di sekitar 180–183 nm. Kuantifikasi dilakukan berdasarkan kurva kalibrasi yang disiapkan dari larutan standar sulfur

dengan matriks serupa, sehingga kandungan sulfur dalam sampel diperoleh dari hasil interpolasi sinyal emisi terhadap standar kalibrasi.

#### 2.2.14 Angka Setana

Nilai angka setana (*cetane number*) ditentukan sesuai ASTM D613 dengan menggunakan mesin CFR (*Cooperative Fuel Research*) satu silinder berkompresi variabel. Sampel bahan bakar diuji dengan cara membandingkan waktu tunda penyalaan terhadap campuran bahan bakar referensi (*primary reference fuels*) berupa *n-cetane* dan *isocetane* yang memiliki nilai setana telah ditetapkan. Nilai sampel angka setana kemudian diperoleh melalui interpolasi terhadap campuran referensi yang menghasilkan waktu tunda penyalaan setara.

#### 2.2.15 Warna ASTM

Warna bahan bakar ditentukan sesuai metode ASTM D1500 dengan cara membandingkan sampel yang ditempatkan dalam tabung kaca transparan terhadap skala standar warna ASTM menggunakan komparator visual di bawah pencahayaan seragam. Nilai warna ditetapkan berdasarkan kesesuaian paling mendekati antara sampel dan standar, dan apabila warna sampel berada di antara dua nilai, hasil dilaporkan sebagai nilai setengah tingkat pada skala warna ASTM.

#### 2.2.16 Endapan Hasil Ekstraksi

Kandungan sedimen ditentukan sesuai ASTM D473, dengan cara menimbang sejumlah sampel minyak, kemudian mengekstraksinya menggunakan pelarut toluena panas hingga seluruh komponen terlarut terpisah. Residu yang tidak larut dikumpulkan, dikeringkan pada suhu terkontrol hingga mencapai massa konstan, lalu ditimbang, sehingga persen sedimen dalam sampel dapat dihitung berdasarkan perbandingan massa residu terhadap massa awal sampel.

#### 2.2.17 Partikulat / Kontaminan Padat

Analisis kontaminan partikulat (*particulate contaminant*) dilakukan sesuai metode ASTM D6217, yaitu dengan memfiltrasi volume tertentu bahan bakar destilat menengah melalui membran filter berpori 0,8  $\mu\text{m}$  yang telah dikeringkan dan ditimbang sebelumnya. Sampel bahan bakar dialirkan hingga seluruh volume melewati filter, kemudian membran dibilas menggunakan pelarut organik (misalnya *isopropanol*) untuk menghilangkan residu bahan bakar. Selanjutnya filter dikeringkan kembali pada suhu terkontrol hingga mencapai massa konstan, lalu ditimbang untuk menentukan massa partikel yang tertahan. Kandungan partikulat dinyatakan sebagai mg/L, dihitung dari selisih massa filter sebelum dan sesudah filtrasi terhadap volume bahan bakar yang dianalisis.

#### 2.2.18 Pelumasan

Uji *lubricity* atau pelumasan bahan bakar dilakukan mengikuti metode ASTM D6079 dengan menggunakan *High Frequency Reciprocating Rig* (HFRR) pada suhu pengujian 60 °C. Dalam pengujian ini, bola baja standar ditekan terhadap cakram baja datar yang terendam dalam sampel bahan bakar, kemudian digerakkan secara bolak-balik dengan frekuensi dan beban tertentu selama waktu pengujian yang ditetapkan. Setelah selesai, diameter bekas keausan (*wear scar diameter*) pada permukaan bola diukur menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran terstandar. Nilai wear scar diameter rata-rata dilaporkan dalam mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) sebagai indikator *lubricity* bahan bakar uji.

#### 2.2.19 Korosi Strip Tembaga

Uji korosi strip tembaga (*copper strip corrosion*) dilakukan sesuai ASTM D130 dengan cara merendam strip tembaga standar yang telah dipoles bersih ke dalam sampel bahan bakar. Tabung uji yang berisi strip dan sampel kemudian ditempatkan dalam penangas pada suhu 50 °C selama 3 jam. Setelah waktu pengujian berakhir, strip tembaga dikeluarkan, dicuci, dan dikeringkan, kemudian permukaannya dibandingkan secara visual dengan standar warna dan tingkat korosi yang tercantum dalam metode. Hasil dilaporkan sebagai klasifikasi korosi tembaga yang sesuai dengan penilaian visual terhadap strip uji.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Teknologi pengolahan limbah plastik melalui proses pirolisis dipandang sebagai metode yang menjanjikan dalam mengurangi volume sampah plastik sekaligus menyediakan alternatif sumber energi (Qian, 2024). Pirolisis menggunakan prinsip dekomposisi termal pada material plastik pada

suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen (Bridgwater, 2012; Wang, 2017). Kondisi anaerobik ini memungkinkan pemecahan rantai polimer plastik menjadi produk-produk dengan nilai ekonomis seperti *fuel oil*, gas, dan residu padat (Liu dkk., 2023; Jahiding dkk., 2024). Hasil *fuel oil* yang dihasilkan memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendekati bahan bakar minyak konvensional, sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang potensial (Jahiding dkk., 2023; 2024). Keunggulan pirolisis tidak hanya terletak pada pengurangan volume limbah plastik secara signifikan, tetapi juga pada kontribusinya dalam diversifikasi sumber energi, dimana pirolisis dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang semakin menipis dan berdampak negatif pada lingkungan (Dyer, 2021). Penelitian ini menggunakan limbah plastik bernomor genap (2, 4, dan 6) seperti sedotan plastik, tutup botol, styrofoam, dan botol *shampo*. Pemilihan limbah plastik dilatar belakangi dengan rantai polimer yang relatif sederhana dan stabil secara kimia, sehingga proses pirolisis dapat memecahnya secara efisien menjadi produk minyak dan gas yang bernilai energi tinggi. Struktur ini memudahkan dekomposisi termal tanpa menghasilkan residu berlebih. Hal ini memungkinkan proses termal menghasilkan fraksi minyak yang tinggi dengan karakteristik bahan bakar yang baik. Selain itu, plastik jenis ini cenderung lebih mudah diolah secara termal dibandingkan plastik lain seperti PET dan PVC, yang dapat menghasilkan gas berbahaya dan residu yang tidak diinginkan. Gambar 1 menampilkan proses pirolisis limbah plastik.

Penelitian menunjukkan bahwa proses pirolisis limbah plastik nomor genap ini menghasilkan produk dengan efisiensi dan kualitas yang lebih optimal, sehingga mendukung penggunaan plastik jenis ini dalam skala industri (Rahman & Abdullah, 2020). Proses pirolisis dengan kapasitas 5 kg menggunakan limbah plastik bernomor genap (2, 4, dan 6) pada suhu 300 °C, selama 45 Menit menghasilkan minyak pirolisis sebanyak 1 L/proses. Analisis kualitas minyak pirolisis disajikan pada Tabel 1.

Pada Tabel 1 terlihat bahwa parameter total angka asam tercatat sebesar 0,37 mg KOH/g, jauh di bawah batas ASTM maksimal 0,6 mg KOH/g dan angka asam kuat tidak terdeteksi. Nilai ini mengindikasikan degradasi oksidatif yang sangat rendah sehingga risiko korosi pada mesin minimal. Hal ini konsisten dengan studi Shahir (2014), yang menyebutkan bahwa TAN rendah menandakan stabilitas oksidatif yang baik. Selanjutnya, hasil titik nyala (PMCC) adalah 61°C, lebih tinggi dari batas minimal ASTM (52°C), yang berarti keamanan penyimpanan cukup terjamin karena bahan bakar memerlukan suhu relatif tinggi untuk terbakar. Penelitian lain juga menegaskan bahwa titik nyala yang tinggi dapat menurunkan risiko kebakaran saat penyimpanan maupun transportasi (Nabi dkk., 2009).



**Gambar 1.** Proses Pirolisis Limbah Plastik

Kadar air dalam minyak pirolisis sebesar 528 ppm, sedikit melebihi batas ASTM maksimal 400 ppm. Kandungan air yang lebih tinggi berpotensi menimbulkan korosi serta mendorong pertumbuhan mikroba dalam tangki penyimpanan. Keberadaan air dalam minyak pirolisis dapat menurunkan kualitas bahan bakar dan *low power* pada mesin (Fitri dkk., 2024c). Data pada tabel 1 menunjukkan kadar abu relatif rendah, yaitu 0,001%-massa, masih di bawah batas ASTM maksimal 0,01%-massa. Hal ini menunjukkan, bahwa residu anorganik tidak signifikan membentuk deposit pada ruang bakar (Mohan dkk., 2006).

Pada uji sifat alir dingin, nilai titik tuang tercatat 15°C, lebih rendah dari batas ASTM yaitu 18°C, sehingga bahan bakar tetap cair pada suhu rendah. Penelitian menunjukkan bahwa nilai titik tuang rendah meningkatkan keandalan bahan bakar pada suhu rendah (Lim dkk., 2011). Sedangkan titik kabut sebesar 21°C, masih di atas baku mutu maksimal 18°C (Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2020). Titik kabut adalah suhu dimana bahan bakar mulai menjadi keruh. Kekeakuan ini terjadi karena komponen terlarut seperti parafin mulai mengeras dan membentuk kristal seiring turunnya suhu. Minyak pirolisis dengan titik kabut sebesar 21°C pada kondisi di Indonesia dengan iklim tropis masih layak digunakan.

Hasil uji residu karbon adalah 0,22%-massa, sedikit lebih tinggi dari batas ASTM maksimal 0,1%-massa. Residu karbon yang tinggi berpotensi menimbulkan deposit pada ruang bakar maupun nozzle. Karbon residu yang tinggi berkorelasi dengan meningkatnya emisi partikulat (Nabi dkk., 2009).

**Tabel 1.** Karakterisasi *Pyrolysis Oil*

No	Parameter	Satuan	Metode	Hasil	Standar
1	Penampilan	-	MU/7.2/APP	Jernih	Jernih dan Cerah
2	Densitas pada 15°C	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D1298	796	815- 870
3	Viskositas kinematik pada 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445	2,8	2.0 - 4.5
4	Total Angka Asam (TAN)	mg KOH/g	ASTM D664	0,4	Maks. 0,6
5	Angka Asam Kuat (SAN)	mg KOH/g	ASTM D664	Nil	Nil
6	Titik Nyala (PMCC)	°C	ASTM D93	61	Min. 52
7	Kadar Air (Metode Karl Fischer)	ppm	ASTM D6304	528	Maks. 400
8	Kadar Abu	%-massa	ASTM D482	0,001	Maks. 0,010
9	Titik Tuang	°C	ASTM D97	15	Maks. 18
10	Titik Kabut	°C	ASTM D2500	21	Maks. 18
11	Residu Karbon Conradson pada 10% Distilat Tersisa	%-massa	ASTM D4530	0,22	Maks. 0,10
12	Suhu Distilasi pada 90% Volume	°C	ASTM D86	371	Maks. 370
13	Kandungan Sulfur (S)	mg/kg	ASTM D5453	<1	Maks. 0,05
14	Angka Setana		ASTM D613	42	Min. 48
15	Warna ASTM	Warna	ASTM D1500	2,5	Maks. 1,0
16	Endapan Hasil Ekstraksi	%-massa	ASTM D473	0,004	Maks. 0,010
17	Partikulat / Kontaminan Padat	mg/L	ASTM D6217	10,8	Maks. 10,0
18	Pelumasan (HFRR, keausan pada 60°C)	Mikron	ASTM D6079	217	Maks. 460
19	Korosi Strip Tembaga (3 jam pada 50°C)	kelas	ASTM D130	1.a	Maks. kelas. 1

Kadar sulfur diperoleh sebesar 0,005 %, jauh di bawah batas ASTM maksimal 0,05 %berat. Rendahnya kandungan sulfur penting untuk menekan emisi SO<sub>x</sub> yang berbahaya bagi lingkungan. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya (Knothe, 2010), yang menyatakan bahwa bahan bakar dengan sulfur rendah lebih ramah lingkungan.

Tabel 1 memperlihatkan nilai angka setana hanya 42. Nilai ini lebih rendah dari standar ASTM minimal 48. Angka setana rendah dapat menyebabkan keterlambatan penyalaan (*ignition delay*), yang berimplikasi pada efisiensi pembakaran dan peningkatan emisi Nox (Zhang dkk., 2015).

Uji warna bahan bakar menunjukkan nilai ASTM 2,5 yang melebihi batas standar maksimal 1,0. Warna yang lebih gelap biasanya disebabkan oleh adanya senyawa aromatik atau degradasi

termal. Adapun kadar endapan hasil ekstraksi hanya 0,004%-massa, masih di bawah batas ASTM yaitu 0,01%-massa, sehingga menunjukkan bahan bakar relatif bersih dari partikel padat (Singh dkk., 2017).

Dari sisi kemampuan pelumasan, nilai pelumasan adalah 216,5  $\mu\text{m}$ , jauh di bawah batas ASTM 460, yang berarti bahan bakar memiliki sifat pelumasan yang baik untuk mencegah keausan injektor. Terakhir, hasil korosi strip tembaga menunjukkan nilai 1a, sesuai dengan standar ASTM, yang menandakan bahwa bahan bakar tidak menimbulkan korosi signifikan pada logam tembaga.

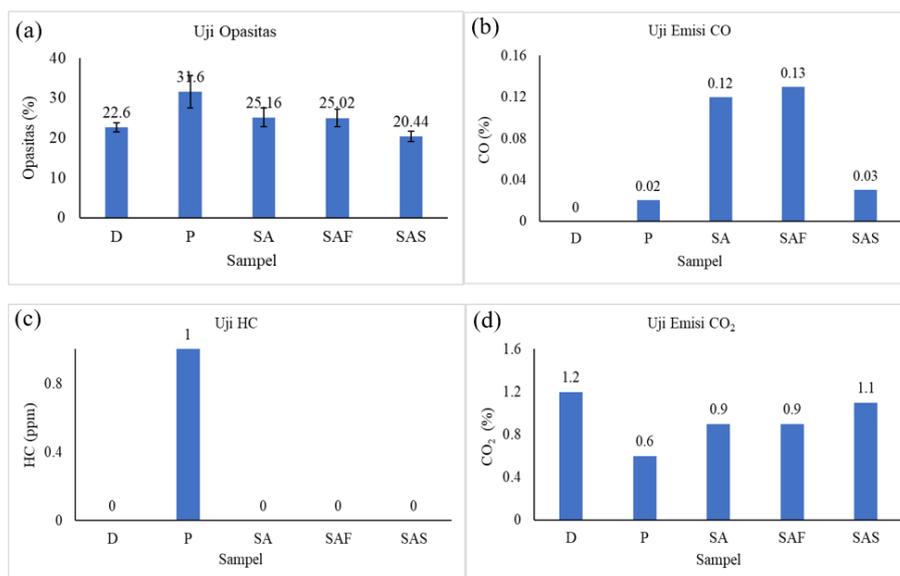
Pengujian performa bahan bakar minyak pirolisis sangat penting untuk menilai kelayakan penggunaannya sebagai bahan bakar alternatif. Tujuan utamanya adalah mengetahui sejauh mana minyak pirolisis dapat bersaing atau setidaknya mendekati kualitas bahan bakar konvensional (Shahir dkk., 2014; Fitri dkk., 2024b). Pengujian dilakukan menggunakan kendaraan uji Innova diesel tahun 2010, mesin diesel D-4D. Hasil uji performa ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Uji Performa Minyak Pirolisis dan Minyak Komersial

RPM	L/h				
	D	P	SA	SAF	SAS
1000	0,875	0,881	0,927	0,831	0,819
2000	2,239	3,324	2,454	2,521	2,335
3000	5,279	5,310	4,979	5,021	4,898

Pada Tabel 2, terlihat 5 sampel bahan bakar yang diuji, yaitu Dexlite (D), Pertamina Dex (P), minyak pirolisis (SA), minyak pirolisis dengan aditif F (SAF), dan minyak pirolisis dengan aditif solketal (SAS). Tabel 2 menunjukkan bahwa performa minyak pirolisis lebih rendah dibandingkan 4 sampel bahan bakar lainnya. Hal ini menunjukkan kualitas minyak pirolisis yang dihasilkan masih rendah dibandingkan dengan bahan bakar komersial seperti D dan P. Kualitas minyak pirolisis dapat ditingkatkan dengan menambah aditif BBM seperti solketal. Penambahan aditif sebesar 0,2% signifikan meningkatkan performa minyak pirolisis menjadi lebih irit/efisien dibandingkan bahan bakar komersial seperti dexlite dan pertamax dex (Fitri dkk., 2024a; 2024c).

Pengujian emisi juga dilakukan untuk memantau hasil emisi penggunaan minyak pirolisis. Gambar 2 menampilkan hasil uji emisi 4 bahan bakar seperti pada uji performa. Ada 4 gas emisi yang diuji, yaitu opasitas, CO, HC dan CO<sub>2</sub>.



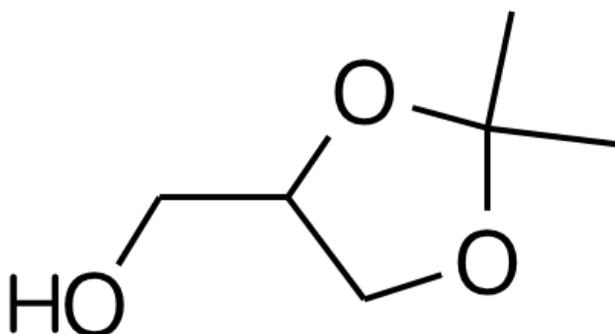
**Gambar 2.** (a) Hasil Uji Opasitas (b) CO (c) HC (d) CO<sub>2</sub> Bahan Bakar Minyak Pirolisis dan Komersial. Sampel Dexlite (D), Pertamina Dex (P), minyak pirolisis (SA), minyak pirolisis dengan aditif F (SAF), dan minyak pirolisis dengan aditif solketal (SAS).

Opasitas yang rendah sangat penting karena mencerminkan minimnya partikel padat atau asap gelap yang dihasilkan dari pembakaran, yang biasanya berupa jelaga karbon. Opasitas tinggi menandakan kandungan partikulat yang besar dalam gas buang, yang berdampak buruk bagi lingkungan dan kesehatan. Hasil uji menunjukkan bahwa semua sampel memenuhi aturan baku mutu emisi opasitas maksimal 40%. Sampel SAS memiliki nilai opasitas terendah sebesar 20,44% merupakan yang terbaik dari sisi partikulat. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan aditif solketal efektif menurunkan emisi opasitas minyak pirolisis, bahkan lebih rendah dibandingkan BBM komersial seperti dextrite dan pertamax dex.

Emisi karbon monoksida (CO) yang rendah mengindikasikan pembakaran bahan bakar yang lebih sempurna, karena CO dihasilkan ketika karbon dalam bahan bakar tidak sepenuhnya teroksidasi menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Oleh karena itu, semakin rendah emisi CO, semakin baik kualitas pembakaran. Secara umum, pada gambar terlihat bahwa uji emisi CO relatif rendah masih di bawah baku mutu permen LHK No.8 tahun 2023 yaitu sebesar 1%. Terjadi penurunan signifikan kadar CO pada SAS dibandingkan dengan SA, yang menunjukkan bahwa aditif solketal dapat membantu menyempurnakan reaksi pembakaran.

Hidrokarbon (HC) yang tidak terbakar juga menjadi indikator penting dalam efisiensi pembakaran. Idealnya, nilai HC mendekati nol, karena senyawa ini berkontribusi pada pembentukan ozon troposferik dan kabut asap. Dalam hasil pengujian, hampir semua sampel kecuali P menunjukkan nilai HC sebesar 0 ppm, yang merupakan hasil sangat baik dan menunjukkan efisiensi pembakaran yang tinggi.

Sedangkan pada karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang tinggi biasanya menunjukkan pembakaran yang hampir sempurna, karena semua karbon berhasil teroksidasi. Namun, CO<sub>2</sub> juga merupakan gas rumah kaca utama yang berdampak pada perubahan iklim. Sampel SAS memiliki emisi CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi (1,1%) dibandingkan SA (0,9%), yang memperkuat bahwa aditif solketal efektif menyempurnakan reaksi pembakaran minyak pirolisis. Struktur senyawa solketal ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur molekul Solketal

#### 4. Kesimpulan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar parameter bahan bakar yang diuji memenuhi standar ASTM, sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Meski demikian, terdapat beberapa deviasi penting yang perlu diperhatikan, seperti densitas yang lebih rendah dari standar yang dapat menurunkan nilai energi per satuan volume, kadar air yang sedikit melebihi batas sehingga berisiko menyebabkan korosi, serta nilai residu karbon conradson yang tinggi yang dapat meningkatkan pembentukan deposit. Selain itu, angka cetane yang rendah berpotensi menyebabkan keterlambatan penyalaan (*ignition delay*), dan nilai warna ASTM yang lebih gelap dari standar mengindikasikan kemungkinan degradasi bahan bakar. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menekankan bahwa parameter-parameter tersebut berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran, emisi, dan umur mesin.

Hasil uji performa dan uji emisi gas buang menunjukkan bahwa aditif solketal yang disintesis dari gliserol sebagai *by product* produksi FAME dari sawit, signifikan menaikkan performa minyak pirolisis bahkan kualitasnya lebih baik dari bahan bakar diesel komersial. Riset selanjutnya akan

dilaksanakan serangkaian pengujian lebih detail pada minyak pirolisis dengan penambahan bio aditif untuk mendapatkan kondisi optimum penambahan aditif yang ekonomis.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT Arutmin Indonesia Site Satui atas dukungan, fasilitas, serta kerja sama yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian berjudul “Produksi, Karakterisasi dan Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Minyak (BBM) Berbasis Limbah Plastik Menggunakan Metode Pirolisis-Fraksinasi-Aditifisasi (Pifratif)”. Dukungan tersebut sangat membantu kelancaran penelitian hingga tersusunnya artikel ilmiah ini.

### Daftar Pustaka

- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Chandara, H.C., Sunjoto, & Sarto (2015). Plastic Recycling In Indonesia By Converting Plastic Wastes (PET, HDPE, LDPE, and PP) Into Plastic Pellets. *ASEAN Journal of Systems Engineering*, 3(2), 65-72.
- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (2021). Profil Peraturan 135.K/HK.02/MEM.M/2021 [PDF]. [https://migas.esdm.go.id/cms/uploads/regulasi/profil\\_peraturan\\_135.pdf](https://migas.esdm.go.id/cms/uploads/regulasi/profil_peraturan_135.pdf)
- Dyer, A. C., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2021). Catalytic Co-Pyrolysis of Biomass and Waste Plastics As a Route to Upgraded Bio-Oil. *Journal of the Energy Institute*, 97, 27–36.
- Fitri, N., Sulistia, D., Abraham, A., & Aditya, I. (2024a). The effect of Grinzeest bio-additives on BBM fuel consumption in mining vehicles at PT Arutmin Indonesia Kintap. *IJCR–Indonesian Journal of Chemical Research*, 9(2), 163–174.
- Fitri, N., Syahrizal, A. K. A., Hidayat, A., Dharma, I. A., Maulidiyah, R., Khofifah, Sukri, Q., & Syahputra, R. (2024b). Sintesis FAME dari jelantah sebagai bahan baku biosolar dan blending dengan bioaditif fraksi minyak atsiri serai wangi untuk optimalisasi pembakaran pada mesin diesel. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 76–100.
- Fitri, N., Mauludiyah, R., Sukri, Q., Syahputra, R., & Ila, I. (2024c). Inisiasi Z-fract formula sebagai bio-aditif efisiensi mesin industri. *IJCR–Indonesian Journal of Chemical Research*, 9(1), 49–61.
- Fitri, N., Riza, R., Akbari, M. K., Khonitah, N., Fahmi, R. L., & Fatimah, I. (2022). Identification of Citronella Oil Fractions as Efficient Bio-Additive for Diesel Engine Fuel. *Designs*, 6(1), 15.
- Jahiding, M., Mashuni, M., Hamid, F. H., Ilmawati, W. O. S., & Hamdana, R. (2024). The production of renewable fuels sago dregs and low-density polyethylene by pyrolysis and its characterization. *Science and Technology Indonesia*, 9(3), 565-576.
- Jahiding, M., Rizki, R. S., & Hasan, E. S. (2021). Investigating the effect of pyro-catalytic temperature on gasoline production from low density polyethylene (LDPE) plastics waste. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1899(1), 012126.
- Jahiding, M., Usman, I., Rizki, R. S., Hasan, E. S., & Mashuni, M. (2023). Chemical and physical properties of plastic fuel from high and low-density polyethylene waste produced by pyrolysis method. *In The 2nd International Symposium on Physics and Applications 2021*, 2604(1), 020013.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). *SIPSN – Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. Diakses 18 Oktober 2025, dari <https://sipsn.kemenlh.go.id/sipsn/>
- Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: a comparison. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), 364-373.
- Lim, Y. K., Lee, J. M., Jeong, C. S., Kim, J. R., & Yim, E. S. (2011). Improvement of Low Temperature Fuel Characteristics by Pour Point Depressant. *Tribology and Lubricants*, 27(2), 109-114.

- Liu, J., Chen, X., Chen, W., Xia, M., Chen, Y., Chen, H., ... & Yang, H. (2023). Biomass pyrolysis mechanism for carbon-based high-value products. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(3), 3157-3181.
- Mawaddah, S. M., Chalid, M., Maulidina, S. A., Ashanti, C. K., & Nugraha, A. F. (2023). Post-consumer recycling of polymers for sustainable 3D printing filament material. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 25(1), 55- 66.
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2020). Co-Pyrolysis of Waste Biomass and Waste Plastics (Polystyrene and Waste Nitrile Gloves) into Renewable Fuel and Value-Added Chemicals. *Carbon Resources Conversion*, 3, 145–155.
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889.
- Nabi, M. N., Hoque, S. M. N., & Akhter, M. S. (2009). Karanja (*Pongamia pinnata*) biodiesel production and fuel properties. *Renewable Energy*, 34(5), 1225-1228.
- Qian, Q., & Ren, J. (2024). From plastic waste to potential wealth: Upcycling technologies, process synthesis, assessment and optimization. *Science of the Total Environment*, 907, 167897.
- Rahman, M. M., & Abdullah, A. M. (2020). Pyrolysis of plastic waste: A review on plastic types, process parameters, and product properties. *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, 20(1), 23-35.
- Shahir, S. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., & Imran, A. (2014). A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 819-836.
- Singh, S. P., & Singh, D. (2017). Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 200–216.
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33-86.
- Wang, Z., Burra, K. G., Lei, T., & Gupta, A. K. (2021). Co-Pyrolysis of Waste Plastic and Solid Biomass for Synergistic Production of Biofuels and Chemicals—A Review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 84, 100899.
- Zhang, X., Zhou, J., Sun, S., Sun, R., & Qin, M. (2015). Numerical investigation of low NO<sub>x</sub> combustion strategies in tangentially-fired coal boilers. *Fuel*, 142, 215-221.