

Analisis Karakteristik Penguapan Campuran Bahan Bakar Solar Pertamina Dex dengan Butanol Sebagai Alternatif Energi yang Bersih

Fahrul Rozziq Hidayat¹, Achmad Faruq Alhikami², Ena Marlina³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang, Address
e-mail : rozziqrozziq@gmail.com

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang, Address
e-mail : alhikami@unisma.ac.id

³ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang, Address
e-mail : ena.marlina@unisma.ac.id

ABSTRACT

Permasalahan lingkungan dan ketergantungan dunia terhadap bahan bakar fosil terus menjadi perhatian utama dalam kebijakan energi global. Penelitian ini bertujuan untuk menilai bagaimana sifat penguapan bahan bakar campuran memengaruhi proses pembakaran, efisiensi energi, dan pembentukan emisi di mesin diesel. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium, yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik penguapan campuran bahan bakar solar dan butanol dengan variasi komposisi. Eksperimen dilakukan dalam kondisi terkendali untuk menganalisis fenomena fisik dari proses evaporasi bahan bakar. Campuran bahan bakar S95B5 menunjukkan kenaikan suhu yang relatif lebih lambat pada tahap awal pemanasan dibandingkan dengan solar murni (S100). campuran S95B5 lebih mudah membentuk uap pada suhu rendah, yang terlihat dari kestabilan suhu yang lebih rendah di awal pemanasan. Hal ini mengindikasikan bahwa butanol meningkatkan volatilitas bahan bakar secara keseluruhan, sehingga dapat mempercepat proses penguapan saat pemanasan berlangsung. campuran S95B5 memiliki titik nyala sebesar 47.5°C, yang lebih rendah secara signifikan dibandingkan dengan solar murni (S100) sebesar 63°C berdasarkan data literatur. Penurunan ini secara langsung menunjukkan bahwa campuran bahan bakar yang mengandung butanol lebih mudah terbakar, karena uap bahan bakar mudah terbentuk pada suhu yang lebih rendah dan dapat menyala dengan cepat saat kontak dengan sumber api. Penambahan 5% n-butanol ke dalam solar (S95B5) secara umum memberikan perubahan yang signifikan terhadap karakteristik fisik dan termal bahan bakar, serta meningkatkan potensi performa dalam proses pembakaran awal.

Keywords : *Bahan Bakar Solar, Butanol, Energi Terbarukan, Energi Bersih*

INTRODUCTION

Permasalahan lingkungan dan ketergantungan dunia terhadap bahan bakar fosil terus menjadi perhatian utama dalam kebijakan energi global. Diesel, yang banyak digunakan dalam mesin pembakaran internal, dikenal akan efisiensinya namun tetap menjadi penyumbang signifikan terhadap pencemaran udara. Emisi dari pembakaran diesel, seperti partikulat (PM), nitrogen oksida (NOx), karbon monoksida (CO), dan hidrokarbon tak terbakar (UHC), berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Chen et al., 2013; Li et al., 2018).

Dengan meningkatnya tekanan untuk mengurangi emisi karbon dan memenuhi target energi berkelanjutan, para peneliti telah mengeksplorasi berbagai alternatif, termasuk penggunaan blending fuels yang menggabungkan bahan bakar fosil dengan

senyawa alkohol seperti butanol. Dibandingkan etanol dan metanol, butanol (terutama n-butanol) memiliki beberapa keunggulan seperti nilai kalor tinggi, titik didih yang lebih tinggi, serta kompatibilitas yang baik dengan sistem injeksi bahan bakar mesin diesel (Altun et al., 2011; Zhang et al., 2022). Selain itu, n-butanol dapat diperoleh dari sumber terbarukan seperti biomassa melalui fermentasi ABE (acetone-butanol-ethanol), menjadikannya kandidat penting dalam pengembangan bahan bakar bio-campuran (Algayyim & Wandel, 2022).

Salah satu aspek krusial dalam penggunaan campuran diesel-butanol adalah karakteristik penguapannya. Proses penguapan memengaruhi homogenitas campuran udara-bahan bakar sebelum proses pembakaran berlangsung. Butanol, dengan latent heat of vaporization yang lebih tinggi dibandingkan diesel, mempengaruhi pendinginan

lokal di dalam silinder pembakaran yang berdampak pada formasi NO_x dan efisiensi termal (Tipanluisa et al., 2022; Mahla et al., 2023).

Beberapa studi menunjukkan bahwa penambahan butanol ke dalam diesel dapat menurunkan emisi NO_x dan partikel melalui efek pendinginan penguapan, walaupun efek ini bergantung pada konsentrasi campuran dan kondisi operasi mesin (Yilmaz et al., 2014; Zhang et al., 2019). Di sisi lain, penggunaan butanol dapat memperpanjang ignition delay dan mempercepat premixed combustion phase yang dapat meningkatkan tekanan puncak dan efisiensi pembakaran (Xia et al., 2019; Singh et al., 2020).

Oleh karena itu, penting dilakukan analisis lebih lanjut mengenai perilaku penguapan campuran solar-butanol dengan variasi konsentrasi yang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk menilai bagaimana sifat penguapan bahan bakar campuran memengaruhi proses pembakaran, efisiensi energi, dan pembentukan emisi di mesin diesel. Studi ini akan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan bahan bakar alternatif yang lebih bersih dan efisien dalam mendukung transisi energi yang berkelanjutan..

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium, yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik penguapan campuran bahan bakar solar dan butanol dengan variasi komposisi. Eksperimen dilakukan dalam kondisi terkendali untuk menganalisis fenomena fisik dari proses evaporasi bahan bakar.

Variabel pada penelitian ini terdiri atas variabel bebas yakni Komposisi campuran solar-butanol, variabel terikat antara lain Laju penguapan, pola uap, suhu bahan, dan variabel control Volume awal bahan bakar, suhu ruangan.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang pada bulan Juni 2025.

Bahan dan Alat Penelitian

1. Bahan
 - Solar (Diesel) komersial
 - n-Butanol teknis ($\geq 99\%$ kemurnian)
 - Air suling (untuk kalibrasi suhu dan uji kontrol)
2. Alat
 - Termokopel tipe K
 - Kamera resolusi tinggi untuk dokumentasi visual
 - Gelas beaker 100 ml
 - Water bath (pemanas air)
 - Stopwatch
 - Hot plate
 - Thermometer digital

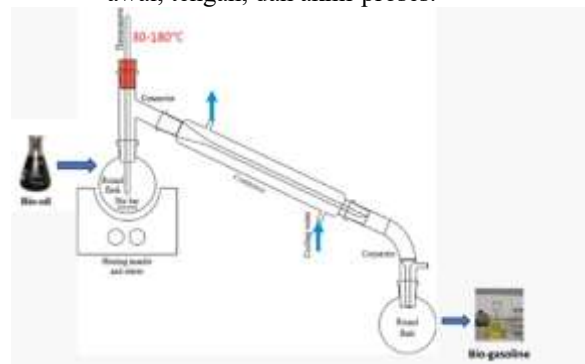
Prosedur Penelitian

1. Persiapan Sampel Campuran
Campuran bahan bakar disiapkan dengan perbandingan volume berikut:

Tabel 1. Persiapan Sampel

Kode Sampel	Komposisi Solar: Butanol (% v/v)
S100	100:00:00
S95B5	95:5:00

2. Prosedur Uji Penguapan
 - a. Gelas beaker diisi dengan 100 ml campuran bahan bakar sesuai komposisi.
 - b. Gelas beaker diletakkan dalam water bath yang dijaga pada suhu 60°C.
 - c. Termokopel dimasukkan untuk mencatat suhu cairan setiap 1 menit.
 - d. Timbangan digital digunakan untuk mencatat massa bahan bakar setiap 2 menit selama 30 menit.
 - e. Dokumentasi visual dilakukan pada saat awal, tengah, dan akhir proses.



Gambar 1. Destilasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 4.1 berikut menyajikan informasi umum terkait pelaksanaan pengujian karakteristik penguapan bahan bakar solar murni (Pertamina Dex/S100) dan campuran solar-butanol (S95B5) secara rinci.

Tabel 4. 1 Rangkuman Umum Pengujian

Aspek	Deskripsi
Lokasi Pengujian	Laboratorium Terpadu, Universitas Islam Malang
Waktu Pengujian	Bulan Juni 2025
Kondisi Lingkungan	Suhu ruangan ± 27 °C, ventilasi baik, kelembapan relatif stabil (tidak dicatat secara kuantitatif)
Jenis Pengujian	Eksperimen laboratorium penguapan bahan bakar dengan metode pemanasan tidak

	langsung menggunakan water bath
Alat Utama	Timbangan digital (± 0.01 g), termokopel tipe K, thermometer digital, kamera resolusi tinggi, water bath, stopwatch, hot plate, gelas beaker
Bahan yang Digunakan	- Pertamina Dex (solar murni) - n-Butanol teknis ($\geq 99\%$) - Air suling untuk kalibrasi suhu
Volume Sampel	100 ml per sampel
Komposisi Sampel	- S100: 100% Pertamina Dex - S95B5: 95% Pertamina Dex + 5% Butanol (v/v)
Tujuan Pengujian	- Mengamati profil penguapan dan laju pengurangan massa - Menilai titik nyala - Menganalisis efek penambahan butanol terhadap volatilitas dan keamanan bahan bakar
Prosedur Singkat	- Pemanasan bahan dalam water bath 60°C - Pengukuran suhu tiap 1 menit dan massa tiap 2 menit selama 30 menit - Dokumentasi visual dilakukan di menit ke-0, 15, dan 30

Hasil Uji Profil Penguapan

Pengamatan dilakukan untuk mengetahui respon termal (kenaikan suhu) dari dua jenis bahan bakar yaitu Pertamina Dex murni (S100) dan campuran Pertamina Dex dengan 5% n-butanol (S95B5) saat dilakukan pemanasan bertahap hingga volume mencapai 30 mL. Parameter yang diukur adalah suhu bahan bakar seiring bertambahnya volume yang dipanaskan.

Data Suhu Terhadap Volume Pemanasan

Tabel 4.2 menyajikan data hasil uji terhadap Pertamina Dex murni (S100), sedangkan Tabel 4.3 menyajikan data campuran 95% Pertamina Dex dan 5% Butanol (S95B5).

Tabel 4. 2 Suhu Pemanasan Pertamina Dex Murni (S100)

PERTAMINA DEX 100 ml			Total Volume (ml)		Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
			ml	vol. %	
Volume awal	100	ml	3	3%	278
			6	6%	284

			9	9%	288
			12	12%	292
			15	15%	295
			18	18%	299
			21	21%	302
			24	24%	305
			27	27%	308
			30	30%	310

Tabel 4. 3 Suhu Pemanasan Campuran 95% Dex + 5% Butanol (S95B5)

PERTAMINA DEX 95 ml			Vol	Vol	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
BUTANOL 5 ml			mL	vol. %	
			3	3%	235
Volume awal	100	ml	6	6%	275
			9	9%	281
			12	12%	287
			15	15%	292
			18	18%	296
			21	21%	300
			24	24%	305
			27	27%	308
			30	30%	312

Data yang disajikan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 menunjukkan hubungan antara penambahan volume bahan bakar yang dipanaskan dan suhu yang tercapai dalam eksperimen pemanasan menggunakan water bath pada suhu tetap. Tabel 4.2 memperlihatkan hasil pengujian untuk Pertamina Dex murni (S100), sedangkan Tabel 4.3 menggambarkan hasil pengujian pada campuran 95% Pertamina Dex dan 5% n-Butanol (S95B5). Dalam setiap pengujian, volume awal bahan bakar yang digunakan adalah 100 mL. Volume tambahan bahan bakar sebesar 3 mL dimasukkan secara bertahap, dan suhu bahan bakar dicatat pada tiap tahap penambahan volume.

Pada sampel S100, terlihat bahwa suhu bahan bakar meningkat secara bertahap seiring dengan bertambahnya volume, dari suhu awal 278°C pada 3% volume menjadi 310°C pada volume 30%. Kenaikan

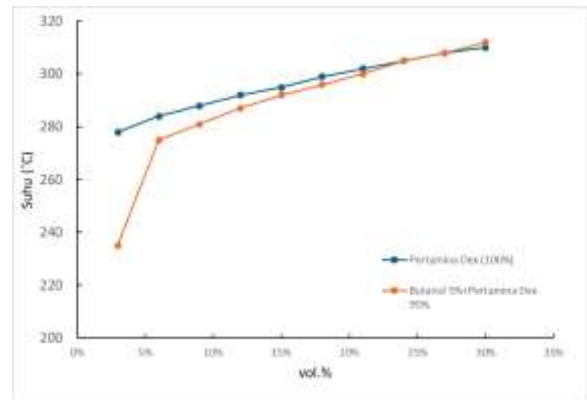
suhu pada S100 berlangsung cukup linier dan stabil, mencerminkan karakteristik termal solar murni yang cenderung memiliki respon termal yang cepat dan langsung terhadap pemanasan. Setiap penambahan volume sebesar 3 mL menyebabkan peningkatan suhu sekitar 3–6°C, yang menunjukkan bahwa bahan bakar ini memiliki sifat penyerapan panas yang relatif rendah dan efisiensi perpindahan panas yang baik.

Berbeda dengan S100, pada campuran S95B5, suhu awal pada volume 3% tercatat lebih rendah, yaitu 235°C. Suhu ini secara signifikan lebih rendah dari suhu awal pada solar murni, menunjukkan bahwa penambahan n-butanol menyebabkan efek pendinginan awal yang cukup besar. Hal ini berkaitan erat dengan sifat fisik butanol yang memiliki kalor penguapan lebih tinggi dan titik didih lebih rendah, sehingga menyerap lebih banyak energi sebelum terjadi peningkatan suhu yang signifikan. Namun, setelah pemanasan berlanjut dan volume mencapai di atas 15% (≥ 18 mL), suhu campuran mulai menyamai bahkan melampaui suhu bahan bakar solar murni, dengan suhu akhir pada volume 30% mencapai 312°C, atau 2°C lebih tinggi dibandingkan S100.

Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun campuran butanol menunjukkan respon termal lambat pada fase awal, energi termal akan terakumulasi lebih cepat pada fase berikutnya, memungkinkan campuran mencapai suhu tinggi yang sama atau lebih tinggi dari bahan bakar murni. Hal ini dapat memiliki implikasi positif dalam proses pembakaran bahan bakar di mesin diesel, karena campuran dengan butanol memiliki kemampuan untuk menguap lebih merata setelah melewati fase inersia termal awal. Kondisi ini mendukung pencampuran udara-bahan bakar yang lebih homogen, yang penting dalam proses pembakaran premixed pada mesin diesel modern.

Kesimpulan awal yang dapat ditarik dari dua tabel tersebut adalah bahwa campuran Pertamina Dex dan butanol memberikan karakteristik termal yang unik dan berbeda dari solar murni, terutama dalam hal kemampuan menyerap panas dan tingkat kestabilan suhu selama pemanasan bertahap. Efek pendinginan awal dari butanol memberikan keuntungan dalam menurunkan temperatur lokal, yang dapat berdampak pada pengurangan emisi NO_x, namun di sisi lain memerlukan waktu lebih untuk mencapai kestabilan suhu sistem. Oleh karena itu, pemahaman terhadap dinamika suhu bahan bakar seperti ini sangat penting dalam merancang strategi pencampuran bahan bakar alternatif berbasis alkohol dengan bahan bakar fosil.

Pembahasan Profil Penguapan (Berdasarkan Perilaku Termal)



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan 2 jenis Bahan Bakar

Gambar di atas menunjukkan grafik hubungan antara persentase volume bahan bakar (vol.%) terhadap suhu (°C) pada dua jenis bahan bakar yang diuji, yaitu Pertamina Dex murni (S100) dan campuran 95% Pertamina Dex dengan 5% n-Butanol (S95B5). setiap kali terbentuk 3 ml uap dari proses pemanasan bahan bakar, suhu saat itu harus dicatat secara sistematis. Hal ini berlaku secara berulang untuk volume berikutnya hingga mencapai suhu maksimum yang ditentukan. Tujuan dari pencatatan volume uap terhadap suhu ini adalah untuk mengetahui titik-titik suhu di mana komponen dalam bahan bakar mulai menguap, sekaligus memberikan informasi tentang kestabilan dan komposisi fraksional bahan bakar. Pendekatan ini memungkinkan analisis terhadap volatilitas dan distribusi suhu penguapan dari berbagai fraksi bahan.

Kurva berwarna biru mewakili Pertamina Dex murni, sementara kurva oranye menunjukkan campuran S95B5. Terlihat jelas bahwa pada volume awal (3% vol.), suhu S95B5 tercatat jauh lebih rendah dibandingkan S100, yaitu sekitar 235°C berbanding 278°C, menunjukkan perbedaan yang sangat mencolok pada fase awal pemanasan.

Namun, setelah melewati titik volume 6%–9%, grafik S95B5 menunjukkan kenaikan suhu yang lebih tajam dan mulai mendekati suhu yang dicapai oleh Pertamina Dex murni. Seiring bertambahnya volume bahan bakar, perbedaan suhu antara kedua sampel semakin mengecil. Bahkan, pada volume 30%, suhu S95B5 dan S100 nyaris sama, masing-masing berada di kisaran 311–312°C. Ini menunjukkan bahwa meskipun S95B5 memiliki respon termal awal yang lambat, campuran ini mampu mengejar dan menyamai kestabilan suhu bahan bakar murni setelah melewati fase pemanasan awal.

Polanya menunjukkan bahwa S95B5 mengalami efek inersia termal awal, tetapi kemudian memasuki fase pemanasan yang lebih efisien karena

butanol yang sudah mulai sepenuhnya mengalami transisi fasa. Dalam konteks pembakaran, hal ini dapat memberikan manfaat dalam mengurangi suhu puncak lokal pada awal pembakaran, sehingga berpotensi menurunkan pembentukan emisi NOx. Selain itu, pada volume tinggi, kesetaraan suhu antara S95B5 dan S100 membuktikan bahwa campuran ini tetap mampu mencapai suhu operasional yang optimal, sehingga layak digunakan dalam sistem pembakaran mesin diesel tanpa memerlukan modifikasi besar pada sistem injeksi atau ruang bakar.

Kesimpulannya, grafik ini memperkuat temuan bahwa penambahan 5% butanol ke dalam solar murni memberikan perubahan signifikan terhadap karakteristik termal awal, tetapi tetap menunjukkan kemampuan termal yang kompetitif setelah fase pemanasan berlangsung. Karakter ini menjadikan campuran solar-butanol sebagai bahan bakar alternatif yang menjanjikan untuk aplikasi energi bersih, dengan pertimbangan pengelolaan suhu dan waktu pemanasan yang tepat dalam sistem mesin.

Hasil Uji Titik Nyala

Titik nyala merupakan parameter penting dalam menilai tingkat keamanan bahan bakar terhadap risiko kebakaran. Titik nyala adalah suhu terendah di mana uap dari bahan bakar akan menyala sesaat ketika diberikan sumber api dalam kondisi tekanan atmosfer tertentu. Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan titik nyala antara bahan bakar Pertamina Dex murni (S100) dan campuran dengan butanol (S95B5).

Data Titik Nyala

Pengujian titik nyala dilakukan menggunakan alat Automatic Closed Cup Flash Point Tester, dengan metode uji tertutup yang sesuai dengan standar ASTM D93. Dari pengujian tersebut, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 4.4 Hasil Uji Flash Point Tester

<i>Automatic Closed Cup Flash Point Tester</i>	
<i>Flash Point</i>	47,5 °C
<i>Present Flash point</i>	70,0 °C
<i>Pressure</i>	92,2 kPa
<i>Tester</i>	
<i>Sample No</i>	

Tabel 4. 4 Hasil Uji Titik Nyala Bahan Bakar

Kode Sampel	Komposisi	Titik Nyala (°C)
S100	100% Pertamina Dex	63
S95B5	95% Pertamina Dex + 5% Butanol	47.5

Pembahasan Titik Nyala

Hasil pengujian titik nyala menunjukkan bahwa penambahan 5% n-butanol ke dalam solar murni (Pertamina Dex) menghasilkan penurunan nilai titik nyala yang cukup signifikan. Berdasarkan data pengukuran aktual yang dilakukan menggunakan alat Automatic Closed Cup Flash Point Tester, titik nyala dari campuran solar dan butanol (S95B5) tercatat sebesar 47.5°C, lebih rendah dibandingkan dengan titik nyala solar murni (S100) yang tercatat sekitar 63°C. Penurunan ini secara langsung menunjukkan bahwa keberadaan n-butanol dalam campuran berpengaruh besar terhadap karakteristik pembakaran awal dari bahan bakar.

Faktor utama yang menyebabkan penurunan titik nyala tersebut adalah sifat fisik dan kimia dari n-butanol itu sendiri. N-butanol memiliki titik didih dan titik nyala yang lebih rendah jika dibandingkan dengan fraksi hidrokarbon dalam solar, serta memiliki tekanan uap yang lebih tinggi. Akibatnya, campuran solar-butanol lebih mudah menghasilkan uap bahan bakar yang bisa bercampur dengan udara dalam jumlah yang cukup untuk membentuk campuran yang mudah terbakar, bahkan pada suhu lingkungan yang relatif lebih rendah. Selain itu, struktur molekul butanol yang lebih sederhana dan mengandung gugus hidroksil (-OH) menjadikannya lebih reaktif secara termal, sehingga mempercepat proses pelepasan uap dan membentuk nyala lebih cepat.

Penurunan titik nyala ini memiliki dua sisi implikasi yang perlu diperhatikan. Di satu sisi, kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran solar-butanol menjadi lebih mudah terbakar, yang tentu saja menimbulkan tantangan dalam aspek penyimpanan dan distribusi, terutama jika bahan bakar disimpan dalam kondisi lingkungan dengan suhu tinggi. Dalam konteks ini, perhatian khusus perlu diberikan terhadap keamanan penanganan bahan bakar, seperti desain tangki penyimpanan, lokasi penyimpanan yang memiliki sistem ventilasi memadai, penghindaran sumber api atau panas terbuka di sekitar fasilitas penyimpanan, serta penggunaan material tangki dan saluran bahan bakar yang tahan terhadap tekanan dan suhu tinggi. Di sisi lain, sifat mudah terbakar ini juga dapat memberikan keuntungan dalam aplikasi mesin diesel, khususnya dalam fase cold-start, yaitu saat mesin dinyalakan dalam kondisi suhu rendah. Campuran yang mudah terbakar akan membantu mempercepat pencapaian kondisi nyala awal, sehingga meningkatkan efisiensi awal pembakaran dan mengurangi pembentukan residu yang umum terjadi pada bahan bakar yang sulit menyala.

Hasil ini juga didukung oleh beberapa temuan dalam literatur, seperti penelitian yang dilakukan oleh

Xia et al. (2019) dan Singh et al. (2020), yang melaporkan bahwa penambahan alkohol ke dalam bahan bakar diesel mampu menurunkan titik nyala secara signifikan, serta meningkatkan volatilitas dan kemudahan pembakaran bahan bakar pada suhu rendah. Penelitian-penelitian tersebut menguatkan bahwa penggunaan butanol sebagai aditif dalam bahan bakar solar memang dapat mengubah sifat dasar bahan bakar secara signifikan, yang pada akhirnya memengaruhi karakteristik pembakaran, efisiensi energi, dan juga aspek keselamatan.

Dari sisi implikasi keselamatan, bahan bakar solar murni (S100) masih berada dalam batas aman untuk penyimpanan dan distribusi dalam sistem konvensional, karena titik nyala yang cukup tinggi memastikan bahwa bahan tidak mudah menguap dan menyala secara spontan pada suhu ruang biasa. Sebaliknya, campuran S95B5 yang memiliki titik nyala 47.5°C mendekati ambang batas minimum titik nyala yang diperbolehkan untuk bahan bakar diesel dalam standar keselamatan penyimpanan dan transportasi. Oleh sebab itu, penggunaan campuran solar-butanol dalam skala besar harus disertai dengan protokol keselamatan tambahan, termasuk ventilasi ruang penyimpanan yang baik untuk mencegah akumulasi uap bahan bakar, penghindaran sumber panas terbuka di area kerja dan distribusi, serta pemilihan material tangki dan saluran bahan bakar yang kompatibel dan tahan terhadap tekanan termal. Pendekatan ini akan menjamin bahwa penggunaan bahan bakar campuran tidak hanya efektif dalam mendukung efisiensi dan kelestarian lingkungan, tetapi juga aman dalam operasional sehari-hari.

Interpretasi Keseluruhan

Pengujian terhadap dua jenis bahan bakar, yakni solar murni (S100) dan campuran solar dengan 5% butanol (S95B5), telah memberikan gambaran yang komprehensif mengenai karakteristik termal dan volatilitas masing-masing sampel. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, terdapat beberapa temuan penting yang dapat diinterpretasikan secara menyeluruh sebagai berikut:

1. Respons Termal Terhadap Pemanasan

Dari hasil pengujian suhu terhadap volume bahan bakar, terlihat bahwa solar murni (S100) menunjukkan kenaikan suhu yang lebih cepat pada tahap-tahap awal pemanasan dibandingkan dengan campuran S95B5. Hal ini mengindikasikan bahwa solar memiliki respons termal yang langsung dan tidak mengalami hambatan dalam proses pemanasan awal. Sebaliknya, pada campuran S95B5, kenaikan suhu berlangsung lebih lambat di awal, yang dapat dijelaskan oleh karakteristik n-butanol yang memiliki kalor penguapan lebih tinggi. Artinya, butanol memerlukan energi lebih besar untuk menguap,

sehingga menyerap lebih banyak panas dari sistem sebelum suhu campuran dapat meningkat secara signifikan.

Namun demikian, seiring bertambahnya volume bahan bakar (terutama setelah mencapai 18 mL), perbedaan suhu antara S100 dan S95B5 mulai mengecil. Bahkan pada volume maksimum (30 mL), suhu campuran S95B5 tercatat sedikit lebih tinggi dibandingkan S100, yaitu 312°C berbanding 310°C. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat perbedaan pada fase awal, campuran butanol mampu mengejar bahkan menyamai kestabilan termal solar murni setelah pemanasan berlanjut. Artinya, setelah proses inersia termal teratasi, bahan bakar campuran ini tidak hanya layak secara termal, tetapi juga menunjukkan performa pemanasan yang kompetitif.

2. Volatilitas dan Karakteristik Penguapan

Dalam penelitian ini, volatilitas bahan bakar tidak diukur secara langsung melalui penurunan massa akibat penguapan, melainkan dievaluasi melalui respon suhu terhadap pemanasan bertahap. Meskipun pendekatan ini bersifat tidak langsung, hasilnya tetap memberikan informasi penting. Penambahan butanol terlihat menurunkan kestabilan suhu pada volume awal, yang secara tidak langsung menunjukkan peningkatan kecenderungan untuk menguap lebih cepat pada suhu rendah, fenomena yang dikenal sebagai *early-stage evaporation*.

Hal ini dapat memberikan keuntungan pada aspek atomisasi bahan bakar, khususnya dalam sistem injeksi mesin diesel modern. Uap bahan bakar yang terbentuk lebih cepat dapat membantu proses pencampuran yang lebih homogen antara bahan bakar dan udara, yang pada akhirnya berdampak pada efisiensi pembakaran dan reduksi emisi. Karakter ini sangat penting dalam mencapai pembakaran yang bersih dan efisien pada kendaraan berbahan bakar campuran.

3. Titik Nyala dan Keamanan Penggunaan

Salah satu temuan paling signifikan dalam penelitian ini adalah perbedaan titik nyala antara kedua sampel bahan bakar. Berdasarkan pengujian menggunakan alat automatic closed cup flash point tester, diketahui bahwa titik nyala campuran S95B5 adalah 47.5°C, lebih rendah dibandingkan dengan solar murni (S100) yang berada pada 63°C. Penurunan sebesar hampir 16°C ini cukup besar dan memiliki konsekuensi langsung terhadap aspek keselamatan bahan bakar.

Terdapat dua implikasi utama dari penurunan titik nyala ini. Pertama, dari segi keuntungan operasional, bahan bakar campuran lebih mudah menyala pada suhu rendah, yang sangat berguna pada kondisi cold-start atau suhu lingkungan rendah. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi pembakaran awal dan mengurangi pembentukan emisi awal seperti

hidrokarbon tak terbakar (unburned HC). Kedua, dari sisi risiko keselamatan, titik nyala yang lebih rendah berarti bahwa bahan bakar lebih mudah terbakar pada suhu lingkungan tinggi, sehingga memerlukan pengelolaan penyimpanan dan distribusi yang lebih ketat, termasuk pengaturan ventilasi, lokasi penyimpanan yang jauh dari sumber panas terbuka, serta penggunaan material tangki dan pipa yang sesuai.

4. Potensi Aplikasi

Dengan mempertimbangkan dua parameter utama yaitu respons termal dan titik nyala, dapat disimpulkan bahwa campuran solar dengan 5% butanol memiliki potensi yang menjanjikan sebagai bahan bakar alternatif, khususnya untuk aplikasi mesin diesel yang membutuhkan efisiensi pembakaran awal yang tinggi. Selain itu, penggunaan butanol yang berasal dari sumber biomassa juga berkontribusi terhadap upaya pengurangan emisi karbon dan diversifikasi sumber energi.

Namun demikian, implementasi bahan bakar ini dalam skala luas tetap memerlukan kajian lanjutan, khususnya terkait performa mesin secara menyeluruh, efisiensi termal, tingkat emisi gas buang, serta daya tahan sistem injeksi terhadap campuran alkohol. Tak kalah penting, penanganan bahan bakar ini harus disertai dengan protokol keselamatan tambahan, karena sifatnya yang lebih mudah terbakar dibandingkan solar murni. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa campuran S95B5 layak dipertimbangkan sebagai alternatif bahan bakar bersih, dengan syarat pengujian lanjutan dan penerapan sistem keselamatan yang memadai dilakukan secara menyeluruh.

Bahan bakar dipanaskan dari suhu ruang, sekitar 25 °C, hingga suhu maksimum 360 °C secara bertahap. Proses ini dilakukan untuk menciptakan kondisi di mana semua fraksi ringan dan berat dalam campuran bahan bakar dapat diuapkan dan dianalisis. Pemanasan hingga suhu tinggi diperlukan untuk mengamati seluruh karakter penguapan, dari senyawa yang mudah menguap seperti butanol, hingga fraksi berat dari solar yang memerlukan suhu lebih tinggi. Dengan begitu, peneliti dapat menentukan distribusi titik uap dan potensi kestabilan bahan terhadap panas ekstrem.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan mengenai karakteristik penguapan dan titik nyala dari bahan bakar Pertamina Dex (S100) dan campurannya dengan 5% butanol (S95B5), maka dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Perilaku Termal:

Campuran bahan bakar S95B5 menunjukkan kenaikan suhu yang relatif lebih lambat pada tahap awal pemanasan dibandingkan dengan solar murni (S100). Hal ini disebabkan oleh karakteristik termofisika dari n-butanol, yang memiliki kalor penguapan (latent heat) yang lebih tinggi dibandingkan senyawa hidrokarbon dalam solar. Butanol memerlukan energi tambahan untuk mencapai perubahan fasa dari cair menjadi uap, sehingga menyerap lebih banyak panas pada awal proses pemanasan. Namun demikian, seiring dengan peningkatan volume dan waktu pemanasan, suhu bahan bakar campuran mulai mendekati suhu solar murni, dan bahkan pada titik volume maksimum (30 mL), suhu S95B5 sedikit melampaui suhu S100, yakni 312°C dibandingkan 310°C. Hal ini menunjukkan bahwa setelah melewati fase inersia termal awal, campuran butanol mampu menyesuaikan dan menunjukkan kestabilan termal yang kompetitif, bahkan lebih tinggi dari bahan bakar murni.

2. Volatilitas dan Potensi Penguapan:

Meskipun dalam penelitian ini tidak dilakukan pengukuran massa evaporasi secara langsung, interpretasi volatilitas dilakukan berdasarkan respon suhu terhadap pemanasan. Hasil menunjukkan bahwa campuran S95B5 lebih mudah membentuk uap pada suhu rendah, yang terlihat dari kestabilan suhu yang lebih rendah di awal pemanasan. Hal ini mengindikasikan bahwa butanol meningkatkan volatilitas bahan bakar secara keseluruhan, sehingga dapat mempercepat proses penguapan saat pemanasan berlangsung. Dalam konteks penggunaannya pada mesin diesel, peningkatan volatilitas ini memberikan keuntungan, karena memungkinkan terjadinya pembentukan uap bahan bakar lebih cepat, yang kemudian mendukung proses atomisasi dan pencampuran bahan bakar dengan udara secara lebih homogen. Kombinasi tersebut sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pembakaran, terutama pada sistem injeksi tekanan tinggi.

3. Titik Nyala:

Hasil uji titik nyala menunjukkan bahwa campuran S95B5 memiliki titik nyala sebesar 47.5°C, yang lebih rendah secara signifikan dibandingkan dengan solar murni (S100) sebesar 63°C berdasarkan data literatur. Penurunan ini secara langsung menunjukkan bahwa campuran bahan bakar yang mengandung butanol lebih mudah terbakar, karena uap bahan bakar mudah terbentuk pada suhu yang lebih rendah dan dapat menyala dengan cepat saat kontak dengan sumber api. Dari sisi aplikasi, karakteristik ini memberikan keuntungan dalam proses cold-start mesin diesel, yaitu pada saat suhu lingkungan rendah dan mesin membutuhkan bahan bakar yang cepat menyala untuk menghindari misfire atau pembakaran tidak sempurna. Namun, penurunan

titik nyala juga menimbulkan tantangan dalam aspek keselamatan, karena bahan bakar menjadi lebih rentan terhadap penyalan spontan saat disimpan dalam lingkungan bersuhu tinggi. Oleh karena itu, penggunaan bahan bakar campuran seperti ini harus dibarengi dengan protokol penyimpanan dan distribusi yang aman dan sesuai standar.

4. Kelayakan Sebagai Bahan Bakar Alternatif:

Penambahan 5% *n*-butanol ke dalam solar (S95B5) secara umum memberikan perubahan yang signifikan terhadap karakteristik fisik dan termal bahan bakar, serta meningkatkan potensi performa dalam proses pembakaran awal. Campuran ini terbukti mampu menunjukkan perilaku termal yang efisien setelah fase pemanasan awal terlewati dan memperlihatkan kecenderungan volatilitas yang tinggi, yang dapat menguntungkan dalam membentuk campuran homogen di dalam ruang bakar. Dengan demikian, S95B5 dapat dipertimbangkan sebagai bahan bakar alternatif yang layak digunakan, terutama pada sistem mesin diesel modern yang mendukung bahan bakar campuran.

Namun demikian, perlu ditekankan bahwa meskipun campuran ini menunjukkan kinerja positif dari aspek penguapan dan pembakaran awal, terdapat tantangan dari sisi penyimpanan dan keamanan, khususnya karena titik nyala yang lebih rendah. Oleh karena itu, disarankan agar dilakukan pengujian lebih lanjut secara langsung pada mesin diesel, termasuk analisis performa menyeluruh (torsi, daya, konsumsi bahan bakar spesifik), uji emisi gas buang (CO, NO_x, HC, dan partikulat), serta pengaruh terhadap komponen sistem injeksi dan ruang bakar dalam jangka panjang. Dengan pengujian lanjutan tersebut, pemanfaatan butanol sebagai aditif bahan bakar tidak hanya akan terbukti secara laboratorium, tetapi juga secara praktis dan aplikatif dalam mendukung transisi menuju energi bersih dan terbarukan.

Untuk pengembangan lebih lanjut dan pemanfaatan bahan bakar campuran solar-butanol dalam skala aplikasi nyata

REFERENCES

A. Hardjono. 2007. *Teknologi Minyak Bumi*. Yogyakarta: Gajah Mada University press. Hal. 87-96.

S Amin. 2007. *Cara Memproduksi Biodiesel Dari Berbagai Bahan Baku Nabati*. Serpong: BPPT PRESS dalam Sri Poernomo Sari dan Dian Permana Putra. 2012. *Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Biodiesel M30 Dari Minyak Jelantah Dengan Katalis*

0,25% Naoh Terhadap Unjuk Kerja Motor Diesel S-1110. Universitas Guna Darma.

Hossain A. B. M. S., Nasrulhaq Boyce A., Salleh A. and Chandran S. 2010. Biodiesel production from waste soybean oil biomass as renewable energy and environmental recycled process. Programme of Biotechnology, Institute of Biological Sciences, Faculty of Science, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia. Hal. 4234.

Altun, S., Oner, C., Yasar, F., & Adin, H. (2011). Effect of *n*-butanol blending with a blend of diesel and biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(15), 9345–9351.

Chen, Z., Liu, J., Han, Z., Du, B., Liu, Y., & Lee, C. (2013). Study on performance and emissions of a passenger-car diesel engine fueled with butanol–diesel blends. *Energy*, 55, 638–646.

Tipanluisa, L., Thakkar, K., Fonseca, N., Lee, C. F., & Armas, O. (2022). Investigation of diesel/*n*-butanol blends as drop-in fuel for heavy-duty diesel engines: Combustion, performance, and emissions. *Energy Conversion and Management*, 259, 115492.

Zhang, X., Li, T., He, R., & Chen, R. (2019). Study on the physicochemical properties and spray and combustion characteristics of 1-butanol/diesel fuel blends in a constant-volume combustion chamber. *Energy & Fuels*, 33(9), 8551–8563.

Algayyim, S. J. M., & Wandel, A. P. (2022). Performance and emission levels of butanol, acetone-butanol-ethanol, butanol-acetone/diesel blends in a diesel engine. *Biofuels*, 13(4), 393–402.

Mahla, S. K., Goga, G., Cho, H. M., & Dhir, A. (2023). Separate effect of biodiesel, *n*-butanol, and biogas on performance and emission characteristics of diesel engine: A review. *Biomass Conversion and Biorefinery*.

Yilmaz, N., Vigil, F. M., Benalil, K., Davis, S. M., & Calva, A. (2014). Effect of biodiesel–butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 135, 46–50.

- Xia, Q., Wang, K., Han, Z., & Tian, W. (2019). A comparative study of combustion and emission characteristics of butanol isomers on a diesel engine with dual fuel butanol isomers/diesel compound combustion. *Fuel*, 253, 1234–1245.
- Singh, R., Singh, S., & Kumar, M. (2020). Impact of *n*-butanol as an additive with eucalyptus biodiesel–diesel blends on the performance and emission parameters of the diesel engine. *Fuel*, 278, 118178.