

STUDI STABILITAS TERMAL DAN SIFAT FISIKOKIMIA CAMPURAN BIODIESEL B40 MENGGUNAKAN KO-SOLVEN ALKOHOL DAN ADITIF

Katriel Dipta Rama Silaban¹, Tedi Kurniadi², Muhammad Naufal Rizky Wibowo³
silabankatriel@gmail.com¹, kurniadi75@gmail.com², naufal.r.wibowo11@gmail.com³
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar B40 memiliki kendala teknis terkait viskositas yang tinggi dan kerentanan terhadap pemisahan fasa, terutama pada suhu rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan ko-solven (etanol dan n-butanol) serta zat aditif terhadap stabilitas fasa dan sifat fisikokimia B40. Pengujian diawali dengan pencampuran sampel menggunakan magnetic stirrer (200 rpm, 10 menit). Stabilitas campuran dievaluasi melalui uji kontrol suhu termal (10°C–90°C) dan uji stabilitas penyimpanan selama 20 hari pada tiga kondisi lingkungan (ruang terbuka, ruang tertutup 28°C, dan ruang pendingin). Karakteristik fisikokimia dianalisis melalui uji densitas, viskositas, prakira titik beku, dan kadar air dengan menggunakan dua bahan dasar berbeda (HSD dan Solar Pertamina). Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran terbukti stabil secara termodinamik, tidak mengalami pemisahan fasa makroskopis, dan tetap homogen baik selama siklus suhu maupun penyimpanan 20 hari. Secara fisikokimia, penambahan etanol dan aditif berhasil menurunkan viskositas. Nilai densitas sangat dipengaruhi oleh bahan dasar, yakni berkisar pada 0,85–0,88 Kg/L untuk base HSD dan 0,83–0,84 Kg/L untuk base Pertamina. Walaupun etanol cenderung menaikkan kadar air hingga lebih dari 2%, penggunaan aditif efektif menekan kadar air kembali ke level 0,49% (HSD) dan 0,20–1,59% (Pertamina). Selain itu, formulasi campuran ini mampu menunda pembentukan kristal padat dengan titik beku yang berhasil diturunkan hingga mencapai 1°C. Kesimpulannya, modifikasi B40 dengan kombinasi etanol, n-butanol, dan aditif terbukti kompatibel dan efektif dalam mempertahankan stabilitas fasa serta memperbaiki karakteristik aliran dingin (cold flow properties), sehingga sangat potensial diaplikasikan secara luas.

Kata Kunci: Aditif, Bahan Bakar B40, Etanol, N-Butanol, Stabilitas Fasa.

ABSTRACT

The use of B40 fuel faces technical challenges related to high viscosity and susceptibility to phase separation, particularly at low temperatures. This study aims to evaluate the effect of adding co-solvents (ethanol and n-butanol) and additives on the phase stability and physicochemical properties of B40. The experiment commenced with sample mixing using a magnetic stirrer (200 rpm, 10 minutes). The stability of the mixture was evaluated through thermal control tests (10°C–90°C) and a 20-day storage stability test under three different environmental conditions (open space, closed room at 28°C, and freezer). Physicochemical characteristics were analyzed through density, viscosity, estimated freezing point, and water content tests using two different base materials (HSD and Pertamina Diesel). The results indicated that the mixtures were thermodynamically stable, did not undergo macroscopic phase separation, and remained homogeneous during both thermal cycling and the 20-day storage period. Physicochemically, the addition of ethanol and additives successfully reduced viscosity. Density values were highly influenced by the base material, ranging from 0.85–0.88 Kg/L for the HSD base and 0.83–0.84 Kg/L for the Pertamina base. Although ethanol tended to increase water content to more than 2%, the use of additives effectively suppressed it back to 0.49% (HSD) and 0.20–1.59% (Pertamina). Furthermore, the mixture formulation was able to delay the formation of solid crystals, successfully lowering the freezing point to as low as 1°C. In conclusion, the modification of B40 with a combination of ethanol, n-butanol, and additives proved to be compatible and effective in maintaining phase stability and improving cold flow properties, demonstrating its high potential

for widespread application.

Kata Kunci: *Additive, Fuel B40, Ethanol, N-Butanol, Phase Stability.*

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar B40 memiliki kendala teknis terkait viskositas yang tinggi dan kerentanan terhadap pemisahan fasa, terutama pada suhu rendah (Eka Alel et al., 2025). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan ko-solven (etanol dan n-butanol) serta zat aditif terhadap stabilitas fasa dan sifat fisikokimia B40. Pengujian diawali dengan pencampuran sampel menggunakan magnetic stirrer (200 rpm, 10 menit). Stabilitas campuran dievaluasi melalui uji kontrol suhu termal (10°C–90°C) dan uji stabilitas penyimpanan selama 20 hari pada tiga kondisi lingkungan (ruang terbuka, ruang tertutup 28°C, dan ruang pendingin). Karakteristik fisikokimia dianalisis melalui uji densitas, viskositas, prakira titik beku, dan kadar air (Pramitasari & Lim, 2022) dengan menggunakan dua bahan dasar berbeda (HSD dan Solar Pertamina). Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran terbukti stabil secara termodinamik, tidak mengalami pemisahan fasa makroskopis, dan tetap homogen baik selama siklus suhu maupun penyimpanan 20 hari. Secara fisikokimia, penambahan etanol dan aditif berhasil menurunkan viskositas (Fauzi et al., 2023). Nilai densitas sangat dipengaruhi oleh bahan dasar, yakni berkisar pada 0,85–0,88 Kg/L untuk base HSD dan 0,83–0,84 Kg/L untuk base Pertamina. Walaupun etanol cenderung menaikkan kadar air hingga lebih dari 2%, penggunaan aditif efektif menekan kadar air kembali ke level 0,49% (HSD) dan 0,20–1,59% (Pertamina). Selain itu, formulasi campuran ini mampu menunda pembentukan kristal padat dengan titik beku yang berhasil diturunkan hingga mencapai 1°C. Kesimpulannya, modifikasi B40 dengan kombinasi etanol, n-butanol, dan aditif terbukti kompatibel dan efektif dalam mempertahankan stabilitas fasa serta memperbaiki karakteristik aliran dingin (cold flow properties), sehingga sangat potensial diaplikasikan secara luas. Seiring dengan menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya kesadaran akan lingkungan, transisi energi terbarukan menjadi fokus utama secara global (Rosewita et al., 2025). Di Indonesia, pemerintah terus menggalakkan pemanfaatan bahan bakar nabati melalui program mandatori pencampuran Fatty Acid Methyl Ester (FAME) ke dalam minyak solar, yang saat ini telah mencapai tahapan B40 (40% FAME dan 60% solar) (Eka Megawati et al., 2024). Penggunaan B40 diharapkan dapat menekan emisi gas buang dan mengurangi ketergantungan pada impor bahan bakar fosil. Meskipun memiliki keuntungan ekologis, peningkatan persentase FAME pada B40 memunculkan beberapa tantangan teknis. Biodiesel memiliki karakteristik viskositas yang lebih tinggi, densitas yang lebih besar, dan sifat higroskopis (mudah menyerap air) dibandingkan solar murni (Saputro & Abdurrahman, 2022). Karakteristik ini sering kali menyebabkan buruknya aliran bahan bakar pada suhu dingin (titik beku/ cloud point yang tinggi) dan memicu terjadinya pemisahan fasa (ketidakstabilan campuran) selama masa penyimpanan, yang pada akhirnya dapat mengganggu kinerja injektor mesin diesel. Untuk memperbaiki kelemahan fisikokimia tersebut, penambahan zat aditif berbasis alkohol sering diaplikasikan (Sa'diyah et al., 2025). Etanol memiliki viskositas yang rendah dan dapat membantu menyempurnakan pembakaran. Namun, etanol memiliki tingkat kelarutan yang rendah pada bahan bakar diesel, sehingga rentan memicu pemisahan dua fasa (Martin & O'malley, 2021). Untuk mengatasi hal ini, N-Butanol digunakan sebagai co-solvent (pelarut pembantu). Dengan rantai karbon yang lebih panjang, N-Butanol bertindak sebagai agen penstabil yang menjembatani perbedaan polaritas antara biodiesel, solar, dan etanol, sehingga campuran dapat mempertahankan fasa tunggalnya (homogen). Meskipun potensi N-Butanol dan Etanol telah diketahui, stabilitas campuran formulasi B40 tersebut

sangat dipengaruhi oleh fluktuasi suhu lingkungan dan durasi penyimpanan (Abu Dzar Alghifary & Nor Latifah, 2025). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mencari titik seimbang pencampuran bahan B40 dengan Etanol, N-Butanol, dan zat aditif lainnya. Penelitian ini secara komprehensif mengevaluasi stabilitas campuran terhadap pembentukan dua fasa melalui uji kontrol suhu spesifik (10°C hingga 90°C) dan uji stabilitas waktu selama 20 hari pada berbagai kondisi lingkungan (suhu ruang fluktuatif luar ruangan, suhu ruang stabil 30°C, dan suhu ekstrem 0°C). Selain itu, evaluasi karakteristik fisikokimia seperti uji viskositas, densitas, kadar air, dan prakira titik beku juga dilakukan untuk memastikan bahwa formulasi akhir B40 yang dihasilkan tetap memenuhi standar mutu bahan bakar dan stabil untuk penyimpanan jangka panjang.

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, digunakan metode analisis kuantitatif berdasarkan eksperimen. Analisis kuantitatif dilakukan berdasarkan penelitian eksperimen yang memiliki tingkat validitas tinggi karena pengendalian yang ketat terhadap variabel eksternal (Selvira & Albina, 2025). Penelitian ini bereksperimen untuk menggunakan pengujian hipotesis yang paling efektif. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yakni pencampuran B40 dengan larutan lain (Etanol, N-Butanol, dan zat aditif), pengujian kontrol suhu dan waktu, penentuan titik keseimbangan campuran B40 (densitas, viskositas, prakira titik beku, dan kadar air). Uji kontrol suhu dan waktu dilakukan dengan pengamatan secara visual selama 20 hari dan pada suhu 10°C - 90°C pada interval kenaikan 10°C. Penentuan titik keseimbangan dilakukan dengan metode standar perhitungan dengan jangka suhu penentu pada 10°C, 30°C dan 60°C.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pencampuran B40

Proses pencampuran B40 dilakukan dengan 7 tahapan dengan penambahan yang berbeda pada masing-masing base B40. B40 base HSD dan Pertamina ditambahkan dengan larutan campuran dan diaduk menggunakan magnetic stirrer dengan kecepatan 200rpm selama 10 menit dengan mengasumsikan selama waktu tersebut pencampuran B40 sudah bercampur sempurna dan tidak menyisakan larutan atau terjadinya perpisahan 2 fasa. Secara teoritis, pencampuran ideal tercapai ketika seluruh komponen zat terdispersi secara merata dan memiliki komposisi yang sama di setiap titik sampel secara makroskopis, menandakan tercapainya kesetimbangan termodinamik fasa cair (McCabe et al., 2010). Parameter utama dalam mengevaluasi kinerja suatu mesin pencampur adalah tingkat homogenitas yang dihasilkan oleh produk akhir. Suatu campuran dapat dianggap homogen secara utuh bila telah tercampur secara merata dan tidak terlihat akan adanya perbedaan dari kedua fase yang dicampurkan. Secara teoritis, pencampuran ideal tercapai ketika seluruh komponen zat terdispersi secara merata dan memiliki komposisi yang sama di setiap titik sampel. Variasi parameter operasi, khususnya durasi pengadukan dan besaran kecepatan rotasi (RPM), terbukti memiliki korelasi langsung terhadap laju perpindahan massa antar-fasa, yang pada akhirnya menentukan nilai homogenitas dari produk pencampuran (Saleh et al., 2023).

Gambar 4.1 Pencampuran B40 dengan Etanol

Uji Suhu

Pengujian kontrol suhu dilakukan dengan memindahkan campuran kedalam tabung reaksi sebanyak 10ml dan diisolasi agar tidak terjadinya kontaminan dengan faktor luar. Etanol (C_2H_5OH) adalah senyawa polar yang memiliki gugus hidroksil ($-OH$). Gugus ini memungkinkan etanol membentuk ikatan hidrogen (hydrogen bond) dengan molekul air (H_2O). Akibatnya, etanol memiliki kecenderungan menyerap uap air dari udara. n-Butanol (C_4H_9OH) juga merupakan alkohol, tetapi memiliki rantai karbon lebih panjang daripada etanol. n-Butanol tidak secepat etanol dalam menyerap air, karena ikatan hidrogen yang terbentuk lebih lemah akibat efek rantai hidrokarbon yang lebih panjang. Namun, dalam waktu lama, n-butanol tetap dapat menarik sedikit uap air, terutama pada kelembapan tinggi. n-Butanol bersifat mudah menguap bila suhu lingkungan meningkat, meskipun lebih stabil daripada etanol. Dibandingkan dengan etanol, n-Butanol () memiliki rantai karbon hidrokarbon yang lebih panjang. Efek sterik dan hidrofobisitas dari rantai karbon yang panjang ini melemahkan potensi pembentukan ikatan hidrogen dengan air, sehingga n-butanol memiliki tingkat higroskopisitas yang lebih rendah dan tidak secepat etanol dalam menyerap air (Liu et al., 2016a)

(a) 10°C (b) 90°C

Selama proses pencampuran, sistem diuji dengan pengaturan suhu konstan, kenaikan suhu dilakukan dengan interval kenaikan 10°C dan diamati perubahan yang terjadi antara B40 dengan air yang terjerap oleh etanol. Konsep bahwa pengujian dengan menaikkan dan menurunkan suhu secara siklik (thermal cycling dari 10°C ke 90°C) adalah metode yang valid untuk membuktikan apakah suatu campuran bahan bakar stabil secara termodinamik (tidak terpengaruh perubahan suhu lingkungan) (Fernando & Hanna, 2004). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi stabil secara termodinamik maupun kinetik pada rentang suhu pengujian, sehingga tidak terdeteksi terjadinya pemisahan fasa, pembentukan emulsi, maupun pemisahan air atau alkohol secara makroskopis. Kompatibilitas antara komposisi kimia serta interaksi polar-nonpolar pada sistem B40 dan penambah dinilai memadai, sehingga variasi suhu yang diuji tidak menyebabkan terjadinya demixing (pemisahan fasa). Interaksi ko-solven n-butanol/etanol pada konsentrasi tertentu dipersepsikan membentuk campuran homogen dengan B40, sehingga pemisahan air tidak terfasilitasi (Waluyo et al., 2024). Penambahan aditif diketahui menstabilkan fase dan mencegah terbentuknya emulsi maupun terjadinya pemisahan (Kadhim et al., 2026).

Dalam rentang suhu 10–90 °C, melalui thermal cycling selama 9 siklus, campuran B40 dengan penambah X (Et/n-Bu/aditif pada konsentrasi Y) diamati tidak mengalami perubahan makroskopik, termasuk tidak adanya pemisahan fasa, serta kadar air yang tidak

berubah secara signifikan dalam batas. Temuan tersebut diinterpretasikan sebagai indikasi kompatibilitas dan stabilitas termal pada kondisi pengujian; meskipun demikian, pengujian jangka panjang serta evaluasi pada kondisi ekstrem tetap diperlukan untuk memverifikasi kelayakan aplikasinya di lapangan.

Uji Kontrol 20 Hari

Pengujian selama 20 hari dilakukan di 3 titik yang berbeda untuk melihat faktor perbandingan yang dikenakan kepada campuran B40. Kondisi pertama berada di ruang terbuka (kondisi panas dan dingin), kondisi kedua berada di ruang tertutup (suhu 28°C), dan kondisi ketiga berada di ruang pendingin. Pengujian ini dilakukan untuk mengamati ketahanan stabilitas campuran B40 dalam berbagai situasi dan kondisi dan dalam jangka waktu yang lama (Christensen & McCormick, 2014). Selama 20 hari pengamatan, tidak diamati adanya pemisahan fase secara makroskopik pada sistem B40–HSD maupun B40–Pertamina, termasuk tidak terbentuknya lapisan air atau fase terpisah, endapan berukuran besar, maupun kekeruhan/pemutihan yang jelas (Lapuerta et al., 2009b). Secara visual, sampel tetap terobservasi jernih (meskipun perbedaan warna antar sampel masih tampak), dan tidak terdeteksi pembentukan lapisan terpisah setelah perlakuan siklus panas–dingin maupun penyimpanan pada suhu ruang. Biodiesel (FAME) diketahui memiliki polaritas yang sedikit lebih tinggi dibandingkan hidrokarbon diesel murni, sehingga campuran B40 berperan sebagai ‘jembatan’ antara fase polar (air/alkohol) dan fase nonpolar. Apabila kandungan air berada pada tingkat rendah dan aditif atau demulsifier tersedia, kondisi homogen dapat dipertahankan. Tidak teramati adanya pemisahan selama 20 hari, sehingga keadaan tersebut dapat diinterpretasikan sebagai kestabilan termodinamik pada kondisi pengujian atau sebagai keadaan kinetik yang terperangkap (kinetically trapped) akibat adanya hambatan energi terhadap proses pemisahan. Pada beberapa sistem, pemisahan fase dapat memerlukan waktu yang lebih panjang ataupun kondisi ekstrem sebelum terjadi.

Uji Prakira Titik Beku

Pada Pengujian ini campuran B40 akan diamati untuk titik permulaan beku dan titik kestabilan campuran B40 sebelum mulai membeku.

Berdasarkan data percobaan, varian BE2 (terutama BE2S1b) teridentifikasi memiliki waktu respons paling panjang sebelum munculnya perubahan pada kondisi dingin, sehingga ketahanan terhadap suhu rendah dapat dianggap relatif lebih baik dibandingkan K1 dan BE1. Namun, karena pengujian dilakukan pada suhu yang tidak seragam dan beberapa sampel hanya dianalisis satu kali, diperlukan pelaksanaan pengujian yang terstandar—meliputi keseragaman suhu, replikasi, serta penambahan parameter analitik seperti cloud point/pour point dan pengukuran Karl-Fischer—untuk memastikan peringkat ketahanan suhu tersebut secara kuantitatif.

Fenomena depresi titik beku dan sifat koligatif dipandang berkontribusi, di mana penambahan molekul polar atau senyawa berkonsentrasi rendah (misalnya alkohol) serta aditif tertentu dianggap dapat menurunkan titik beku sistem, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk pembentukan fase padat pada suhu uji menjadi lebih panjang. Peningkatan viskositas dan pengaruhnya terhadap kinetika koalesensi juga dinilai berperan, karena formulasi dengan viskositas lebih tinggi atau yang menghasilkan struktur

emulsi mikro menyebabkan pergerakan molekul dan koalesensi kristal berlangsung lebih lambat, sehingga keterlihatan fase padat tertunda. Selain itu, keberadaan surfaktan atau cold-flow improver diperkirakan menghambat nukleasi dan pertumbuhan kristal parafin atau menghasilkan kristal berukuran lebih halus, sehingga sampel teramati memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap proses pembekuan (Pradelle et al., 2019).

Dalam fenomena nukleasi dan pertumbuhan kristal, beberapa sampel dapat berada dalam kondisi supercooling, yakni tetap berada dalam fase cair meskipun suhunya berada di bawah titik beku stabil, sebelum akhirnya mengalami pembekuan secara tiba-tiba. Waktu yang tercatat kemungkinan merupakan waktu hingga onset terjadinya peristiwa yang teramati, sehingga formulasi yang mampu menghambat proses nukleasi akan terukur memiliki waktu yang lebih panjang. Kandungan air juga dianggap berperan, karena keberadaan air bebas dapat mempercepat pemisahan atau emulsifikasi pada kondisi suhu rendah, sedangkan sampel dengan kadar air yang lebih rendah cenderung menunjukkan stabilitas yang lebih tinggi.

Uji Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk menentukan perubahan sifat fisik campuran B40 mengenai tingkat kompatibilitas antarkomponen, homogenitas campuran, serta potensi terjadinya perubahan struktur mikro akibat penambahan. Evaluasi densitas juga bertujuan memastikan bahwa campuran tetap berada dalam rentang karakteristik bahan bakar yang dapat diterima, sehingga stabilitas dan performa B40 tidak terganggu oleh modifikasi komposisi yang diuji (Lv et al., 2013).

(a). Diagram perbandingan densitas HSD dan Pertamina

Berdasarkan data hasil pengukuran densitas pada dua jenis bahan dasar, yaitu HSD dan Pertamina, terlihat bahwa jenis base memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai densitas campuran. Berdasarkan data hasil pengukuran densitas pada dua jenis bahan dasar, yakni High Speed Diesel (HSD) dan Solar Pertamina, terlihat bahwa karakteristik basis bahan bakar memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap nilai akhir densitas campuran. Densitas awal B40 berbasis HSD tercatat konsisten lebih tinggi dibandingkan B40 berbasis Pertamina pada seluruh variasi perlakuan. Perbedaan ini berkorelasi langsung dengan komposisi kimiawi penyusunnya; HSD didominasi oleh fraksi hidrokarbon rantai panjang bermassa molekul tinggi yang menghasilkan massa jenis lebih besar. Sebaliknya, Solar Pertamina umumnya tersusun dari fraksi hidrokarbon yang lebih ringan dan telah dilengkapi dengan berbagai aditif komersial pabrikan, sehingga densitas dasarnya relatif lebih rendah (Koul et al., 2021).

Penambahan etanol ke dalam sistem B40 menghasilkan tren densitas yang fluktuatif bergantung pada konsentrasinya. Pada penambahan etanol 5% (E5), terjadi penurunan nilai densitas yang cukup tajam. Hal ini merupakan akibat dari efek pengenceran (dilution effect), mengingat etanol murni memiliki massa jenis yang jauh lebih rendah dibandingkan matriks biodiesel maupun diesel. Namun, pada peningkatan konsentrasi menjadi 10% (E10), densitas campuran justru mengalami sedikit kenaikan kembali, khususnya pada basis HSD. Fenomena non-linear ini secara teoritis disebabkan oleh dominasi interaksi ikatan hidrogen dan gaya dipol-dipol antara gugus hidroksil etanol dengan komponen ester pada FAME. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, interaksi polar ini memfasilitasi penataan molekul (molecular packing) yang lebih rapat, sehingga memicu sedikit peningkatan massa jenis rata-rata campuran melebihi efek pengencerannya (Berman et al., 2015).

Efek penataan molekul tersebut juga teramati pada variasi penambahan n-butanol.

Sebagai ko-solven rantai panjang, penambahan n-butanol 0,5% memicu peningkatan densitas campuran. Dibandingkan dengan etanol, n-butanol memiliki massa jenis intrinsik yang sedikit lebih berat dan sifat amfifilik yang lebih seimbang. Hal ini memungkinkannya menjembatani interaksi antara komponen nonpolar diesel dan FAME secara lebih efisien, menghasilkan struktur agregasi molekul yang lebih kompak dan stabil. Walau demikian, ketika konsentrasi n-butanol dinaikkan menjadi 1%, nilai densitas kembali menurun. Pada titik ini, volume alkohol yang ditambahkan telah melampaui batas optimal penataan struktur, sehingga efek pengenceran kembali mendominasi dan merenggangkan jarak antarmolekul dalam sistem campuran.

Selanjutnya, penambahan zat aditif pada konsentrasi 100 ppm dan 200 ppm menunjukkan tren peningkatan densitas yang relatif kecil namun sangat konsisten pada kedua jenis basis B40. Peningkatan ini tidak semata-mata dikontribusikan oleh massa jenis aditif itu sendiri, melainkan oleh mekanisme kerja aditif sebagai agen penstabil antarmuka. Aditif bekerja dengan menurunkan tegangan antarmuka antara FAME, etanol, dan n-butanol, sehingga memfasilitasi homogenitas tingkat mikroskopis. Pada dosis optimal 200 ppm, aktivitas permukaan dari aditif ini mengikat komponen-komponen penyusun menjadi satu fasa termodinamik yang sangat stabil dan rapat, yang bermanifestasi pada peningkatan densitas campuran (Arpornpong et al., 2014)

Secara keseluruhan, fluktuasi densitas pada campuran modifikasi B40 ini adalah hasil resultan dari karakteristik fisik bahan dasar, efek pengenceran pelarut, peningkatan ikatan antarmolekul, serta stabilisasi struktur ruang oleh ko-solven dan aditif. Kombinasi dari mekanisme fisis dan kimiawi ini memastikan densitas akhir tetap berada dalam batas toleransi kelayakan bahan bakar.

Uji Viskositas

Pengujian viskositas dilakukan untuk menentukan karakteristik reologi dari larutan B40 beserta campurannya guna menilai pengaruh penambahan ko-solvent atau aditif terhadap perilaku alir sistem.

Berdasarkan hasil pengukuran reologi campuran B40 pada tiga variasi suhu (10°C, 30°C, dan 60°C), teridentifikasi bahwa karakteristik bahan dasar (base) memberikan signifikansi yang tinggi terhadap profil viskositas akhir. B40 berbasis High Speed Diesel (HSD) secara konsisten menunjukkan viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan B40 berbasis Solar Pertamina pada seluruh variasi campuran. Fenomena ini sangat berkorelasi dengan distribusi berat molekul hidrokarbon penyusunnya; HSD didominasi oleh fraksi hidrokarbon rantai panjang yang kental, sehingga menghasilkan resistansi geser (shear resistance) fluida yang lebih besar. Sebaliknya, Solar Pertamina diformulasikan dengan fraksi hidrokarbon yang lebih ringan dan dilengkapi dengan aditif pabrikan guna mengoptimalkan sifat alir (flowability), yang bermuara pada viskositas intrinsik yang lebih rendah (Ghannam & Selim, 2016)

Modifikasi campuran melalui penambahan etanol pada konsentrasi 5% dan 10% memperlihatkan tren penurunan viskositas pada kedua jenis basis B40. Secara fisiko-kimia, etanol murni memiliki viskositas kinematik yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan FAME (biodiesel) maupun diesel. Kehadiran etanol dalam matriks campuran bertindak sebagai pelarut pengencer (diluent) yang secara efektif mendisrupsi dan mereduksi gaya tarik kohesi antarmolekul pada rantai panjang hidrokarbon. Efisiensi penurunan viskositas ini teramati semakin nyata pada suhu tinggi, mengingat sensitivitas

etanol terhadap ekspansi termal makin memperlemah interaksi antarmolekuler dalam sistem campuran (Pires de Oliveira et al., 2020)

Sementara itu, penambahan ko-solven n-butanol mengindikasikan profil penurunan viskositas yang tidak sepenuhnya linear. Pada dosis rendah (0,5%), n-butanol memfasilitasi penurunan viskositas karena sifat amfifiliknya yang menjembatani polaritas antara etanol dan FAME, sehingga meningkatkan homogenitas struktural fluida. Namun, pada peningkatan konsentrasi menjadi 1%, derajat penurunan viskositas mulai termoderasi. Hal ini diakibatkan oleh viskositas intrinsik dari rantai karbon n-butanol () yang lebih tinggi dibandingkan etanol (). Pada konsentrasi yang lebih besar, kontribusi friksi molekuler dari rantai hidrokarbon n-butanol mulai mengimbangi efek pengencerannya, sehingga laju penurunan viskositas total menjadi tidak setajam pada perlakuan penambahan etanol (Lapuerta et al., 2017)

Inkorporasi zat aditif pada konsentrasi 100 ppm dan 200 ppm juga secara konsisten mereduksi viskositas campuran. Kinerja fisis aditif ini bertumpu pada mekanisme penurunan tegangan antarmuka (interfacial tension) antara komponen FAME, etanol, dan n-butanol. Dengan menurunnya tegangan antarmuka, struktur campuran menjadi lebih terdistribusi secara seragam, yang secara hidrodinamis memperbaiki aliran fluida. Pada dosis optimum 200 ppm, penurunan viskositas terjadi lebih masif, mengindikasikan perbaikan struktur aliran yang signifikan. Peran aditif ini sangat krusial terutama pada suhu rendah, di mana molekul fluida cenderung beraglomerasi dan meningkatkan viskositas; aditif memitigasi aglomerasi tersebut sekaligus mereduksi risiko hambatan alir.

Secara keseluruhan, variabel suhu memberikan dampak termodinamika yang paling dominan terhadap reologi campuran. Profil viskositas seluruh sampel turun secara drastis seiring dengan peningkatan suhu dari 10°C ke 60°C. Perilaku ini sejalan dengan teori kinetika fluida, di mana injeksi energi termal akan meningkatkan energi kinetik molekuler dan mereduksi gaya tarik antarmolekul, sehingga fluida berekspansi dan mengalir lebih mudah (Pires de Oliveira & Caires, 2019). Pada suhu 10°C, perbedaan viskositas antar-varian sangat teramplifikasi akibat rigiditas struktur molekul yang beragam. Sebaliknya, pada suhu 60°C, energi kinetik mendominasi pergerakan sistem, sehingga efek dari perbedaan komposisi kimia (base, alkohol, dan aditif) menjadi kurang terdeskriminasi, dan nilai viskositas seluruh sampel berkonvergensi pada titik yang saling berdekatan

Uji Kadar Air

Pengujian kadar air pada campuran B40 dilakukan untuk menentukan sejauh mana kandungan air di dalam sistem dapat memengaruhi stabilitas fisik dan kompatibilitas formulasi. Pengujian ini dilakukan untuk mengamati selama 5 hari, berapa persen air yang terjerap oleh campuran B40.

Hasil pengujian kadar air pada campuran B40 mengindikasikan bahwa karakteristik bahan dasar (base fuel) memberikan determinasi yang signifikan terhadap profil retensi air produk akhir. Biodiesel berbasis High Speed Diesel (HSD) menunjukkan tren akumulasi kadar air yang konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan B40 berbasis Solar Pertamina pada hampir seluruh variasi formulasi. Fenomena ini erat kaitannya dengan profil kimiawi HSD yang didominasi oleh fraksi hidrokarbon berat, yang secara alamiah memiliki tingkat higroskopisitas dan kapasitas pengikatan molekul air sedikit lebih besar selama proses pencampuran dan penyimpanan. Sebaliknya, Solar Pertamina sebagai bahan bakar komersial telah diformulasikan dengan paket aditif pabrikan (seperti demulsifier), yang

secara proaktif menekan afinitas penyerapan uap air, sehingga akumulasi kadar air totalnya dapat dipertahankan pada level yang relatif lebih rendah (Fregolente et al., 2012)

Inkorporasi etanol pada konsentrasi 5% dan 10% memicu eskalasi kadar air secara linear pada kedua jenis basis bahan bakar. Etanol murni merupakan senyawa polar yang memiliki higroskopisitas ekstrem akibat keberadaan gugus hidroksil ($-OH$). Gugus ini membentuk jaringan ikatan hidrogen yang kuat dengan uap air dari udara ambien, sehingga tidak hanya menarik kelembapan lingkungan secara agresif, tetapi juga menahan air bebas agar tetap terlarut di dalam matriks campuran. Pola peningkatan ini tervisualisasi secara drastis pada B40 HSD, di mana kadar air melonjak signifikan dari basis 0,58% menjadi lebih dari 2% pada penambahan etanol 10% (Liu et al., 2016b)

Di sisi lain, penggunaan n-butanol sebagai ko-solven memberikan respons penyerapan air yang bersifat konsentrasi-dependen. Pada variasi penambahan n-butanol 0,5%, terjadi peningkatan kadar air minor pada matriks HSD namun sistem tetap berada pada rentang stabilitas yang memadai, sedangkan pada Solar Pertamina fluktuasinya lebih minim. Hal ini merepresentasikan bahwa rantai karbon n-butanol ($-C_4H_9$) menekan sifat higroskopisitasnya menjadi jauh di bawah etanol. Akan tetapi, ketika konsentrasi n-butanol dinaikkan menjadi 1%, retensi air justru mengalami pelonjakan. Pada konsentrasi yang berlebih, n-butanol mulai bertindak memperluas area misel (micellar region) campuran, yang secara termodinamika meningkatkan kapasitas maksimum sistem bahan bakar untuk menahan dan melarutkan air dalam fasa kontinu. Akibatnya, alih-alih menstabilkan, kelebihan n-butanol justru memfasilitasi peningkatan kadar air total (Kuszewski, 2018)

Sebagai intervensi, injeksi zat aditif pada dosis 100 ppm dan 200 ppm terbukti sangat efektif dalam mereduksi kandungan air pada kedua jenis basis B40. Aditif ini beroperasi dengan mekanisme surfaktan spesifik yang mendisrupsi stabilitas emulsi mikro. Dengan menurunkan tegangan antarmuka, aditif mencegah molekul air tersuspensi secara persisten di dalam fase minyak. Pada B40 HSD, dosis aditif 200 ppm mampu menekan kadar air secara drastis hingga menyentuh angka 0,49%, jauh lebih rendah dibandingkan perlakuan dengan etanol maupun n-butanol semata. Profil serupa juga terkonfirmasi pada Solar Pertamina, di mana kadar air tereduksi dan stabil pada rentang yang sangat rendah (0,20%–1,59%). Hal ini memvalidasi peran esensial aditif sebagai agen penstabil fase yang mengeliminasi kelebihan air terlarut (Ribeiro et al., 2020)

Secara komprehensif, fluktuasi kadar air pada modifikasi B40 ini dikendalikan oleh resultan dari karakteristik bawaan bahan dasar, afinitas higroskopisitas pelarut polar (terutama etanol), konsentrasi kritis ko-solven n-butanol, serta efisiensi kinerja aditif. Etanol bertindak sebagai pemicu utama masuknya air, n-butanol memberikan efek modulasi yang sangat bergantung pada dosis, sementara aditif memainkan peran krusial sebagai agen purifikasi yang memitigasi retensi air berlebih, guna menjamin spesifikasi bahan bakar tetap ideal.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

- a. pengujian yang meliputi proses pencampuran, uji suhu, kontrol stabilitas 20 hari, prakira titik beku, densitas, viskositas, serta kadar air menunjukkan bahwa formulasi campuran B40 dengan penambahan etanol, n-butanol, dan aditif pada konsentrasi yang diuji memiliki tingkat kompatibilitas dan stabilitas fisik yang memadai dalam kondisi laboratorium.
- b. Pengujian stabilitas selama 20 hari pada berbagai kondisi lingkungan mengonfirmasi

bahwa campuran B40–HSD maupun B40–Pertamina mempertahankan homogenitas tanpa terbentuk fase air, kekeruhan, ataupun endapan, sehingga kestabilan dapat dinyatakan tercapai.

- c. Secara keseluruhan, hubungan antara viskositas, densitas, dan kadar air pada biodiesel menunjukkan pola keterkaitan yang saling memengaruhi karakteristik fisik campuran. Kadar air yang meningkat akibat penambahan etanol maupun n-butanol pada konsentrasi tertentu cenderung menurunkan viskositas karena air berfungsi sebagai fase yang lebih encer dan tidak mampu berbaur secara sempurna dengan komponen minyak, sehingga menghasilkan campuran yang lebih mudah mengalir. Pada saat yang sama, peningkatan kadar air juga menyebabkan sedikit penurunan densitas pada beberapa formula, khususnya ketika jumlah air yang terikat atau tersuspensi cukup besar. Namun, pada kondisi lain seperti penambahan n-butanol 0,5%, densitas justru dapat meningkat karena terbentuknya campuran yang lebih homogen dengan struktur molekul yang lebih rapat. Aditif berperan penting dalam menurunkan kadar air sekaligus menstabilkan viskositas dan densitas agar tetap berada dalam rentang yang seragam. Dengan demikian, perubahan pada salah satu parameter fisik—baik kadar air, viskositas, maupun densitas—akan memengaruhi dua parameter lainnya, sehingga keseluruhan sifat biodiesel sangat ditentukan oleh keseimbangan antara komposisi kimia, tingkat higroskopisitas, dan keberadaan aditif dalam campuran.
- d. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penambahan etanol, n-butanol, dan aditif dalam formulasi B40 dapat dilakukan tanpa mengganggu stabilitas fisik dalam rentang kondisi pengujian yang diterapkan. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa kombinasi komponen tersebut kompatibel terhadap matriks B40 dan mampu mempertahankan sifat fisik penting seperti homogenitas, densitas, viskositas, serta ketahanan terhadap suhu rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu Dzar Alghifary, & Nor Latifah. (2025). Kajian Stabilitas Fisikokimia Antibiotik β -laktam: Implikasi terhadap Formulasi dan Penyimpanan. *Inovasi Kesehatan Global*, 2(3), 179–187. <https://doi.org/10.62383/ikg.v2i3.2215>
- Arpornpong, N., Attaphong, C., Charoensaeng, A., Sabatini, D. A., & Khaodhiar, S. (2014). Ethanol-in-palm oil/diesel microemulsion-based biofuel: Phase behavior, viscosity, and droplet size. *Fuel*, 132, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.068>
- Berman, P., Meiri, N., Colnago, L. A., Moraes, T. B., Linder, C., Levi, O., Parmet, Y., Saunders, M., & Wiesman, Z. (2015). Study of liquid-phase molecular packing interactions and morphology of fatty acid methyl esters (biodiesel). *Biotechnology for Biofuels*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s13068-014-0194-7>
- Chen, W., & Chen, J. (2016). Crystallization behaviors of biodiesel in relation to its rheological properties. *Fuel*, 171, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.049>
- Christensen, E., & McCormick, R. L. (2014). Long-term storage stability of biodiesel and biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, 128, 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.045>
- Corral-Gómez, L., Rubio-Gómez, G., Martínez-Martínez, S., & Sánchez-Cruz, F. A. (2019). Effect of diesel-biodiesel-ethanol blends on the spray macroscopic parameters in a common-rail diesel injection system. *Fuel*, 241, 876–883. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.081>
- Eka Alel, A., Hastuti, R. P., & Legawati, L. (2025). Tantangan Implementasi Program B40 di Indonesia: Tinjauan Teknis dan Ketersediaan Bahan Baku Biodiesel. *JURNAL SURYA TEKNIKA*, 12(2), 387–393. <https://doi.org/10.37859/jst.v12i2.10770>

- Eka Megawati, Apriliya Prastika Anggraini, Resmihadi, & Debora Ariyani. (2024). Analisis Kandungan Fatty Acid Metil Ester (FAME) Pada Biosolar B30 Dengan Metode Fourier Transform Infrared (FTIR) Studi Kasus Laboratorium PT. X. *JURNAL TEKNOSAINS KODEPENSA*, 4(2), 7–11. <https://doi.org/10.54423/jtk.v4i2.56>
- Fauzi, M., Herlina, H., & Sholeha, I. M. (2023). Karakteristik Fisik dan Fungsional Tepung Labu Kuning LA3 Desa Tegalrejo, Kecamatan Tegalsari, Kabupaten Banyuwangi. *AGRITEKNO: Jurnal Teknologi Pertanian*, 12(2), 106–114. <https://doi.org/10.30598/jagritekno.2023.12.2.106>
- Fernando, S., & Hanna, M. (2004). Development of a Novel Biofuel Blend Using Ethanol–Biodiesel–Diesel Microemulsions: EB–Diesel. *Energy & Fuels*, 18(6), 1695–1703. <https://doi.org/10.1021/ef049865e>
- Fregolente, P. B. L., Fregolente, L. V., & Wolf Maciel, M. R. (2012). Water Content in Biodiesel, Diesel, and Biodiesel–Diesel Blends. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57(6), 1817–1821. <https://doi.org/10.1021/jc300279c>
- Ghannam, M. T., & Selim, M. Y. E. (2016). Rheological properties of water-in-diesel fuel emulsions. *International Journal of Ambient Energy*, 37(1), 24–28. <https://doi.org/10.1080/01430750.2013.874368>
- Hariyansyah, M. Febrianti. (2025). Review Formulasi Emulsi Dalam Pengembangan Sediaan Farmasi. *Jurnal Farmasi Sains Dan Teknologi*, 3(01), 20–29. <https://doi.org/10.65117/p79xw382>
- Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1925). The Ostwald Viscometer as a Consistometer. *The Journal of Physical Chemistry*, 29(10), 1217–1223. <https://doi.org/10.1021/j150256a005>
- Hopper, Z., Desbrow, B., Roberts, S., & Irwin, C. (2023). Preparation procedures of food and beverage samples for oxygen bomb calorimetry: A scoping review and reporting checklist. *Journal of Food and Drug Analysis*, 31(2), 232–243. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3461>
- Kadhim, M. Q., Oshchepkov, P. P., & Kuznetsov, A. G. (2026). Evaluating biodiesel, emulsions, and additives for diesel engine. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 21. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctag035>
- Koul, R., Kumar, N., & Singh, R. . (2021). A review on the production and physicochemical properties of renewable diesel and its comparison with biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(18), 2235–2255. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1646355>
- Kuszewski, H. (2018). Physical and Chemical Properties of 1-Butanol–Diesel Fuel Blends. *Energy & Fuels*, 32(11), 11619–11631. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02912>
- Lapuerta, M., Armas, O., & García-Contreras, R. (2009). Effect of Ethanol on Blending Stability and Diesel Engine Emissions. *Energy & Fuels*, 23(9), 4343–4354. <https://doi.org/10.1021/ef900448m>
- Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J., Fernández-Rodríguez, D., & Patiño-Camino, R. (2017). Modeling viscosity of butanol and ethanol blends with diesel and biodiesel fuels. *Fuel*, 199, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.101>
- Lin, C. (2003). The fuel properties of three-phase emulsions as an alternative fuel for diesel engines*. *Fuel*, 82(11), 1367–1375. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00021-8)
- Liu, H., Hu, B., & Jin, C. (2016). Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 184, 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.037>
- Lv, P., Cheng, Y., Yang, L., Yuan, Z., Li, H., & Luo, W. (2013). Improving the low temperature flow properties of palm oil biodiesel: Addition of cold flow improver. *Fuel Processing Technology*, 110, 61–64. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.12.014>
- Martin, A., & O'malley, J. (2021). Kompatibilitas campuran bahan bakar metanol pada kendaraan dan mesin berbahan bakar bensin di Indonesia. *The International Council on Clean Transportation*.
- Mccabe, W. L., Smith, J. C., & Dave, P. (2010). Scilab Code for Unit Operations of Chemical Engineering Created by Book Details. In *Education* (Issue October).

- McCormick, R. L., & Westbrook, S. R. (2010). Storage Stability of Biodiesel and Biodiesel Blends. *Energy & Fuels*, 24(1), 690–698. <https://doi.org/10.1021/ef900878u>
- Ni, P., Zhang, Z., Xu, H., Wang, X., & Xia, Q. (2022). Diffusion and hygroscopicity of particles from diesel and biodiesel combustion in an environmental chamber. *Energy Reports*, 8, 8271–8281. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.051>
- Pawade, S. S., Vilbaste, M., Siiman, A., Toom, L., Herodes, K., & Leito, I. (2026). A quantitative approach to determine water and moisture content of different types of lignin using attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy combined with partial least squares regression. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 20(2), 919–930. <https://doi.org/10.1002/bbb.70124>
- Pires de Oliveira, I., & Caires, A. R. L. (2019). Molecular arrangement in diesel/biodiesel blends: A Molecular Dynamics simulation analysis. *Renewable Energy*, 140, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.061>
- Pires de Oliveira, I., Caires, A. R. L., Baskar, K., Ponnusamy, S., Lakshmanan, P., & Veerappan, V. (2020). Biodiesel as an additive for diesel-ethanol (diesohol) blend: physical-chemical parameters and origin of the fuels' miscibility. *Fuel*, 263, 116753. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116753>
- Pradelle, F., Leal Braga, S., Fonseca de Aguiar Martins, A. R., Turkovics, F., & Nohra Chaar Pradelle, R. (2019). Experimental assessment of some key physicochemical properties of diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends for use in compression ignition engines. *Fuel*, 248, 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.087>
- Pramitasari, R., & Lim, J. P. (2022). Karakterisasi Sifat Fisikokimia Ekstrak dan Bubuk Hasil Pengeringan Beku Antosianin Mahkota Bunga Telang (*Clitoria ternatea* L.)(Characterization of Physicochemical Properties of Butterfly Pea Flower Petal (*Clitoria ternatea* L.) Anthocyanin Extract and Fre. *Agricultural Journal*, 5(2), 305.
- Ribeiro, K. C., Kashefi, K., Assenheimer, T., Carretoni, C., Portilho, M., Pinto, J. C., & Nele, M. (2020). Biodiesel/Water/Glycerol Emulsion Separation Using Electrocoalescence: Model and Process Emulsions. *Energy & Fuels*, 34(2), 1737–1743. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01980>
- Rosewita, B., Daynarra, B., Breliastiti, R., & Nelson, C. I. (2025). Transisi Energi Terbarukan: Peran PLTS dalam Efisiensi Ekonomi dan Ketahanan Energi Indonesia. *Media Ilmiah Akuntansi*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.34208/mia.v13i1.54>
- Sa'diyah, A., Ardiansyah Lutfi, D., Haryono, E., Novianarenti, E., & Rahmat Ramadani, N. (2025). Uji Emisi Gas buang Pada Four Stroke Engine Menggunakan Multi-Feedstock Biodiesel Dengan Penambahan Zat Aditif (2-EHN). *Jurnal Teknologi Maritim*, 8(2), 13–22. <https://doi.org/10.35991/jtm.v8i2.74>
- Saleh, A. M., Alias, A. B., Ali, O. M., & Saleh, N. M. (2023). Factors Affecting on Process of Synthesizing Biodiesel and Arranging Production Steps: a Review Study. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.15866/ireme.v17i1.22675>
- Saputro, B. A., & Abdurrahman, A. (2022). Karakteristik biodiesel dari campuran bahan bakar dexlite dan minyak jelantah tanpa perlakuan pada mesin diesel. *Jurnal Teknik Kimia*, 28(2), 51–59. <https://doi.org/10.36706/jtk.v28i2.1003>
- Selvira, & Albina, M. (2025). Model Penelitian Eksperimental dalam Pendidikan: Jenis, Tujuan dan Aplikasinya. *Jurnal Media Akademik (JMA)*, 3(6), 3031–5220.
- Solar, B., & Dimawarnita, F. (2021). Surfaktan untuk bahan bakar solar dan biodiesel surfactant for the diesel and biodiesel fuels. 31(September 2018), 120–128. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.2.120>
- Waluyo, B., Arifatul Fatimah, Y., Habibi, I., Dyan Pertiwi, F., Setiyo, M., & Marlina, E. (2024). Enhancing Biodiesel-Methanol blends with 1-Butanol for stable and efficient fuels. *Fuel*, 361, 130667. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130667>
- Windayani, N., Hasanah, I., & Helsy, I. (2018). Analisis Bahan Ajar Senyawa Karbon Berdasarkan Kriteria Keterhubungan Representasi Kimia. *JTK (Jurnal Tadris Kimiya)*, 3(1),

83–93. <https://doi.org/10.15575/jtk.v3i1.2682>

Zhu, Z., Zhou, Y., Li, X., Liu, L., Lu, Y., & Ren, T. (2025). Measuring soil particle density using water pycnometer: Influencing factors, errors, and correction. *Soil Science Society of America Journal*, 89(3). <https://doi.org/10.1002/saj2.70073>.