



Pengaruh Penambahan Kamper sebagai Aditif terhadap Karakteristik dan Emisi Gas Buang Mesin Berbahan Bakar Bensin

Effects of Camphor Addition as an Additive on Characteristics and Exhaust Gas Emissions of Gasoline Powered Engines

NURYOTO^{1,2*}, G. AWALUDIN SOBARSAH¹, RAHMAYETTY^{1,2}, JAYANUDIN^{1,2}

¹Magister Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon-Banten, Indonesia 42435

²Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon- Banten, Indonesia 42435

* nuryoto@untirta.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 August 2023

Accepted 18 April 2024

Published 31 July 2024

Keywords:

Gasoline

Octane Numbers

Camphor

Naphtalene

Emissions

ABSTRACT

The automotive industry, synonymous with motorized vehicles, has experienced rapid development, and every motorized vehicle requires fuel as its power source. To ensure optimal engine performance, some individuals add additives to fuel using camphor. Research on camphor as a fuel additive is not new, as it has been studied by several researchers before, although with the use of premium gasoline in previous studies. In this study, we observed a different type of fuel, namely "pertalite," and conducted tests to assess camphor's solubility in pertalite, variations in octane number, and their impact on exhaust gas emissions. Therefore, the study aimed to understand the effects of camphor addition on the increase in octane number, changes in fuel characteristics, camphor dissolution time, and emissions from exhaust gas. The study involved varying camphor additions from 1 to 8% in pertalite fuel. The results of the study indicate that the use of camphor as a fuel additive in pertalite fuel does not have a negative impact on the environment in terms of exhaust gas emissions. However, it is not fuel-efficient due to the minimal increase in octane number, only rising from 90 to 90.4 (with an 8% camphor addition). Furthermore, it causes fluctuations in vapor pressure, ranging from 45 to 58.8 kPa, which can affect the combustion process in the chamber. On the other hand, the dissolution time of camphor is relatively long, requiring 5–26 minutes for concentrations of 1–8%, making it inefficient. The study results are expected to provide initial insights for developing other additives, such as alcohol, which is a renewable and safe chemical.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 11 Agustus 2023

Disetujui 18 April 2024

Diterbitkan 31 Juli 2024

Kata kunci:

Bensin

Bilangan Oktana

Kamper

Naftalena

Emisi

ABSTRAK

Industri otomotif yang identik dengan kendaraan bermotor mengalami perkembangan yang sangat pesat, dan setiap kendaraan bermotor membutuhkan bahan bakar sebagai penggerak. Agar performa mesin tetap terjaga baik, ada sebagian masyarakat menambahkan aditif ke dalam bahan bakar menggunakan kamper. Penelitian terkait kamper sebagai aditif bahan bakar bukanlah hal baru, karena telah dilakukan riset oleh beberapa peneliti sebelumnya, tetapi menggunakan bahan bakar jenis premium. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengamatan menggunakan bahan bakar yang berbeda yaitu jenis pertalite, serta melakukan pengujian kelarutan kamper ke dalam pertalite, perubahan karakteristik, bilangan oktana, serta pengaruhnya terhadap emisi gas buang. Oleh karena itu, penelitian ini mempunyai tujuan untuk menguji dan mengetahui pengaruh penambahan kamper terhadap peningkatan bilangan oktana, perubahan karakteristik bahan bakar jenis pertalite, waktu pelarutan kamper, dan emisi pada gas buang. Pengamatan dilakukan dengan memvariasikan penambahan kamper sebesar 1–8% pada bahan bakar pertalite. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan aditif berupa kamper pada bahan bakar pertalite tidak memiliki dampak negatif terhadap lingkungan terkait emisi gas buang, tetapi tidak ekonomis karena peningkatan bilangan oktana yang dihasilkan sangat kecil yaitu hanya meningkat dari 90 menjadi 90,4 (pada penambahan kamper sebanyak 8%). Selain itu berakibat fluaktiatif terhadap tekanan uap yaitu dari 45 menjadi 58,8 kPa, selanjutnya turun lagi dibawah 58,8 kPa, yang mana akan mempengaruhi proses pembakaran pada ruang bakar. Pada sisi yang lain, waktu pelarutan kamper tergolong lama karena membutuhkan waktu 5–26 menit untuk kadar 1–8%, sehingga menjadi tidak efisien. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi awal untuk pengembangan aditif yang lain seperti alkohol yang merupakan bahan kimia yang dapat diperbarui dan aman.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia, industri otomotif yang identik dengan kendaraan bermotor mengalami perkembangan yang sangat pesat dari waktu ke waktu. Berdasarkan data dari Kementerian Perindustrian (2021), terdapat 22 perusahaan yang bergerak di bidang industri roda empat, dengan kapasitas produksi total hingga 2,35 juta per tahun. Untuk setiap kendaraan bermotor yang digunakan, baik untuk alat transportasi umum maupun pribadi membutuhkan bahan bakar sebagai penggerak. Bahan bakar yang umum dipakai pada kendaraan bermotor adalah bahan bakar cair seperti bensin (*gasoline*). Bahan bakar bensin yang baik harus mempunyai sifat mudah diupkan di dalam ruang bakar dan terbakar dalam silinder tepat waktu, sehingga tidak menimbulkan ketukan atau *knocking*. Ketukan sendiri terjadi akibat dari bahan bakar yang terbakar tidak tepat waktu yang terjadi di dalam ruang bakar, dan berpotensi menurunkan performa dari kendaraan itu sendiri. Bahkan dalam jangka panjang dampak ketukan ini akan merusak kendaraan, khususnya di bagian ruang bakar. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka bahan bakar yang digunakan harus memiliki bilangan oktana yang tinggi, bahkan kalau memungkinkan mendekati bilangan oktana 100. Pada umumnya untuk bahan bakar yang mempunyai bilangan oktana tinggi, seringkali mempunyai harga yang cukup mahal. Bensin (*gasoline*) jenis pertamax dan pertamax turbo yang mempunyai bilangan oktana di atas 92, dan masuk kategori bensin yang tidak disubsidi pemerintah RI, dan harganya cukup mahal, serta cenderung mengikuti harga pasar. Untuk kalangan masyarakat menengah ke atas menggunakan pertamax dan pertamax turbo sebagai bahan bakar mungkin bukan merupakan kendala, tetapi bagi masyarakat menengah ke bawah merupakan masalah tersendiri, karena harus mengeluarkan dana lebih. Untuk mengatasi masalah tersebut, pada sebagian masyarakat ada kecenderungan untuk meningkatkan bilangan oktana bahan bakar dengan menambah kamper yang dibeli dari toko-toko atau retail (Sari, 2022). Harapannya dengan menambahkan kamper yang notebene mengandung naftalena (Radifan & Lindawati, 2018; Budiman & Ilyas, 2022), akan mampu meningkatkan bilangan oktana dari bensin tersebut. Pada penelitian ini ingin menjawab fenomena yang terjadi di sebagian masyarakat yang melakukan penambahan kamper pada bahan bakar, apakah berdampak terhadap peningkatan bilangan oktana atau tidak, bagaimana pengaruhnya terhadap karakteristiknya, dan bagaimana terkait emisi gas buangnya, cenderung lebih berbahaya atau tidak, sehingga akan terjawab secara ilmiah.

Peningkatan bilangan oktana pengganti timbal, yang mana telah dilarang dapat menggunakan senyawa jenis aromatik, seperti benzena (Bara Radhi, 2020), tetapi benzena sendiri sebenarnya zat karsinogenik (Kim, 2016), yang berbahaya bagi kesehatan karena menyebabkan kanker, sehingga tidak disarankan. Bahkan kadar benzena yang telah ada di dalam *feed stock* dilakukan reduksi melalui proses pemurnian (Galadima & Muraza, 2015), agar kadarnya diambang batas aman, sebelum diproses lebih lanjut menjadi bahan bakar. Jika dilihat dari rumus struktur kimianya antara

naftalena dan benzena hampir sama, yaitu sama-sama mempunyai struktur siklik (lihat Gambar 1), sehingga berpotensi dapat digunakan untuk menaikkan bilangan oktana pada *gasoline*.

Berdasarkan kajian beberapa peneliti menunjukkan bahwa penambahan naftalena pada bahan bakar jenis premium berdampak baik pada peningkatan performa proses pembakaran di dalam ruang bakar (Lapisa *et al.* 2017; Wibowo & Fauzhia 2021). Lapisa *et al.* (2017) telah melakukan penambahan naftalena sebanyak 10% massa, dan mampu menaikkan energi sebesar 0,5HP, dan cenderung sama dengan aditif menggunakan metanol dan etanol. Pada penelitian yang sama yang dilakukan oleh Wibowo & Fauzhia (2021) dengan penambahan kamper sebanyak 9 gram per liter bahan bakar premium mampu meningkatkan efisien pembakaran sebesar 25% dari kondisi penggunaan premium tanpa ditambahkan kamper. Artinya bahwa penambahan naftalena ke dalam bahan bakar jenis premium baik dalam bentuk kristal naftalena murni maupun yang terkandung di dalam kamper berdampak positif pada proses pembakaran yang terjadi. Penambahan naftalena ke dalam bahan bakar juga menurut Vrablik *et al.* (2022) berdampak baik pada stabilitas bahan bakar, yang akan berpengaruh pada waktu penyimpanan selama bensin tidak digunakan. Pada dasarnya penelitian ini melakukan hal yang sama dengan penelitian sebelumnya, hanya saja yang membedakan adalah dilakukan pada bahan bakar jenis pertalite, yang mana bensin dengan bilangan oktana terendah yang tersedia saat ini, karena bensin jenis premium telah ditarik dari pasaran. Selain itu pada penelitian ini juga akan dilakukan observasi waktu kelarutan kamper ke dalam bahan bakar pertalite, sehingga akan diketahui berapa lama waktu pelarutan sampai larutan kamper-pertalite siap digunakan. Jika ternyata kamper membutuhkan waktu yang lama untuk terlarut, maka sistem kamper-pertalite menjadi tidak efektif dan dapat berpotensi penyumbatan bagian *suction line* pompa bahan bakar.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini mempunyai tujuan untuk menguji dan mengetahui pengaruh penambahan kamper terhadap peningkatan bilangan oktana, perubahan karakteristik bahan bakar jenis pertalite, waktu pelarutan kamper, dan emisi pada gas buang. Harapannya setelah dilakukan kajian ini dan dibandingkan dengan pustaka yang ada, masyarakat akan menjadi mengetahui tingkat keekonomian penggunaan kamper sebagai aditif bahan bakar, perubahan karakteristik, dan efeknya bagi lingkungan, serta pengaruhnya untuk kesehatan.

2. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini merupakan penelitian studi kasus yang bersifat eksperimental, yang mana prinsipnya adalah membandingkan suatu perlakuan (*treatment*) dengan pembanding dasar. Penelitian menggunakan fasilitas yang ada di pada laboratorium LEMIGAS, yaitu berupa mesin pengujian *Reid Vapour Pressure* (RPV), mesin pengujian densitas, mesin pengujian *Research Octane Number* (RON), dan digunakan adalah berupa bahan bakar jenis pertalite yang

dibeli dari Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) Pertamina, dan kamper merk Alfamart yang dibeli dari toko Alfamart. Karakteristik dan bilangan oktana pertalite tanpa penambahan kamper (kadar kamper 0%) hasil pengujian tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji pertalite tanpa kamper

No	Parameter Uji	Min	Max
1	Densitas kg/m ³	715	770
2	Tekanan Uap (kPa)	45	69
3	Bilangan oktana (RON)	90	

2.2 Prosedur Penelitian

2.2.1 Alur Penelitian

Bahan bakar pertalite dimasukan ke dalam wadah sebanyak 1 liter, lalu kamper dimasukan ke dalam pertalite tersebut dengan konsentrasi 1, 4, dan 8% (10, 40, dan 80 gram kamper dalam 1 liter pertalite), dan setiap 1 menit diangkat kampernya untuk dilakukan penimbangan, dan dilakukan pencatatan perubahan massa guna memprediksi berapa lama waktu yang diperlukan kamper untuk melarut sempurna ke dalam bahan bakar pertalite. Ketika kamper sudah terlarut semuanya, maka larutan antara kamper dan pertalite bisa dilakukan pengujian *Reid Vapour Pressure* (RPV), pengujian densitas, pengujian *Research Octane Number* (RON), dan pengujian emisi gas buang.

2.2.2 Pengujian Larutan Pertalite

a) Penentuan Oktan (RON)

Mesin pengujian CFR (*Cooperative Fuel Research*) dihidupkan dan dipanaskan dengan kecepatan putar 600 rpm sampai tercapai kondisi operasi yang ditentukan, selanjutnya pada tabung pengatur kelembaban udara (*ice tower*) dimasukan es batu. Tahap selanjutnya memasukan 400 ml sampel yang akan diukur pada salah satu tangki (tangki ke-1). Menggeser selektor yang berada di bawah tangki, sehingga mesin berjalan dengan bahan bakar sampel yang akan diuji. *Knockmeter* dihidupkan dan tinggi rendahnya ruang bakar diatur dengan memutar engkol, sehingga jarum *knockmeter* menunjukkan bilangan 55 (lihat juga skala tertinggi yang terlihat pada mikrometer). Bilangan oktana sampel diperkirakan dengan cara mencocokkan skala mikrometer pada tabel konversi yang tersedia. Larutan standar dibuat dengan mencampurkan iso-oktana dengan n-heptana berdasarkan perkiraan bilangan oktana sampel yang akan diuji. Larutan standar dimasukan pada tangki 2 dan 3. Kemudian, menggeser selektor yang berada di bawah tangki, sehingga mesin berjalan dengan bahan bakar standar. Baca skala tertinggi yang terdapat pada *knockmeter*. Setelah diperoleh angka untuk kedua standar, maka bilangan oktana sampel dapat diketahui dengan cara interpolasi.

b) Pengujian karakteristik bahan bakar pertalite

i. Pengujian tekanan uap (RVP)

Ruang udara (*air chamber*) pada peralatan pengujian dibersihkan dengan alkohol atau aseton, selanjutnya dikeringkan dan dicatat temperaturnya. Sampel sebanyak 150 ml yang akan diukur dimasukan ke dalam ruang sampel (bahan bakar chamber) dan didinginkan di dalam lemari es sampai temperatur di

bawah 500°F. Ruang udara dan ruang sampel dihubungkan dan dimasukan ke dalam penangas air (*water bath*) pada temperatur 1000°F, dengan lamanya rendaman kurang lebih 30 menit agar proses penguapan cairan di dalam alat RVP sempurna. Tahap selanjutnya dilakukan pengocokan dan mencatat angka yang ditunjukkan oleh pengukur tekanan (*pressure gauge*). Setiap 5 menit alat diangkat dan dikocok, dan diulangi sampai beberapa kali, sehingga angka yang ditunjukkan oleh pengukur tekanan sampai keadaan konstan. Hasil yang diperoleh dari skala yang ditunjukkan oleh pengukur tekanan dikurangi dengan angka yang terdapat dalam tabel koreksi temperatur.

ii. Pengujian densitas

Sampel yang dibutuhkan sebanyak 0,7 ml, selanjutnya dimasukan ke dalam tabung sampel untuk diinjeksikan. Tahap selanjutnya adalah memasangkan tabung kapiler TFE-flouorokarbon eksternal ke bagian bawah tabung sampel. Sampel dimasukan ke ujung kapiler yang tersedia, agar dapat terhisap ke bagian atas port menggunakan jarum atau saluran vakum sampai tabung sampel terisi dengan benar. Selanjutnya, menyalakan lampu penerangan dan memeriksa tabung sampel dengan hati-hati, serta memastikan tidak ada gelembung yang terperangkap di dalam tabung dan terisi tepat di luar titik suspensi pada sisi kanan. Kemudian, mematikan lampu penerangan dengan segera setelah terkena tabung sampel, karena panas yang dihasilkan dapat mempengaruhi pengukuran suhu. Setelah mesin uji menampilkan pembacaan yang stabil untuk ke empat angka kerapatan dan lima untuk nilai T, hal itu menunjukkan bahwa kesetimbangan suhu telah tercapai, catat kepadatan atau nilai T.

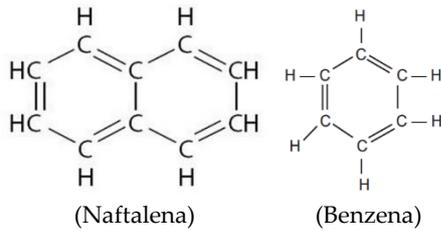
iii. Pengujian Emisi Buang

Pengujian emisi gas buang dilakukan menggunakan *gas analyzer*. Tahapan yang dilakukan diantaranya menghidupkan mesin dan mengatur putaran mesin sesuai kebutuhan penelitian, serta menghidupkan *tachometer* untuk melihat putaran mesin. Menghidupkan alat uji *gas analyzer*, menunggu sampai *display* pada alat tersebut menampilkan "GAS READY". Langkah selanjutnya adalah memasukan pipa input *exhaust Gas Analyzer* ke dalam pipa knalpot, menekan tombol "MEAS" pada alat *gas analyzer* dan akan muncul angka pada *display*. Selanjutnya menunggu beberapa saat sampai angka yang ditunjukkan pada *display* stabil lalu mencatat data yang ditunjukkan oleh *display Gas Analyzer* tersebut, kemudian menekan tombol "STANDBY" pada *gas analyzer* apabila pengambilan data sudah selesai. Mesin dimatikan dan mengosongkan bahan bakar sampai habis, untuk dilakukan pengujian menggunakan bensin yang sudah ditambah aditif berupa kamper 10 gram, 40 gram dan 80 gram per liter pertalite.

2.3 Pengujian Waktu Pelarutan Kamper pada Pertalite

Waktu pelarutan kamper merupakan waktu yang dibutuhkan kamper untuk terlarut sempurna ke dalam pertalite, sehingga pengguna akan mengetahui ketika memasukan kamper ke tangki bahan bakar pertalite, berapa lama kendaraan baru bisa dijalankan. Konsep pelarutan

partikel kamper sendiri sebenarnya dapat dideskripsikan mengikuti model *shrinking particle* seperti yang tersaji pada Gambar 2 (Safari *et al.*, 2009).



Gambar 1. Rumus struktur kimia naftalena dan benzene



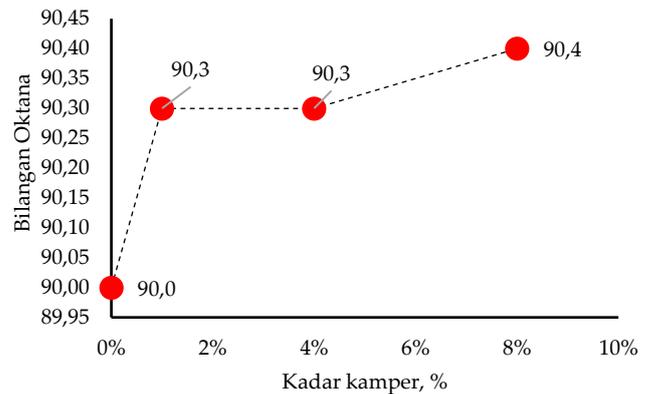
Gambar 2. Ilustrasi peluruhan padatan kamper di dalam cairan gasoline

Secara teori, partikel padatan kamper makin lama akan semakin mengecil, dan terlarut sepenuhnya ke dalam cairan *bahan bakar* (lihat Gambar 2). Untuk menentukan waktu pelarutan partikel kamper yang diilustrasikan pada Gambar 2, dapat dilakukan dengan mudah dengan melakukan *trendline* menggunakan Microsoft Excel dengan menghubungkan antara waktu (t) vs konsentrasi (w). Hasil *trendline* dapat dijadikan persamaan matematika sederhana untuk menentukan waktu kelarutan kamper dengan konsentrasi kamper yang berbeda-beda ketika dilarutkan ke dalam *bahan bakar* jenis pertalite.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Kamper terhadap Bilangan Oktana

Nilai bilangan oktana pada masing-masing sampel percobaan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya konsentrasi aditif kamper yang ditambahkan pada bahan bakar berupa pertalite (lihat Gambar 3). Hasil ini memberikan informasi bahwa penambahan kamper 1-8% berdampak positif terhadap peningkatan bilangan oktana, walaupun memang tidak signifikan pengaruhnya. Pertalite tanpa penambahan aditif kamper (kadar kamper 0%) sebesar 90, dan setelah dilakukan penambahan dengan konsentrasi 1, 4, dan 8% bilangan oktana hanya mengalami peningkatan masing-masing sebesar 90,3; 90,3; dan 90,4 (lihat Gambar 3). Artinya bahwa penelitian ini memperkuat penelitian yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan Lapisa *et al.* (2017) serta Wibowo & Fauzhia (2021) bahwasanya penambahan kamper sebagai aditif memberikan efek baik terhadap proses pembakaran, terbukti setelah dilakukan uji bilangan oktana terjadi peningkatan bilangan oktana, walaupun tidak signifikan peningkatannya.



Gambar 3. Pengaruh kadar kamper yang dimasukkan terhadap bilangan oktana

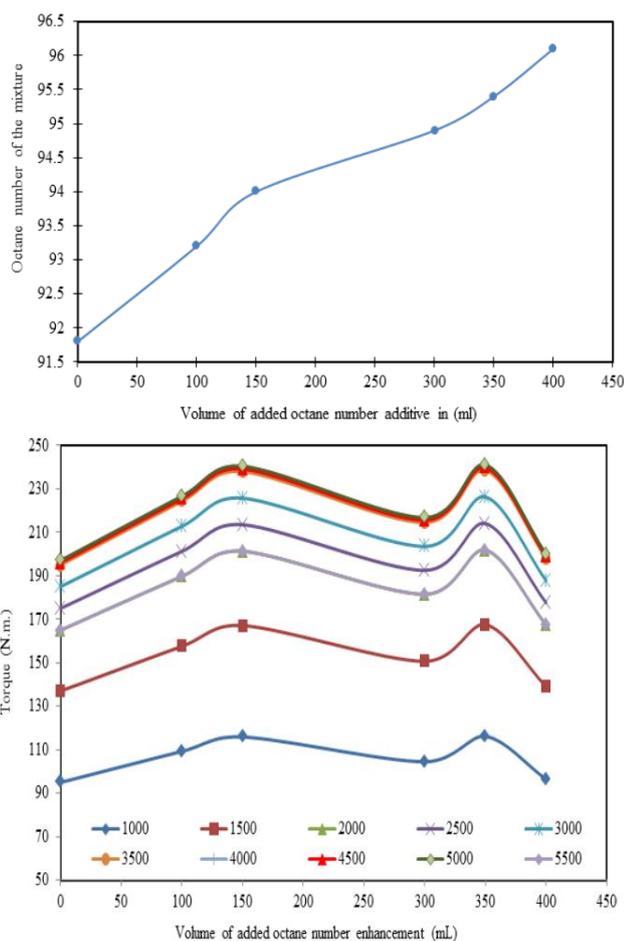
Hasil penelitian ini mempunyai kecenderungan yang sama dengan apa yang dilakukan oleh Mussa (2017), yang menunjukkan bahwa penambahan aditif kamper yang ditambahkan ke bahan bakar pertalite hanya berpengaruh kecil terhadap peningkatan bilangan oktana. Menurut Mussa (2017) dan Hartawan (2021) bahwa kamper akan memberikan dampak pada peningkatan bilangan oktana ketika dicampurkan dengan bahan bakar yang mempunyai bilangan oktana di bawah 90 (jenis bahan bakar premium dengan bilangan oktana 88). Tetapi ketika bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar dengan bilangan oktana 90 ke atas maka dampaknya tidak signifikan lagi. Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah pertalite dengan bilangan oktana 90, dan akibatnya peningkatan bilangan oktana yang dihasilkan tergolong sangat kecil. Jadi dengan data ini dapat memberikan informasi bahwa kamper berdampak besar terhadap peningkatan bilangan oktana pada bahan bakar jenis premium dan tidak untuk pertalite atau pun pertamax. Jika dilihat dari Gambar 4 (a) dan (b) yang dilakukan oleh Ali *et al.* (2023), menunjukkan bahwa peningkatan aditif yang diberikan ke dalam bahan bakar berdampak pada peningkatan bilangan oktana dan berpengaruh pada peningkatan *brake thermal efficiency* yang mengindikasikan seberapa besar energi dari bahan bakar dikonversi menjadi tenaga (Sanjaya *et al.*, 2020). Uji *brake thermal efficiency* oleh Ali *et al.* (2023) yang dilakukan pada rentang *speed engine* 1.000–5.500 rpm, diperoleh kondisi optimal pada *speed engine* 2.000 rpm yang dicapai pada bilangan oktana 94,10. Hasil peningkatan bilangan oktana yang dihasilkan pada penelitian ini sangat kecil yaitu hanya 0,4 point (dari 90 ke 90,4), sehingga potensi untuk mempengaruhi *brake thermal efficiency* juga kemungkinan akan sangat kecil tentunya.

3.2 Pengaruh Kamper terhadap Karakteristik Bahan Bakar

3.2.1 Densitas

Beberapa faktor yang mempengaruhi proses pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar diantaranya adalah rasio udara-bahan bakar (Panggabean *et al.*, 2023; Ramadhan & Noubnome, 2023), pengaturan mesin (Widjatmiko & Listiyono, 2023), bilangan oktana (Halim *et al.*, 2023), serta densitas (Maulana *et al.* 2023). Densitas merupakan parameter cukup penting dan paling mudah dalam pengukurannya. Densitas bahan bakar akan

mempengaruhi proses pembakaran yang terjadi, yang mana semakin tinggi densitas suatu bahan bakar maka dimungkinkan semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya proses pembakaran bahan bakar pada kondisi operasi pembakaran yang sama. Hal ini terjadi karena semakin besar densitas bahan bakar, maka *boiling point* bahan bakar akan mengalami peningkatan. Tetapi sisi positif dengan meningkatnya densitas bahan bakar, maka akan berpotensi menurunkan ketukan yang terjadi akibat terjadinya pembakaran spontan. Hasil kajian yang dilakukan oleh Ali et al. (2023) menunjukkan bahwa ada relasi antara peningkatan bilangan oktana dengan densitas, LHV (*Low Heating Value*) dan ketukan. Semakin tinggi bilangan oktana, ternyata berpengaruh pada peningkatan densitas, penurunan LHV, dan peningkatan anti ketukan (anti *knocking*). Fenomena penurunan LHV yang berimbas pada *brake thermal efficiency* (khususnya pada bilangan oktana di atas 94,1) yang terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Ali et al. (2023) yaitu mengalami penurunan (lihat Gambar 4.b), ternyata selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Gunawan & Gunawan (2020). Pada penelitian yang dilakukan oleh Gunawan & Gunawan (2020) juga menunjukkan bahwa nilai LHV yang lebih kecil menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih kecil pula.

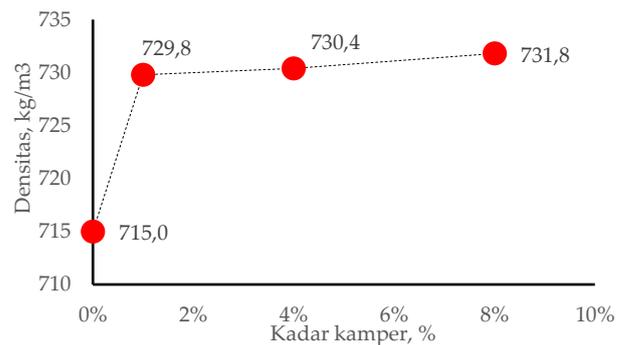


Gambar 4. Pengaruh penambahan aditif terhadap: (atas) peningkatan bilangan oktana, (bawah) *brake thermal efficiency* (Ali et al., 2023)

Tabel 2. Hasil uji karakteristik pada penambahan aditif komersial pada gasoline pada RON 91,80 (Ali et al., 2023)

Parameter karakteristik	Penambahan aditif				
	100 ml	150 ml	300 ml	350 ml	400 l
Densitas, g/cm ³	0,7713	0,7744	0,7765	0,778	0,7789
LHV, KJ/Kg	43412	43150	42970	42611	42266
Bilangan Oktana (RON)	93,20	94,10	94,90	95,20	96,10
Anti Knocking	86,55	87,20	87,60	87,70	87,80

Pada Gambar 5 terlihat bahwa densitas cenderung mengalami peningkatan, seiring meningkatnya kadar kamper yang diberikan. Hasil pengukuran densitas pada kadar kamper 0, 1, 4, dan 8% berurut-turut adalah 715; 729,8; 730,4; dan 731,8 kg/m³. Densitas tersebut masih masuk dalam rentang yang diijinkan untuk bahan bakar jenis pertalite, yaitu 715–770 kg/m³ (lihat Tabel 1). Kecenderungan yang terjadi pada penelitian ini mempunyai kemiripan pada penelitian yang dilakukan oleh Kaisan et al., 2020) yang mana terjadi peningkatan densitas (berupa spesifik densitas) dari 0,7572 (untuk bensin tanpa kamper) menjadi 0,7588 (untuk bensin dengan kamper 10 gram).



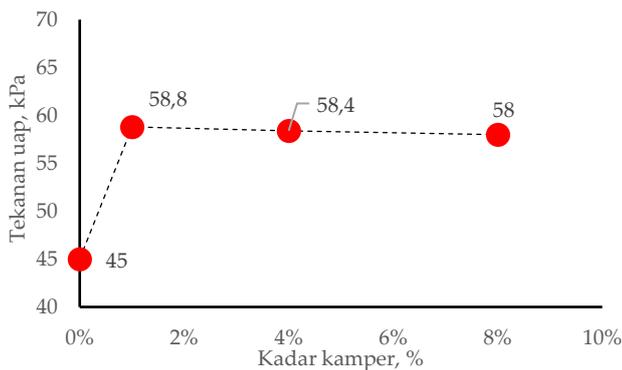
Gambar 5. Pengaruh kadar kamper yang dimasukkan terhadap densitas

Pada dasarnya rentang densitas bahan bakar sudah tertentu, misalnya densitas solar berkisar pada 815–880 kg/m³, sedangkan pada bahan bakar pertalite berada pada kisaran 715–770 kg/m³. Jadi ketika densitas berada pada kisaran di luar rentang tersebut, akan berimbas tidak baik pada proses pembakaran yang terjadi. Densitas bahan bakar yang terlalu besar akan meningkatkan konsumsi bahan bakar atau semakin boros. Hal ini terjadi karena densitas yang terlalu besar akan menghasilkan nilai kalor yang lebih kecil, sehingga menyebabkan kualitas energi yang dihasilkan akan lebih rendah (Wijaya et al., 2012). Hasil penelitian Wijaya et al. (2012) ini juga terkonfirmasi oleh penelitian yang dilakukan oleh Ali et al. (2023) dan Gunawan & Gunawan (2020) seperti yang telah dideskripsikan sebelumnya.

3.2.2 Tekanan Uap

Tekanan uap suatu senyawa menunjukkan suatu nilai dimana fase gas memiliki kesetimbangan dengan fase cairnya. Semakin tinggi nilai tekanan uap dari suatu senyawa, maka

memiliki arti bahwa lebih banyak fase uap dalam kesetimbangan uap cair dari suatu senyawa tersebut. Kecenderungan besarnya nilai tekanan uap ini juga berarti senyawa tersebut lebih *volatile*. Terlihat pada Gambar 6 bahwa nilai tekanan uap pada penambahan kamper sebanyak 1% mengalami peningkatan, tetapi ketika konsentrasi kamper dinaikan ke 4% dan 8% tekanan uap mengalami penurunan. Fenomena ini terjadi dampak dari kesetimbangan uap-padat bahan bakar, dan interaksi intermolekular yang terjadi di dalam larutan tersebut (Silva *et al.*, 2004). Pada pertalite tanpa aditif tidak ada interaksi ikatan hidrogen antar molekul dibandingkan campuran pertalite-naftalena (naftalena dari kamper), sehingga menyebabkan perluasan ikatan hidrogen (Pumphrey *et al.*, 2000). Perluasan tersebut menyebabkan kesetimbangan uap-cair terganggu, dan akibatnya campuran pertalite-naftalena menjadi mudah teruapkan yang ditandai dengan peningkatan tekanan uap. Interaksi yang terjadi pada pertalite merupakan interaksi nonpolar berupa dispersi london dan dipol-dipol terinduksi dan akan terganggu akibat kehadiran naftalena. Hal tersebut menyebabkan entropi kesetimbangan uap-padat berubah sehingga bahan bakar lebih mudah menguap (Anderson *et al.* (2010); Shirazi *et al.* (2019)), dan fenomena ini hanya terjadi pada konsentrasi kamper yang rendah. Pada saat konsentrasi dinaikan menjadi 4 dan 8% fenomena berbeda, yang mana dampak peningkatan densitas lebih dominan (lihat Gambar 5).



Gambar 6. Pengaruh kadar kamper yang dimasukan terhadap tekanan uap

Secara teoritis semakin besar densitas suatu fluida, maka sifat volatilitas suatu zat akan mengalami penurunan. Berdasarkan hasil percobaan hasil percobaan pada Gambar 6 memberikan informasi bahwa penambahan aditif naftalena pada pertalite membuat senyawa bahan bakar pada kondisi tertentu akan berakibat pada bahan bakar sedikit lebih sulit terbakar secara spontan di dalam ruang bakar, yang ditandai dari tekanan uap yang cenderung lebih kecil dibandingkan dengan pertalite tanpa penambahan aditif. Kondisi ini berdampak baik pada proses pembakaran, karena akan menghindari terjadi ketukan atau *knocking* pada saat proses pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar seperti yang telah dideskripsikan dan tervalidasi oleh penelitian yang dilakukan oleh Ali *et al.* (2023).

3.3 Pengaruh Kamper terhadap Emisi Gas Buang

Pengukuran emisi pada penelitian ini dilakukan pada nilai tekanan uap tertingginya yaitu pada penambahan kamper dengan kadar 1%. Hal tersebut dilakukan dengan

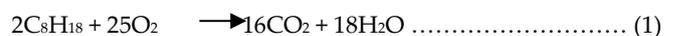
pertimbangan bahwa pada kondisi tersebut dimana RVP tinggi dan densitas lebih rendah dibandingkan konsentrasi 4 dan 8%, maka lebih berpotensi terjadi pembakaran spontan dibandingkan pada kadar 4 ataupun 8%. Pengukuran dilakukan berbasis pada perubahan kadar karbon monoksida (CO), Hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO₂), dan oksigen (O₂). Sebenarnya visual luaran emisi berbahaya atau tidak dapat dilihat dari warna gas yang keluar (Fesser *et al.*, 2018). Ketika gas luaran tidak berwarna, maka kemungkinan aman. Tetapi tentunya tolak ukur visual sulit dijadikan acuan, sehingga untuk memastikan memang perlu dilakukan analisis lebih lanjut.

Terlihat pada Tabel 3, nilai kadar CO antara pertalite tanpa aditif kamper dan dengan adanya penambahan aditif kamper sebesar 1% mengalami penurunan sebesar 0,16% (dari 2,08 menjadi 1,92%). Data tersebut menunjukkan bahwa pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar menjadi lebih sempurna dan efisiensi pembakaran mengalami peningkatan, dengan dilakukan penambahan kamper ke dalam bahan bakar pertalite, walaupun tidak signifikan dampaknya. Penambahan aditif kamper juga ternyata dapat menekan kadar HC luaran dari gas emisi yang dihasilkan (lihat Tabel 3). Adanya oksigen di dalam senyawa naftalena yang terkandung di dalam kamper memicu terjadinya peningkatan rasio oksigen dengan bahan bakar pada mesin secara tidak langsung. Pada kondisi ini maka hidrokarbon (HC) yang terkandung di dalam bahan bakar akan lebih banyak terbakar, sehingga kadar HC dapat menurun apabila dibandingkan tanpa tambahan aditif.

Tabel 3. Hasil uji emisi gas buang

No	Bahan Bakar	Parameter			
		CO (%)	HC (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
1	Pertalite (tanpa aditif)	2,08	1509	3,0	13,94
2	Sampel 1 %	1,92	1428	3,1	13,30

Hasil pada penelitian ini diperkuat dengan observasi yang dilakukan oleh Munther (2017) yang menunjukkan bahwa terjadi penurunan kadar HC di dalam gas buang setelah dilakukan penambahan aditif naftalena ke dalam bensin. Peningkatan kadar oksigen di dalam ruang bakar juga menyebabkan terjadinya pembakaran terjadi lebih sempurna (Tirtoatmodjo, 2000; Srinivas Rao *et al.*, 2019). Kondisi ini dapat dilihat dari luaran gas buang terutama kandungan gas CO dan CO₂, yang mana kadar CO akan mengalami penurunan dan kadar CO₂ akan mengalami peningkatan. Jika dilihat dari hasil pengujian CO₂ pada penelitian ini, menunjukkan fenomena tersebut, yang mana kadar CO₂ yang dihasilkan lebih tinggi bahan bakar yang ditambah kamper dibandingkan dengan bahan bakar pertalite yang tidak di tambah kamper (lihat Tabel 3). Fenomena tersebut secara teoritis dapat dijelaskan dengan menggunakan Persamaan (1) yaitu konsep reaksi pembakaran.



dimana C₈H₁₈ adalah bahan bakar yang digunakan berupa gasoline.

Dari Persamaan 1 dapat diilustrasikan bahwa pada saat kadar CO₂ meningkat, maka secara otomatis konsumsi oksigen di dalam pembakaran meningkat, dan pembakaran menjadi lebih sempurna. Pada hasil uji emisi gas buang (Tabel 3) terlihat bahwa kadar oksigen (O₂) pada luaran gas buang, kandungan oksigen pada gas buang untuk bahan bakar bensin (gasoline) dengan penambahan kamper lebih rendah dibandingkan tanpa adanya penambahan kamper. Hasil ini membuktikan bahwa oksigen terpakai lebih banyak pada pembakaran pada bahan bakar bensin dengan adanya kamper dibandingkan dengan bahan bakar bensin tanpa adanya kamper.

3.4 Penentuan Waktu Larut Kamper dalam Peralite

Pada Tabel 4 terlihat waktu pelarutan kamper dari awal dimasukan sampai habis terlarut untuk masing-masing kadar kamper berbeda-beda. Pada kadar kamper 1, 4, dan 8% berturut-turut waktu peluruhannya adalah 5 menit 50 detik (5,83 menit); 18 menit 35 detik (18,58 menit), dan 26 menit 51 detik (26,85 menit). Jika diamati (Tabel 4) kamper membutuhkan waktu yang cukup lama untuk melarut ke dalam pertalite, dan jika dimasukan ke tangki bahan bakar langsung yang ada di dalam kendaraan, maka potensi penyumbatan bagian *suction line* pompa bahan bakar sangat besar. Untuk itu harus dilakukan diluar tangki bahan bakar, dan ketika sudah terlarut baru dimasukan ke dalam tangki bahan bakar kendaraan.

Tabel 4. Hasil uji waktu pelarutan kamper

No	Sampel	Waktu (menit)					
		0	1'	2'	3'	4'	5'50''
1	Sampel 1%						
	Massa (gr)	1	0,9	0,6	0,4	0,3	0
2	Sampel 4%						
	Massa (gr)	4	3,6	3,0	2,2	1,2	0
3	Sampel 8%						
	Massa (gr)	8	7,0	5,8	4,2	2,4	0

Ketika dilakukan *trendline* pada Gambar 7 yang merupakan hubungan antara waktu dan kadar kamper dihasilkan Persamaan 2.

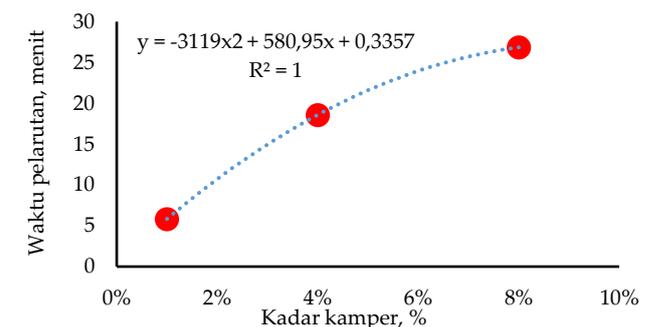
$$t = (580,95 w + 0,3357) - 3119w^2 \dots\dots\dots(2)$$

Dengan, t = waktu pelarutan (menit), w = persentase kamper (%)

Persamaan 2 yang dihasilkan dengan *trendline* di excel sangat membantu guna memprediksi waktu pelarutan baik secara interpolasi (di dalam rentang 1–8%) maupun ekstrapolasi (diluar kadar yang dilakukan), sehingga potensi kesalahan tindakan pada saat menjalankan kendaraan bermotor bisa dihindari sejak awal. Walaupun untuk penggunaan Persamaan 2 perlu divalidasi dengan rentang kadar yang agak lebar untuk menguji keefektifan penggunaan Persamaan 2 tersebut.

Kamper yang dijual di retail ataupun toko bersumber dari alam (pohon *Cinnamomum Camphora*), dan menurut

Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) cenderung aman (Ardiyanto, 2017), tetapi kadar naftalena sebenarnya hanya kecil yaitu 1,79% dari total penyusun kamper tersebut (Wang et al., 2022), yang sebagian besar didominasi oleh terpenoid (C₁₀H₁₆O) (Rosyidi et al., 2023). Kondisi ini yang menyebabkan naftalena sebagai aditif pertalite kurang maksimal dampaknya. Tetapi jika dilihat dari sifat fisis naftalena sendiri mangacu *Material Safety Data Sheet* (MSDS), naftalena merupakan bahan beracun yang bersifat akut (kategori 4), dan dapat berpotensi menjadi pemicu atau menyebabkan penyakit kanker (Carl Roth, 2023) dan anemia hemolitik (Rosyidi et al., 2023) pada pemakaian jangka panjang. Oleh karena itu, penggunaan naftalena untuk aditif khususnya naftalene murni tidak disarankan untuk jangka waktu panjang dan sebisa mungkin perlu dihindari. Jika mengacu pada penelitian Kaisan et al. (2020) lebih disarankan menggunakan alkohol sebagai aditif bahan bakar bensin dibandingkan kamper yang mengandung naftalena, selain lebih aman dibandingkan naftalena juga mampu mereduksi emisi gas lebih baik. Hasil penelitian yang dilakukan Kaisan et al. (2020), emisi gas yang dihasilkan dengan penggunaan alkohol jenis propanol, mampu mereduksi kadar HC dan CO di dalam gas buang mesin bensin (gasoline) dari sebesar 453 ppm dan 0,45 ppm (dengan kamper 10 gram), menjadi 340 dan 0,32 ppm ketika bensin ditambahkan propanol 5% volume.



Gambar 7. Pengaruh kadar kamper yang dimasukan terhadap waktu pelarutan (peluruhan)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan aditif kamper pada bahan bakar pertalite memiliki pengaruh terhadap peningkatan bilangan oktana, tetapi sangat tidak signifikan pengaruhnya, khususnya untuk dicampurkan ke dalam bahan bakar yang mempunyai bilangan oktana di atas 90. Penambahan kamper ke dalam bahan bakar tidak berdampak buruk terhadap emisi gas buang, dan tidak berimbas negatif pada lingkungan khususnya terhadap luaran dari emisi gas buang pembakaran. Tetapi dari segi ekonomi, penambahan kamper ke dalam bahan bakar pertalite kurang ekonomis, karena pengaruhnya sangat kecil terhadap terhadap peningkatan bilangan oktana dan penurunan emisi gas buang, dan juga perubahan karakteristiknya cenderung fluktuatif khususnya terhadap tekanan uap yang mengalami peningkatan pada kadar 1%, selanjutnya mengalami penurunan. Kondisi ini akan mempengaruhi performa pembakaran tentunya. Selain itu waktu pelarutan kamper juga tergolong lama yaitu 5–26 menit, sehingga harus

dilakukan diluar tangki bahan bakar. Oleh karena itu, berdasarkan hasil penelitian ini, penambahan kamper sebagai aditif alternatif bahan bakar pertalite tidak direkomendasikan, karena selain dampaknya tidak signifikan terhadap peningkatan angka oktana, penurunan gas buang, serta karakteristik yang fluktuatif, ternyata berpotensi menjadi pemicu atau menyebabkan penyakit kanker, walaupun kadar naftalena pada kamper tergolong kecil yaitu sekitar 1,97%. Namun jika hal itu terus dilakukan maka tidak menutup kemungkinan seseorang dapat terkena kanker.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Prodi Magister Teknik Kimia, Prodi Sarjana Teknik Kimia, serta Lemigas, sehingga penelitian ini dapat terlaksana. Semoga penelitian dapat menjadi informasi yang bermanfaat bagi masyarakat luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, K. K., Hameed, A. Q., & Al-Obaidi, M. A. (2023). An experimental investigation of the performance indicators of gasoline engine with octane number additive. *Ratio*, 8(3).
- Anderson, V. F., Anderson, J. E., Wallington, T. J., Mueller, S. A., & Nielsen, O. J. (2010). Vapor Pressure of Alcohol-Gasoline Blends. *Energy & Fuels*, 24 (6), 3647-3654.
- Bara Radhi, A. R. (2020). The Recent Development in Gasoline Upgrading Additives (Octane Boosters). *Journal of Southwest Jiaotong University*, 55(6).
- Budiman, E. D., & Ilyas, M. (2022). 1, 2-dihydroxynaphthalene as Biomonitoring of Occupational Exposure to Naphthalene.
- Ardiyanto W. (2017). Plus Minus Penggunaan Kapur Barus Di Rumah, www.rumah.com/berita-properti/2017/1/144664/plus-minus-penggunaan-kapur-barus-di-rumah. Retrieved 15 Agustus 2023. www.rumah.com.
- Carl Roth. (2023). Safety Data Sheet Napthalene. United Kingdom. <https://www.carlroth.com/medias> Di unduh tanggal 15 Agustus 2023.
- Galadima, A., & Muraza, O. (2015). Role of zeolite catalysts for benzene removal from gasoline via alkylation: A review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 213, 169-180.
- Gunawan, W., & Gunawan, B. A. (2020). Studi Efisiensi Boiler Terhadap Nilai Kalor Batubara Pada Boiler Jenis Pulverizer Coal Kapasitas 300 T/H. *Jurnal Intent: Jurnal Industri Dan Teknologi Terpadu*, 3(2), 122-130.
- Halim, R. G., Riza, A., & Darmawan, S. (2023). Pengaruh Nilai Oktan terhadap Unjuk Kerja Mesin dan Kajian Analisis Pembakaran Akibat Delay Combustion pada Mesin Otto Satu Silender. *Jurnal Cahaya Mandalika ISSN 2721-4796 (online)*, 3(1), 223-230.
- Hartawan, E. (2021). beli-pertalite-dicampur-kapur-barus-bisa-naikan-oktana-beneran-nih? <https://www.motorplus-online.com>. Di unduh tgl 23 Februari 2023, pukul 14.58 WIB
- Kaisan, M. U., Yusuf, L. O., Ibrahim, I. U., Abubakar, S., & Narayan, S. (2020). Effects of propanol and camphor blended with gasoline fuel on the performance and emissions of a spark ignition engine. *ACS omega*, 5(41), 26454-26462.
- Kemenperin (2021). Menperin:-Industri-Otomotif-Jadi-Sektor-Andalan-Ekonomi-Nasional. <https://www.kemenperin.go.id/artikel/22297/>. Di unduh tgl 23 Februari 2023, pukul 15.00 WIB
- Kim, Y. H. (2016). Energy saving of benzene separation process for environmentally friendly gasoline using an extended DWC (divided wall column). *Energy*, 100, 58-65.
- Lapisa, R., Putra, D. S., Arif, A., & Abda'u, S. A. (2017). Effect of Gasoline Additive Materials on Engine Performance. 4th International Conference on Technical and Vocational Education and Training (TVET), PP 126-129.
- Maulana, S., Syahid, D. N., Widjanarko, D., & Setiyawan, A. (2023). Pengaruh Pemanasan Awal (Pre-heater) Bahan Bakar terhadap Performa Mesin Diesel dengan Pemanas Kontrol Otomatis di Laboratorium Pengujian Performa Mesin Jurusan Teknik Mesin FT Unnes.. *JMEL: Journal of Mechanical Engineering Learning*, 12(1), 39-48.
- Munther, A., M. (2017). Experimental Study on The Combustion and Exhaust Emissions of Otto Engine Fuel with Naphthalene-Gasoline Blends. Department of Mechanical Engineering, University of Baghdad.
- Mussa, M. A. (2017). Experimental study on the combustion and exhaust emissions of otto engine fuel with naphthalene-gasoline blends. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 10(1), 58-70.
- Panggabean, T., Mandang, T., Nelwan, L. O., & Hermawan (2023), W. Pengaruh Laju Umpam Bahan Bakar dan Laju Aliran Udara terhadap Kinerja Pembakaran Tungku Fixed Bed. *agriTECH*, 43(1), 32-46.
- Pumphrey, J. A., Brand, J. I., & Scheller, W. A. (2000). Vapour Pressure Measurements and Predictions for Alcohol - Gasoline Blends. *Fuel*, 79 (11), 1405-1411.
- Radifan, H. H., & Lindawati, L. (2018). Pengaruh Kecepatan Alir Udara dan Temperatur Terhadap Perpindahan Massa Padat dan Gas (Disk Naftalen-Udara) Dalam Sistem Kolom Akrilik. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 2(3).
- Ramadhan, M. F., & Noubnome, V. (2023). Analisa Pengaruh Variasi Nilai Air Fuel Ratio (AFR) Terhadap Prestasi Mesin. *JURNAL KAJIAN TEKNIK MESIN*, 8(1), 131-140.
- Rosyidi, A. A., Narendra, H. H., Yahya, A., & Handayani, Y. (2023). Kamper Aromatik Dari Limbah Parafin Dengan Penambahan Ekstrak Kulit Jeruk Nipis Untuk Alternatif Kamper Pabrikasi. *Jurnal Integrasi Sains dan Qur'an (JISQu)*, 2(02), 197-203.
- Sanjaya, F. L., Syaiful, S., & Syarifudin, S. (2020). Brake spesific fuel consumption, brake thermal efficiency, dan emisi gas buang mesin bensin EFI dengan sistem EGR berbahan bakar premium dan butanol. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 9(2), 170-176.
- Sari (2022). Kapur Barus Bisa Meningkatkan Oktana Bensin? Kompas.com diunduh tanggal 26 Juli 2023

- Shirazi, S. A., Abdollahipoor, B., Martinson, J., Windom, B., Foust, T. D., & Reardon, K. F. (2019). Effect of Dual Alcohol Gasoline Blends on Physiochemical Properties and Volatility Behavior. *Fuel* 252, 542-552.
- Silva, R. D., Cataluna, R., Menezes, R. E. W. D., Samios, D., Piatnicki, C. M. S. (2004). Normal Butanol Additive in Methanol-Gasoline Blends Fired in a Spark Ignition Single Cylinder Engine : Effects of Combustion and Emissions Characteristics. *Irbis*
- Srinivas Rao, T., Jakeer Hussain, S., Dhana Raju, V., Venu, H., & Subramani, L. (2022). Experimental assessment of various fuel additives on the performance and emission characteristics of the spark ignition engine. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1333-1338.
- Tirtoatmodjo, R. (2000). Pengaruh Naphtalene Terhadap Perubahan Angka Oktan Bensin Unjuk Kerja Motor Dan Gas Buangnya. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(2), 97-101.
- Vrablik, A., Schlehofer, D., Dlasková Jaklová, K., Hidalgo Herrador, J. M., & Cerny, R. (2022). Comparative study of light cycle oil and naphthalene as an adequate additive to improve the stability of marine fuels. *ACS omega*, 7(2), 2127-2136.
- Wang, L. M., Chen, Q. Y., Zhong, Z., Yi, Y., Hou, W. F., & Wang, H. X. (2022). Research on variation of volatile compounds of Cinnamomum cassia Presl in different processing stage of stewed beef. *Food Science and Technology*, 42.
- Wibowo, F. E., & Fauzhia, R. (2021). Pengaruh Rasio Campuran Naphtalene pada Premium terhadap Efisiensi Bahan Bakar dan Kinerja Mesin Sepeda Motor 4tak. *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 5(2), 114-124
- Wijaya, I., Arthawan, I., & Sari AN. (2012). Potensi Nira Kelapa sebagai Bahan Baku Bioetanol. *Jurnal Bumi Lestari* Vol. 12, No. 1, 85-92.
- Widjatmiko, M. B. S., & Listiyono, L. (2023). Analisis pengaturan sudut pengapian dan durasi injeksi terhadap torsi motor bensin volume 2000 cm3. *Nautical: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 2(8), 538-546