

Kecepatan Pembakaran Laminar dan Tinggi Api Premix pada Campuran Pertamax-Avgas dengan Etanol

Muhammad Nur Cahyo Hidayat Nasrullah¹, Muh Nurkoyim Kustanto^{2*}, Mahros Darsin², Nasrul Ilminnafik²,
Skriptyan Noor Hidayatullah Syuhri²

¹Akademi Penerbang Indonesia Banyuwangi; nurcahyohidayat@icpa-banyuwangi.ac.id

²Universitas Jember; nurcahyohidayat@icpa-banyuwangi.ac.id; nurkoyin@unej.ac.id;
mahros.teknik@unej.ac.id; nasrul.teknik@unej.ac.id; skriptyan.syuhri@unej.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.xxxxx/xxxxx>

*Muh Nurkoyim Kustanto

Email: nurkoyin@unej.ac.id

Published: Januari, 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstrak: Bahan bakar penerbangan yang umum digunakan untuk pesawat dengan tipe mesin reciprocating adalah avgas 100 LL. Keandalan penggunaan bahan bakar ini masih belum tergantikan, khususnya di daerah Indonesia. Pada umumnya avgas menggunakan zat aditif berbahaya berupa tetraethyl lead atau timbal untuk meningkatkan performa bahan bakar ini. Meskipun dapat meningkatkan performa, zat aditif ini terkenal menjadi cancer agent hingga penyebab penurunan IQ akademik pada anak-anak. Beberapa penelitian untuk mengurangi penggunaan timbal pada bahan bakar penerbangan sudah beberapa kali dibahas oleh para peneliti, salah satunya dengan mencampurkan avgas dengan bahan bakar konvensional tanpa timbal. Namun jarang yang membahas mengenai kecepatan pembakaran laminar (S_L) pada topik tersebut. Artikel ini bertujuan untuk mengetahui dampak pencampuran bahan bakar avgas dengan pertamax serta penambahan etanol, serta variasi nosel burner terhadap kecepatan pembakaran laminar (S_L) dan tinggi api premix yang dihasilkan pada rasio ekuivalen 0,8; 1,0; dan 1,2. Metode bunsen burner dipilih sebagai alat pengujian, karena dinilai simpel dan memiliki hasil yang cukup akurat. Dari pengujian yang dilakukan etanol memiliki nilai S_L tertinggi. Campuran avgas dan pertamax memiliki kecepatan pembakaran yang lebih rendah dibanding avgas 100 LL murni, namun lebih tinggi dari pada pertamax murni. Sebaliknya hasil tinggi api berbanding terbalik. Namun dapat diketahui bahwa penambahan volume 30% etanol pada campuran terbukti meningkatkan kecepatan pembakaran yang dihasilkan. Selain data dari variasi bahan bakar, pengujian juga dilakukan dengan variasi diameter nosel. Dapat diketahui bahwa diameter nosel mempengaruhi nilai S_L .

Keywords: api premix, avgas 100LL, bahan bakar penerbangan, kecepatan pembakaran, pesawat mesin piston.

PENDAHULUAN

Pesawat udara masih menjadi pilihan moda transportasi yang paling cepat, efisien, dan terjangkau (Li dkk., 2022; Ramdani dkk., 2019), namun demikian industri aviasi menjadi tetap harus berkomitmen pada keamanan, bahkan di tengah risiko yang sangat tinggi (Cusick dkk., 2017; Sun dkk., 2021). Hal ini dikarenakan pesawat udara didukung dengan berbagai teknologi tinggi (*high tech*) (Więckowski, 2021). Agar bekerja dengan baik pesawat membutuhkan mesin pendorong yang memiliki kemampuan yang mendukung. Pada dasarnya, jenis mesin pesawat dibagi menjadi dua, *jet engine* dan *piston engine* (El-Sayed, 2017). Pesawat *jet engine* atau *gas turbine engine* merupakan pesawat komersil yang banyak dimanfaatkan maskapai penerbangan untuk membawa penumpang maupun kargo dalam jumlah besar dan perjalanan yang sangat jauh (Seymour dkk., 2020). Bahan bakar yang digunakan pada mesin ini pada umumnya adalah *avtur* (*aviation turbine*).

Sedangkan pesawat dengan *piston engine* atau *reciprocating* merupakan pesawat yang dimanfaatkan pada *general aviation* seperti pada penggunaan pelatihan terbang atau juga sering digunakan dalam bidang agrikultur (Pan dkk., 2020). Pesawat dengan mesin piston sendiri beroperasi dengan prinsip yang sama seperti mesin busi (*spark ignition*) pada mobil, tetapi memiliki persyaratan kinerja yang jauh lebih tinggi (Bishop & Elvers, 2021). Selain itu mesin pesawat piston beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dan menghasilkan daya yang lebih besar (Kumar dkk., 2018b). Bahan bakar yang digunakan untuk mesin pesawat ini adalah *aviation gasoline (avgas)*. Bahan bakar avgas memiliki karakteristik yang dapat mencegah terjadinya detonasi, sehingga tidak mempengaruhi keselamatan penerbangan dan keandalan operasional pesawat udara (Ershov dkk., 2021).

Bahan bakar dikatakan dapat mencegah terjadinya detonasi jika telah memenuhi persyaratan nilai oktan yang memadai. Hal ini penting karena bahan bakar dengan nilai oktan yang cukup tinggi memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menghindari efek *knocking*, yang bisa merusak mesin dan mengganggu mengurangi kinerja mesin (Kumar dkk., 2018b; Yusri dkk., 2018). Avgas merupakan bahan bakar dengan tambahan zat aditif spesial yang diperuntukkan dalam penggunaan pesawat dengan mesin piston (Kumar dkk., 2019). Zat aditif tersebut adalah TEL atau *thetra ethil lead*, yang telah dikenal karena kemampuannya dalam menangani permasalahan *knock* pada mesin (Kumar dkk., 2020b). Jika tidak ada bahan tambahan TEL ini, tingkat oktan pada avgas akan terlalu rendah, sehingga akan menyebabkan meningkatnya risiko kegagalan mesin dalam memperoleh tenaga yang dibutuhkan pesawat (Kumar dkk., 2018a). Salah satu jenis avgas yang banyak dipakai adalah avgas 100 LL (*low lead*), bahan bakar ini telah lulus uji standar ASTM D910 atau DEF STAN 91-90 (Karakoç dkk., 2018).

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, avgas memiliki kandungan timbal atau *thetra ethil lead (TEL)* untuk meningkatkan nilai *research octane number (RON)* (Kumar dkk., 2019). Namun demikian, meski fakta tentang peran besar TEL sebagai zat aditif untuk pencegah *knock* dalam pesawat *piston engine* sudah tidak diragukan lagi, kenyataannya avgas 100 LL memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan, terutama pengaruhnya terhadap kesehatan manusia (Kumar dkk., 2018a). Kandungan timbal yang mengalir pada darah dengan jumlah tertentu dapat menjadi *cancer agent* untuk orang dewasa (Shiek dkk., 2021). Sedangkan untuk anak-anak dampak yang terjadi dapat mengakibatkan penurunan IQ, hingga gangguan akademik di sekolah jika terakumulasi dalam beberapa tahun (Kumar dkk., 2018a; Shiek dkk., 2021). Selain itu, alasan ekonomi juga menjadi kelemahan bahan bakar avgas 100 LL. Bahan bakar ini memiliki harga dua kali lipat lebih mahal dari pada bahan bakar jenis pertamax (Pertamina, 2023; Rejeki & Ayumi, 2023). Oleh karena itu diperlukan solusi dari permasalahan ini. Salah satu alternatif dalam mengatasi ini adalah dengan melakukan pencampuran bahan bakar avgas dengan mogas (motor gasoline) atau bahan bakar konvensional.

Percobaan penggunaan mogas sebagai bahan bakar pesawat pertama kali dilakukan pada pesawat tipe *Cessna 150* pada tahun 1982, pesawat ini dilengkapi dengan mesin *Continental O-200*. Hasil dari percobaan ini menunjukkan hal yang positif, kemudian selanjutnya *Federal Aviation Administration (FAA)* menunjuk *Piston Aircraft Fuel Inisiatif (PAFI)* sebagai organisasi yang memfokuskan untuk menemukan alternatif bahan bakar pesawat tanpa penggunaan timbal sebagai zat aditif yang selama ini dipakai pada avgas 100 LL (FAA, 2012). Sedangkan untuk penerapannya dalam penggunaan terbang, FAA memberikan ijin kepada pengguna pesawat *piston engine* untuk menjadikan mogas sebagai campuran bahan bakar avgas, namun terlebih dahulu harus melalui pengesahan *supplement type certificate (STC)* yang dikeluarkan oleh FAA (Kumar dkk., 2020a).

Beberapa riset mengenai pencampuran bahan bakar avgas demi mencari alternatif untuk mengurangi penggunaan timbal juga telah dilakukan peneliti, diantaranya dengan mencampurkan avgas dan beragam jenis

mogas (Kumar dkk., 2020a) hingga dengan variasi nilai *MON* (*motor octane number*) (Gökmen dkk., 2021), kemudian penambahan zat aditif berupa *anilin*, *N-metil anilin* atau *m-toluidin* (Wei dkk., 2017) dan *isooctan* dengan *n-heptane* (Ershov dkk., 2021). Dari penelitian tersebut belum ada riset yang menunjukkan dampak pencampuran bahan bakar avgas-mogas terhadap kecepatan pembakaran laminar dan tinggi api. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas analisis dampak pencampuran bahan bakar avgas 100 LL dan mogas jenis pertamax dengan menggunakan metode *Bunsen burner*. Dikarenakan pencampuran avgas dengan mogas dapat menimbulkan efek samping (Sulung dkk., 2023), maka untuk mengatasi hal tersebut, pada penelitian ini ditambahkan etanol sebagai zat aditif. Keputusan untuk memilih etanol sebagai zat aditif dikarenakan sifatnya yang dapat mempengaruhi kecepatan pembakaran pada beberapa jenis *gasoline* (Almarzooq dkk., 2023). Selain penambahan etanol pada bahan bakar campuran avgas-mogas, diameter *burner* juga berperan dalam mempengaruhi kecepatan pembakaran (X. Wang dkk., 2020).

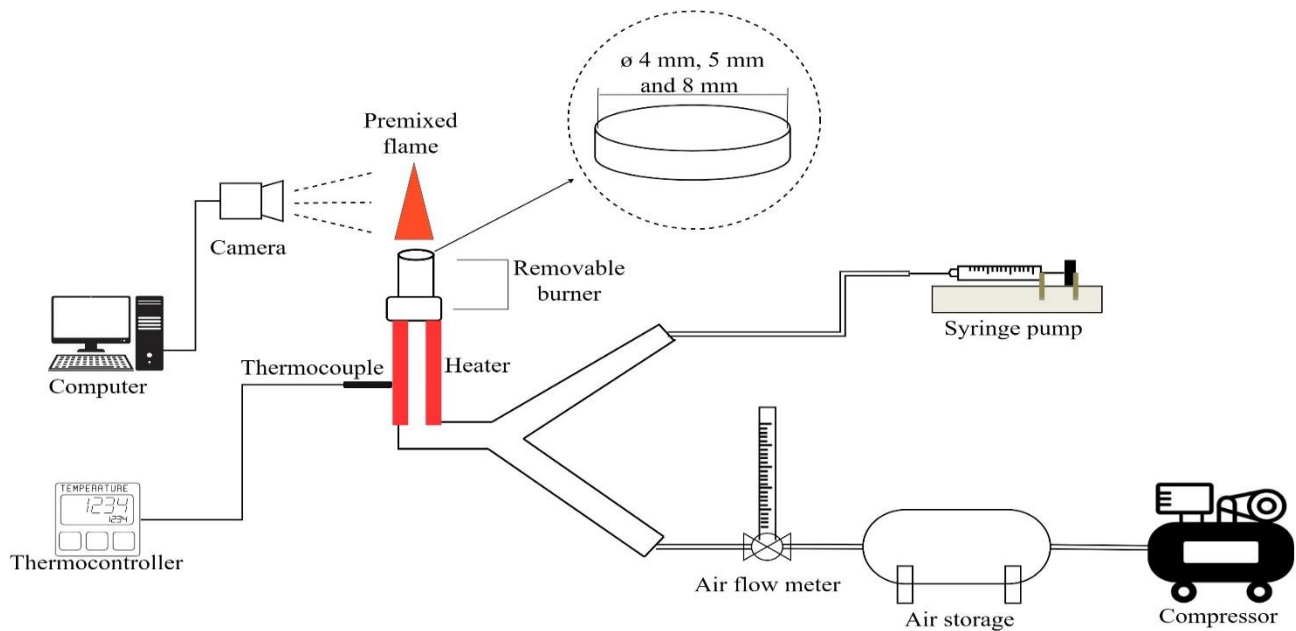
Kecepatan pembakaran merupakan salah satu karakteristik penting yang harus dipenuhi pada bahan bakar mesin *spark ignition*. Kecepatan nyala laminar mempengaruhi sejauh mana campuran bahan bakar dan udara akan terbakar dalam situasi yang ideal (tanpa gangguan turbulensi). Semakin tinggi kecepatan nyala laminar, semakin cepat campuran tersebut akan terbakar. Hal ini berdampak langsung pada laju pembakaran bahan bakar dalam berbagai aplikasi, termasuk mesin pembakaran dalam. Dengan kecepatan nyala laminar yang lebih tinggi, pembakaran bahan bakar dapat lebih efisien dan menghasilkan tenaga yang lebih besar (Chen dkk., 2009; Pizzuti dkk., 2016). Selanjutnya parameter lain yang perlu diperhatikan adalah tinggi api. Dari tinggi api juga dapat diketahui kondisi kecepatan pembakaran. Selain itu, tinggi api merefleksikan *soot* pada proses pembakaran serta mengetahui kesetabilan proses pembakaran (Amell, 2007; Hua dkk., 2020). Dari beberapa literatur yang telah diuraikan, belum ditemukan penelitian yang mengkhususkan mengenai kecepatan pembakaran dan tinggi api premix dari campuran bahan bakar avgas 100 LL, pertamax RON 92 dan penambahan etanol melalui variasi diameter *burner*. Dikarenakan urgensi ini, penelitian ini akan membahas permasalahan kecepatan pembakaran laminar dan tinggi api dari beberapa kondisi bahan bakar dan diameter *burner*.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental (Nasrullah dkk., 2023). Alat uji yang digunakan adalah *Bunsen burner*. Gambar 1 menampilkan ilustrasi dari alat uji yang digunakan untuk menentukan kecepatan pembakaran laminar dan tinggi api. Variasi ujung *burner* yang digunakan terbuat dari material tembaga. Sedangkan diameter *burner* dibuat bisa dilepas agar bisa diubah-ubah untuk memvariasikan lebar *nozzle* dengan diameter 4 mm, 5 mm, dan 8 mm. Pada pengujian variasi diameter, bahan bakar yang digunakan disamakan yakni campuran 50% avgas 100 LL dan 50% pertamax, serta debit udara dan bahan bakar disamakan dengan ekuivalen rasio 0,8;1,0; dan 1,2 pada saat pengujian dengan variasi bahan bakar. Sedangkan bagian utama *Bunsen burner* untuk pencampuran udara-bahan bakar terbuat dari stainless steel dengan bentuk geometri *Y-Junction* dan diberikan pemanas pada bagian leher *burner* untuk menyesuaikan inisial temperatur agar didapat proses pembakaran yang baik untuk menyesuaikan *flash point* bahan bakar (Tian dkk., 2010).

Aliran bahan bakar disesuaikan dengan menggunakan *syringe pump*, sementara aliran udara didapatkan dari kompresor. Debit udara yang keluar dari kompresor kemudian disesuaikan menggunakan *flow meter* udara. Selain itu, debit udara dan bahan bakar disesuaikan untuk mencapai rasio ekuivalen yang telah ditentukan, yaitu 0,8; 1,0; dan 1,2. Nyala api kemudian direkam menggunakan kamera. Kamera ini ditempatkan sejajar dengan ujung *burner* dengan jarak 18 cm. Proses pengambilan video dilakukan pada setiap variasi sebanyak tiga kali

percobaan untuk memastikan validitas data. Hasil video kemudian dikonversi menjadi bentuk gambar menggunakan perangkat lunak aplikasi *AceMovie video editor*.



Gambar 1. Skema alat penelitian

Bahan bakar yang diuji terdiri dari avgas 100 LL, pertamax dan etanol. Selanjutnya dari ketiga bahan bakar ini dilakukan pencampuran dengan persentase volume ditampilkan pada Tabel 1, khusus pada pengujian dengan variasi diameter burner bahan bakar yang digunakan adalah 50% avgas 100 LL dan 50% pertamax. Avgas 100 LL dan pertamax yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari PT. Pertamina (persero), sedangkan etanol yang digunakan memiliki kemurnian 96% yang didapatkan dari PT. Catur Rindang Usaha yang terletak di Tangerang Selatan. Sebelumnya bahan bakar avgas 100 LL dan pertamax dilakukan uji *GC-MS (Gas Chromatography–Mass Spectrometry)* di laboratorium biosain Politeknik Negeri Jember ntuk mengetahui komposisi kedua bahan bakar.

Tabel 1. Persentase campuran pengujian bahan bakar

Kode bahan bakar	Persentase volume
E0A100M0	0% Etanol + 100% AVGAS + 0% MOGAS
E100A0M0	100% Etanol + 0% AVGAS + 0% MOGAS
E0A0M100	0% Etanol + 0% AVGAS + 100% MOGAS
E0A50M50	0% Etanol + 50% AVGAS + 50% MOGAS
E30A35M35	30% Etanol + 35% AVGAS + 35% MOGAS

Hasil api yang telah direkam kemudian diolah menjadi nilai tinggi api dan kecepatan pembakaran. Nilai tersebut didapat dari pengukuran menggunakan software image-J. Namun untuk mengetahui nilai kecepatan pembakaran diperlukan perhitungan dari sudut api yang didapat dari image-J. Pada dasarnya untuk mendapatkan nilai kecepatan pembakaran laminar diperlukan perkalian antara sudut api (α) yang dihasilkan

dengan kecepatan reaktan bahan bakar (Prasetyo & Wahyudi, 2022). Nilai sudut api (α) yang telah didapatkan kemudian dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 1 untuk dapat menentukan kecepatan pembakaran (Nasrullah dkk., 2023).

$$SL = V \cdot \sin \alpha \quad \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

SL : kecepatan pembakaran laminar (cm/s)

V : kecepatan reaktan (cm/s)

α : nilai sudut api ($^{\circ}$)

Sedangkan komponen kecepatan reaktan (V) didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.

$$V = \frac{Q \text{ udara} + Q \text{ bahan bakar}}{A} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

V : Kecepatan reaktan (cm/s)

Q udara : Debit udara (ml/detik)

Q bahan bakar : Debit bahan bakar(ml/detik)

A : Luas penampang (cm^2)

Sebelum melaksanakan pengujian api, terlebih dahulu dilakukan perhitungan rasio ekivalen. Perhitungan rasio ekivalen ini digunakan untuk menentukan pendekatan debit udara dan bahan bakar yang diperlukan nantinya ketika pengujian. Perhitungan rasio ekivalen (ϕ) dilakukan dengan menggunakan persamaan 3 (He dkk., 2019).

$$\text{Rasio ekivalen } (\phi) = \frac{\frac{\text{bahan bakar}}{\text{udara}} \text{ Aktual}}{\frac{\text{bahan bakar}}{\text{udara}} \text{ Stokimetri}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum dilakukan pengujian api, terlebih dahulu dilakukan penyetaraan reaksi kimia dari semua bahan bakar yang akan diujikan. Penyetaraan reaksi kimia dilakukan dengan menggunakan komponen mayor pada tiap bahan bakar sebagai reaktan. Tabel 2 dan Tabel 3 menampilkan komponen penyusun bahan bakar avgas 100 LL dan pertamax dari hasil uji GC-MS. Sedangkan reaktan untuk etanol digunakan komposisi senyawanya adalah 96% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ dan 4% H_2O (Z. Wang dkk., 2021).

Tabel 2. Komponen penyusun avgas 100 LL

No	Nama umum senyawa kimia	Rumus molekul	Volume (%)
1	2-Ethyl Aziridine	C4H8	2,74%
2	Heptane, (2,2,4,6,6-Pentamethylheptane)	C12H26	2,15%
3	Decane, (3,3,4-Trimethyldecane)	C13H28	23,32%
4	Toluene	C7H8	1,97%
5	n-Octadecane	C18H38	1,22%
6	n-Pentadecane	C15H32	1,78%
7	Hexadecane, (2,6,10,14-tetramethyl)	C20H42	2,71%
8	Benzene, (1,4-dimethyl)	C8H10	14,07%
9	Benzene, (1,2,4-Trimethylbenzene)	C9H12	50,05%

Tabel 3. Komponen penyusun pertamax

No	Nama umum senyawa kimia	Rumus molekul	Volume (%)
1	Cyclopentane, (Methylcyclopentane)	C6H12	8,36%
2	Pentane, (2,2-Dimethylpentane)	C7H16	7,95%
3	Benzene, (Isopropylbenzene)	C9H12	12,66%
4	Hexatriacontane (n-Hexatriacontane)	C36H74	12,71%
5	Benzene, (1,3-Di-n-decylbenzene)	C26H46	2,77%
6	4,4-Dimethyl-Adamantan-2-OL	C12H20	8,26%
7	Naphthalene, (2-Methylnaphthalene)	C11H10	15,82%
8	Benzene, (4-Phenylcyclohexene)	C12H14	3%
9	Benzene, (4-heptynyl)	C13H16	4,61%
10	Naphthalene, (2,6-Dimethylnaphthalene)	C12H12	9,5%
11	n-Hexadecane	C16H34	3,81%
12	Hexadecane, (2,6,10,14-Tetramethylhexadecane)	C20H42	10,54%

Komponen penyusun avgas 100 LL, pertamax dan etanol dikombinasikan sesuai persentase yang nantinya akan dijadikan reaktan dalam proses pembakaran. Reaktan ini kemudian direaksikan dengan udara (21% oksigen dan 79% nitrogen) kemudian menghasilkan produk pembakaran CO₂, H₂O dan N₂ dalam proses pembakaran sempurna (Jiang dkk., 2020; Sher dkk., 2020; Z. Wang dkk., 2021). Dari persamaan reaksi kemudian dapat diketahui hasil perhitungan perbandingan udara dan bahan bakar stokiometri. Pada Persamaan 4 ditampilkan perhitungan perbandingan udara dan bahan bakar stokiometri dari campuran 35% avgas 100 LL, 35% pertamax dan 30% etanol.

$$\begin{aligned} \text{AFR stokiometri} &= \frac{\text{jumlah mol udara}}{\text{jumlah mol bahan bakar}} \\ &= \frac{13,44137809 (1+3,7)}{1} = 63,17 \frac{\text{mol udara}}{\text{mol bahan bakar}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{AFR stokiometri} &= \frac{\text{massa molar udara}}{\text{massa molar bahan bakar}} \\ &= 63,17447702 \times \frac{M_W \text{ udara}}{M_W \text{ bahan bakar}} \\ &= 63,17447702 \times \frac{28,97}{134,4457708} \\ &= 13,61 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

Kecepatan pembakaran laminar

Proses pembakaran adalah reaksi kimia eksotermis yang secara fundamental dapat didefinisikan sebagai proses lepasnya ikatan-ikatan kimia lemah bahan bakar akibat pemberian energi tertentu dari luar menjadi atom-atom bermuatan yang aktif kemudian bereaksi dengan oksigen lalu membentuk ikatan-ikatan molekul kuat yang menghasilkan panas dalam jumlah besar dan cahaya (Kohse-Höinghaus, 2021). Bentuk api premix laminar yang paling khas adalah api *bunsen burner*. Secara sederhana rambatan gelombang pembakaran dapat diilustrasikan dengan digambarkan jika tabung pada posisi horizontal berisi reaktan. Jika reaktan (sebelah kiri) tabung horizontal diberi pemantik, maka api akan merambat dari kiri (reaktan) ke kanan (produk) bagian

tabung (Wahyudi, 2013). Sedangkan pada nosel *burner* terdapat dua tipe api, kerucut api premix yang berada dekat dengan mulut nosel dan kerucut luar yang disebut dengan difusi (Sugara dkk., 2023).

Dalam proses pembakaran terjadi gradien temperatur. Temperatur produk yang dihasilkan lebih tinggi daripada temperatur reaktan. Menurut hukum termodinamika, ini menyebabkan terjadinya transfer panas dari produk (yang memiliki temperatur lebih tinggi) ke reaktan (dengan temperatur yang lebih rendah). Distribusi produk yang memiliki suhu tinggi juga menghasilkan distribusi temperatur yang serupa. Sehingga dalam proses ini, transfer panas disertai dengan difusi massa dari produk ke reaktan. Transfer panas yang terjadi terus menerus akan meningkatkan temperatur reaktan. Jika temperatur reaktan terus meningkat maka akan menyebabkan zona pemanasan awal bergeser ke kanan. Karena temperatur zona pemanasan awal lebih tinggi dari sebelumnya, maka menyebabkan terjadinya proses pembakaran. Dengan demikian zona pemanasan awal akan menjadi zona reaksi. Peristiwa ini terjadi secara terus menerus sehingga api akan merambat ke reaktan. Kecepatan rambatan api inilah yang disebut dengan kecepatan pembakaran (Kustanto dkk., 2017; McAllister dkk., 2011; Rallis & Garforth, 1980; Wardana, 2008).

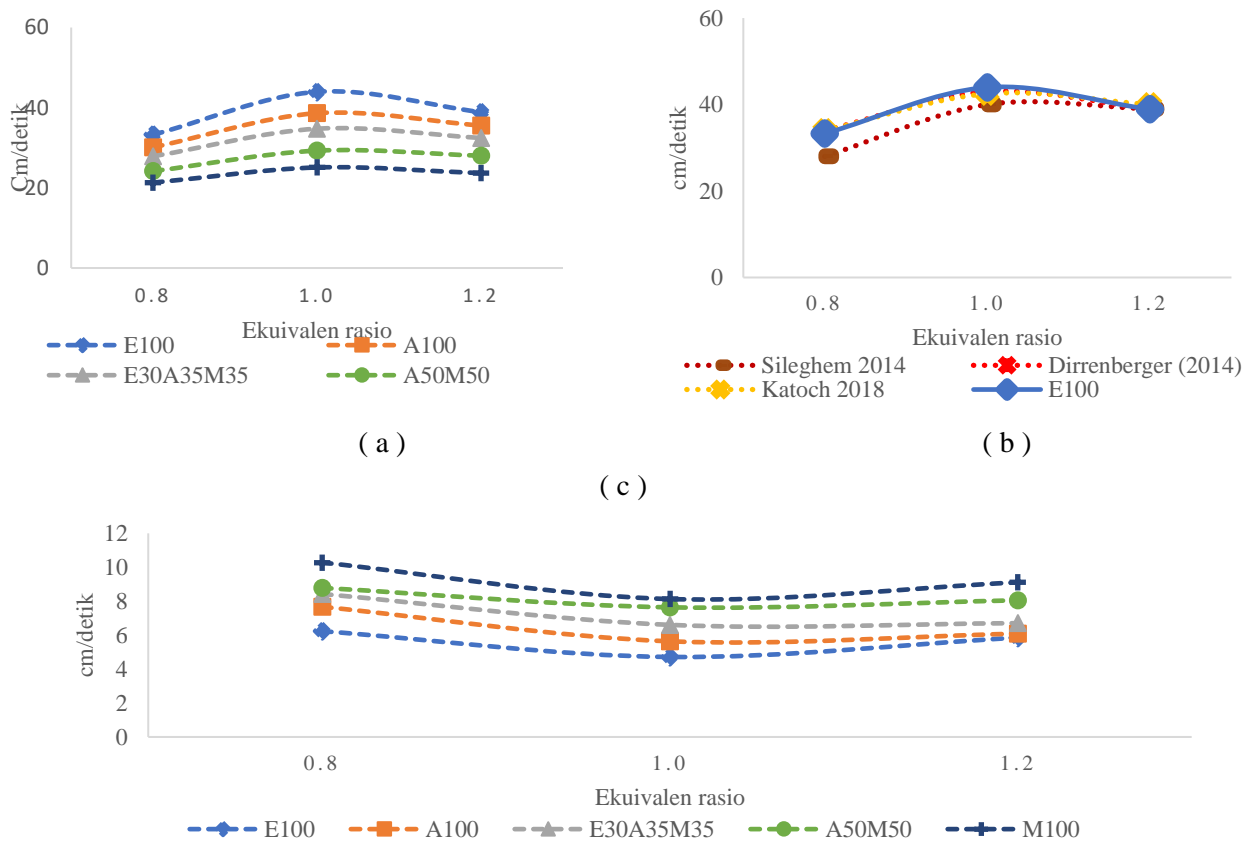
Eksperimen telah dilakukan untuk mengetahui kecepatan pembakaran dari bahan bakar avgas 100 LL, pertamax, etanol dan kombinasi dari bahan bakar tersebut. Dari visualisasi api yang ditangkap kamera lalu dilakukan pengujian tinggi api dan kecepatan pembakaran. Gambar 2a menampilkan grafik nilai kecepatan pembakaran pada penelitian yang telah dilakukan. Dapat diketahui dari Gambar 2a pola nilai kecepatan pembakaran etanol pada ekuivalen rasio 0,8; 1,0; dan 1,2 pada penelitian ini mengkonfirmasi hasil penelitian yang dilakukan oleh (Katoch dkk., 2018). Selain itu, nilai kecepatan pembakaran etanol pada penelitian ini tidak berbeda jauh dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Dirrenberger dkk., 2014; Sileghem dkk., 2014). Perbandingan hasil kecepatan pembakaran etanol pada penelitian ini dengan penelitian sebelumnya ditampilkan pada Gambar 2b. Selanjutnya dapat diketahui bahwa kecepatan pembakaran tertinggi dari semua bahan bakar yang diujikan adalah etanol yakni dengan nilai 43,9 cm/detik. Pernyataan ini juga dikonfirmasi oleh penelitian yang dilakukan oleh (Del Pecchia dkk., 2020), bahwa etanol memiliki kecepatan pembakaran tertinggi dibandingkan dengan bahan bakar bensin dan campuran dari keduanya. Hal ini terjadi karena etanol memiliki rantai karbon yang relatif pendek yakni C_2H_5OH . Rantai karbon pendek cenderung memudahkan proses pembakaran karena lebih mudah terurai menjadi produk-produk pembakaran. Selain itu, etanol mengandung oksigen yang terikat dalam molekulnya, sehingga dapat mengurangi kebutuhan udara luar yang digunakan saat proses pembakaran dan pada akhirnya menyebabkan nilai AFR dari etanol lebih rendah dan menyebabkan kecepatan pembakaran lebih tinggi (Kohse-Höinghaus dkk., 2010; Kustanto dkk., 2017). Sedangkan pertamax memiliki nilai kecepatan pembakaran terendah 25,09 cm/detik dikarenakan bahan bakar ini rata-rata terdiri dari senyawa dengan rantai karbon yang tinggi. Dapat dilihat pada Tabel 3, komponen senyawa dengan volume diatas 10% berturut-turut adalah 12% C_9H_{12} , 12% $C_{36}H_{74}$, 15% $C_{11}H_{10}$ dan 10% $C_{20}H_{42}$. Beberapa komponen ini memiliki kontribusi tinggi mengingat jumlah persen dalam volume yang dimiliki, sehingga dapat menghambat proses pembakaran dikarenakan butuh waktu yang lebih lama dalam melepas rantai-rantai atom agar menjadi proses pembakaran (Ibadurrohman dkk., 2021).

Sedangkan avgas 100 LL memiliki nilai kecepatan lebih tinggi dari pada pertamax yakni 38,62 cm/detik. Dikarenakan pada senyawa kimia yang tercantum pada Tabel 2 hasil uji GC-MS, didapati avgas 100 LL memiliki jumlah senyawa penyusun dengan rantai karbon yang cenderung lebih kecil dari pada pertamax. Contoh senyawanya adalah C_9H_{12} dengan komposisi 50%. Hal ini cukup berdampak signifikan terhadap kecepatan pembakaran yang terjadi karena dalam hal pelepasan atom pada proses pembakaran, dengan jumlah atom C yang lebih sedikit maka membutuhkan waktu yang relatif lebih singkat (Suartha & Widana, 2017).

Namun hasil berbeda didapat ketika mengkombinasikan bahan bakar avgas 100 LL dan pertamax masing-masih 50% volume. Nilai kecepatan pembakaran menurun dibandingkan dengan avgas 100 LL murni, namun lebih tinggi dibandingkan pertamax murni. Nilai kecepatan pembakaran kedua campuran bahan bakar ini adalah 29,28 cm/detik. Hal ini terjadi karena dengan mengkombinasikan kedua bahan bakar, maka komponen senyawa yang terkandung didalam avgas 100 LL dapat membantu untuk meningkatkan kecepatan pembakaran pertamax, begitupun sebaliknya. Sehingga sifat senyawanya cenderung menyesuaikan. Hal ini sudah pernah dibahas oleh (Kumar dkk., 2019). Selanjutnya campuran avgas 100 LL dan pertamax diberikan tambahan etanol, dari hasil pengujian dengan menambahkan 30% volume etanol, terbukti dapat meningkatkan kecepatan pembakaran secara signifikan yakni 34,75 cm/detik. Hal ini terjadi karena dengan penambahan 30% senyawa dengan rantai atom yang lebih kecil yakni C_2H_5OH dapat membantu dalam reaksi pembakaran sehingga menyebabkan kecepatan pembakaran meningkat dibanding sebelum dilakukan penambahan (Xu dkk., 2013).

Tinggi api

Selain kecepatan pembakaran, nilai tinggi api juga dilakukan pengambilan data. Tinggi api digunakan sebagai salah satu pendekatan untuk mengetahui struktur api pada tiap ekuivalen rasio (Mikofski dkk., 2006). Gambar 2c menampilkan tinggi api yang didapatkan dari pemrosesan visualisasi data melalui software *image-J*. Dari grafik dapat diketahui bahwa nilai tinggi api terkecil di dapat dari ekuivalen rasio (ϕ) 1,0. Nilai ekuivalen rasio 1,0 merupakan campuran bahan bakar mendekati stokiometri. Hal ini sesuai dengan penelitian yang disampaikan oleh (Zhen dkk., 2016), dimana dalam penelitiannya menyebutkan bahwa tinggi api dipengaruhi oleh rasio campuran bahan bakar dan udara. Campuran bahan bakar dan udara yang nilainya menjauhi stokiometri akan diiringi oleh peningkatan tinggi api. Hal ini terjadi karena tinggi api terkait erat dengan konsumsi penuh uap bahan bakar, di mana tinggi api mencapai titik akhir ketika semua bahan bakar yang menguap telah terbakar habis (Sugara dkk., 2023). Tinggi api ditentukan oleh ketersediaan oksigen yang cukup untuk membakar bahan bakar pada rasio stoikiometri. Data eksperimental pada Gambar 5 menunjukkan bahwa tinggi api terbesar didapatkan pada semua jenis bahan bakar yang diujikan dengan ekuivalen rasio 0,8 dan 1,2. Sedangkan nilai tinggi api terendah didapatkan pada ekuivalen rasio 1,0. Hal ini mendukung konsep bahwa keseimbangan antara bahan bakar dan oksigen menjadi kunci dalam menentukan nilai tinggi api (Chung Tsai & Drysdale, 2002; Fu dkk., 2013).



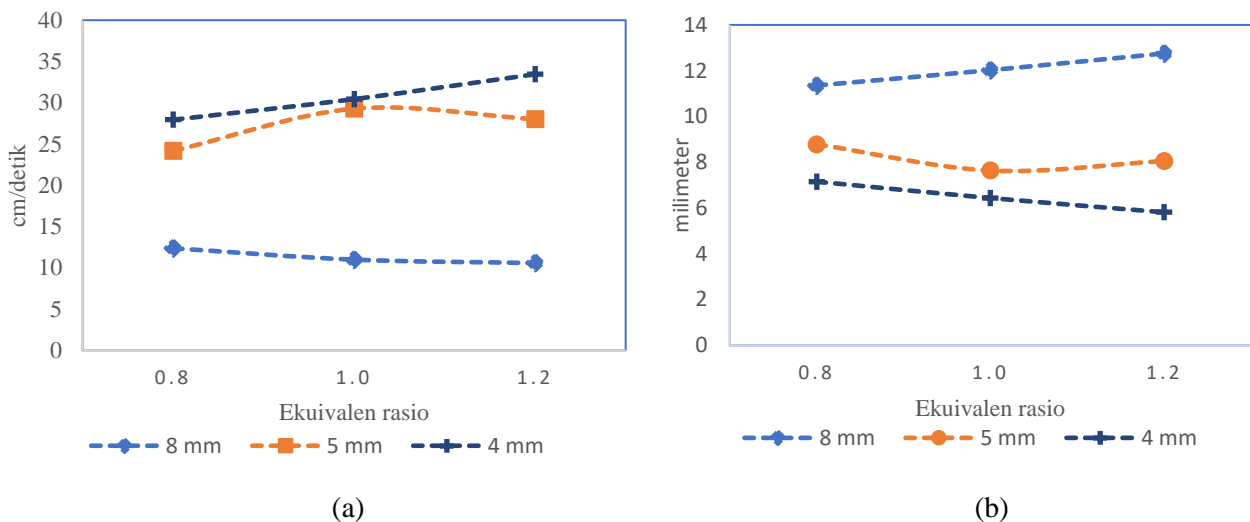
Gambar 2. Grafik : a) kecepatan pembakaran, b) Penelitian sebelumnya, c) Tinggi api

Variasi nosel *Bunsen burner*

Nosel *Bunsen burner* divariasikan namun tidak mengubah debit bahan bakar dan udara, hal ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap kecepatan pembakaran. Dapat diketahui pada Persamaan 2 nilai kecepatan reaktan sangat bergantung pada diameter luas penampang. Oleh karena itu, dengan semakin kecil diameter nosel maka menyebabkan nilai kecepatan reaktannya meningkat. Sebaliknya pada diameter bunsen burner 8 mm maka kecepatan reaktannya lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada diameter 5 mm.

Data kecepatan pembakaran dari variasi diameter nosel ditampilkan pada Gambar 3a. Dapat dilihat bahwa nilai kecepatan pembakaran pada nosel 4 mm mendapatkan hasil tertinggi yakni berturut-turut ϕ 0,8; 1,0 dan 1,2 adalah 33,4 cm/detik, 30,4 cm/detik, lalu 27,9 cm/detik. Nilai kecepatan pembakaran laminar menjadi tinggi karena dalam memperoleh nilai tersebut, pada penelitian ini menggunakan Persamaan 1, yang menyebutkan bahwa kecepatan pembakaran dipengaruhi oleh kecepatan reaktan (Prasetyo & Wahyudi, 2022). Sedangkan pada nosel 8 mm kecepatan pembakaran yang diperoleh berturut turut dengan ϕ 0,8; 1,0 dan 1,2 adalah yang paling rendah dibandingkan dengan variasi nosel lainnya, yakni 12,3 cm/detik, 10,9 cm/detik dan 10,5 cm/detik. Pola berbeda terjadi pada pembakaran dengan nosel 5 mm, nilai kecepatan pembakaran yang didapat pada ϕ 1,0 merupakan nilai tertinggi dibandingkan ϕ 0,8 dan ϕ 1,2. Hal ini terjadi karena stokiometri pada umumnya memiliki nilai kecepatan pembakaran yang tertinggi dibandingkan bahan bakar dan udara dengan ϕ 0,8 dan ϕ 1,2 fenomena ini terjadi karena bahan bakar dan udara tercampur dalam proporsi (Nasrullah dkk., 2023; Zhou, 2018).

Sedangkan pada nilai tinggi api dapat dilihat pada gambar 3b. Hasil tinggi api menunjukkan bahwa nilai kecepatan pembakaran berbanding terbalik dengan nilai tinggi api. Hal ini terjadi karena, dengan perubahan konsentrasi bahan bakar dapat meningkatkan tinggi kerucut api namun diikuti dengan penurunan laju pembakaran laminar (Zhen dkk., 2014). Semakin kaya bahan bakar maka pola api menjadi lebih tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh ekivalen ratio, semakin meningkat ekivalen ratio maka komposisi udara semakin berkurang sedangkan komposisi bahan bakar semakin meningkat sehingga bahan bakar tidak bereaksi secara keseluruhan sisa bahan bakar yang tidak bereaksi terdorong keluar pada ujung bunsen burner dan menyebabkan pola tinggi api semakin meningkat (Bahri dkk., 2015).



Gambar 3. Hasil data variasi nosel : a) Kecepatan pembakaran laminar, b) Tinggi api

SIMPULAN

Pengujian kecepatan pembakaran dan tinggi api dari variasi bahan bakar dan variasi nosel telah dilakukan pada penelitian ini. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa nilai kecepatan pembakaran dan tinggi api dipengaruhi oleh jenis bahan bakar. Tiap jenis bahan bakar berbeda-beda nilai kecepatan pembakaran dan tinggi apinya tergantung dari komponen penyusun pada bahan bakar tersebut. Sedangkan hasil pengujian dengan variasi diameter dapat meningkatkan nilai kecepatan pembakaran. Penelitian ini juga telah dikonfirmasi dengan beberapa penelitian sebelumnya, dan menampilkan hasil yang cukup relevan. Hal ini terjadi karena kecepatan reaktan dipengaruhi oleh diameter pada nosel. Semakin kecil nosel maka kecepatan reaktan semakin besar, sehingga membuat kecepatan pembakaran laminar meningkat. Penelitian mengenai pencampuran bahan bakar penerbangan masih banyak yang bisa dikembangkan dan dibahas. Salah satunya adalah dengan mengetahui dampak emisi yang dihasilkan dari pencampuran bahan bakar, kemudian simulasi mengenai hasil pembakaran. Bahkan penelitian ini juga dapat dikembangkan dengan menggunakan metode alat uji lain dalam mengetahui kecepatan pembakaran. Seperti penggunaan instrumen analitis yang lebih canggih atau teknologi sensor terkini yang dapat memberikan informasi lebih detail tentang parameter pembakaran. Selain itu, eksplorasi integrasi alat uji lain seperti spektroskopi atau analisis termal dapat memperluas cakupan pemahaman terhadap dinamika pembakaran, membuka pintu bagi penelitian yang lebih lanjut dalam mengoptimalkan efisiensi proses pembakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Almarzooq, Y. M., Schoegl, I., & Petersen, E. L. (2023). Laminar flame speed measurements of a gasoline surrogate and its mixtures with ethanol at elevated pressure and temperature. *Fuel*, *343*, 128003. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128003>
- Amell, A. A. (2007). Influence of altitude on the height of blue cone in a premixed flame. *Applied Thermal Engineering*, *27*(2–3), 408–412. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.07.013>
- Bahri, S., Muhaya, L., Wardana, I., & Widhiyanuriyawan, D. (2015). Pembakaran Premixed Minyak Nabati pada Bunsen Burner Type Silinder. *Jurnal Rekayasa Mesin*, *6*(1), 45–50.
- Bishop, G. J., & Elvers, B. (2021). Aviation Gasoline (Avgas)*. Dalam *Handbook of Fuels* (hlm. 529–531). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527813490.ch25>
- Chen, Z., Burke, M. P., & Ju, Y. (2009). Effects of Lewis number and ignition energy on the determination of laminar flame speed using propagating spherical flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, *32*(1), 1253–1260. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.05.060>
- Chung Tsai, K.-, & Drysdale, D. (2002). Flame height correlation and upward flame spread modelling. *Fire and Materials*, *26*(6), 279–287. <https://doi.org/10.1002/fam.809>
- Cusick, S. K., Antonio I. Cortés, Ph. D., & Clarence C. Rodrigues, Ph. D. (2017). Commercial aviation safety. Dalam *Commercial Aviation Safety* (6th Edition). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259641824/toc-chapter/chapter1/section/section1>
- Del Pecchia, M., Pessina, V., Berni, F., d’Adamo, A., & Fontanesi, S. (2020). Gasoline-ethanol blend formulation to mimic laminar flame speed and auto-ignition quality in automotive engines. *Fuel*, *264*, 116741. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116741>
- Dirrenberger, P., Glaude, P. A., Bounaceur, R., Le Gall, H., da Cruz, A. P., Konnov, A. A., & Battin-Leclerc, F. (2014). Laminar burning velocity of gasolines with addition of ethanol. *Fuel*, *115*, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.015>
- El-Sayed, A. F. (2017). *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines, Second Edition*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315156743>
- Ershov, M. A., Klimov, N. A., Burov, N. O., Abdellatief, T. M. M., & Kapustin, V. M. (2021). Creation a novel promising technique for producing an unleaded aviation gasoline 100UL. *Fuel*, *284*, 118928. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118928>
- FAA. (2012). *Unleaded AVGAS Transition Aviation Rulemaking Committee FAA UATARC Final Report Part II Appendices*.

https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/committees/documents/media/Avgas.ARC.RR.Appendix.2.17.12.pdf

- Fu, J., Tang, C., Jin, W., Thi, L. D., Huang, Z., & Zhang, Y. (2013). Study on laminar flame speed and flame structure of syngas with varied compositions using OH-PLIF and spectrograph. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(3), 1636–1643. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.023>
- Gökmen, M. S., Aydoğan, H., & Doğan, İ. (2021). Effect of Gasoline-AVGAS Blends on Engine Performance of Engine with Direct Injection. *Bioenergy Studies, Black Sea Agricultural Research Institute*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.51606/bes.2021.1>
- He, X., Hou, X., Yang, Q., Ma, X., Tian, G., & Liu, F. (2019). Study of laminar combustion characteristics of gasoline surrogate fuel-hydrogen-air premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13910–13922. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.009>
- Hua, Y., Qiu, L., Liu, F., Qian, Y., & Meng, S. (2020). Numerical investigation into the effects of oxygen concentration on flame characteristics and soot formation in diffusion and partially premixed flames. *Fuel*, 268, 117398. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117398>
- Ibadurrohman, I. A., Hamidi, N., & Yuliati, L. (2021). Pengaruh Panjang Rantai Karbon dan Derajat Ketidakjenuhan terhadap Karakteristik Pembakaran Droplet Asam Lemak Tunggal. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(2), 331–347. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.11>
- Jiang, Y., Gruber, A., Seshadri, K., & Williams, F. (2020). An updated short chemical-kinetic nitrogen mechanism for carbon-free combustion applications. *International Journal of Energy Research*, 44(2), 795–810. <https://doi.org/10.1002/er.4891>
- Karakoç, T. H., Colpan, C. O., & Şöhret, Y. (2018). Advances in Sustainable Aviation. Dalam T. H. Karakoç, C. O. Colpan, & Y. Şöhret (Ed.), *Advances in Sustainable Aviation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67134-5>
- Katoch, A., Millán-Merino, A., & Kumar, S. (2018). Measurement of laminar burning velocity of ethanol-air mixtures at elevated temperatures. *Fuel*, 231, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.083>
- Kohse-Höinghaus, K. (2021). Combustion in the future: The importance of chemistry. *Proceedings of the Combustion Institute*, 38(1), 1–56. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.375>
- Kohse-Höinghaus, K., Oßwald, P., Cool, T. A., Kasper, T., Hansen, N., Qi, F., Westbrook, C. K., & Westmoreland, P. R. (2010). Biofuel Combustion Chemistry: From Ethanol to Biodiesel. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(21), 3572–3597. <https://doi.org/10.1002/anie.200905335>
- Kumar, T., Mohsin, R., Ghafir, M. F. A., Kumar, I., & Wash, A. M. (2018a). Concerns over use of leaded aviation gasoline (AVGAS) fuel. *Chemical Engineering Transactions*, 63, 181–186. <https://doi.org/10.3303/CET1863031>

- Kumar, T., Mohsin, R., Ghafir, M. F. A., Kumar, I., & Wash, A. M. (2018b). Review of alternative fuel initiatives for leaded aviation gasoline (AVGAS) replacement. *Chemical Engineering Transactions*, *63*, 175–180. <https://doi.org/10.3303/CET1863030>
- Kumar, T., Mohsin, R., Majid, Z. A., Ghafir, M. F. A., Yusuf, N. K., Kim, J. Y., Wash, A. M., & Sahri, D. M. (2019). Response surface methodology application in optimization of performance and exhaust emissions of RON 98, aviation gasoline 100LL and the blends in Lycoming O-320 engine. *Fuel*, *256*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115909>
- Kumar, T., Mohsin, R., Majid, Z. Abd., Ghafir, M. F. A., & Wash, A. M. (2020a). Experimental optimisation comparison of detonation characteristics between leaded aviation gasoline low lead and its possible unleaded alternatives. *Fuel*, *281*, 118726. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118726>
- Kumar, T., Mohsin, R., Majid, Z. Abd., Ghafir, M. F. A., & Wash, A. M. (2020b). Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology. *Applied Energy*, *259*, 114150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114150>
- Kustanto, M. N., Wardana, N. G., Sasongko, M. N., & Yuliati, L. (2017). Laminar burning velocity of ethanol premixed combustion enriched with liquefied petroleum gas (LPG). *ENERGETIKA*, 16–22.
- Li, C., Cheng, K., Ma, S., Liu, H., Ji, Z., & Qin, J. (2022). Performance analysis of solid oxide fuel cell/piston engine hybrid system for aviation. *Applied Thermal Engineering*, *214*, 118797. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118797>
- McAllister, S., Chen, J.-Y., & Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Thermodynamics of Combustion* (hlm. 15–47). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7943-8_2
- MIKOFSKI, M., WILLIAMS, T., SHADDIX, C., & BLEVINS, L. (2006). Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames. *Combustion and Flame*, *146*(1–2), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.04.006>
- Nasrullah, M. N. C. H., Kustanto, M. N., Darsin, M., Ilminnafik, N., & Syuhri, S. N. H. (2023). Studi Kecepatan Pembakaran Laminar dan Tinggi Api Premix Avgas 100 LL dengan Variasi Ekuivalen Rasio. *TURBO: Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, *12*(02), 410–417. <https://doi.org/10.24127/trb.v12i2.2952>
- Pan, Z., Zou, X., Zhou, Z., & Zhou, K. (2020). Fatigue Research for Connecting Rod of Aero Piston Engine. *Journal of Physics: Conference Series*, *1519*(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1519/1/012004>
- Pertamina. (2023, September 29). *Daftar Harga Aviasi*. One solution Pertamina. <https://onesolution.pertamina.com/Harga>

-
- Pizzuti, L., Martins, C. A., & Lacava, P. T. (2016). Laminar burning velocity and flammability limits in biogas: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 856–865. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.011>
- Prasetyo, D. H. T., & Wahyudi, D. (2022). Pengaruh rasio ekuivalen dan komposisi bahan bakar terhadap karakteristik api dengan menggunakan bahan bakar biodiesel kesambi. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 11(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v11i2.2247>
- Rallis, C. J., & Garforth, A. M. (1980). The determination of laminar burning velocity. *Progress in Energy and Combustion Science*, 6(4), 303–329. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(80\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0360-1285(80)90008-8)
- Ramdani, D., Rizqi, R. M., & Maradita, F. (2019). Pengaruh Fasilitas, Kualitas Pelayanan dan Brand Image Terhadap Keputusan Menggunakan Transportasi Udara. *Jurnal Manajemen dan Bisnis*, 2(2), 45–56. <https://doi.org/10.37673/jmb.v2i2.523>
- Rejeki, F., & Ayumi, V. (2023). Analisa Sentimen Mengenai Kenaikan Harga Bbm Menggunakan Metode Naïve Bayes Dan Support Vector Machine. *JSAI : Journal Scientific and Applied Informatics*, 6(1). <https://doi.org/10.36085>
- Seymour, K., Held, M., Georges, G., & Boulouchos, K. (2020). Fuel Estimation in Air Transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102528. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102528>
- Sher, F., Iqbal, S. Z., Liu, H., Imran, M., & Snape, C. E. (2020). Thermal and kinetic analysis of diverse biomass fuels under different reaction environment: A way forward to renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, 203, 112266. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112266>
- Shiek, S. S., Mani, M. S., Kabekkodu, S. P., & Dsouza, H. S. (2021). Health repercussions of environmental exposure to lead: Methylation perspective. *Toxicology*, 461, 152927. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152927>
- Sileghem, L., Alekseev, V. A., Vancoillie, J., Nilsson, E. J. K., Verhelst, S., & Konnov, A. A. (2014). Laminar burning velocities of primary reference fuels and simple alcohols. *Fuel*, 115, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.004>
- Suarta, I. M., & Widana, I. K. (2017). PENGARUH PENAMBAHAN N-HEPTANA PADA HYDROUS DAN ANHYDROUS ETANOL TERHADAP KECEPATAN PEMBAKARAN. *PROSIDING SNITT POLTEKBA*, 2(1), 189–195.
- Sugara, I. R., Ilminnafik, N., Junus, S., Kustanto, M. N., & Hermawan, Y. (2023). Experimental Study on the Effect of Magnetic Fields on Combustion Characteristics of Biodiesel from Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*). *Automotive Experiences*, 6(1), 122–132. <https://doi.org/10.31603/ae.8328>

- Sulung, S. D., Rumani, D. D., Qiram, I., Nasrullah, M. N. C. H., & Wibowo, U. L. N. (2023). Impact of the fuel mixture ratio of AVGAS 100LL and RON 92 fuel on combustion characteristics. *Journal of Science Technology (JoSTec)*, 5(1), 07–13. <https://doi.org/10.55299/jostec.v5i1.478>
- Sun, X., Wandelt, S., & Zhang, A. (2021). Technological and educational challenges towards pandemic-resilient aviation. *Transport Policy*, 114, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.09.010>
- Tian, G., Daniel, R., Li, H., Xu, H., Shuai, S., & Richards, P. (2010). Laminar Burning Velocities of 2,5-Dimethylfuran Compared with Ethanol and Gasoline. *Energy & Fuels*, 24(7), 3898–3905. <https://doi.org/10.1021/ef100452c>
- Wahyudi, D. (2013). Kecepatan Api Premix Penyalaan Atas Campuran Stoikiometri dan Nitrogen. *Edisi Nopember*, 3(2).
- Wang, X., Cheng, X., Lu, H., Pan, F., Qin, L., & Wang, Z. (2020). Effect of burner diameter on structure and instability of turbulent premixed flames. *Fuel*, 271, 117545. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117545>
- Wang, Z., Han, X., He, Y., Zhu, R., Zhu, Y., Zhou, Z., & Cen, K. (2021). Experimental and kinetic study on the laminar burning velocities of NH₃ mixing with CH₃OH and C₂H₅OH in premixed flames. *Combustion and Flame*, 229, 111392. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.02.038>
- Wardana, I. N. G. (2008). *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran. PT. Danar Wijaya*. Brawijaya University Press Malang.
- Wei, Y., Wei-wei, C., Yue-qin, S., Xiao-long, Z., & Ying, Z. (2017). Effect of Aromatic Amine Antiknocks on the Properties of Grade 100 Unleaded Aviation Gasoline. *Journal of East China University of Science and Technology*, 43(3), 311–316. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.2017.03.003>
- Więckowski, M. (2021). Will the Consequences of Covid-19 Trigger a Redefining of the Role of Transport in the Development of Sustainable Tourism? *Sustainability*, 13(4), 1887. <https://doi.org/10.3390/su13041887>
- Xu, H., Yao, C., Xu, G., Wang, Z., & Jin, H. (2013). Experimental and modelling studies of the effects of methanol and ethanol addition on the laminar premixed low-pressure n-heptane/toluene flames. *Combustion and Flame*, 160(8), 1333–1344. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.02.018>
- Yusri, I. M., Abdul Majeed, A. P. P., Mamat, R., Ghazali, M. F., Awad, O. I., & Azmi, W. H. (2018). A review on the application of response surface method and artificial neural network in engine performance and exhaust emissions characteristics in alternative fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 665–686. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.095>
- Zhen, H. S., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Huang, Z. H. (2014). Characterization of biogas-hydrogen premixed flames using Bunsen burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(25), 13292–13299. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.126>

Zhen, H. S., Leung, C. W., Cheung, C. S., & Huang, Z. H. (2016). Combustion characteristic and heating performance of stoichiometric biogas–hydrogen–air flame. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.040>

Zhou, L. (2018). Fundamentals of Combustion Theory. Dalam *Theory and Modeling of Dispersed Multiphase Turbulent Reacting Flows* (hlm. 15–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813465-8.00003-X>