

## **Analisis Pembakaran Ganda Bahan Bakar Natural Gas dan Biosolar pada Mesin Diesel Satu Silinder: Studi Efisiensi Termal dan Performa**

### ***Analysis of Dual Combustion of Natural Gas and Biodiesel Fuels in a Single Cylinder Diesel Engine: Thermal Efficiency and Performance Study***

Resi Aji Narantoko<sup>1\*</sup>, Abrar Riza<sup>1</sup>, Harto Tanujaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Jakarta 11440, Indonesia

\*Corresponding author: [resi.515210013@stu.untar.ac.id](mailto:resi.515210013@stu.untar.ac.id)

Diterima: 20-06-2025

Disetujui: 18-07-2025

Dipublikasikan: 04-08-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



#### **Abstrak**

Riset pembahasan ini bertujuan mengetahui unjuk kinerja mesin Diesel satu silinder Jiandong 170F dengan pengoprasian menggunakan pembakaran bahan bakar ganda antara biosolar sebagai bahan bakar utama dan natural gas. Pada studi ini *reactivity controlled compression ignition* (RCCI) dan *low temperature combustion* (LTC) sebagai metode pencampuran bahan bakar dengan memanfaatkan campuran bahan bakar biosolar B30 dan gas alam. Karakteristik gas alam yang memiliki angka setana rendah menyebabkan proses pembakaran terjadi saat suhu lebih rendah sehingga penyalan titik mati atas lebih awal. Kondisi ini dapat ditelaah menggunakan metode HCCI. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan torsi aktual 4% senilai 5,8 Nm dibandingkan penggunaan biosolar murni. Selain itu, terdapat peningkatan efisiensi termal sebesar 5-10 % senilai rata-rata 30%. Hal ini, menjadikan pembakaran yang lebih sempurna sehingga berkontribusi terhadap penurunan emisi sisa atau NOx.

**Kata Kunci:** SDG, Emisi, Pembakaran ganda, Efisiensi termal.

#### **Abstract**

*This research discussion aims to determine the performance of the Jiandong 170F single-cylinder Diesel engine when operating on dual-fuel combustion, utilizing biodiesel as the primary fuel and natural gas. In this study, RCCI and low-temperature combustion (LTC) are methods of fuel mixing by using a mixture of B30 biodiesel fuel and natural gas. The characteristic of natural gas with a low cetane number causes the combustion process to occur at lower temperatures, resulting in early ignition of the upper dead point. This condition can be examined using the HCCI method. The test results showed a 4% increase in actual torque, worth 5.8 Nm, compared to the use of pure biodiesel. In addition, there is an increase in thermal efficiency of 5-10%, which is worth an average of 30%. This makes combustion more perfect, so that it contributes to a reduction in residual emissions or NOx.*

**Keywords:** SDG, Emissions, Dual fuel, Thermal efficiency.

## **1. Pendahuluan**

Penemuan penggunaan *dual fuel* dilakukan oleh penemu mesin Diesel yaitu Rudolf Diesel berdasarkan hasil pengujian dengan menggunakan metode pengendalian pembakaran pada mesin pembakaran dalam yang terdiri dari pembuatan campuran udara atau oksigen dengan bahan bakar, kemudian langkah kompresi mencampur bahan bakar gas tersebut hingga mencapai suhu rendah dari titik nyala bahan bakar. Setelah itu bahan bakar Diesel menuju ruang bakar dengan tekanan atmosfer yang lebih tinggi atau lebih rendah dari hasil suhu akibat

kompresi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa meskipun suhu meningkat akibat kompresi, hasil pembakaran berada di bawah titik nyala bahan bakar atau *delay combustion* (Diesel R. 1901). Rasio kompresi yang digunakan untuk mencapai tekanan kompresi yang dibutuhkan pada mesin Diesel umumnya berkisar 14,7:1 (Bennett 2010; Colin R. Ferguson and Allan T. Krikpatrick 2016).

Pengujian metode *dual combustion* yang dilakukan para peneliti menunjukkan adanya kemungkinan untuk meningkatkan kestabilan pembakaran guna mencapai efisiensi termal pada mesin Diesel *dual fuel* dengan biosolar dan gas. Peneliti melakukan penelitian untuk mengetahui Bagaimana pengaruh kombinasi bahan bakar gas dengan bahan bakar biosolar pada proses pembakaran ganda terhadap efisiensi termal mesin Diesel 1 silinder JD170F, Bagaimana hubungan antara putaran per menit, torsi, dan laju bahan bakar dalam menghasilkan nilai daya teoritis dan efisiensi emisi, serta karakteristik mesin Diesel 1 silinder JD170F pada proses pembakaran dan besarnya daya yang dihasilkan.

Penerapan *dual combustion* dengan metode RCCI sebagai strategi LTC diterapkan untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar mesin sekaligus mengurangi emisi NOx dan jelaga dari mesin (Zarrinkolah and Hosseini 2022; Teknologi 2016; Kassa and Hall 2018). Pada konferensi Paris semakin banyak negara, kawasan, kota, dan perusahaan yang menetapkan target netralitas karbon. Solusi nol karbon menjadi semakin kompetitif di sektor-sektor ekonomi yang mewakili 25% emisi (UNFCC 2015). Pernyataan tersebut dimaksudkan untuk memberikan kontribusi dalam mendukung Konferensi Paris 2015 tentang tujuan pengurangan emisi gas buang (UNFCC 2015). Mendukung program *sustainable goals development* ke-13 tentang perubahan iklim (United Nation n.d.). Nitrogen oksida (NOx) dan emisi jelaga dari mesin Diesel memiliki dampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan. NOx merupakan komponen pembentuk ozon dan partikel jelaga juga berkontribusi besar terhadap pemanasan global.

Bahan bakar gas alam di injeksikan melalui bagian *air-intake manifold* mesin menggunakan perangkat *mixer*, sedangkan bahan bakar biosolar di injeksi langsung melalui *injector* kedalam ruang bakar. Proses pembakaran ganda konvensional pada mesin Diesel dimana bahan bakar cair dan gas berupa tetesan biosolar sebagai bentuk cair yang diinjeksikan langsung ke dalam ruang bakar yang telah dicampur dengan udara melalui *intake manifold*. Selama proses pembakaran, tetesan biosolar bercampur dengan udara setelah itu biosolar menguap terlebih dahulu sebelum terbakar pada ruang bakar (Yuvenda and Purnama Putra n.d.; Yusaf and Noor 2014; Alciatore and Anderson : n.d.). Sehingga terjadi perbedaan titik penyalaan dibandingkan menggunakan bahan bakar biosolar murni tanpa campuran. Penggunaan bahan bakar ganda titik nyala sebelum titik mati atas menghasilkan mode pembakaran efisien dengan emisi NOx dan jelaga yang rendah dapat dicapai (Elsevier Butterworth-Heinemann Edited by Doug Woodyard 2004; Jamrozik, Tutak, and Grab-Rogaliński 2019).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh sistem pembakaran ganda menggunakan kombinasi bahan bakar natural gas dan biosolar terhadap efisiensi termal, performa mesin, dan emisi gas buang pada mesin Diesel 1 silinder, serta mengevaluasi hubungan antara parameter operasional seperti putaran mesin, torsi, dan konsumsi bahan bakar terhadap daya output dan kualitas pembakaran.

## 2. Metode

### 1. Spesifikasi Mesin Diesel

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin Diesel standar dengan satu silinder dan empat langkah, seperti yang tertera pada spesifikasi rinci mesin yang tercantum pada Tabel

1. Selain itu, sistem intake *naturally aspirated* dengan tambahan *venturi mixer* digunakan pada mesin untuk pembakaran campuran antara udara dan bahan bakar CNG ke dalam silinder.

**Table 1.** Spesifikasi Mesin Diesel Jiandong 170F

| Deskripsi          | Spesifikasi                            |
|--------------------|----------------------------------------|
| Merk               | Jiandong                               |
| Model              | JD170F                                 |
| Tipe               | 1 Silinder, 4 Langkah, Pendingin udara |
| Bore x Stroke (mm) | 70 x 60                                |
| Output (PS)        | 4,05 (5,5)                             |

## 2. Bahan bakar

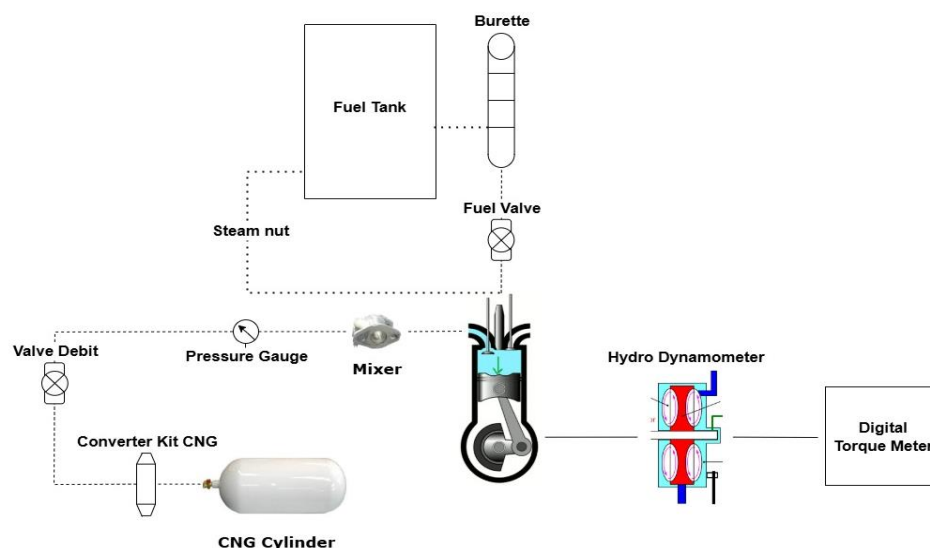
Pencampuran bahan bakar dalam penelitian ini menggunakan metode pembakaran ganda konvensional, bahan bakar yang digunakan adalah gas alam dan biosolar. Biosolar, khususnya B30, berfungsi sebagai bahan bakar dasar, sedangkan gas alam berfungsi sebagai sumber energi utama. B30 merupakan campuran yang terdiri dari 30% minyak jarak dan 70% solar konvensional. Kombinasi bahan bakar biosolar sebagai bahan bakar utama dan gas alam ini diuji pada mesin satu silinder sebagai variabel dalam penelitian ini. Peneliti sebelumnya juga telah mengeksplorasi penggunaan campuran bahan bakar ini dalam aplikasi kendaraan (Soares 2015; Pertamina, n.d.; Nguyen 2023).

## 3. Replikasi pengujian

Pengambilan data pengujian dilakukan dengan 4 kali replikasi pada setiap variasi putaran mesin 1800 rpm hingga 2600 rpm dengan pengujian beban tetap. Nilai yang ditampilkan pada penelitian ini merupakan hasil rata-rata untuk parameter daya dan efisiensi termal. Pengulangan ini dilakukan sebagai acuan validitas dan konsistensi data eksperimen.

## 4. Skema pengujian

Dalam pengujian kinerja dan proses pembakaran mesin Diesel konvensional berbahan bakar ganda, mesin Diesel satu silinder juga dilengkapi dengan mixer dengan debit katup untuk mengatur injeksi CNG. Diagram skematik dari pengaturan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 1 (Industrial Quik Search n.d.; Kuncoro 2016). Pengujian unjuk performa menggunakan *techquiment* TD 114 sebagai indikator konsumsi bahan bakar atau *burette* dan TD115 untuk meja *test bench* menopang mesin Jiandong 170F.

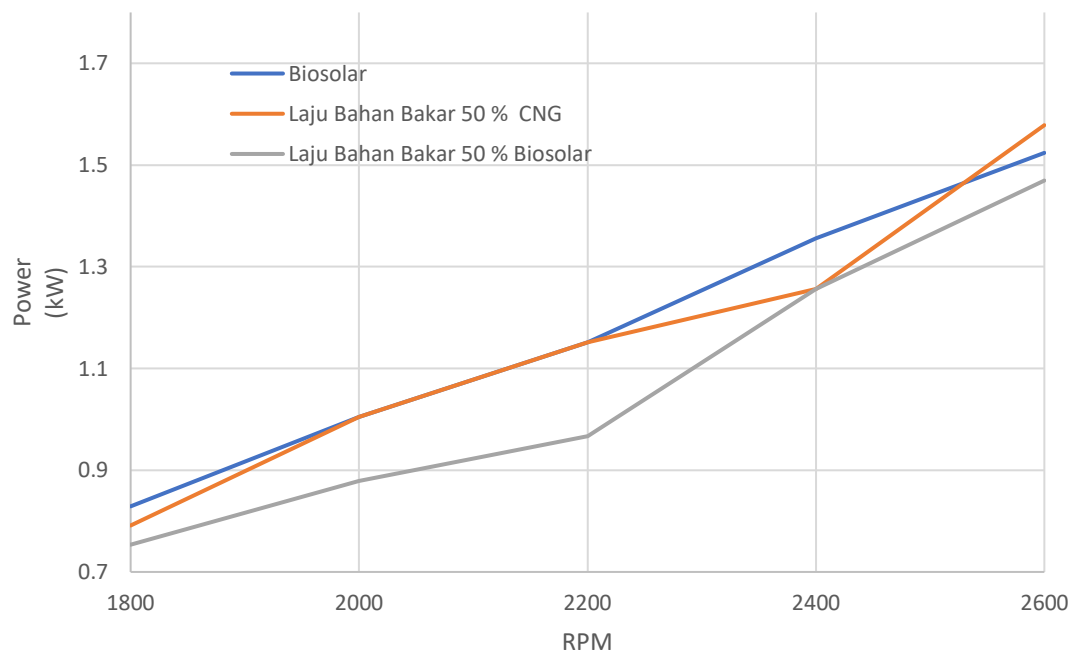


**Gambar 1.** Skema Pengujian Pembakaran Ganda pada Mesin Diesel 1 Silinder

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil daya saat pembakaran ganda pada mesin Diesel

Berdasarkan Gambar 2 yang menunjukkan daya dengan putaran rpm mesin pembakaran dalam penggunaan bahan bakar campuran antara bahan bakar biosolar dan bahan bakar biosolar murni pada kecepatan mesin pembakaran 1800 rpm menunjukkan kurva peningkatan yang konstan dari tiga variasi injeksi. Pada penggunaan bahan bakar biosolar murni, kurva meningkat secara konstan pada kecepatan mesin pembakaran 1800 rpm hingga kecepatan mesin pembakaran 2600 rpm dengan nilai daya 0,82 kW hingga 1,52 kW. Pada bahan bakar campuran, terjadi fluktuasi kurva akibat adanya variasi jumlah injeksi bahan bakar biosolar dan CNG pada rentang putaran mesin bakar 1800 rpm sampai dengan 2600 rpm menghasilkan nilai daya sebesar 0,75 kW sampai dengan 1,26 kW untuk variasi jumlah injeksi bahan bakar 100% biosolar : 50% CNG dan daya keluaran variasi jumlah injeksi bahan bakar 50% biosolar : 50% CNG putaran mesin bakar 1800 rpm sampai dengan 2600 senilai 0,79 kW sampai dengan 1,57 kW.



**Grafik 1.** Variasi daya antara rendah sampai tinggi pada putaran mesin uji stasioner pada pembakaran bahan bakar ganda.

Daya yang dihasilkan dengan variasi injeksi bahan bakar campuran 100% biosolar : 50% CNG dan 50% biosolar : 50% CNG mengalami penurunan kurva efisiensi daya teoritis dibandingkan dengan penggunaan bahan bakar biosolar murni tanpa campuran bahan bakar gas alam. Besaran daya bahan bakar yang dihasilkan adalah 100% biosolar : 50% CNG nilai terendah terjadi pada putaran mesin pembakaran 1800 rpm sampai dengan putaran motor pembakaran 2600 rpm sebesar 0,75 kW sampai dengan 1,46 kW menunjukkan bahwa terjadi penundaan pembakaran yang diakibatkan pencampuran bahan bakar biosolar dengan bahan bakar CNG tidak seimbang.

Berdasarkan Analisis Anova (Tabel 2) menunjukkan *columns (treatment factor)* menghasilkan nilai *P-value* < *alpha* bahwa pada manipulasi kondisi pengaturan bahan bakar biosolar dan CNG merupakan faktor yang signifikan mempengaruhi variasi nilai daya dari mesin Diesel 1 silinder dengan kapasitas mesin tertentu.

**Tabel 2.** Metode Analisis Anova dua faktor 4 kali percobaan dengan variasi bahan bakar dan putaran mesin motor bakar Diesel 1 silinder

| Anova: Two-Factor with Replication |             |             |             |             |             |          |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| SUMMARY                            | Torque 1800 | Torque 2000 | Torque 2200 | Torque 2400 | Torque 2600 | Total    |
| <b>Biosolar</b>                    |             |             |             |             |             |          |
| Count                              | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 20       |
| Sum                                | 3,31584     | 4,0192      | 4,605333332 | 5,42592     | 6,095786668 | 23,46208 |
| Average                            | 0,82896     | 1,0048      | 1,151333333 | 1,35648     | 1,523946667 | 1,173104 |
| Variance                           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0,06399  |
| <b>50 % CNG</b>                    |             |             |             |             |             |          |
| Count                              | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 20       |
| Sum                                | 3,12744     | 3,8936      | 4,467173333 | 5,32544     | 6,20464     | 23,01829 |
| Average                            | 0,78186     | 0,9734      | 1,116793333 | 1,33136     | 1,55116     | 1,150915 |
| Variance                           | 0,000354946 | 0,00394384  | 0,010427805 | 0,004206763 | 0,004937103 | 0,079902 |
| <b>50 % Bio</b>                    |             |             |             |             |             |          |
| Count                              | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 20       |
| Sum                                | 3,12744     | 3,977333333 | 4,55928     | 5,32544     | 6,259066666 | 23,24856 |
| Average                            | 0,78186     | 0,994333333 | 1,13982     | 1,33136     | 1,564766667 | 1,162428 |
| Variance                           | 0,000354946 | 0,002775295 | 0,003358107 | 0,014302993 | 0,016539296 | 0,082529 |
| <b>Total</b>                       |             |             |             |             |             |          |
| Count                              | 12          | 12          | 12          | 12          | 12          |          |
| Sum                                | 9,57072     | 11,89013333 | 13,63178667 | 16,0768     | 18,55949333 |          |
| Average                            | 0,79756     | 0,990844444 | 1,135982222 | 1,339733333 | 1,546624445 |          |
| Variance                           | 0,000731403 | 0,002018396 | 0,003984739 | 0,005201088 | 0,006171379 |          |
| <b>ANOVA</b>                       |             |             |             |             |             |          |
| Source of Variation                | SS          | df          | MS          | F           | P-value     | F crit   |
| Sample                             | 0,004926002 | 2           | 0,002463001 | 0,603665959 | 0,551171155 | 3,204317 |
| Columns                            | 4,107751834 | 4           | 1,026937958 | 251,6959833 | 3,60444E-30 | 2,578739 |
| Interaction                        | 0,010647784 | 8           | 0,001330973 | 0,326213033 | 0,951633742 | 2,152133 |
| Within                             | 0,18360328  | 45          | 0,004080073 |             |             |          |
| Total                              | 4,3069289   | 59          |             |             |             |          |

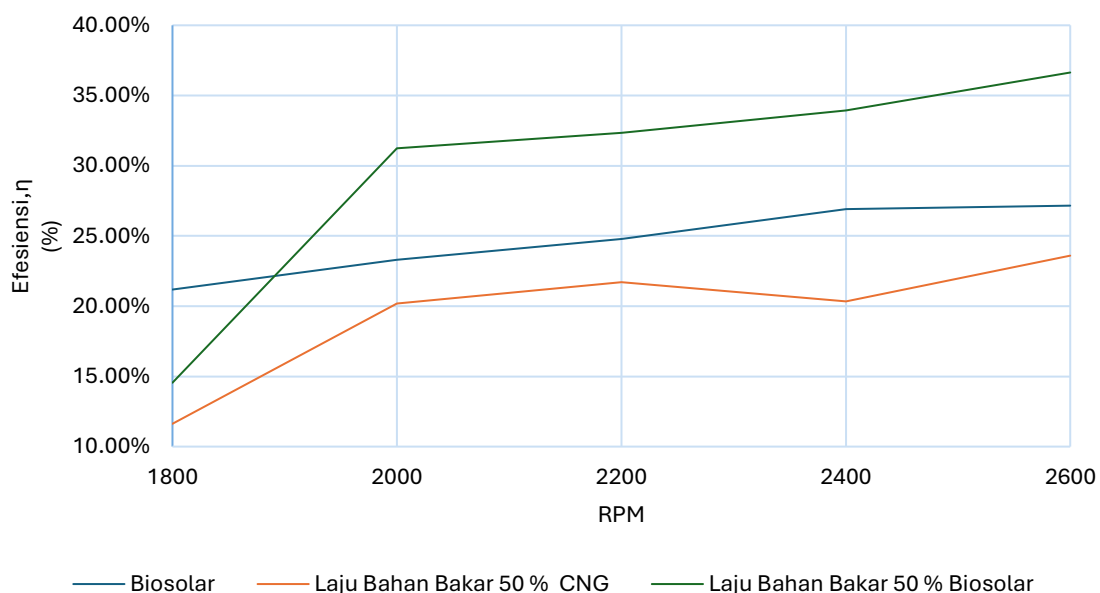
Dengan demikian, terjadi penurunan daya teoritis pada rentang putaran mesin Diesel pembakaran dari 1800 rpm ke 2600 rpm tidak optimal. Hal yang sama juga terjadi dengan campuran variasi jumlah bahan bakar 50% biosolar : 50% CNG pada putaran mesin pembakaran 2600 rpm dimana hasilnya daya teoritis menampilkan nilai sebesar 1,57 kW yang menunjukkan pada rentang putaran motor pembakaran 2600 rpm terjadi fenomena pembakaran dimana aliran udara tidak stabil akibat volume CNG yang meningkat pada ruang bakar serta titik nyala penyalaan yang terlambat. Jadi, hasil kompresi pada ruang bakar atau silinder mesin Diesel yang menggunakan campuran bahan bakar 50% biosolar dan 50% bahan bakar CNG mengalami peningkatan dibandingkan dengan bahan bakar biosolar murni. Kemudian terjadi penurunan daya pada rentang putaran mesin pembakaran 1800 rpm ke 2600 rpm dengan variasi jumlah injeksi bahan bakar 100% biosolar : 50% CNG. Sehingga pada rpm sedang mesin pembakaran dalam ruang bakar mesin pembakaran dalam terindikasi menghasilkan fase pencampuran bahan bakar yang kurang baik dari penyalaan bahan bakar Bio-Solar yang tidak optimal dan penyerapan

kalor pada ruang bakar oleh bahan bakar CNG menurun dengan rentang putaran mesin pembakaran 1800 rpm sampai dengan 2600 rpm dengan menggunakan campuran bahan bakar biosolar 100% dan bahan bakar CNG 50%. Ditemukan bahwa hasil pencampuran bahan bakar yang tidak optimal pada rentang putaran mesin pembakaran dalam 1800 rpm sampai dengan 2600 rpm mesin pembakaran dalam menurunkan performa keluaran daya dari penggunaan bahan bakar biosolar murni.

Merujuk pada penelitian terdahulu, hasil daya memang menunjukkan kurva yang menurun. Dijelaskan bahwa jika konsep pembakaran ganda bahan bakar biosolar dan bahan bakar CNG dapat menurunkan nilai daya seiring dengan putaran mesin pembakaran dalam yang semakin meningkat. Namun jika kondisi putaran mesin pembakaran dalam rpm minimum merupakan nilai torsi yang efisien. Karakteristik ini berlaku pada mesin pembakaran dalam Diesel atau penyalaan kompresi. Hal ini terjadi karena proses penyuntikan bahan bakar CNG menurunkan suhu di ruang bakar, yang menyebabkan pembakaran tidak stabil dan nilai kalor bahan bakar biosolar rendah dibandingkan bahan bakar solar biasa. Oleh karena itu, jika bahan bakar CNG dicampur dengan bahan bakar biosolar, akan menghasilkan fluktuasi rentang kurva daya dengan putaran mesin pembakaran rpm tertentu (Febriansyah, Riza, and Darmawan 2020; Rotaru 2024; Clayton 2008; Das, Subbarao, and Subrahmanyam 2015).

#### 4.2. Efisiensi termal

Gambar 3 menunjukkan efisiensi termal dengan rpm mesin pembakaran dalam penggunaan bahan bakar campuran antara bahan bakar biosolar dan bahan bakar CNG pada kecepatan mesin pembakaran 1800 rpm yang menunjukkan kurva fluktuasi satu jumlah variasi injeksi.



**Grafik 2.** Variasi nilai efisiensi termal dengan rpm selama pengujian stasioner pada pembakaran bahan bakar ganda mesin Diesel.

Pada penggunaan bahan bakar biosolar murni kurvanya naik secara konstan pada putaran mesin bakar 1800 rpm sampai dengan putaran mesin bakar 2600 rpm dengan nilai efisiensi termal sebesar 21,18% sampai dengan 27,16%. Pada bahan bakar campuran terjadi fluktuasi kurva akibat adanya variasi jumlah injeksi bahan bakar biosolar dan CNG pada kisaran putaran mesin bakar 1800 rpm sampai dengan 2600 rpm sehingga menghasilkan nilai efisiensi termal sebesar 14,55% sampai dengan 36,64% untuk variasi jumlah injeksi bahan bakar 100% biosolar :

50% CNG dan hasil efisiensi termal variasi jumlah injeksi bahan bakar 50% biosolar : 50% CNG putaran mesin bakar 1800 rpm sampai dengan 2600 yaitu sebesar 11,63% sampai dengan 23,60%. Efisiensi termal yang dihasilkan pada variasi injeksi bahan bakar campuran berbeda antara 100% biosolar: 50% CNG dibandingkan dengan 50% c: 50% CNG.

Peningkatan teoritis pada kurva efisiensi termal dibandingkan menggunakan bahan bakar biosolar murni dan bahan bakar campuran 50% biosolar: 50% CNG. Hasil efisiensi termal mendekati nilai terendah tetapi masih dalam rasio optimal pada proses pembakaran terjadi pada putaran mesin pembakaran 2400 rpm terhadap putaran mesin pembakaran 2600 rpm sebesar 33,93% sampai 36,64% untuk 100% biosolar : 50% CNG dibandingkan pada putaran mesin pembakaran dari 2400 sampai putaran motor pembakaran 2600 rpm sebesar 20,35% sampai 23,60% untuk pembakaran bahan bakar 50% biosolar : 50% CNG hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan suhu pada ruang bakar mesin Diesel menghasilkan pembakaran yang optimal dan pembakaran yang sempurna dengan pencampuran bahan bakar 100% biosolar dengan bahan bakar 50% CNG. Secara teoritis penurunan efisiensi termal pada kisaran putaran mesin pembakaran 1800 rpm sampai 2400 rpm tidak optimal pada campuran bahan bakar 50% biosolar dengan bahan bakar 50% CNG.

Pada penelitian ini menunjukkan bahwa pada rentang putaran mesin pembakaran 1800 rpm sampai dengan 2400 rpm terjadi fenomena pembakaran tidak sempurna yang disebabkan oleh tekanan aliran udara yang tidak stabil dan titik atomisasi yang melemah seiring dengan bertambahnya volume bahan bakar CNG yang masuk ke ruang bakar mesin Diesel. Sehingga terjadi penurunan efisiensi termal pada rentang putaran mesin pembakaran 1800 sampai dengan 2400 rpm dengan variasi katup injeksi bahan bakar biosolar 50% : 50% CNG. Menurut peneliti terdahulu, nilai efisiensi termal pada konsep *dual combustion* bahan bakar biosolar dengan bahan bakar CNG menunjukkan optimasi yang mengacu pada nilai efisiensi termal yang semakin meningkat saat kondisi bahan bakar CNG. Metode yang digunakan adalah RCCI (Chhatbar 2025; Ryu 2013) sedangkan peneliti saat ini menggunakan campuran bahan bakar CNG yang dicampur dengan bahan bakar biosolar secara konvensional sehingga menghasilkan fluktuasi pada rentang kurva daya dengan rpm mesin pembakaran tertentu.

#### 4. Kesimpulan

Data efisiensi termal menunjukkan pada putaran mesin pembakaran 2400 rpm dengan menggunakan bahan bakar biosolar murni menunjukkan kondisi mesin pembakaran Diesel normal pada siklus pembakaran menghasilkan nilai efisiensi termal sebesar 26,91%. Pada saat menggunakan campuran bahan bakar biosolar dengan bahan bakar CNG menunjukkan peningkatan efisiensi termal sebesar 33,93% untuk penggunaan laju alir katup bahan bakar 100% biosolar : 50% CNG dan sebesar 23,60% untuk penggunaan bahan bakar 50% biosolar : 50% CNG. Menjelaskan bahwa pembakaran terjadi secara optimal pada konsumsi bahan bakar dengan menggunakan campuran 100% biosolar dengan Bahan CNG menghasilkan pembakaran dengan emisi yang rendah. Penggunaan bukaan katup bahan bakar ganda antara campuran bahan bakar 100% biosolar dan 50% CNG terbukti efektif dalam menekan konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi termal pada mesin Diesel Jiandong 170F pada kondisi pengaturan variabel kecepatan dan beban tetap. Perolehan nilai data efisiensi termal serta besaran daya yang dihasilkan menggunakan konsep pembakaran ganda bahan bakar biosolar dengan bahan bakar CNG menunjukkan adanya fluktuasi performa. Agar perolehan hasil penelitian ini menyeluruh, peneliti mendatang mampu mempertimbangkan penambahan perangkat ECU (*electronic control unit*) guna mengetahui nilai spesifik peningkatan performa.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Abrar Riza, S.T., M.T. dan Ir. Harto Tanujaya, S.T., M.T., Ph.D sebagai pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada teman seperjuangan terutama Erwin Pratama, Natasya Riana Kurniadi, dan Kristofer Severiano Dinata.

## Daftar Pustaka

- Abdullah, I., Yudanto, B. G., Nasution, A., dan Andiko, R. 2022. "Performance Analysis of Biogas and Gasoline Fuels on the Quality of Combustion in a 4 Stroke 1 Cylinder Generator Engine with a Capacity of 80 cc." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(1): 66–74. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i1.9>.
- Alciatore, George F., dan Douglas Anderson. 2006. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. New York: McGraw-Hill.
- Anderson, John D. 2006. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. Edisi ke-1. Disunting oleh Suzanne Jeans. New York: McGraw-Hill.
- Barita, Eswanto, dan Kirfan Wujud. 2022. "Planning of Fluidized Combustion Chamber Using Waste Fuel." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(1): 58–65. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i1.11>.
- Bennett, Sean. 2010. *Modern Diesel Technology: Diesel Engines*. Disunting oleh Lauren Stone. Clifton Park: Delmar Cengage Learning.
- Chhatbar, J., Rajpara, P., Biswas, S., dan Banerjee, R. 2025. "Integration of RCCI and CDF Combustion in Conventional Diesel Engine Using CNG-Diesel Fuels: An Experimental Study." *Journal of Applied Fluid Mechanics* 18(1): 87–97. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.1.2809>.
- Das, Pranab, P. M. V. Subbarao, dan J. P. Subrahmanyam. 2015. "Effect of Cetane Number and Fuel Properties on Combustion and Emission Characteristics of an HCCI-DI Combustion Engine Using a Novel Dual Injection Strategy." Dalam *SAE Technical Papers*, 1–8. Delhi: SAE International. <https://doi.org/10.4271/2015-26-0023>.
- Diesel, Rudolf. 1901. *Method of Igniting and Regulating Combustion for Internal Combustion Engines*. Paten tahun 1901.
- Febriansyah, Iqbal Muhammad, Abrar Riza, dan Steven Darmawan. 2020. "Comparation Study Performance Diesel Engine Using BioDiesel with Secondary Data." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1007(1): 012085. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012085>.
- Ferguson, Colin R., dan Allan T. Kirkpatrick. 2016. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences*. Edisi ke-3. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press.
- Jamrozik, Arkadiusz, Wojciech Tutak, dan Karol Grab-Rogaliński. 2019. "An Experimental Study on the Performance and Emission of the Diesel/CNG Dual-Fuel Combustion Mode in a Stationary CI Engine." *Energies* 12(20). <https://doi.org/10.3390/en12203857>.
- Kassa, Mateos, dan Carrie Hall. 2018. "Dual-Fuel Combustion." Dalam *IntechOpen*, 1–18. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80570>.
- Kuncoro, Ari, Susilo Wisnugroho, dkk. 2016. "Rancang Bangun Konverter Kit Dual Fuel (LPG-Solar) untuk Mesin Diesel Kapal Nelayan Tradisional." *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, November 2016: 1–8.
- Nguyen, Van Giao, Minh Tuan Pham, Nguyen Viet Linh Le, Huu Cuong Le, Thanh Hai Truong, dan Dao Nam Cao. 2023. "A Comprehensive Review on the Use of BioDiesel for Diesel Engines." *International Journal of Renewable Energy Development* 12(4): 720–40. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54612>.

- Rotaru, Silviu, Constantin Pana, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu, Dinu Fuioreescu, dan Gheorghe Lazaroiu. 2024. "CNG Impact on Combustion Quality of a Diesel Engine Fueled in Diesel-Gas Mode." *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35010>.
- Ryu, Kyunghyun. 2013. "Effects of Pilot Injection Timing on the Combustion and Emissions Characteristics in a Diesel Engine Using BioDiesel-CNG Dual Fuel." *Applied Energy* 111: 721–30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.046>.
- Soares, Claire. 2015. "Gas Turbine Fuel Systems and Fuels." Dalam *Gas Turbines*, 317–411. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410461-7.00007-9>.
- Taghi, dan Vahid Hosseini. 2022. "Detailed Analysis of the Effects of BioDiesel Fraction Increase on the Combustion Stability and Characteristics of a Reactivity-Controlled Compression Ignition Diesel-BioDiesel/Natural Gas Engine." *Energies* 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15031094>.
- Yusaf, T. F., dan M. M. Noor. 2014. "Effect of Compressed Natural Gas Mixing on the Engine Performance and Emissions." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.15282/ijame.8.2013.29.0117>.
- Yuvenda, Dori, dan Randi Purnama Putra. 2023. "Optimization of Injection Duration to Increase the Substitution of CNG Fuel on a Diesel Dual Fuel Engine Operation at High Load." *Vocational Education International Conference*, 1–5 Juli.
- Zulkifli Abdul Majid, Rahmat Mohsin, dan Abdul Hakim Shihnan. 2016. "Engine Performance and Exhaust Emission of Diesel Dual Fuel Engine Fuelled by BioDiesel, Diesel and Natural Gas." *Jurnal Teknologi* 78(6): 59–67.