

## ANALISIS KARAKTERISTIK PEMBAKARAN DAN PERFORMA THERMAL MESIN DIESEL *DUAL-FUEL* BERBAHAN BAKAR HIDROGEN MENGGUNAKAN SIMULASI CFD

\*Iqbal Zaen Damara<sup>1</sup>, M.S.K Tony Suryo Utomo<sup>2</sup>, Muchammad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: [zaeniqbal52@gmail.com](mailto:zaeniqbal52@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik pembakaran dan performa termal pada mesin diesel *dual-fuel* dengan variasi substitusi energi hidrogen sebesar 5%. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak CFD ANSYS Forte dengan n-heptana sebagai bahan bakar *surrogate* diesel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan hidrogen secara signifikan mengubah pola pembakaran dari difusi menjadi *premixed* yang agresif. Peningkatan porsi hidrogen 5% memicu lonjakan laju pelepasan panas (HRR) maksimum sebesar 672,77% dan tekanan silinder puncak mencapai 14,34 MPa (meningkat 76,82% dari *baseline*). Hal ini disebabkan oleh kecepatan nyala api laminar hidrogen yang tinggi yang mempercepat inisiasi pembakaran. Dampak negatif ditemukan pada emisi NO<sub>x</sub> yang melonjak drastis hingga 6.435,66%, yang berkorelasi langsung dengan peningkatan temperatur puncak silinder hingga 2.913 K sesuai mekanisme Zeldovich. Penelitian ini menyimpulkan bahwa meskipun hidrogen meningkatkan efisiensi pelepasan energi, diperlukan strategi kontrol emisi untuk mereduksi beban termal dan oksidasi nitrogen yang masif.

**Kata Kunci:** ansys forte; bahan bakar ganda; hidrogen; karakteristik pembakaran; nox termal

### Abstract

*This study aims to analyze the combustion characteristics and thermal performance of a hydrogen-diesel dual-fuel engine with energy substitution variations of 5%. Numerical simulations were conducted using ANSYS Forte CFD software with n-heptane as the diesel surrogate fuel. The results indicate that hydrogen addition significantly shifts the combustion pattern from diffusion to aggressive premixed combustion. Increasing the hydrogen fraction up to 10% triggered a peak Heat Release Rate (HRR) surge of 760.99% and a peak cylinder pressure of 14.34 MPa (a 76.84% increase from the baseline). This phenomenon is attributed to the high laminar burning velocity of hydrogen, which accelerates combustion initiation. A negative impact was observed in NO<sub>x</sub> emissions, which skyrocketed by 6,435.66% at the highest hydrogen variation, directly correlating with the peak cylinder temperature rise of up to 2,913 K as per the Zeldovich mechanism. This research concludes that while hydrogen enhances energy release efficiency, emission control strategies are required to mitigate massive thermal loads and nitrogen oxidation.*

**Keywords:** ansys forte; dual-fuel; hydrogen; combustion characteristics; thermal nox

### 1. Pendahuluan

Krisis energi global dan regulasi emisi gas buang yang semakin ketat telah mendorong penelitian intensif terhadap bahan bakar alternatif untuk mesin pembakaran dalam. Mesin diesel, meskipun memiliki efisiensi termal yang tinggi, tetap menjadi penyumbang signifikan terhadap emisi partikulat dan nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) [1]. Hidrogen muncul sebagai kandidat bahan bakar masa depan yang menjanjikan karena tidak mengandung karbon, memiliki densitas energi yang tinggi, serta kecepatan nyala api laminar yang sangat cepat [2]. Karakteristik kimiawi hidrogen ini memungkinkan terjadinya pembakaran yang lebih sempurna dibandingkan bahan bakar fosil konvensional [3].

Salah satu metode yang efektif dalam mengaplikasikan hidrogen pada mesin diesel adalah melalui sistem *dual-fuel*. Dalam sistem ini, hidrogen dicampurkan ke dalam saluran masuk udara untuk membentuk campuran *premixed*, yang kemudian dipantik oleh injeksi pilot bahan bakar diesel [4]. Penggunaan hidrogen dalam sistem *dual-fuel* terbukti mampu meningkatkan efisiensi pelepasan panas dan mengurangi emisi karbon seperti CO dan CO<sub>2</sub> secara drastis [5]. Namun, penggunaan hidrogen dengan kecepatan bakar yang tinggi juga menimbulkan tantangan teknis berupa kenaikan tekanan silinder yang sangat tajam dan temperatur puncak yang ekstrem [6].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa porsi substitusi energi hidrogen memiliki batasan optimal tertentu. Sahoo et al. menyatakan bahwa peningkatan fraksi hidrogen secara linear berkontribusi pada kenaikan laju pelepasan panas (*Heat Release Rate*/HRR) dan tekanan puncak, namun dapat memicu fenomena *knocking* pada konsentrasi tinggi [7]. Selain itu, mekanisme pembentukan NO<sub>x</sub> termal melalui *Zeldovich Mechanism* menjadi isu krusial karena temperatur pembakaran hidrogen seringkali melampaui ambang batas 1.800 K [8]. Saravanan dan Nagarajan

melaporkan bahwa tanpa strategi pengendalian seperti EGR, emisi NO<sub>x</sub> pada mesin diesel-hidrogen dapat meningkat secara eksponensial seiring dengan bertambahnya beban termal silinder [9].

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik pembakaran dan performa termal mesin diesel *dual-fuel* menggunakan simulasi numerik 3D dengan perangkat lunak ANSYS Forte. Fokus utama penelitian adalah menganalisis korelasi antara variasi substitusi energi hidrogen terhadap distribusi temperatur, evolusi tekanan silinder, profil pelepasan panas dan emisi NO<sub>x</sub> [10]. Melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai fenomena *advanced combustion* dan limitasi oksigen yang terjadi pada porsi hidrogen dalam ruang bakar.

## 2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan perangkat lunak ANSYS Forte untuk menganalisis karakteristik pembakaran dan performa termal pada mesin diesel *dual-fuel* (diesel-hidrogen). Simulasi ini memungkinkan pemodelan kinetika kimia yang kompleks, fenomena semprotan bahan bakar, serta interaksi turbulensi dalam ruang bakar secara mendetail selama siklus tertutup (*closed cycle*).

Geometri ruang bakar dimodelkan berdasarkan spesifikasi mesin diesel satu silinder yang direpresentasikan dalam domain sektor (*sector mesh*) untuk mengoptimalkan waktu komputasi tanpa mengurangi akurasi hasil. Tahap *pre-processing* meliputi pembuatan *mesh* komputasi dengan fitur *automatic meshing* yang memiliki kepadatan tinggi di area nosel injeksi dan dinding silinder untuk menangkap gradien temperatur dan tekanan secara presisi. Kualitas *mesh* dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam mencapai konvergensi solusi numerik pada setiap langkah waktu (*time step*).

Dalam Fase fluida dalam ruang bakar diselesaikan dengan memecahkan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi. Model turbulensi RNG k- $\epsilon$  diterapkan untuk memodelkan aliran gas dalam silinder, sementara proses pecahnya butiran semprotan bahan bakar (*spray breakup*) dimodelkan menggunakan pendekatan *Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor* (KH-RT). Bahan bakar diesel dimodelkan menggunakan n-heptana sebagai *surrogate* untuk merepresentasikan karakteristik pembakaran bahan bakar diesel murni secara akurat dalam simulasi kinetika kimia.

Proses pembakaran *dual-fuel* dimodelkan dengan mengasumsikan hidrogen tercampur secara homogen dengan udara sebagai campuran *premixed* awal, yang kemudian dipantik oleh injeksi bahan bakar *pilot* n-heptana. Kinetika kimia diselesaikan menggunakan mekanisme reaksi reduksi yang mencakup spesies penting untuk pembentukan emisi, termasuk mekanisme *Extended Zeldovich* untuk prediksi emisi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>). Variasi porsi substitusi energi hidrogen ditetapkan pada 0% (*baseline*), 5% dengan total energi input yang dipertahankan konstan.

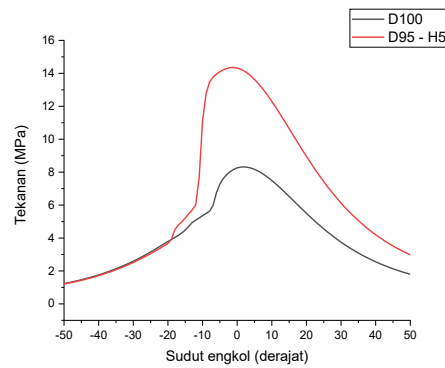
Analisis pasca-proses difokuskan pada evaluasi parameter kunci pembakaran yang meliputi tekanan dalam silinder (*in-cylinder pressure*), laju pelepasan panas (*heat release rate* - HRR), distribusi temperatur spasial, serta konsentrasi emisi NO<sub>x</sub>. Data hasil simulasi diekstraksi untuk membandingkan pengaruh setiap variasi hidrogen guna menentukan karakteristik performa termal dan emisi yang dihasilkan pada berbagai kondisi operasional.

## 3. Hasil dan Pembahasan

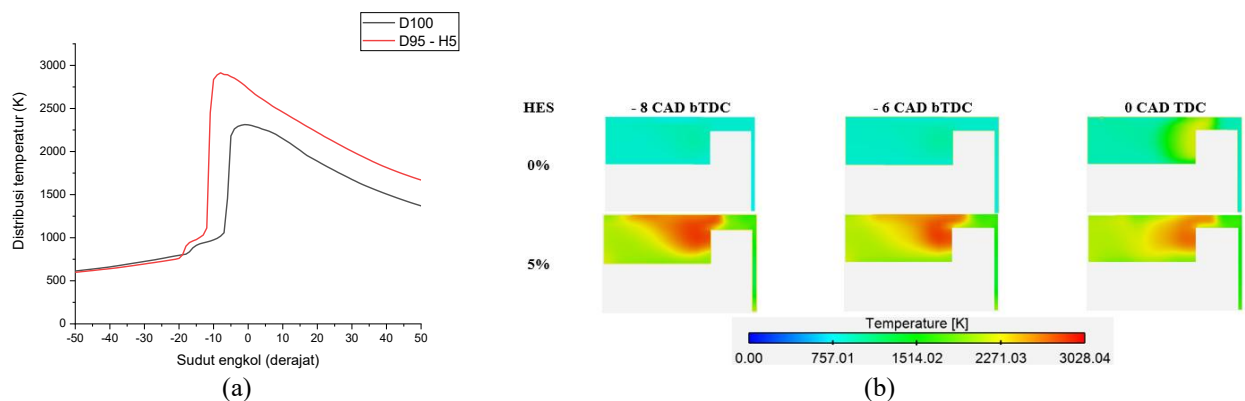
Untuk Penelitian ini menyajikan evaluasi komprehensif mengenai performa mesin dan karakteristik pembakaran pada mesin diesel *dual-fuel* menggunakan bahan bakar pengganti berbasis n-heptana dengan penambahan gas hidrogen. Fokus utama penelitian ini adalah menganalisis dampak porsi substitusi energi hidrogen sebesar 0%, 5% terhadap proses pembakaran secara keseluruhan. Investigasi ini secara khusus mengisolasi pengaruh hidrogen sebagai bahan bakar utama dengan tetap menjaga waktu injeksi bahan bakar yang konstan. Untuk memastikan konsistensi data, *Start of Injection* (SOI) ditetapkan pada -22,5° BTDC untuk seluruh kasus simulasi.

### 3.1 Analisis Tekanan dan Temperatur di Dalam Silinder

Variasi tekanan di dalam silinder terhadap sudut engkol untuk porsi substitusi energi hidrogen 5% digambarkan dalam Gambar 1, yang menunjukkan tren kenaikan yang signifikan dibandingkan dengan basis diesel murni. *Baseline* (D100) mencatat tekanan puncak silinder (PCP) sebesar 8,31 MPa, sementara porsi substitusi energi hidrogen 5% (D95-H5) memicu lonjakan drastis sebesar 76,82% di atas nilai *baseline*. Peningkatan ini terutama didorong oleh kecepatan nyala api hidrogen yang lebih unggul dibandingkan dengan diesel, sehingga memperpendek durasi pembakaran dan meningkatkan laju kenaikan tekanan (*pressure rise rate*) di dalam ruang bakar.



Gambar 1. Tekanan Silinder

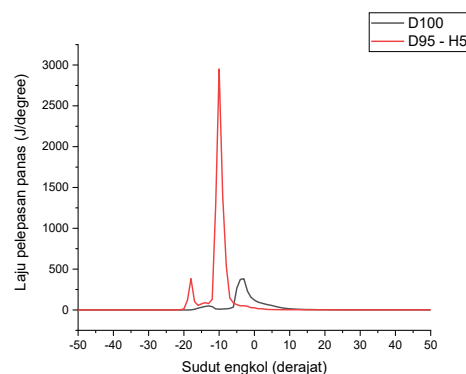


Gambar 2. (a) Grafik Distribusi Temperatur; (b) Kontur Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur dalam silinder diilustrasikan pada Gambar 2 (a) dan (b). Kasus dasar (D100) mencapai suhu puncak sebesar 2.313 K, sedangkan porsi substitusi energi hidrogen 5% (D95-H5) menghasilkan eskalasi termal yang signifikan sebesar 25,94%, yang menunjukkan kenaikan total sebesar 30,91% dari kondisi D100. Peningkatan temperatur silinder secara progresif ini utamanya disebabkan oleh laju pelepasan panas yang sangat masif dari hidrogen selama fase *premixed combustion*. Secara termodinamika, suhu yang sangat tinggi ini mengonfirmasi temuan pada emisi, di mana kadar NOx melonjak drastis karena suhu tersebut jauh melampaui ambang batas pembentukan nitrogen oksida secara termal.

### 3.2 Analisis Laju Pelepasan Panas

HRR (*Heat Release Rate*) mencirikan laju pembakaran, dan Gambar 3 mengilustrasikan fluktuasi laju pelepasan panas terhadap sudut engkol untuk porsi substitusi energi hidrogen 5%.



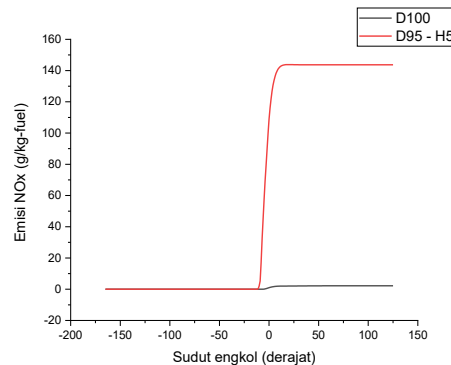
Gambar 3. Laju Pelepasan Panas

Profil laju pelepasan panas (HRR) terhadap sudut kruk as untuk berbagai fraksi hidrogen pada SOI -22,5° BTDC disajikan pada Gambar 3. *Baseline* (D100) menunjukkan puncak HRR yang relatif rendah sebesar 382 J/deg, namun porsi substitusi energi hidrogen 5% (D95-H5) memicu lonjakan drastis sebesar 672,77% dibandingkan dengan *baseline*. Fenomena ini dikaitkan dengan karakteristik hidrogen yang memiliki kecepatan nyala api laminar (*laminar burning*

*velocity*) sangat tinggi, yang secara signifikan mempercepat fase *premixed combustion* dan mengonsentrasikan pelepasan energi dalam durasi yang lebih singkat.

### 3.3 Emisi NOx

Profil emisi nitrogen oksida (NOx) terhadap sudut engkol untuk berbagai tingkat pengayaan hidrogen diilustrasikan pada Gambar 4 berikut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *baseline* (D100) menghasilkan nilai emisi akhir yang sangat rendah sebesar 2,20 g/kg-bahan bakar, sedangkan porsi substitusi energi hidrogen 5% (D95-H5) memicu lonjakan drastis sebesar 6.435,66% dibandingkan dengan *baseline*. Fenomena ini berkorelasi langsung dengan suhu puncak silinder yang mencapai hingga 2.913 K. Berdasarkan mekanisme Extended Zeldovich, pembentukan NO<sub>x</sub> termal sangat sensitif terhadap temperatur di atas 1.800 K.



Gambar 4. Emisi NOx

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis Penggunaan porsi substitusi energi hidrogen 5% terhadap karakteristik pembakaran, performa termal, dan emisi NOx pada mesin diesel bahan bakar ganda (*dual-fuel*) pada SOI konstan -22,5° BTDC.

1. Penggunaan porsi substitusi energi hidrogen 5% secara signifikan meningkatkan tekanan dan temperatur di dalam silinder, di mana puncak tekanan silinder melonjak sebesar 76,82% dari nilai *baseline* 8,31 Mpa. Temperatur puncak naik dari 2.313 K hingga peningkatan maksimum sebesar 30,91%. Laju pelepasan panas (HRR) menunjukkan eskalasi drastis sebesar 672,77 %, karena reaktivitas hidrogen yang unggul.
2. Sementara emisi nitrogen oksida (EINOx) yang melonjak hingga 6.435,66% akibat mekanisme NOx termal.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2018.
- [2] S. Verhelst and T. Wallner, "Hydrogen-fueled internal combustion engines," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 6, pp. 490–527, 2009.
- [3] G. A. Karim, "Hydrogen as a spark ignition engine fuel," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 28, no. 5, pp. 569–577, 2003.
- [4] N. Saravanan and G. Nagarajan, "An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation (EGR)," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 40–47, 2010.
- [5] T. Korakianitis, A. M. Namasivayam, and R. J. Crookes, "Hydrogen-dual-fuel compression-ignition engine with secondary injection of water or EGR," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 36, no. 13, pp. 7734–7748, 2011.
- [6] T. Gatts et al., "The effect of hydrogen addition on main combustion characteristics and emissions of a direct injection diesel engine," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, no. 19, pp. 14610–14621, 2012.
- [7] B. B. Sahoo, N. Sahoo, and U. K. Saha, "Effect of hydrogen sharing on diesel engine performance and emission," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, no. 14, pp. 6033–6045, 2009.
- [8] M. Momeni et al., "Thermodynamic analysis of a dual-fuel (diesel-hydrogen) engine," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, no. 36, pp. 20491–20502, 2019.
- [9] S. Shudo and H. Suzuki, "Analysis of direct injection SI hydrogen engine by heat release shape," *SAE Trans.*, vol. 112, pp. 1012–1021, 2003.
- [10] F. Z. Liu and G. A. Karim, "Simulation of the hydrogen-diesel dual-fuel engine," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 22, no. 8, pp. 837–842, 1997.