

Performa dan Karakteristik Emisi Gas Buang Mesin Diesel Berbahan Bakar Ganda

Arifin Siagian dan Mawardi Silaban

Balai Besar Teknologi Energi (B2TE), BPPT
Kawasan PUSPIPTEK, Cisauk, Tangerang Selatan, Banten, 15314.
Email: silaban90210@yahoo.com

ABSTRAK

Dewasa ini pemanasan global dan polusi atmosfer yang diakibatkan oleh motor bakar telah menjadi masalah sosial. Selain itu, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sangat dituntut untuk dikurangi, oleh sebab semakin menipis ketersediaannya. Makalah ini menjelaskan penelitian pada sebuah mesin diesel konvensional, yaitu mesin bakar torak pengapian kompresi (*compression autoignition*) yang berkaitan dengan polusi dan efisiensi. Mesin dioperasikan dengan menginjeksikan sedikit solar sebagai pemicu pengapian saja (*pilot autoignition*). Kemudian bahan bakar gas (BBG) sebagai bahan bakar utama bersama-sama udara dialirkan melewati mixer di dalam *intake port* ke dalam silinder bakar mesin. Dalam hal ini dilakukan uji performa mesin dengan memakai masing-masing dua jenis BBG, yaitu propana (C_3H_8) dan hidrogen (H_2), dengan prosentasi yang bervariasi. Untuk perbandingan, pengoperasian mesin dengan bahan bakar standar (solar 100%, *single-fuel*) juga dilakukan. Uji performa ini mencakup analisis tekanan di dalam silinder, karakteristik emisi gas buang, dan efisiensi panas. Laju pelepasan panas (*rate of heat release*) dihitung dari penurunan tekanan hasil pengukuran langsung di dalam silinder. Sebagai hasilnya, telah diketahui bahwa; emisi gas buang pada kondisi pengoperasian dengan kedua BBG (propana dan hidrogen), masing-masing menghasilkan asap (*smoke* atau *soot* atau *Particulate Matter, PM*), hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), dan oksida nitrogen (NO_x) yang menurun signifikan, akan tetapi efisiensi panas sedikit menurun.

Kata kunci: Pemanasan global, bahan bakar ganda, mesin diesel konvensional, pemicu pengapian.

ABSTRACT

Today's the global warming of the earth and atmospheric pollution caused by combustion engines has become a social problem. Further more, the dependence on fossil fuels is expected to be reduced, and therefore more expensive, because of dwindling availability. This paper discusses on a conventional diesel engine, i.e., compression ignition piston combustion engine (compression ignition) that related to the pollution and efficiency. A diesel engine is operated by injecting a bit of diesel as a trigger ignition only, Fuel Gas (CNG) as fuel staple together the air flow through the mixer in the intake port into the cylinder combustion engine. In this case the engine performance test using each of the two types of fuel gas, ie propane (C_3H_8) and hydrogen (H_2), with a percentage that varies. For comparison, the operation of the engine with standard fuel (diesel 100%, single-fuel) were also performed. This performance test includes analysis of the pressure in the cylinder, exhaust gas emission characteristics, and thermal efficiency. Heat release rate (rate of heat release) was calculated from the derivative of the pressure measurement results in the cylinder. As a result, it has been known that; exhaust emissions on operating conditions with both gas fuel (propane and hydrogen), each of which produce smoke (smoke or soot or Particulate Matter, PM), hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2) and nitrogen oxides (NO_x), which decreased significantly, but the thermal efficiency slightly decreased.

Keywords: Global warming, dual fuel, combustion engine, spark ignition.

PENDAHULUAN

Pemanasan global bumi akibat dari gas karbon dioksida (CO_2) yang meningkat pada lapisan atmosfer

dapat menimbulkan perubahan cuaca yang ekstrim dapat menyebabkan banjir, dan polusi udara yang memacu timbulnya berbagai penyakit pada makhluk hidup. Masalah sosial tersebut di atas sebagian

besar diakibatkan oleh gas buang yang dihasilkan oleh mesin motor bakar. Kemudian dari pada itu, bahan bakar fosil semakin mahal harganya karena sumbernya semakin menipis. Oleh sebab itu disamping tuntutan peningkatan efisiensi panas juga dituntut gas buang mesin motor bakar yang ramah lingkungan.

Mesin diesel adalah salah satu dari motor bakar yang diketahui mempunyai efisiensi panas (*thermal efficiency*) yang tinggi, tangguh terhadap cuaca, dan fleksibel terhadap jenis bahan bakar. Karena itulah mesin diesel, sangat banyak dan sangat luas penggunaannya terutama, yang membutuhkan kapasitas tenaga besar. Mesin diesel menghasilkan CO₂ yang relatif kecil dibandingkan motor bakar bensin karena efisiensi panas yang lebih besar, akan tetapi pembakaran pada sistem mesin ini menghasilkan oksida nitrogen (NO_x) dan asap yang lebih buruk dari pada motor bakar yang lain. Bagi makhluk hidup, NO_x dapat mengakibatkan kematian karena dapat mengikat *haemoglobin* di dalam darah sehingga darah tidak mendapat oksigen, sedangkan asap dapat menyebabkan gangguan pernapasan, karena itu sangat diperlukan perbaikan gas buangnya. Lagi pula, pada mesin diesel konvensional hubungan NO_x dan asap adalah antagonis (*trade-off*), yaitu sulit menekan kadar NO_x dan asap sekaligus dalam waktu yang bersamaan. Misalnya; apabila periode injeksi solar dipercepat (injeksi dini) pembakaran secara pre-mixed dominan, dan rasio ekuivalensi tinggi menyebabkan temperatur bakar mencapai temperatur terbentuknya NO_x, walaupun asap (*smoke* atau *soot* atau *Particulate Matter, PM*) dapat ditekan secara signifikan, akan tetapi kadar NO_x malah tinggi. Sebaliknya bila, periode injeksi solar diperlambat (mendekati sekitar titik mati atas atau *Top Dead Center, TDC*), maka pembakaran secara difusi dominan, menimbulkan NO_x yang rendah, akan tetapi kadar asap tinggi.

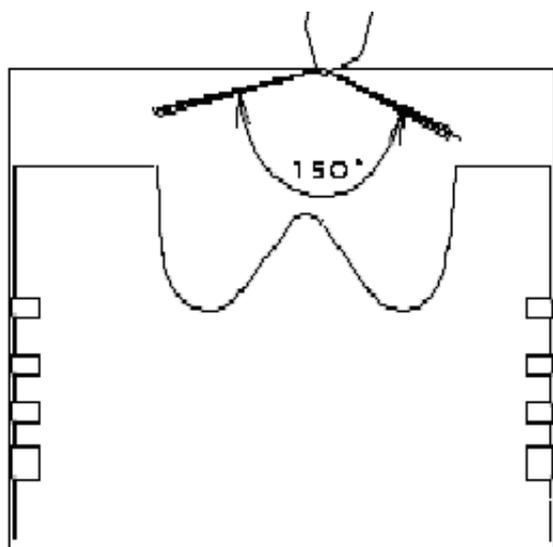
Dewasa ini, telah banyak riset terhadap mesin diesel, yang memungkinkan bahan bakar gas (BBG), seperti; *Liquified Petroleum Gas (LPG)*, *Compressed Natural Gas (CNG)*, biogas, gas hasil gasifikasi; gas produser, dan lain-lain dipakai sebagai bahan bakar utama. Karena antara udara dan BBG dapat bercampur dengan baik, dan konsentrasinya dapat diatur dengan mudah, sehingga dengan memilih periode injeksi solar yang tepat waktu diharapkan NO_x dan asap dapat ditekan sekaligus dalam waktu yang bersamaan. Ada beberapa hasil riset telah mendapatkan konsep [1-11] serta performa dan karakteristik gas buang mesin berbahan bakar ganda atau *dual fuel diesel engine* itu. Emisi asap dapat ditekan secara signifikan, namun emisi hidrokarbon meningkat pada

kondisi beban rendah. Selain konsep baru pada mesin diesel di atas, ada lagi konsep *Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine* [12-14]. Ini berarti bahwa campuran sangat tipis (*ultra lean mixture*) dikompres dengan periode yang cukup waktu membuat campuran homogen, yaitu tenggang waktu sampai tercapainya pengapian (*ignition delay*), kemudian dibakar dengan pemicu api (*pilot autoignition*) oleh injeksi jumlah kecil solar. Beberapa peneliti [15-17] telah melakukan penelitian dual-fuel diesel engine dengan mengoperasikan gas hidrogen. Hasilnya menunjukkan bahwa emisi gas *greenhouse*; NO_x dan asap dapat diturunkan masing-masing kira-kira 70-80%.

Pada penelitian ini, BBG (propana, hidrogen) sebagai bahan bakar utama dialirkan melalui intake port ke dalam silinder mesin diesel konvensional yang periode injeksi solar-nya dapat dirubah, dan sebagai pemicu api digunakan bahan bakar solar yang disemprotkan langsung ke dalam silinder mesin dengan jumlah kecil (*dual-fuel*). Kemudian, dengan periode injeksi solar yang dapat dirubah bervariasi sangat luas, dan berdasarkan variasi tersebut NO_x, HC, CO, CO₂ diukur, dan dianalisis efisiensi panas-nya, kemudian dibandingkan dengan performa mesin pada kondisi pengoperasian dengan bahan bakar solar 100% (*single-fuel*). Laju pelepasan panas dihitung dari penurunan tekanan dari hasil pengukuran langsung di dalam silinder.

METODE PENELITIAN

Pengujian ini dilakukan pada sebuah mesin diesel, 4-tak, silinder tunggal. Diameter (*bore*) dan langkah (*stroke*) masing-masing adalah 92 dan 96 mm. Periode injeksi solar dapat dibuat dengan variasi yang sangat luas, dari mulai 60° sebelum titik mati atas (*Before Top Dead Centre atau BTDC*) sampai 5° setelah titik mati atas (*After Top Dead Centre, atau ATDC*). Rasio kompresi adalah 17,7, dan tipe silinder bakar adalah cekungan dalam (*deep dish*) pada bagian piston atas. Spesifikasi mesin yang digunakan adalah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, dan skematik piston di dalam silinder bakar serta tipenya adalah seperti Gambar. 1. Pada kop silinder (*cylinder head*) dilengkapi dengan pengukur tekanan (*pressure transducer*) yaitu untuk pengukuran tekanan pada proses pembakaran berlangsung, yang akan dipergunakan untuk perhitungan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menghitung laju pelepasan panas dan temperatur dalam silinder. Sinyal tekanan dalam silinder, sinyal TDC (*top dead centre*), dan sinyal bukaan katup (*valve lift*) dideteksi oleh sebuah gap sensor yang direkam pada sebuah perekam digital.



Gambar 1. Skematik Posisi Piston di dalam Silinder

Tabel 1. Spesifikasi Mesin

Engine type	water cooled, 4-stroke, DI Diesel Engine
Combustion chamber	single-cylinder, deep-dish type
Bore x stroke (mm)	92x96
Displacement (cc)	638
Compression ratio	17.7
Injection nozzle diameter (mm) (hole number, injection angle)	0.26 (4-hole, 150°)
Injection pressure (MPa)	19.6
Injection timing	variable (for wide-range of crank angle)
Engine speed (rpm)	1000

Gas propana dan hidrogen dialirkan ke dalam silinder bakar setelah melalui sebuah *mixer* udara dan BBG. Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur udara dan BBG, dan flowmeter digunakan untuk mengukur debit udara dan BBG yang ditempatkan di dalam intake port. Pengukuran kadar emisi gas buang yaitu, hidrokarbon (HC) yang diterjemahkan sebagai hexana, CO, dan CO₂ menggunakan Horiba-MEXA 554J. NO_x diukur dengan tipe analisis Chemiluminescent (Shimadzu, NOA-305). Asap diukur dengan Bosch tipe meter (Zexel, DSM-10). Temperatur air pendingin dan oli pelumas mesin masing-masing sama, 60°C.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Tekanan

Laju pelepasan panas dihitung dan dianalisis dari hasil penurunan tekanan dari pengukuran langsung selama proses pembakaran di dalam silinder dengan menggunakan model *one-region*[18] dari hukum I termodinamika. Laju pelepasan panas $dQ/d\theta$ diperoleh dengan asumsi mengabaikan kehilangan panas dan gas di dalam silinder bakar tersebar merata, sebagai berikut: Dari hukum termodinamika I $dQ=dU + PdV$ diperoleh;

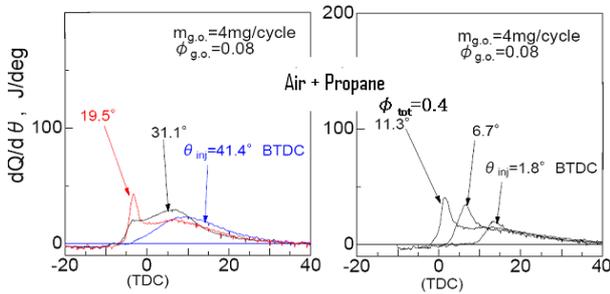
$$\begin{aligned} \frac{dQ}{d\theta} &= \frac{dU}{d\theta} + P \frac{dV}{d\theta} \\ &= \frac{c_v}{R} \left(P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) + P \frac{dV}{d\theta} \\ &= \frac{1}{\kappa - 1} \left(P \frac{dV}{d\theta} + V \frac{dP}{d\theta} \right) + P \frac{dV}{d\theta} \\ &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} V \frac{dP}{d\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

- Q : panas yang dilepas (J),
- U : energi dalam (J),
- P : tekanan di dalam silinder (Pa),
- c_v : koefisien panas,
- V : volume silinder (m³),
- κ : rasio koefisien panas, dan
- θ : sudut putar mesin (deg.)

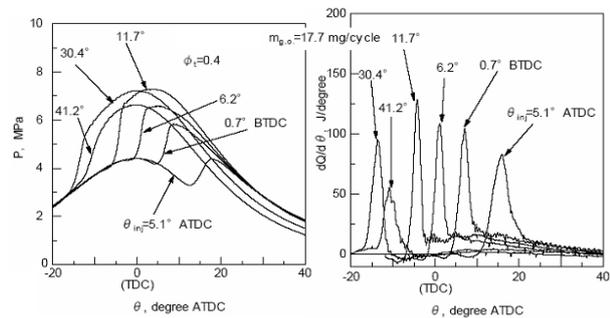
Gambar 2 menunjukkan grafik dari tekanan P dan laju pelepasan panas $dQ/d\theta$ pada proses pembakaran di dalam silinder mesin terhadap periode injeksi solar yang berubah, pada kondisi pengoperasian dengan bahan bakar solar 100% (*single-fuel*). Rasio ekuivalensi keseluruhan Φ adalah 0.40 (pada kondisi operasi sebagai *dual-fuel* $\Phi_{g.o.} = 0.08$) dan kecepatan mesin n adalah 1000 rpm. Periode injeksi solar, θ_{inj} dibuat bervariasi dari mulai 60° BTDC sampai dengan 5° ATDC. Sejalan dengan periode injeksi solar dipercepat, nilai dari puncak ke-dua dari laju pelepasan panas menjadi lebih kecil sebab komulasi (laju) pembakaran secara premixed meningkat. Pada periode injeksi $\theta_{inj} = 11.7^\circ$ BTDC, nilai puncak pertama adalah yang terbesar. Pada periode injeksi lebih awal dari 30.4° BTDC, nilai dari puncak pertama lebih kecil dan tanpa puncak ke-dua, dan laju pelepasan panas menunjukkan karakteristik pembakaran yang secara premixed. Hal ini disebabkan oleh wilayah campuran sangat tipis (*ultra lean mixture*) mendominasi pembakaran di dalam silinder mesin. Sejsuai dengan dipercepatnya periode injeksi solar maka semakin panjang pula tenggang waktu sampai terjadi titik api atau *ignition delay*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.

Gambar 4 menunjukkan laju pelepasan panas pada kondisi campuran udara dan hidrogen dan Gambar 2 campuran udara dan propana yang dimasukkan dari *intake port*, terhadap periode injeksi solar θ_{inj} . Jumlah solar $m_{g.o}$ yang diinjeksikan, pada kondisi ini adalah 4mg/cycle yang berarti dengan rasio ekuivalensi setara dengan 0.08. Secara keseluruhan, termasuk propana dan hidrogen masing-masing $\Phi_{tot} = 0.4$. Periode injeksi solar θ_{inj} ; pada kondisi campuran udara+ propana diubah dari antara 41.4° BTDC dan 1.8° BTDC, sedangkan untuk campuran udara dan hidrogen diubah antara 62.7° BTDC dan 3.2° ATDC. Secara keseluruhan bentuk grafik pada kondisi kedua bahan bakar gas yang berbeda tersebut memiliki kesamaan, tetapi

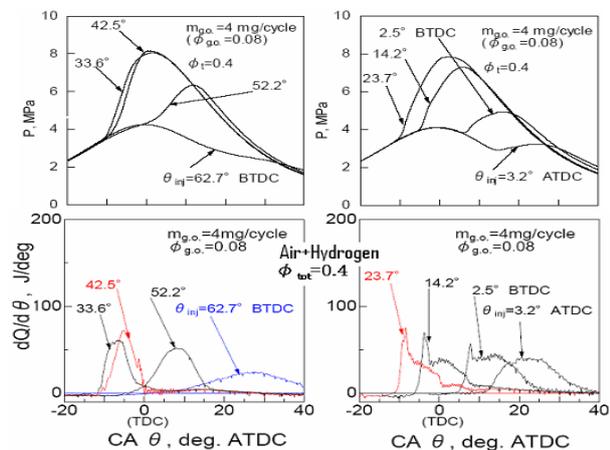
nilai puncak dari laju pelepasan panas dengan kondisi periode injeksi solar θ_{inj} yang berdekatan memiliki perberbedaan. Di antara kedua campuran tersebut, nilai puncak campuran udara dan hidrogen lebih besar dari pada campuran udara dan propana. Hal ini disebabkan sifat hidrogen yang lebih mudah dan lebih cepat terbakar dibandingkan dengan propana.



Gambar 2. Laju Pelepasan Panas Campuran Udara dan Propana



Gambar 3. Tekanan dan Laju Pelepasan Panas pada Kondisi Udara saja ($\Phi_{tot}=0.4$, $\theta_{inj}=41.2^\circ$ BTDC~ 5.1° ATDC)



Gambar 4. Tekanan dan Laju Pelepasan Panas Campuran Udara dan Hidrogen

Untuk membandingkan karakteristik antara kondisi mesin berbahan bakar solar 100% (*single-fuel*) dan berbahan bakar gas (*dual-fuel*) maka dipilih hidrogen mewakili kondisi berbahan bakar ganda, karena hidrogen adalah BBG tanpa kandungan karbon, dan ramah lingkungan.

Dari analisis yang dilakukan seperti pada Gambar 3 dan 4 diperoleh hasil sebagai berikut: Nilai puncak tekanan lebih besar. Secara keseluruhan nilai puncak dan gradien dari laju pelepasan panas adalah lebih kecil.

- (1) Laju pelepasan panas mirip dengan pengoperasian dengan solar 100%, pada periode injeksi solar θ_{inj} antara 23.7° dan 2.5° BTDC, yang mana; puncak ke-duanya adalah pembakaran hidrogen yang mulai dari pemicu api yang diakibatkan oleh solar.
- (2) Pada $\theta_{inj} = 3.2^\circ$ ATDC, laju pelepasan panas menunjukkan hanya satu puncak yang landai. Tenggang waktu selama *ignition delay* membuat solar ber-difusi dan kemudian membuat pembakaran secara *premixed*.
- (3) Pada periode injeksi solar yang lebih awal dari pada 33.6° BTDC, injeksi solar ke dalam campuran udara+hidrogen dapat bercampur dengan waktu yang lebih longgar, membuat campuran tipis mendominasi isi silinder dan solar menjadi sumber pemicu api di seluruh wilayah di dalam silinder. Oleh karena itu, pembakaran menjadi sangat lambat dan laju pelepasan panas menunjukkan hanya satu puncak.

Analisis Emisi Gas Buang

Emisi gas buang, seperti, asap (*smoke* atau *soot*), oksida nitrogen (NOx), HC, dan CO, dan efisiensi panas, η_e telah didapatkan pada periode injeksi solar yang bervariasi sangat luas. Pada pengujian ini dibuat rasio ekuivalensi (*Equivalence Ratio, ER*) total, $\Phi_t = 0.3; 0.4$, dan 0.5 pada kondisi ini jumlah injeksi solar adalah 0.4 mg/cycle atau setara dengan $\Phi_{g.o.} = 0.08$.

Pada kondisi campuran udara dan hidrogen dan udara dan propana, yang masing-masing dialirkan dari intake port, baik pada kondisi dengan propana maupun kondisi dengan hidrogen tidak didapati asap seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5 dan 6. Hal ini disebabkan; yang berlaku untuk kedua campuran bahwa, masing-masing campuran bercampur dengan baik dengan udara membentuk campuran tipis (*lean mixture*) sehingga tidak ada wilayah di dalam silinder yang miskin oksigen. Khusus untuk campuran udara dan hidrogen, karena bahwa tidak terdapat unsur karbon pada struktur molekulnya, sehingga tidak menghasilkan asap. Jadi asap yang ditemukan pada kondisi pengoperasian mesin tanpa gas (solar 100%) adalah yang dihasilkan oleh solar. Pada kondisi *dual-fuel* asap tidak ditemui adalah karena pembakaran dengan injeksi solar yang jumlahnya sangat kecil. Dalam kondisi pengoperasian tanpa BBG (solar 100%), tidak dapat diperoleh data pada periode injeksi θ_{inj} antara 50 dan 10° BTDC, dan 10 dan 30° BTDC sebab terjadi ketuk (*knocking*) pada masing-

masing $\Phi_t = 0.4$ dan $\Phi_t = 0.5$. Pada kondisi mesin *dual-fuel* dengan campuran udara dan hidrogen, tidak dapat diperoleh data pada periode injeksi θ_{inj} antara 60 dan 5° BTDC pada $\Phi_{tot} = 0.5$.

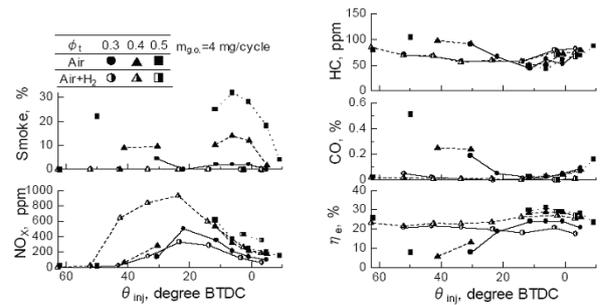
Apabila periode injeksi dipercepat dari dekat TDC, maka kadar NOx meningkat dan nilai maksimum laju pelepasan panas pada θ_{inj} sekitar 25° BTDC juga besar. Apabila periode injeksi dipercepat lagi, kadar NOx berkurang secara signifikan. Ini adalah disebabkan tidak didapatinya wilayah pembakaran ber-temperatur tinggi akibat percampuran yang bagus (rasio ekuivalensi tidak ada wilayah yang tinggi) di antara masing-masing kondisi. Oleh sebab itu, pada umumnya kadar NOx tinggi disebabkan oleh nilai tekanan maksimum dalam silinder adalah tinggi. Emisi hidrokarbon didapati pada ketiga kondisi (*single-fuel*, dan *dual-fuel*; hidrogen dan propana) sebab kondisi *dual-fuel* pun menggunakan solar, karena pembakaran solar dan propana tidak sempurna. Pada kondisi solar 100% dan kondisi campuran udara+hidrogen, menunjukkan kadar hidrokarbon minimum di sekitar $\theta_{inj} = 20^\circ$ BTDC, seperti mesin diesel konvensional. Hubungan karakteristik NOx dan hidrokarbon adalah *trade-off*. Apabila kadar hidrokarbon menurun, maka kadar NOx akan meningkat oleh sebab pembakaran yang lebih baik mengakibatkan temperatur bakar menjadi tinggi. Pada kondisi *dual-fuel*, udara dan hidrogen, hidrokarbon yang dihasilkan hampir sama dengan pembakaran pada kondisi solar 100%, akan tetapi pada kondisi *dual-fuel* udara + propana, hidrokarbon yang dihasilkan sangat tinggi untuk semua periode injeksi solar. Ini adalah disebabkan campuran sulit terbakar sehingga dihasilkan gas mentah, yang diterjemahkan oleh alat ukur sebagai hidrokarbon. Efisiensi panas pada kedua kondisi *dual-fuel* menurun dibandingkan dengan kondisi 100% solar.

Pada kondisi campuran udara + hidrogen efisiensi panas menurun sedikit, sementara kondisi udara + propana menurun sangat tajam terutama pada periode injeksi θ_{inj} mendekati TDC. Ini adalah disebabkan pembakaran yang sangat buruk mengakibatkan campuran terbuang tanpa terbakar, dapat dilihat dari grafik hidrokarbon yang juga meningkat tajam. Akan tetapi pada kedua kondisi *dual-fuel* ini baik NOx maupun asap hampir tidak ada pada periode injeksi solar sekitar 50° BTDC.

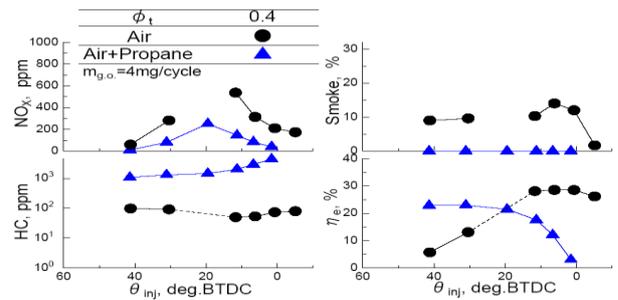
Gambar 7 menunjukkan karakteristik hubungan antara emisi gas buang dan perubahan perbandingan massa hidrogen terhadap solar pada periode injeksi yang tetap, yaitu $\theta_{inj} = 3.5^\circ$ ATDC. Rasio ini diekspresikan pada basis rasio ekuivalensi sebagai berikut: $\Psi = \Phi_{H_2}/\Phi_t$

Rasio ekuivalensi keseluruhan, Φ_t , dibuat pada 0.3, 0.4, dan 0.5. Jumlah injeksi solar bervariasi mulai dari 4, 8, dan 12 mg/cycle untuk setiap rasio ekuivalensi. Pada $\psi = 0$ (100% solar), data yang dipakai adalah pada periode injeksi 3.5° ATDC. Emisi buang asap menurun sejalan dengan bertambahnya fraksi hidrogen ψ , sebab solar yang

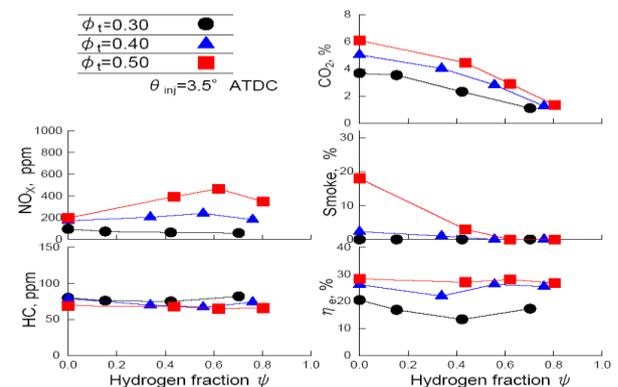
diinjeksi ke dalam silinder berkurang. Pada $\Phi_t = 0.3$, kadar NOx tidak meningkat walaupun fraksi hidrogen meningkat. Akan tetapi, pada $\Phi_t = 0.4$ dan 0.5, menghasilkan NOx yang bernilai maksimum. Seperti ditunjukkan pada Gambar 8, pada $\Phi_t=0.4$, nilai maksimum laju pelepasan panas pada $\psi = 0.56$ adalah sedikit lebih besar dari pada $\psi = 0.76$. Pembakaran pada $\psi = 0.56$ tampak lebih kuat dari pada $\psi = 0.76$. Oleh sebab itu NOx pada $\psi = 0.56$ memberikan hasil paling besar. Kadar HC menunjukkan nilai yang hampir sama untuk semua fraksi hidrogen, akan tetapi sedikit menurun dengan bertambahnya rasio ekuivalensi keseluruhan. Konsentrasi CO₂ dan CO menurun dengan bertambahnya fraksi hidrogen. Efisiensi panas η_e , tidak berubah dari fraksi hidrogen 0 sampai $\psi = 0.8$ untuk $\Phi_t=0.5$.



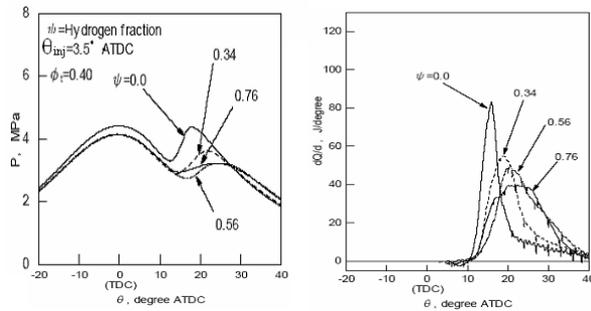
Gambar 5. Emisi Gas Buang (Asap, NOx, HC, CO) dan Efisiensi Panas, η_e terhadap θ_{inj} (air dan hidrogen dari intake port)



Gambar 6. Hubungan Antara Emisi Gas Buang (asap, NOx, HC, CO) dan Efisiensi Panas, η_e dengan θ_{inj} untuk Udara dan Propana, pada Intake Port



Gambar 7. Hubungan antara Emisi Gas Buang (asap, NOx, HC, CO, dan CO₂) dan Efisiensi Panas, η_e , dengan Perubahan Fraksi Hidrogen, ψ



Gambar 8. Hubungan antara Tekanan dan Laju Pelepasan Panas untuk Beberapa Fraksi Hidrogen ($\Phi_t = 0.4$, $\theta_{inj} = 3.5^\circ$ ATDC).

KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian pada sebuah mesin diesel konvensional, dengan menginjeksikan sedikit solar sebagai pemicu api (*pilot autoignition*) ke dalam silinder bakar yang diisi campuran udara dan BBG (propana dan hidrogen) yang dialirkan dari intake port sebagai bahan bakar pokok (*dual-fuel*). Dari hasil pengujian ini telah didapatkan kesimpulan performa mesin dan karakteristik emisi gas buangnya, sebagai berikut: Apabila periode injeksi solar dipercepat maka NO_x akan menurun, oleh sebab temperatur bakar menurun akibat campuran udara dan BBG (propana, hidrogen) dan solar bercampur baik menjadi campuran merata dan tipis (*lean premixed*). Khususnya pada kondisi *dual-fuel* dengan gas hidrogen 80% dari total bahan bakar, maka HC, CO, dan CO₂ menurun dan tanpa asap, akan tetapi efisiensi panas menurun sedikit dibandingkan dengan pada pengoperasian standar (100% solar), Pada satu keadaan yang istimewa, yaitu pada kondisi periode injeksi solar dipercepat signifikan baik asap maupun NO_x hampir tidak didapati, dan HC rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Henein, N.A. and Bolt, J.A., *Correlation of Air Charge Temperature and Ignition Delay for Several Fuels in a Diesel Engine*, SAE Paper, No. 690252, 1969.
- Tesarek, H., *Investigation Concerning the Employment Possibilities of Diesel-Gas Process for Reducing Exhaust Emission, Especially Soot (Particulate Matter)*, SAE Paper, No. 831197, 1983.
- Karim, G.A., *The Dual Fuel Engine of the compression Ignition Type—Prospects, Problem and Solution—A Review*, SAE Paper, No. 831073, 1983.
- Varde, K.S., *Propane Fumigation in a Direct Injection Type Diesel Engine*, SAE Paper, No. 831354, 1983.
- Siebers, D.L. and Edwards, C.F., *Autoignition of Methanol and Natural Gas in a Simulated Diesel Environment*, SAE Paper, No. 910227, 1991.
- Karim, G.A., *An Examination of Some Measures for Improving the Performance of Gas Fueled Diesel Engines at Light Load*, SAE Paper, No. 912366, 1991.
- Wong, W.Y., Midkiff, K.C. and Bell, S.R., *Performance and Emissions of a Natural Gas Dual-Fueled, Indirect Injected Diesel Engine*, SAE Paper, No. 911766, 1991.
- Daiso, Yasigeo, Kibara, Saitou, Kozeki, Shimizu, *Characteristics of Combustion and Low Emissions of Dual-Fuel Engine*(1st Journal of The Using Natural Gas to Ignited by Light Oil, JSA Paper, pp. 23-28, 27-3 1996.
- Poonia, M.P., Pamesh, A. and Gaur, R.R., *Experimental Investigation of the Factors Affecting the Performance of a LPG – Diesel Dual Fuel Engine*, SAE Paper, No. 1999-01-1123, 1999.
- Goto, S., Lee, D., Shakal, J., Harayama, N., Honjyo, F. and Ueno, H., *Performance and Emission of an LPG Lean Burn Engine for Heavy Duty Vehicles*, SAE Paper, No. 1999-01-1513, 1999.
- Liu, Z., Karim, G. A., *The Ignition Delay Period in Dual Fuel Engines*, SAE Paper, No. 950466, 1995.
- Thring, R.H., *Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines*, SAE Paper No. 892068, 1989.
- Takeda, Y., Keiichi, N., Keiichi, N., *Emission Characteristics of Premixed Lean Diesel Combustion with Extremely Early Staged Fuel Injection*, SAE Paper, No. 961163, 1996.
- Allen, W. G., Ryan, T.W., *Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) of Diesel Fuel*, SAE Paper, No. 971676, 1997.
- Gopal, G., Srinivasa Rao, P., Gopalakrishnan, K.V. and Murthy, B.S., *Use of Hydrogen in Dual-Fuel Engines*, Int. J. of Hydrogen Energy, 7-3, pp. 267-272, 1982.
- Varde, K.S., and Frame, G.A., *Hydrogen Aspiration in a Direct Injection Type Diesel Engine Its Effect on Smoke and Other Engine Parameters*, Int. J. Hydrogen Energy, 8-7, pp. 549-555, 1983.
- Lambe, S.M., and Watson, H.C., *Optimizing the design of a hydrogen engine with pilot diesel fuel injection*, Int. J. of Vehicle Design, Vol. No. 4, pp. 370-389, 1993.
- Arifin Laurensius Siagian, *Study on The Gas Fuel Contains in Ambient Conditions Ignition Delay of Diesel Spray*, Doctoral Thesis, p. 51, Okayama University, 1999.