

PENGUJIAN ALAT INJEKSI CNG TERHADAP EMISI GAS BUANG PADA MESIN DIESEL BERBAHAN BAKAR GANDA (CNG-SOLAR)

Saut Siagian¹, Yuhani Djaya, dan Sugeng Prayitno

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UPN "Veteran" Jakarta

Jl. R.S. Fatmawati Pondok Labu Jakarta Selatan – 12450

Telp. 021 7656971 Ext. 195

Abstract

This research aims at knowing the influence of using gas fuel and injection unit of the gas emission on the diesel engine of dual fuel (CNG–Diesel fuel). This research uses gas injection unit from simulation result with the package program of CFD (Computational fluid Dynamic Fluent Gambit) and it is found that the injection unit dimension resulting from the first test using gas injection unit of the D type model is 0,3 mm with ten holes. This research also uses the portable diesel engine propelling the electric generator without modification. The method of test which is done toward the diesel engine with direct injection and load variation using diesel fuel of 100 % and then tested by using dual fuel (CNG–Diesel fuel). The test result with gas injection unit shows that the average of smoke emission which is experienced by diesel engine that is used dual fuel is better which is 41 % compared to diesel fuel of 100%, but whenever HC emission is higher than 14 times and emission of average NOX is high and as big as 1.8 times compared to the diesel engine of diesel fuel 100%.

Key words: Diesel engine, Gas injection, Dual fuel, Flue gas emission

PENDAHULUAN

Mesin Diesel merupakan salah satu jenis dari motor bakar dalam. Pada mesin Diesel penyalaan bahan bakar diinjeksikan ke dalam silinder yang berisi udara dengan kondisi temperatur, dan tekanan tinggi. Oleh sebab itu mesin Diesel disebut juga dengan mesin dengan penyalaan kompresi. Mesin dengan penyalaan kompresi ini menghasilkan emisi gas buang yang cukup tinggi, berbahaya bagi kesehatan, dan lingkungan sekitar. Kadar yang tinggi dari Nitrogen Oksida (NOx), Karbon Monoksida (CO), Karbon Dioksida (CO₂), dan partikel emisi lain yang berhubungan dengan bahan bakar Diesel merupakan isu yang telah lama muncul. Akan tetapi sampai saat ini penggunaan mesin Diesel tetap menjadi idola dalam dunia transportasi maupun dunia industri. Hal ini dikarenakan karakteristik dari mesin Diesel yang memiliki ratio kompresi tinggi sehingga mampu menghasilkan daya yang besar.

Natural gas merupakan bahan bakar yang potensial untuk menggantikan bahan bakar konvensional transportasi dengan tujuan menghasilkan mesin Diesel dengan emisi yang rendah dan lebih ramah lingkungan. Jenis dari *natural gas* yang dimanfaatkan untuk bahan bakar adalah *Compressed Natural Gas* (CNG) yang merupakan gas alam yang dimanfaatkan yang berada dalam fase gas. Penggunaan CNG sebagai bahan bakar pada mesin Diesel, baik itu sebagai bahan bakar tambahan maupun bahan bakar utama. Untuk mengoptimalkan pembakaran dan power yang dihasilkan, komposisi pencampuran antara CNG, dan bahan bakar solar perlu diperhatikan. Mesin yang digunakan untuk dianalisa merupakan *dual fuel diesel engine* dengan CNG sebagai bahan bakar utama. Mesin diesel berbahan bakar ganda (*dual fuel = DF*) adalah mesin Diesel yang menggunakan unit sistem injeksi bahan bakar gas, dan *mixer* sebagai pencampur sehingga dapat beroperasi sebagai mesin Diesel berbahan bakar solar, dan pencampurnya.

¹ Kontak Person : Saut Siagian
Jurusan Teknik Mesin, FT UPNV Jakarta
Telp. 021 7656971

Tujuan penelitian ini adalah mengkaji efek penggunaan bahan bakar gas, dan unit injeksinya terhadap emisi gas buang pada mesin Diesel berbahan bakar ganda (CNG-Solar). Dengan bantuan analisa pemasukan Udara-CNG yang disimulasikan dengan kajian numerik paket program CFD (*Computational Fluid Dynamics Fluent-Gambit*) diperoleh dimensi unit injeksi dari hasil peneliti yang pertama.

Pengujian ini dilakukan pada data yang diperoleh dari penggunaan unit injeksi gas hasil simulasi yang didapat dari pengujian yang terdahulu. Karena pembakaran tergantung pada pencampuran bahan bakar di dalam ruang bakar, maka pencampuran bahan bakar sebelum masuk ke dalam ruang bakar layak dipertimbangkan. Penelitian dilakukan pada mesin diesel *portable* penggerak generator listrik dengan karakteristik mesin orisinil (tanpa modifikasi) dan menggunakan bahan bakar ganda (CNG-Solar).

Mesin Diesel Dual Fuel

Mesin Diesel *Dual Fuel* merupakan salah satu jenis mesin pembakaran dalam (*internal combustion*) yang dapat beroperasi dengan mengkombinasikan bahan bakar Diesel cair dengan bahan bakar gas (CNG). Penggunaan CNG sebagai bahan bakar pada mesin Diesel ada dua metode yaitu mesin Diesel dengan menggunakan 100% CNG sebagai bahan bakar (*Single fuel diesel engine*) atau lebih dikenal dengan istilah gas Diesel dan mesin Diesel dengan menggunakan kombinasi antara CNG dengan *Diesel fuel* sebagai bahan bakar (*Dual Fuel Diesel engine*).

Prinsip kerja dari *dual fuel Diesel engine* adalah dengan memasukkan CNG bersamaan dengan udara bersih pada saat langkah isap, dan intake valve terbuka. Pada saat posisi piston mendekati TMA (Titik mati atas) Diesel fuel diinjeksikan ke ruang bakar sehingga terjadi proses pembakaran. Dalam proses ini, *Diesel fuel* hanya digunakan sebagai penyala dari campuran CNG, dan udara bersih yang terkompresi. Hal ini dikarenakan CNG, membutuhkan temperatur yang tinggi untuk mencapai titik di mana CNG dapat terbakar dengan sendirinya (*auto ignition temperature*). Bahan bakar Diesel konvensional memiliki *auto ignition temperature* yang lebih rendah dari pada CNG, sehingga proses pembakaran pada *dual fuel Diesel engine* terjadi karena bahan bakar Diesel meledak lebih dahulu yang sekaligus berfungsi sebagai penyala untuk campuran bahan CNG, dan udara bersih.

Kualitas pembakaran tergantung pada mutu pencampuran bahan bakar. Untuk mendapatkan campuran udara-CNG yang baik pada sambungan saluran isap, maka gas (CNG) disalurkan melalui unit injeksi, dan *mixer*. Proses pencampuran, dan pembakaran di dalam ruang bakar berlangsung selama masa penginjeksian solar, di mana pada saat awal penginjeksian solar ke dalam ruang bakar yang telah terisi campuran udara-CNG telah berada dalam batas kondisi siap terbakar.

Compressed Natural Gas (CNG)

Compressed Natural Gas (CNG) adalah gas alam yang dikompresi pada tangki bertekanan tinggi yaitu 18–20 MPa. Komposisi utama dari hidrokarbon penyusun CNG adalah Metana (CH_4), sedangkan hidrokarbon lain yang terkandung dalam CNG adalah Etana (C_2H_6), Propana (C_3H_8) dan Butana (C_4H_{10}). Berdasarkan data dari *Alternatif Fuel Data Centre 2004* didapatkan bahwa terdapat beberapa gas penyusun CNG yaitu Karbon Dioksida (CO_2), Hidrogen Sulfida (H_2S), Nitrogen (N_2), Helium (He), dan uap air. CNG merupakan bahan bakar yang bersih dengan alasan hasil pembakarannya menghasilkan emisi yang rendah untuk Karbon Dioksida (CO_2), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO_x), dan Hidrokarbon yang tidak terbakar pada emisi motor bakar. Komposisi CNG sebagian besar terdiri dari gas Metana sekitar 93%, dan selebihnya adalah gas Etana, Propana, Butana, Nitrogen, dan Karbondioksida. CNG lebih ringan dari udara dengan berat jenis 0,606 kg/m^3 , dan mempunyai nilai oktan 120–130. Mengingat CNG adalah fase gas mudah menguap, sehingga mudah bercampur dengan udara. Dengan tingginya angka oktan dari CNG, maka pada ratio kompresi yang lebih tinggi sangat jarang terjadi *knocking* (Lim Pey Li, 2006). Dengan sifat mudah bercampur, maka proses pembakaran lebih baik dibandingkan dengan bahan bakar minyak. CNG memiliki karakter dengan temperatur penyalaan yang tinggi (*high auto-ignition temperature*) sehingga dalam aplikasinya pada mesin Diesel tetap memerlukan keberadaan

solar sebagai pemantik pembakaran. Bila pengaturan campurannya baik, maka hasil pembakarannya tidak menimbulkan asap hitam, sehingga dengan menggunakan CNG pada mesin Diesel berbahan bakar ganda dapat menekan tingkat konsentrasi *soot* pada gas buang.

Injeksi Gas.

Unit injeksi Gas atau CNG berfungsi sebagai pencampur Udara-CNG yang diperlengkapi dengan sejumlah *nosel*, dan dipasang pada saluran masuk *intake manifold* sebelum mixer. Konstruksi injeksi CNG sesuai dengan modeling dari hasil simulasi CFD-*Fluent* yang telah disimulasikan sebelumnya. Unit injeksi gas yang digunakan adalah Model geometri-D dengan jumlah *nosel* 10 lubang yang masing-masing berdiameter 0.3 mm, dan jarak antar lubang adalah 6 mm. Penempatan sistem injeksi tersebut berjarak 200 cm dari posisi unit mixer sebelum masuk ke ruang bakar.

Mixer

Mixer merupakan suatu konstruksi bentuk venturi sederhana di mana bila udara melewatinya akan terjadi kevakuman pada kerongkongan venturi *mixer* sehingga pasokan CNG dapat masuk ke dalam ruang bakar sesuai kebutuhan. *Mixer* ditempatkan sebelum *intake manifold* dan berfungsi untuk mencampur antara udara dan bahan bakar gas sebelum masuk ke dalam ruang bakar.

Emisi Gas Buang

Emisi gas buang yang melampaui nilai ambang batas yang berasal dari motor bakar Diesel maupun bensin dapat mengganggu kesehatan manusia serta mencemari lingkungan. Hasil pembakaran suatu bahan bakar hidrokarbon terdiri atas CO, Hidrokarbon atau HC, NOx (NO, dan NO₂) serta Partikulat. Kandungan emisi gas buang tergantung pada kondisi disain dan operasi, namun secara umum terdiri atas

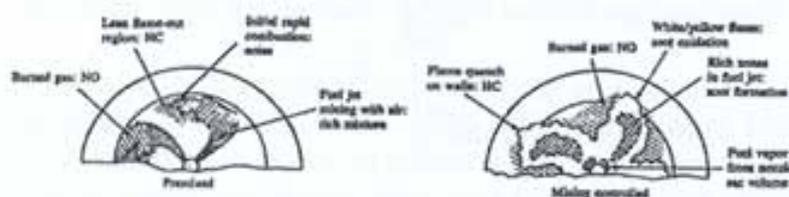
- NOx : 500–1000 ppm atau 20 g/kg - bahan bakar
- CO : 1–2 % atau 200 g/kg - bahan bakar.
- HC : 3000 ppm atau 25 g/kg - bahan bakar.

Polutan yang terdapat di udara berasal dari partikulat berupa: asap, debu, partikel padat yang sangat halus dan bila masuk melalui saluran pernafasan manusia dapat menimbulkan gangguan kesehatan. *Smoke-meter* digunakan untuk mengukur *soot* atau *black smoke* yang ke luar melalui gas buang. Gas buang dihisap melalui probe untuk diukur kadar *smoke*-nya.

Pembentukan Emisi Pada Mesin Diesel.

Oleh karena penginjeksian bahan bakar solar ke dalam ruang bakar berlangsung sebelum, dan selama proses pembakaran, maka distribusi bahan bakar solar tidak seragam. Sehingga bahan bakar solar yang diinjeksikan dan nyala api pembakaran mempengaruhi pembentukan NO. Emisi NO terbentuk pada daerah dengan temperatur tinggi dan yang terbesar terjadi pada daerah mendekati stoichiometri.

Hidrokarbon (HC) dan *soot* (asap) yang tidak terbakar terjadi pada saat pembakaran fasa *premixed* dan fasa *mixing controlled*. Sedangkan *soot* terbentuk pada daerah *spray* yang kaya di mana intinya masih mengandung bahan bakar yang belum terbakar. Bahan bakar yang telah berupa uap selanjutnya dipanasi oleh gas panas sekitarnya, dan akhirnya terbakar yang ditandai dengan nyala api pembakaran yang berwarna kuning.



Gambar 1. Mekanisme Pembentukan Polutan selama fasa *Premixed* dan *Mixing Controlled Combustion* pada Mesin Diesel Injeksi Langsung

Sumber: *Internal Combustion Engine Fundamentals, John. B. Heywood*

Beberapa faktor yang menyebabkan timbulnya emisi HC adalah yang pertama karena adanya daerah dengan campuran Udara-Bahan Bakar terlalu miskin (*overleaning*). Pada daerah batas *spray* terdapat campuran Udara-Bahan Bakar terlalu miskin yang jauh di bawah batas *combustible*, sehingga kecepatan pembakarannya tidak sempurna karena berlangsung dengan sangat lambat. Penyebab lain adalah lambatnya pencampuran Udara-Bahan Bakar (*undermixing*), oleh karena pada saat tertentu kecepatan injeksi bahan bakar yang rendah menyebabkan tersisanya bahan bakar solar pada ujung alat injeksi solar (*sac volume*). Sehingga sisa bahan bakar pada ujung injektor tersebut walaupun akhirnya dapat masuk ke dalam ruang bakar saat akhir proses pembakaran, dan selama proses ekspansi namun tidak ikut terbakar dan menjadi penyumbang terbentuknya emisi HC di dalam gas buang. Penyebab terakhir adalah karena pengaruh *wall quenching* yaitu peristiwa matinya nyala api pembakaran saat mendekati dinding silinder ruang bakar yang bertemperatur lebih rendah.

METODE PENELITIAN

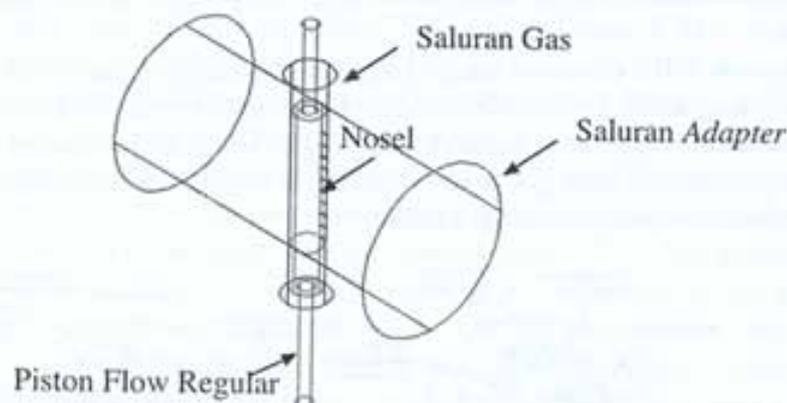
Pengujian dilakukan pada mesin Diesel injeksi langsung penggerak generator listrik di Balai Termodinamika Motor dan Propulsi (BTMP) PUSPITEK-BPPT Serpong Banten. Spesifikasi Mesin Diesel Genset

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Uji.

Merek	Yanmar
Type	TS 190 R DI (Direct Injection)
Jumlah silinder	4
Diameter x Langkah silinder	110 x 106 (mm)
Volume silinder	1.007 (cm ³)
Output kW hp (cont)	11,8 kW / 16 hp
Output kW / hp (rated)	14 kW / 19 hp
Putaran (rated)	2.200 (rpm)
Sistem pendingin	Radiator
Berat	182 (kg)

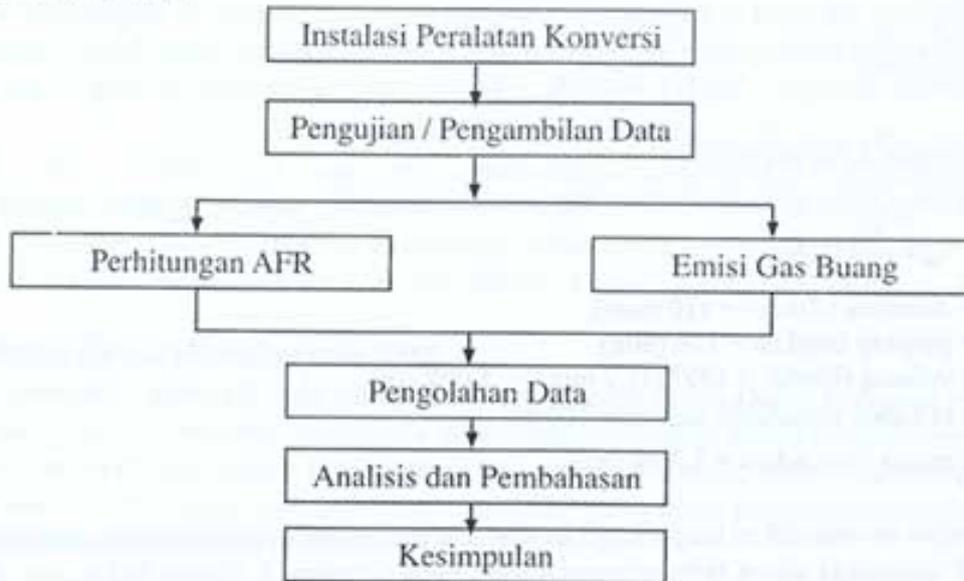
Dalam penelitian ini digunakan alat ukur antara lain; (1) Buret yaitu alat untuk mengukur konsumsi bahan bakar solar dengan kapasitas 30 ml, (2) Alat untuk mengukur emisi gas buang dalam % (CO, CO₂, HC, O₂, NOX) dengan spesifikasi SPX EGA-2000, (3) Alat untuk mengukur kadar smoke dalam % (smoke level), dan (4) Alat ukur berat yaitu timbangan konsumsi gas CNG dengan deviasi ketelitian 0,05 kg.

Unit Injeksi Geometri D hasil simulasi :



Gambar 2. Geometri Sistem Injeksi dan Adapter

Diagram Alir Pengujian

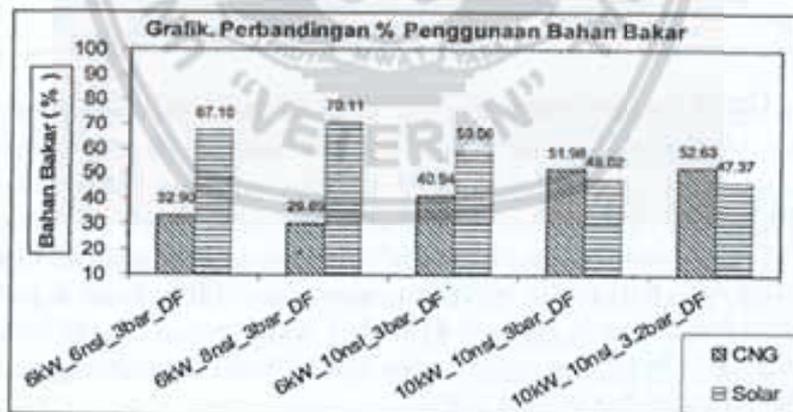


Gambar 3. Diagram Alir Pengujian

Prosedur Pelaksanaan Pengujian sebagai berikut: (1) Pengujian mesin Diesel injeksi langsung dengan variasi beban yang menggunakan bahan bakar solar 100 %. (2) Pengujian mesin Diesel injeksi langsung dengan variasi beban dan bukaan nosel yang menggunakan bahan bakar ganda (CNG-Solar). (3) Setiap pengujian dilakukan pada putaran konstan sekitar 2000 rpm. (4) Pengambilan data konsumsi solar dilakukan dengan menggunakan alat ukur buret. (5) Gas dengan alat timbangan, data konsumsi berat dan dicatat pada awal dan akhir penggunaan setiap 1 jam. (6) Bersamaan dengan itu dilakukan pengambilan data emisi dan smoke. (7) Setelah pengambilan data selesai, putaran mesin diturunkan ke posisi idle / tanpa beban kemudian mesin dimatikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Persentase Penggunaan CNG.



Gambar 4. Grafik perbandingan penggunaan bahan bakar mesin berbahan bakar ganda pada berbagai kondisi operasi mesin.

Pada Gambar 4, terlihat bahwa dengan penggunaan unit injeksi gas hasil simulasi, persentase CNG tertinggi dapat dicapai pada pembebanan listrik 10 kW, dan bukaan 10 nosel serta tekanan gas 3,2 bar yaitu sebesar 52,63%. Kondisi ini sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi pada tekanan 3 bar untuk beban, dan bukaan nosel yang sama serta jauh lebih tinggi dari kondisi operasi beban 6 kW dengan bukaan nosel hingga 10 lubang.

Hal tersebut disebabkan karena massa jenis gas lebih rendah dari udara sehingga bahan bakar

gas saat masuk ke dalam mixer mendapat kekuatan untuk menghambat udara yang akan melewati mixer, selain itu merupakan sifat gas yang mudah menguap, dan selalu bergerak ke atas. Kapasitas aliran berbanding lurus dengan laju aliran massa sehingga semakin besar laju aliran massa (dengan penambahan bukaan nosel) semakin besar pula kapasitas aliran atau sebaliknya.

Perhitungan AFR Aktual.

Massa udara atau satuan waktu yang masuk ke dalam silinder mesin 4-langkah :

$$V_{\text{sil}} : V_{\text{sil}} = \frac{\pi}{4} b^2 S (\text{mm}^3)$$

b = diameter silinder = 110 (mm).

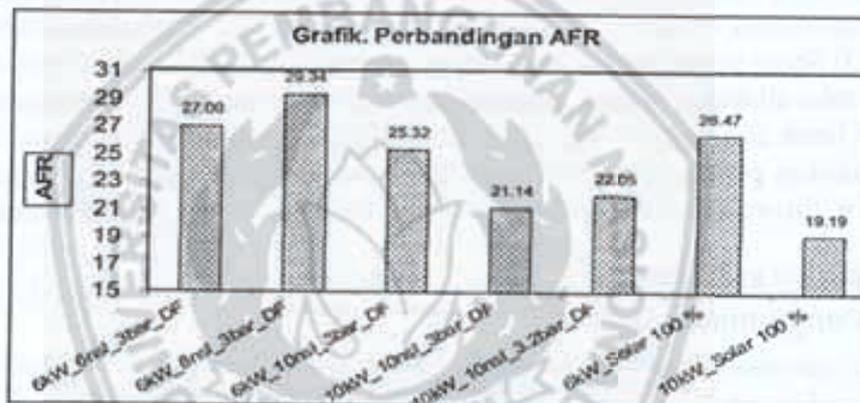
S = panjang langkah = 106 (mm)

Vs : volume silinder = 1007351,7 mm³ = 1.007 cm³

η_{vol} : efisiensi volumetris asumsi = 100 %

ρ_a : massa jenis udara = 1,2 kg / m³

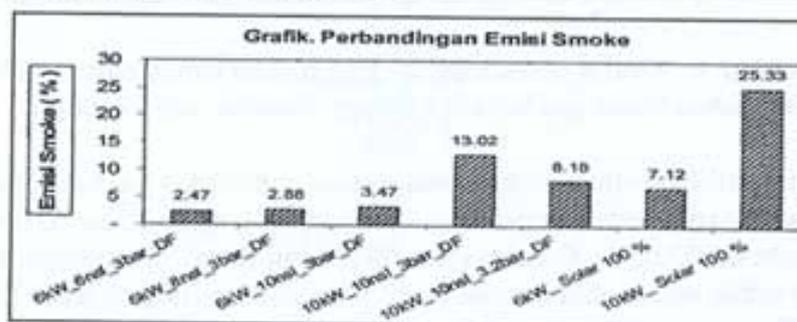
Maka dengan memasukkan harga-harga di atas dan nilai besaran putaran hasil pencatatan pengujian diperoleh konsumsi udara sebagaimana tertera pada Gambar 5. Bahan bakar gas diukur dengan alat ukur timbangan dengan periode pengukuran setiap 1 jam pada akhir pemakaian (g/jam). Bahan bakar solar diukur dengan alat ukur Buret (g/detik). AFR adalah perbandingan massa udara dan bahan bakar yang mengalir masuk ke dalam ruang bakar, ditabelkan dan digambar dalam grafik sebagaimana pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik perbandingan AFR (Air Fuel Ratio) mesin berbahan bakar ganda dan solar 100 % pada berbagai kondisi operasi mesin.

Emisi Gas Buang.

Pada Gambar 6, terlihat bahwa mesin berbahan bakar ganda (CNG-Solar) menyumbang emisi smoke rata-rata 41% dari mesin berbahan bakar solar 100%. Pada daya 6 kW emisi *smoke* dari mesin berbahan bakar ganda sebesar 41% dari emisi mesin diesel berbahan bakar solar, sedangkan pada daya 10 kW terlihat emisi *smoke* mesin berbahan bakar ganda sebesar 42% dari emisi smoke mesin berbahan bakar solar 100%.

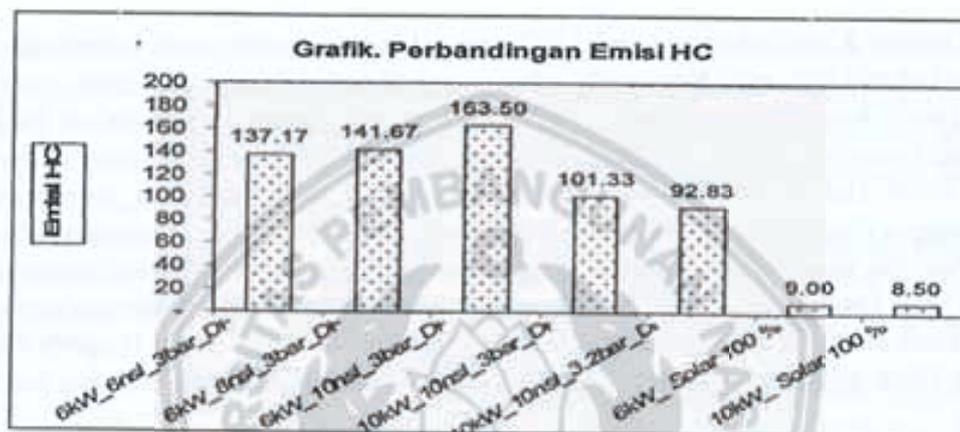


Gambar 6. Grafik perbandingan emisi gas buang Smoke pada berbagai kondisi operasi mesin.

Rendahnya emisi *smoke* dari mesin berbahan bakar ganda disebabkan karena jumlah solar yang digunakan lebih sedikit dibandingkan dengan mesin berbahan bakar solar 100%. Di samping itu karena pemasukan CNG dan udara melalui *intake manifold* telah terlebih dahulu dimasukkan ke dalam ruang bakar sebelum penginjeksian solar, sehingga sebelum *autoignition solar* terjadi, di dalam ruang bakar telah tersedia campuran CNG-udara yang dalam kondisi batas mampu bakar (*combustible limit*). Setelah terjadi *auto-ignition* maka campuran Udara-CNG di dalam ruang bakar spontan terbakar sehingga lebih memudahkan pembakaran solar yang diinjeksikan berikutnya. Karena pembakarannya lebih sempurna, maka jelas bahwa emisi *smoke* dari mesin berbahan bakar ganda lebih baik dibandingkan dengan mesin Diesel berbahan bakar solar 100%.

Perbandingan Emisi Hidrokarbon (HC)

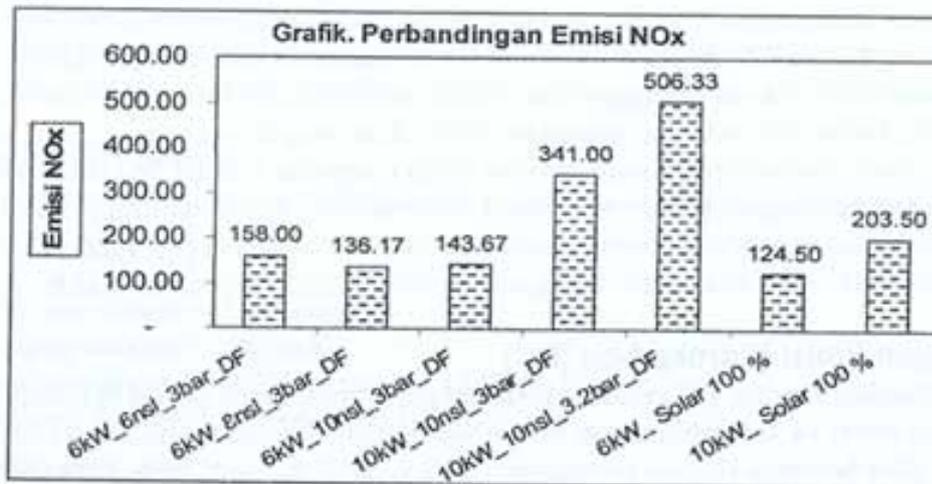
Pada Gambar 7, emisi HC rata-rata pada pengoperasian mesin Diesel berbahan bakar ganda menghasilkan emisi 14 kali lebih tinggi bila dibandingkan dengan mesin Diesel berbahan bakar solar 100%. Dari berbagai tingkat persentase CNG yang digunakan, pada pengoperasian mesin berbahan bakar ganda terlihat menghasilkan emisi HC yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin Diesel berbahan bakar solar 100%.



Gambar 7.
Grafik perbandingan emisi gas buang HC pada berbagai kondisi operasi mesin.

Tingginya kandungan emisi HC pada mesin Diesel berbahan bakar ganda disebabkan karena dominasi pembakaran yang terjadi pada fasa premixed sehingga tekanan di dalam silinder yang tinggi menyebabkan sebagian campuran Udara-CNG masuk, dan terjebak di dalam crevice volume. Semakin tinggi tekanan di dalam ruang bakar semakin banyak pula campuran yang dapat masuk dan terjebak di dalam crevice volume. Hal ini juga terjadi pada saat penambahan debit CNG dalam campuran bahan bakar mengakibatkan semakin banyak gas yang dapat masuk dan terjebak di dalam crevice volume. Di samping itu gas pembakaran mengalami wall quenching, karena perbedaan temperatur antara gas pembakaran yang menuju atau mendekati dinding silinder menyebabkan api pembakaran mati. Hal tersebut menjadi penyebab meningkatnya kandungan emisi HC pada gas buang. Dengan kondisi tersebut menyebabkan adanya campuran yang tidak terbakar yang akhirnya menjadi emisi HC pada gas buang.

Perbandingan Emisi NOx.



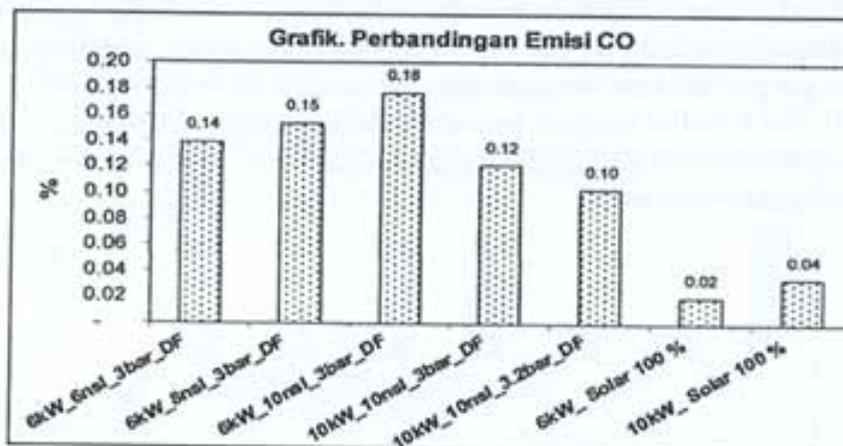
Gambar 8. Grafik perbandingan emisi gas buang NOx pada berbagai kondisi operasi mesin.

Pada Gambar 8. terlihat bahwa emisi NOx yang dihasilkan oleh mesin berbahan bakar ganda di mana pada beban 6 kW emisi Nox sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan emisi yang dihasilkan oleh mesin Diesel berbahan bakar solar 100%. Namun pada beban 10 kW terjadi lonjakan yang signifikan yaitu rata-rata sebesar 2,6 kali lebih tinggi dibandingkan dengan mesin Diesel berbahan bakar solar 100%. Hal ini diakibatkan oleh karena gas Nitrogen merupakan gas yang sulit untuk bereaksi, Nitrogen dapat bereaksi dengan Oksigen pada temperatur pembakaran yang cukup tinggi. Proses pembakaran yang terjadi pada mesin berbahan bakar ganda didominasi pada fasa premix combustion. Oleh karena pada mesin berbahan bakar ganda, CNG bersama-sama dengan sejumlah udara telah lebih dahulu dimasukkan ke dalam ruang bakar, sehingga akhir langkah kompresi di dalam ruang bakar telah tersedia campuran Udara-CNG yang siap untuk terbakar sebelum solar diinjeksikan.

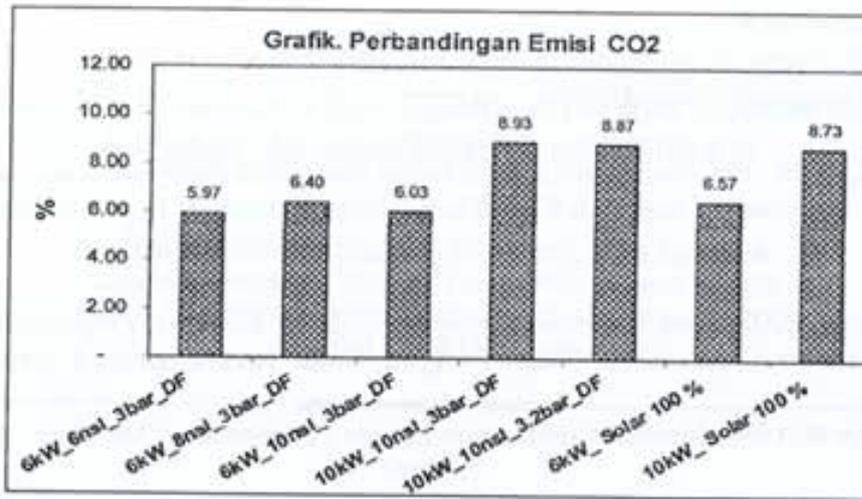
Setelah autoignition terjadi pada saat penginjeksian solar, maka campuran Udara-CNG secara spontan terbakar, hal ini mengakibatkan lonjakan temperatur dan tekanan yang tiba-tiba di dalam ruang bakar yang berakibat peningkatan kandungan emisi NOx.

Perbandingan Emisi CO dan CO2.

Secara umum kandungan emisi CO maupun CO2 dari mesin Diesel berbahan bakar ganda dan mesin Diesel berbahan bakar solar 100%, terlihat pada Gambar 9 dan Gambar 10 untuk setiap pembebanan baik pada mesin berbahan bakar ganda maupun mesin berbahan bakar solar 100% di mana emisi CO lebih tinggi pada mesin Diesel berbahan bakar ganda, walaupun masih di bawah ambang batas yang dianjurkan, sedangkan emisi CO2 terlihat relatif sama untuk setiap pembebanan.



Gambar 9. Grafik perbandingan emisi gas buang CO pada berbagai kondisi operasi mesin.



Gambar 10. Grafik perbandingan emisi gas buang CO₂ pada berbagai kondisi operasi mesin

SIMPULAN

CNG dapat digunakan sebagai bahan bakar substitusi solar pada mesin orisinil Diesel, dan dengan menggunakan unit injeksi hasil simulasi dengan jumlah lubang nosel 10 buah dan berdiameter 0,3 mm juga dapat dioperasikan dengan baik di mana persentase penggunaan gas hingga 52,63% pada kondisi operasi 10kW-10nsl 3,2 bar.

Emisi *smoke* rata-rata yang ditimbulkan oleh mesin berbahan bakar ganda sebesar 41% dari emisi yang ditimbulkan oleh mesin berbahan bakar solar 100%, namun emisi HC lebih tinggi 14 kali. Sedangkan emisi NO_x rata-rata naik sebesar 1,8 kali dibandingkan dengan mesin berbahan bakar solar 100%.

Selama pengoperasian mesin berbahan bakar ganda dapat beroperasi dengan baik, tidak berbeda dengan saat pengoperasian mesin dengan menggunakan solar 100%.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2006, *Energi Alternatif ditengah surutnya pasokan minyak*, <<http://www.republika.co.id>>, diakses tanggal 24 Juni 2006.
- Hariyotejo. P., 2006, *Laporan Teknis Sub Kegiatan Dipa 2006 Pengembangan Teknologi Otomotif Ramah Lingkungan*, Simulasi CFD-Fluent-Gambit, Internal Report BTMP-BPPT, Agustus 2006.
- Hari, Sumartono, 2003, *Studi Pengaruh Waktu Injeksi Solar Terhadap Performa Mesin Diesel Berbahan Bakar Ganda CNG-Solar*, Program Studi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- Heywood John B, 1988, *Internal Combustion Engine Fundamental*, Mc Graw Hill, Singapore 1988.
- Lin, Zhiqiang and Wanhua Su, 2003, *A study on the amount of pilot injection and its effects on rich and lean boundaries of the premixed CNG/air mixture for a CNG/diesel dual-fuel engine*, International Journal of Global Energy Issues, Vol. 20, Number 3/2003, Pages 290-301
- Pei Li, LIM, 2006, *The Effect of Compression Ratio on the CNG-Diesel Engine*, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying Oktober 2004. <<http://www.usq.edu.au/>>, diakses September 2006.
- Rangkuti, Chalilullah, 1995, *Perbandingan Udara Bahan-bakar dari Analisa Gas-buang pada Suatu Motor-bakar*, ISSN :0853.5175, Edisi No. 002- Desember 1995
- Tjokrowisastro.E H, Widodo. B U K, *Teknik Pembakaran Dasar dan Bahan Bakar* Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri – ITS Surabaya.
- T Ishiyama, H Kawanabe, K Ohashi, M Shioji, S Nakai, 2005. *A study on premixed charge compression ignition combustion of natural gas with direct injection*, International Journal of Engine Research ISSN: 1468-0874 DOI: 10.1243/146808705X30459 Volume 6, Number 5 / 2005 Pages: 443 – 451
- Yusaf T.F., Abd. Halim S., Yusoff A. & Ahmad Faris I., 1999. *A study of dual fuel system using compressed natural gas for commercial diesel engine*, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 2. (ms 163-167)