

# Performansi Mesin Diesel Silinder Tunggal dengan Injeksi Cogenerasi *Superheated Steam*

G.E Kusuma, Emie Santoso, Mardi Santoso, Pranowo Sidi  
Jurusan Teknik Permesinan Kapal  
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya  
Surabaya, Indonesia, 60111  
e-mail : kusuma.george@ppns.ac.id

**Abstract**— Krisis energi dapat diperlambat terjadinya dengan penemuan bahan bakar baru atau dengan meningkatkan efisien energi pada engine konvensional yang sekarang digunakan. Mesin diesel adalah salah satu mesin konvensional yang menjadi pilihan utama untuk alat transportasi laut maupun darat. Engine dengan kelebihan dimensi yang *compact* dan daya yang dihasilkan besar menjadi opsi utama pada pemilihan engine penggerak. Mesin diesel silinder tunggal menjadi pilihan utama bagi mesin kapal nelayan dan mesin pertanian. Jumlah pengguna mesin diesel silinder tunggal yang sangat besar akan memberikan kontribusi yang cukup besar untuk konsumsi bahan bakar. Usaha untuk meningkatkan efisiensi mesin dilakukan dengan memanfaatkan energi yang sudah terbuang pada gas buang dengan sistem cogenerasi menjadi salah satu alternatif terobosan yang dilakukan. Cogenerasi akan mampu menurunkan temperatur gas buang sehingga mencegah pemanasan udara secara global akibat emisi gas. Injeksi uap air ke ruang bakar dengan memanfaatkan panas gas buang bertemperatur rata-rata 624 °C sebagai sumber pemanas *steam generator* menjadi alternatif karena mampu menaikkan performansi mesin sekaligus menaikkan efisiensi konsumsi bahan bakar. Prototipe mesin diesel silinder tunggal dengan injeksi *steam superheated* dengan temperatur 130 °C memanfaatkan cogenerasi gas buang telah mampu bekerja dengan performansi baik pada injeksi uap sebesar 1.5 - 4.5 liter/jam dan mampu menurunkan *SFC (Specific Fuel Consumption)* engine rata-rata 8.92% dibanding mesin diesel tanpa injeksi uap. Kenaikan performansi engine didominasi oleh kenaikan nilai entalpi udara dalam ruang bakar sehingga membantu proses pembakaran lebih cepat.

**Keywords**— *Cogenerasi; injeksi uap; diesel; efisiensi energi; SFC*

## I. PENDAHULUAN

Mesin diesel silinder tunggal banyak digunakan pada kapal-kapal nelayan kecil dan mesin-mesin pertanian karena tingkat perawatan dan operasionalnya yang mudah. Kemudahan operasionalnya dan juga perawatan menjadi pertimbangan utama pada proses pemilihan tipe diesel silinder tunggal dibandingkan oleh pertimbangan emisi gas buang dan performansi efisiensinya. Pada masyarakat nelayan dan petani ekonomi rendah pertimbangan dan kesadaran akan tingkat efek negatif emisi gas buang pada lingkungan sangat kurang. Dengan jumlah nelayan dan petani di Indonesia yang sangat banyak yang menggunakan mesin diesel akan memberikan efek kumulatif yang sangat besar pada kuantitas emisi gas buang yang dihasilkan pada pengoperasiannya. Kajian yang penting juga diperlukan pada mesin diesel silinder tunggal mengingat pada efek kumulatif dan jangka panjang penggunaannya. Mesin diesel memiliki karakteristik pembakarannya pada temperatur

yang tinggi menghasilkan daya lebih besar namun diikuti efek samping emisi gas buang yang lebih banyak dibanding engine tipe lainnya. Banyak efek negatif pada lingkungan hidup akibat dari emisi gas buang yang dilepaskan oleh engine diesel yang digunakan di laut maupun di darat. Oleh sebab efek kerusakan ini maka tingkat emisi gas buang pada mesin diesel diatur oleh secara nasional maupun internasional dan terus akan dibatasi oleh regulasi. Salah satu emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran pada temperatur tinggi mesin diesel adalah NOx. Ada berbagai macam variasi metode di dalam dan luar silinder untuk menurunkan emisi NOx. Salah satu metode reduksi NOx adalah injeksi air ke dalam silinder ruang bakar. Air yang diinjeksikan ke dalam ruang bakar dalam bentuk emulsi bahan bakar minyak dengan air secara langsung atau diinjeksikan langsung ke *intake manifold (fumigation)* pada diesel engine. Berdasarkan kajian literatur yang ada penurunan temperatur maksimum pembakaran oleh injeksi air akan diikuti dengan penurunan emisi gas NOx [1] [2]. Samec dkk. menekankan bahwa emisi NOx dan jelaga akan berkurang masing-masing sebesar 20% dan 50% pada saat menggunakan 10% dan 15% emulsi air - bahan bakar. Pada sisi lain, hal tersebut tidak menyebabkan efek penurunan efisiensi pembakaran dengan ditandai kenaikan SFC [1]. Abu-Zaid dkk mengevaluasi performansi mesin diesel pada torsi, tenaga, efisiensi efektif, suhu SFC dan exhaust chamber saat rasio air/bahan bakar terjadi peningkatan [3]. Lin dan Wang menunjukkan bahwa temperatur pembuangan, O<sub>2</sub>, NOx dan gas buang turun, emisi CO<sub>2</sub> dan CO meningkat saat bahan bakar beroksigen tiga fasa (air / bahan bakar / air atau bahan bakar / air / bahan bakar) diinjeksikan ke mesin diesel dan bahan bakar emulsi tiga fasa memiliki temperatur gas exhaust chamber yang lebih tinggi dan emisi CO dan NOx yang lebih rendah bila dibandingkan dengan dua fasa (air / bahan bakar) [4].

Dalam metode fumigasi, air dalam fasa cair disuntikkan ke air intake manifold. Tauzia dkk. menyatakan bahwa 60 - 65% air disuntikkan ke dalam intake manifold mesin diesel dengan sistem injeksi tipe common rail, emisi NOx bisa turun hingga hingga 50% dan terjadi kehilangan panas pada dinding silinder, dimana efek ini akan menyebabkan pengurangan efisiensi [5]. Donahue dan Ishida et al. menginvestigasi injeksi air ke mesin diesel akan menghasilkan bahwa NOx, emisi jelaga pada gas buang dan pengurangan SFC pada saat mesin diesel diberi beban rendah namun sebaliknya emisi jelaga dan SFC akan naik dan emisi NOx menurun pada saat mesin diberi beban tinggi [5].

Mengacu pada tinjauan –tinjauan pustaka yang ada, penginjeksian air ke dalam ruang bakar secara langsung, seperti metode emulsi atau sistem fumigasi ke intake manifold akan mampu mengurangi emisi NOx [1] [4] [5] [6]. Namun parameter gas buang untuk HC dan CO dan SFC akan meningkat [3]. Selain itu air terutama dalam metode fumigasi akan merusak spesifikasi minyak pelumas dan menyebabkan meningkatkan keausan bagian mesin yang bergerak [7]. Salah satu metode yang bisa digunakan untuk menurunkan emisi NOx adalah injeksi air ke intake manifold yang sebelumnya dalam fasa liquid diubah menjadi fasa uap. Parlak et al menjelaskan bahwa emisi NOx akan berkurang hingga 33%, Daya dan torsi efektif meningkat hingga 3% dan nilai SFC mampu turun mencapai 5% sebagai hasil uji beban penuh dengan sistem injeksi uap yang dikontrol secara elektronik dengan rasio uap optimum ditentukan 20% [8]. Pada penelitian ini sistem modifikasi engine diesel silinder tunggal difokuskan dengan injeksi steam dengan fasa uap mencapai fasa superheated steam untuk mendapat hasil yang seimbang dari sisi keuntungan penurunan emisi gas buang namun tetap menjaga dan meningkatkan performansi daya dan efisiensi bahan bakar SFC.

## II. MATERIAL DAN METODE

### A. Metode Eksperimen

Metode eksperimen dilaksanakan pada mesin diesel silinder tunggal, dimana sistem injeksi udaranya adalah natural, 4(empat) langkah/stroke dan sistem pendingin engine menggunakan air. Type engine ini dipilih dikarenakan desain konstruksinya cukup sederhana untuk mengalami proses modifikasi dan tipe mesin ini banyak dan umum digunakan untuk engine penggerak mesin kapal nelayan kecil maupun mesin pertanian.

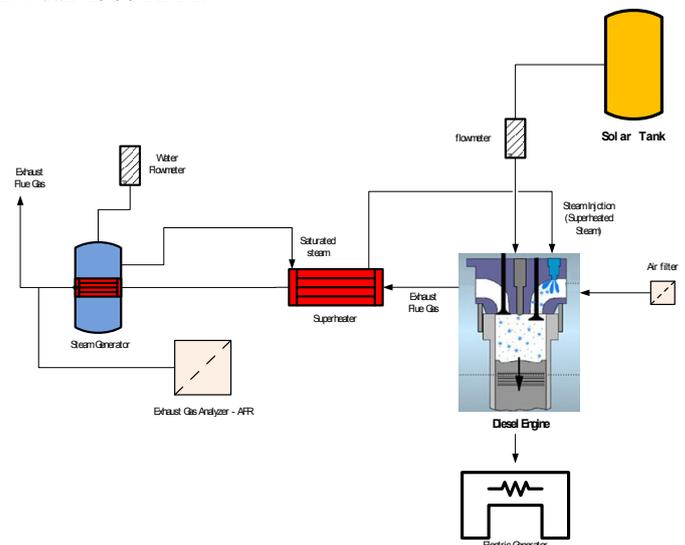
Tabel 1. Spesifikasi Engine Diesel -DongFeng

No	Model R180	
	Spesifikasi	
1	Cooling System	Hopper
2	Displacement	402
3	Diameter	80x80 mm
4	Starting system	Engkol
5	Dimension :	658x341x463 mm
7	Silinder	1 (single)
8	Sistem Pembakaran	Indirect
9	Max. Torque	8/ 2600
10	Continue Torque	7/ 2200
11	Compression Ratio	21 : 1
12	Sistem Governor	Mekanik

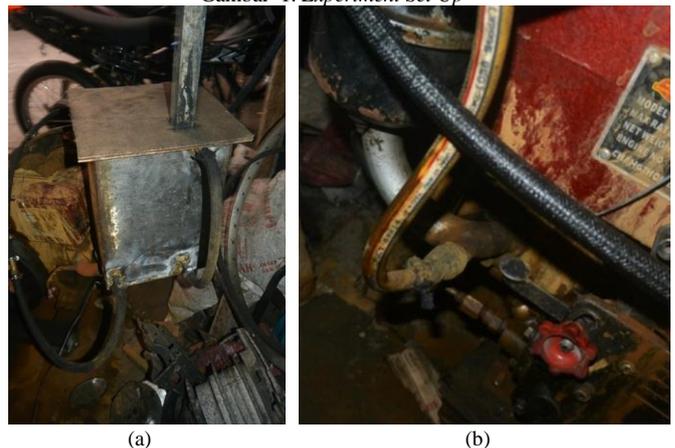
Untuk membangkitkan steam dengan fasa superheated sistem ini memanfaatkan panas gas buang engine dengan menggunakan unit steam generator yang dipasang sesudah gas buang mengalir dari exhaust chamber. Alat pengukur temperatur dan tekanan terpasang pada steam untuk memastikan kualitas steam berada pada fasa superheated. Unit steam generator ini disebut cogenerator yang berfungsi memanfaatkan kembali energi yang sudah terbuang pada exhaust chamber. Steam generator difabrikasi sendiri dengan menggunakan desain perpindahan panas dengan material stainless steel seperti ditunjukkan pada gambar 2 (a). Jumlah massa air yang dikonversi menjadi steam diatur dengan flowmeter tipe gate valve. Sistem

injeksi steam yang masuk ke air manifold difabrikasi seperti gambar 2(b).

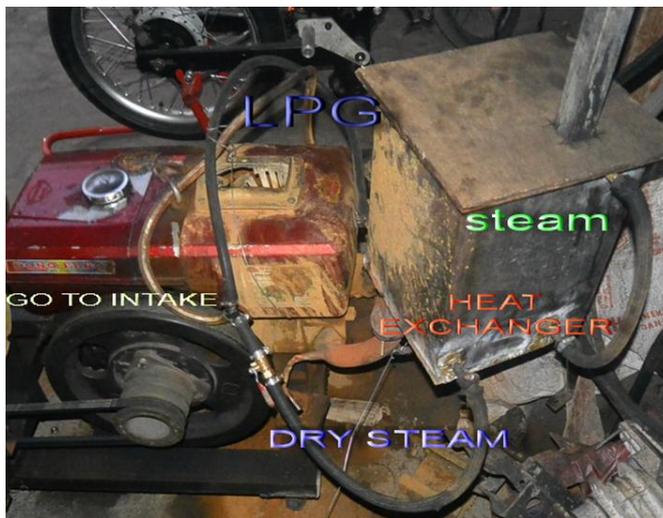
Untuk memantau gas buang yang keluar dari steam generator digunakan *Air Fuel Ratio* (AFR) untuk memberikan informasi kualitas pembakaran yang terjadi pada ruang bakar. Mesin diesel silinder tunggal pada eksperimen dioperasikan pada variasi beban listrik pada generator listrik bervariasi 0.3 kWh, 0.45 kWh, 0.6 kWh dan 0.75 kWh agar mendapatkan gambaran unjuk kerja mesin pada beban rendah sampai tinggi pada putaran engine yang dijaga stabil pada 2500 RPM. Untuk mengkonversi energi mekanik yang dihasilkan oleh engine diesel dicoupling dengan electric generator menggunakan V-belt. Spesifikasi electric generator memiliki daya name plate 7.5 KW dan 1500 RPM.



Gambar 1. Experiment Set Up



Gambar 2 .(a) Steam Generator (b) Injeksi Steam Pada Air Manifold



Gambar 3. Sistem Mesin Diesel Dengan Cogenerasi Steam

Sebagai data standard pembandingan mesin diesel silinder tunggal ini dioperasikan tanpa modifikasi pada sistem bahan bakar untuk bisa mendapatkan unjuk kerja mesin asli dari fabrikasi. Data tersebut digunakan sebagai data standard acuan terhadap unjuk kerja engine yang mengalami proses modifikasi pada sistem bahan bakarnya dengan injeksi steam memanfaatkan cogenerasi panas gas buang.

Modifikasi injeksi steam menggunakan steam pada fasa superheated dengan dipantau menggunakan parameter pressure yang menunjukkan tekanan 1 atm dan temperatur 130 C. Steam memasuki ruang bakar bercampur dengan udara pembakaran pada air intake manifold. Massa steam yang diinjeksikan pada eksperimen ini diukur dengan mengacu pada pada flowmeter yang terpasang. Variasi flowrate air sebesar 1.5 liter/jam, 2.5 liter/jam, 3.5 liter/jam sampai 4.5 liter/jam digunakan sebagai parameter massa steam yang diinjeksikan ke ruang bakar.

Eksperimen diulang pada setiap variasi beban engine dan injeksi steam untuk mendapatkan deskripsi performansi secara keseluruhan dari beban rendah sampai tinggi dengan kualitas AFR gas hasil pembakarannya dibandingkan dengan kondisi operasi mesin diesel tersebut pada saat dioperasikan pada saat kondisi standard tanpa modifikasi.

### III. HASIL DAN DISKUSI

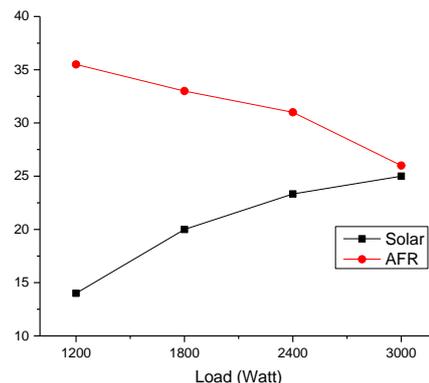
Performansi engine diesel dianalisa dengan parameter SFC yang menunjukkan Air-Fuel Ratio (AFR) dan temperatur gas buang. Nilai SFC menunjukkan rasio perbandingan total konsumsi bahan bakar terhadap daya listrik yang mampu dibangkitkan oleh alternator yang di *coupling* dengan engine untuk mengetahui rasio dan efisiensi sistem engine. Nilai SFC bisa diaplikasikan unit pembangkit daya untuk memprediksi nilai kalor bahan bakar yang digunakan untuk pembakaran. Pengukuran SFC dilakukan pada beban yang tetap selama satu jam sehingga didapatkan data operasional engine pada kondisi stabil. Sehingga pengukuran jumlah bahan bakar dan AFR yang mampu mewakili kondisi operasi stabil engine.

AFR menunjukkan perbandingan antara jumlah massa udara terhadap massa bahan bakar yang terjadi pada proses pembakaran pada khususnya type internal combustion engine.

Nilai AFR akan menunjukkan campuran bahan bakar dengan udara dan jumlah bahan bakar yang mampu dilepaskan oleh proses dan juga berapa banyak massa pollutant yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran. Dengan jumlah massa udara yang pembakaran yang cukup akan memberikan proses pembakaran yang sempurna yang dikenal sebagai pembakaran stoichiometric. Rasio yang rendah daripada nilai stoichiometric akan memberikan campuran yang "rich" kaya dengan bahan bakar. Campuran udara yang kaya bahan bakar akan menghasilkan proses pembakaran yang efisiensi rendah namun akan mampu memproduksi daya lebih besar dan temperatur pembakaran yang rendah. Campuran rasio yang rendah "lean" daripada stoichiometric akan menghasilkan pembakaran yang lebih efisien namun dengan akan bisa menyebabkan kerusakan pada engine dan menghasilkan emisi gas buang NOx pada gas buang. Untuk mendapatkan kalkulasi AFR yang presisi maka jumlah udara pembakaran harus benar menjadi fokus perhatian karena density udara yang bervariasi dipengaruhi oleh lokasi ketinggian, temperatur udara masuk air intake manifold dan kemungkinan efek uap air dan penambahan kadar oksigen pada udara.

#### A. Performansi mesin diesel standard

Pengujian pengoperasi mesin diesel tanpa modifikasi pada sistem bahan bakarnya dengan tetap hanya menggunakan bahan bakar tunggal yaitu solar dengan pemberian beban bervariasi menggunakan instrumen pada alternator. Parameter-parameter operasi engine akan menunjukkan performansinya pada mode standard. Pada kondisi pemberian beban pada alternator akan menyebabkan kenaikan konsumsi bahan bakar pada mesin sehingga mesin bekerja tidak hanya mengandalkan besar moment inertia pada *flywheel* untuk mampu mencapai putaran mesin stabil namun memerlukan konsumsi bahan bakar lebih banyak untuk bisa mencapai RPM mesin yang stabil pada angka 2500 RPM dan yang direduksi oleh transmisi menjadi 1500 RPM pada alternator.

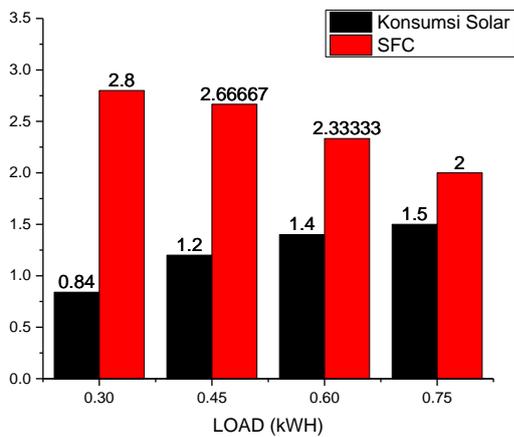


Gambar 4. Grafik AFR Gas Buang Dan Konsumsi Bahan Bakar Solar (CC/Minit) Pada Variasi Beban

Penurunan parameter AFR mesin menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar akan naik untuk mencapai RPM mesin konstan untuk menghasilkan daya yang sesuai yg dibebankan alternator. Korelasi diatas ditunjukkan gambar 4 menjelaskan gambaran hubungan linear antara konsumsi bahan bakar dalam

CC/menit terhadap daya mesin yang dihasilkan beserta karakteristik pembakaran solar di setiap RPM mesin dan beban stabil mesin akan menyebabkan AFR hasil pembakaran gas buang akan mendekati AFR pembakaran stokiometri solar sebesar 14-15 dengan penambahannya.

Performansi SFC mesin diesel standard bekerja pada nilai 2.45 pada beban dinaikan dari mulai beban 0.3 kWH sampai 0.75 kWH. Terjadi kecenderungan perbaikan performansi SFC pada saat beban terus dinaikan. Hal ini menunjukkan efisiensi pembakaran makin baik dan ditunjukkan nilai AFR pada gas buang mendekati AFR stokiometrinya. Proses reaksi pembakaran yang baik akan menghasilkan performansi SFC yang makin meningkat sehingga mampu menurunkan konsumsi bahan bakar solar per menit operasinya.

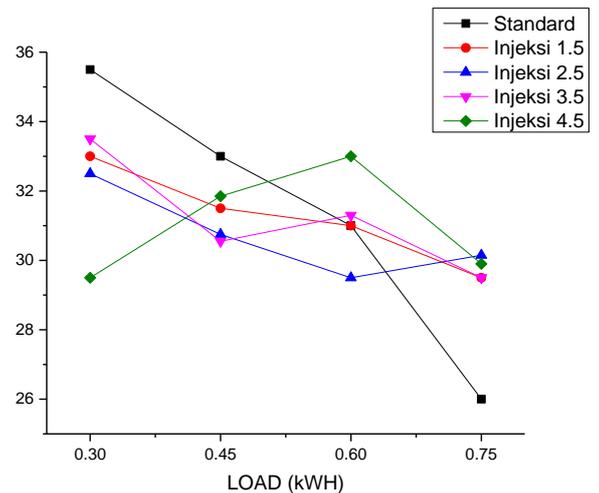


Gambar 5. Grafik Performansi SFC Dan Konsumsui Bahan Bakarnya Dalam

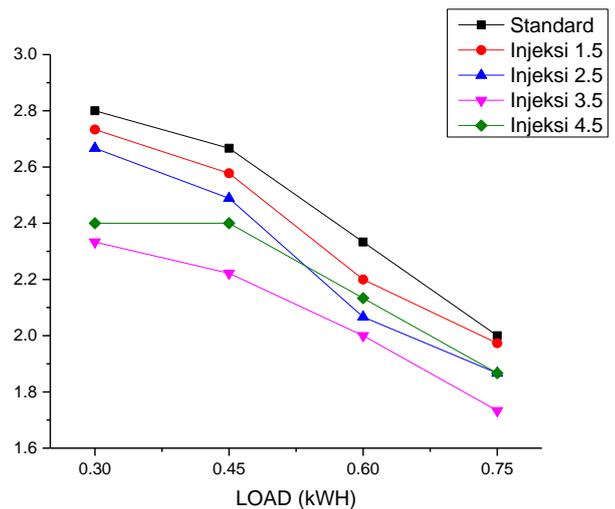
**B. Performansi mesin diesel dengan modifikasi penambahan injeksi Steam dari sistem cogenerasi gas buang**

Mode pengoperasian ini mesin diesel dengan modifikasi sistem bahan bakar tetap menggunakan solar dengan penambahan sistem injeksi steam *air manifold*. Steam diproduksi oleh steam generator memanfaatkan panas gas buang sehingga mesin mampu menurunkan temperatur gas buang dan juga meregenerasi panas dari gas buang untuk mengkonversi air menjadi uap panas lanjut (*superheated*). Proses injeksi steam dilakukan pada air manifold dan steam masuk ke ruang bakar akibat proses langkah hisap. Pengontrolan besar massa steam yang diinjeksikan ke proses pembakaran diatur dengan valve/katup dengan melakukan kontrol volume rate air yang masuk ke dalam steam generator. Penelitian melakukan variasi *flowrate* steam *superheated* yang diinjeksikan sebesar 1.5, 2.5, 3.5 sampai 4.5 liter/jam untuk memberikan korelasi kenaikan performansi sampai nilai maksimal injeksi steam akan menurunkan performansi dari engine. Kualitas hasil pembakaran yang terjadi di ruangan bakar mamapu dianalisa dan ditunjukkan oleh parameter nilai AFR gas buangnya pada setiap variasi pembebanannya dan besar massa injeksi steamnya. Gambar 6 menunjukkan karakteristik AFR pembakaran engine pada beban yang konstan dengan injeksi steam menunjukkan penurunan nilai AFR dibandingkan dengan AFR engine

standard tanpa injeksi steam. Penurunan ini terjadi akibat terjadinya proses okupansi ruang bakar dari udara segar oleh steam. Proses okupansi tersebut menyebabkan prosentase udara dalam ruang bakar akan berkurang. Proses pengurangan udara pembakaran ini tidak mengurangi kualitas pembakaran solar pada ruang bakar terlihat pada daya engine dihasilkan yang sama dan engine membutuhkan konsumsi bahan bakar solar yang lebih rendah. Hasil yang signifikan ini dapat menjadi acuan bahwa sistem cogenerasi gas buang untuk steam generator mampu bekerja dengan baik untuk meningkatkan daya engine dan menurunkan konsumsi bahan bakar minyak solar. Proses injeksi *superheated* steam menambah nilai enthalpy dari udara yang memasuki ruang bakar mesin sehingga udara di ruang bakar memiliki energi lebih banyak dibandingkan kondisi standard. Peningkatan kalor akibat injeksi steam meningkatkan suhu udara yang masuk ke dalam ruang bakar.



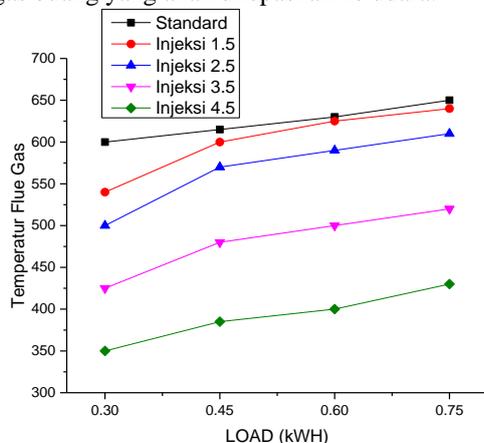
Gambar 6. Grafik Perbandingan Nilai AFR Gas Buang



Gambar 7. Grafik Perbandingan Performansi *Specific Fuel Consumption* (SFC)

Peningkatan energi dan suhu pada udara ruang bakar ini dapat mempercepat persiapan pembakaran solar pada langkah kompresi. Suhu udara dan kalor yang tinggi di ruang bakar

meningkat proses pembakaran solar. Efek dari kondisi tersebut tekanan hasil pembakaran meningkat dan menghasilkan torsi mesin lebih besar pada RPM yang sama dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah. Performansi engine dianalisa dengan parameter SFC dan temperatur gas buang ditunjukkan pada gambar 7 dan gambar 8. Variasi flowrate injeksi diberikan untuk mengetahui efek dari injeksi steam terhadap performansi engine pada nilai SFC, AFR dan temperatur gas buang yang mencerminkan proses pembakaran yang terjadi dalam silinder engine. Pada pembebanan engine pada daya rendah 0.3-0.45 kWh injeksi steam superheated sebesar 1.5 -3.5 liter/jam akan mampu menurunkan SFC dari engine namun dengan penambahan steam makin sampai flowrate 4.5 liter/jam akan menaikkan kembali SFC. Kenaikan SFC diakibatkan proses pembakaran semakin sulit terjadi dikarenakan efek okupansi steam di ruang bakar akan mengurangi massa udara yang masuk ke ruang bakar. Massa udara untuk proses pembakaran berkurang dratis ditunjukkan oleh angka AFR yang rendah pada saat injeksi steam mencapai 4.5 liter/jam. Sehingga proses pembakaran membutuhkan konsumsi bahan bakar solar yang lebih banyak untuk bisa menghasilkan daya yang sama dibandingkan pada kondisi operasi dengan injeksi steam dibawah 4.5 liter/jam dan operasi standard tanpa injeksi steam. Nilai AFR yang kondisinya *rich* akan menunjukkan konsumsi bahan bakar yang lebih tinggi untuk menghasilkan persatuan daya yang dihasilkan. Kondisi ini akan menyebabkan kenaikan dari SFC proses pembakaran dan penurunan efisiensi pembakaran. Pada kondisi mesin standard tanpa injeksi steam kondisi engine dengan bahan bakar yang rendah namun dengan jumlah udara yang tinggi akan mengakibatkan temperatur pembakaran yang tinggi. Kondisi ini tidak terjadi pada engine dengan sistem injeksi steam dibanding engine standard tanpa injeksi karena massa steam kondisi superheated akan mampu menurunkan suhu temperatur pembakaran namun tidak sekaligus menurunkan daya karena diimbangi dengan kenaikan nilai enthalpy udara pada ruang bakar memberikan kontribusi energi pada proses pembakaran ditunjukkan oleh gambar 8 tentang grafik perbandingan temperatur gas buang. Berdasarkan literature dan penelitian-penelitian sebelumnya pembakaran pada mesin diesel dengan temperatur pembakaran lebih rendah akan mampu menurunkan emisi gas buang yang akan dilepaskan ke udara.



Gambar 8 .Grafik Perbandingan Temperatur Gas Buang

Penelitian ini menghasilkan prototype steam generator yang mampu memanfaatkan panas gas buang untuk menjadi fluida pemanas bagi steam generator sehingga mampu mengubah fasa air menjadi steam superheated pada tekanan 1 atm pada temperatur 130 C dengan parameter volume specific  $h = 2736 \text{ kJ/kg}$ ,  $V_s = 1.841 \text{ m}^3/\text{kg}$ , Entrophy (s) =  $7.517 \text{ kJ/kg.C}$ . Pada kondisi saturated steam memiliki parameter antara lain  $h = 2736 \text{ kJ/kg}$ ,  $V_s = 1.674 \text{ m}^3/\text{kg}$ , Entrophy (s) =  $7.354 \text{ kJ/kg.C}$ . Proses konversi energi steam yang terjadi didalam silinder adalah penurunan fasa dari superheated steam menjadi saturated steam untuk menghindari kerusakan material exhaust chamber akibat fasa liquid steam. Perubahan fasa tersebut akan melepaskan energi sebesar  $\Delta h = 60.48 \text{ kJ/kg}$  sehingga pada performansi engine terbaik dengan injeksi 3.5 liter/jam steam akan memberikan penambahan energi 211,7 kWh ke dalam udara pembakaran dalam silinder.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian pengujian performansi mesin diesel silinder tunggal dengan injeksi superheated steam 130 °C dengan memanfaatkan konversi energi terbuang pada *flue gas* bertemperatur rata-rata 624 °C dengan sistem cogenerasi terbukti menjadi salah satu alternatif terobosan penghematan energi. Sistem cogenerasi mampu menurunkan temperatur ruang bakar sehingga mampu menurunkan emisi gas sekaligus memanfaatkan kembali energi gas buang (cogenerasi). Prototipe engine diesel silinder tunggal dengan injeksi steam superheated dengan memanfaatkan cogenerasi gas buang telah mampu bekerja dengan performansi baik terbukti dengan penurunan SFC dibanding engine standard sebagai berikut:

1. Pada pembebanan daya rendah pada engine sebesar 0.3 kWh dengan injeksi steam dengan flowrate 1.5 – 3.5 liter/jam akan meningkatkan performansi sehingga SFC nya 2.38 – 16.67% dibandingkan dengan engine diesel standard. Kenaikan injeksi steam diatas 3.5 liter/jam pada injeksi steam 4.5 liter/jam akan menurunkan performansi engine diesel mencapai 14.47% akibat efek okupansi udara oleh steam di dalam ruang bakar.
2. Pada pembebanan daya engine sebesar 0.45 kWh dengan injeksi steam dengan flowrate 1.5 – 3.5 liter/jam akan memiliki perbaikan performansi sehingga SFC nya 3.33 – 16.67% dibandingkan dengan engine diesel standard. Kenaikan injeksi steam diatas 3.5 liter/jam pada injeksi steam 4.5 liter/jam akan menurunkan performansi engine diesel menjadi 10%.
3. Pada pembebanan daya engine sebesar 0.6 kWh dengan injeksi steam dengan flowrate 1.5 – 3.5 liter/jam akan memiliki perbaikan performansi sehingga SFC nya 5.71 – 14.29 % dibandingkan dengan engine diesel standard. Kenaikan injeksi steam diatas 3.5 liter/jam pada injeksi steam 4.5 liter/jam akan menurunkan performansi engine diesel menjadi 8.57 %.
4. Pada pembebanan daya engine sebesar 0.75 kWh dengan injeksi steam dengan flowrate 1.5 – 3.5 liter/jam akan memiliki perbaikan performansi sehingga SFC nya 1.33 – 13.33 % dibandingkan dengan engine diesel standard. Kenaikan injeksi steam diatas 3.5 liter/jam pada injeksi

steam 4.5 liter/jam akan menurunkan performansi engine diesel menjadi 6.67 % hal ini disebabkan oleh pada beban yang besar akan membutuhkan energi yang besar sehingga konsumsi bahan bakar solar dengan LHV yang tinggi akan dibutuhkan lebih banyak. Proses ini dapat dilihat dari nilai AFR gas buang yang cenderung turun pada beban mesin yang tinggi sebagai cerminan dibutuhkan massa udara yang lebih besar dibutuhkan pada ruang bakar.

Secara keseluruhan penelitian terjadi perbaikan performansi engine diesel dengan ditandai turunnya SFC dari setiap variasi pembebanan rata-rata mencapai 8.92%. Maksimum performansi terbaik mesin diesel silinder tunggal dengan injeksi superheated steam adalah pada putaran engine 2500 RPM, dengan load 0.3-0.45 kWh dengan injeksi steam cogenerasi sebesar 3.5 liter/jam yang mampu mereduksi SFC sebesar 16.57% dari kondisi operasi mesin diesel standard.

#### REFERENCES

- [1] K. B. R. D. N. Samec, "Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine," *Fuel*, vol. 81, pp. 2035-2044, 2002.
- [2] C. R. P. D. A. R. F. W. F. Bedford, "Effects of direct water injection on DI diesel engine combustion," *SAE J. Automotive. Eng*, vol. 01, p. 2938, 2000.
- [3] M. Abu-Zaid, "Performance of single cylinder, direct injection diesel engine using water fuel emulsion," *Energy Conversion Management*, vol. 45, pp. 697-705, 2004.
- [4] K. W. C.Y. Lin, "Diesel engine performance and emission characteristics using three-phase emulsions as fuel," *Fuel*, vol. 83, pp. 537-545, 2004.
- [5] A. M. S. S. X. Tauzia, "Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine," *Energy*, vol. 35, pp. 3628-3639, 2010.
- [6] E. A. g. V. A. G. Kökkülünk, "Prediction of emissions and exhaust temperature for direct injection (DI) diesel engine with emulsified fuel," *J. Electr. Eng. Co. in press*.
- [7] H. S. O. B. M. A.-R. G.H. Abd-Alla, "Effects of diluent admissions and intake air temperature in exhaust gas recirculation on the emissions of an indirect injection dual fuel engine," *Energy Conversion Management*, vol. 42, pp. 1033-1045, 2001.
- [8] V. A. Y. Ü. B. S. a. C. B. B. G. K. A. Parlak, "New method to reduce NOx emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system," *J. Energy Inst.*, vol. 85, pp. 135-139., 2012.
- [9] H. U. D. S. M. Ishida, "Prediction of NOx reduction rater due to port water injection in a DI diesel engine," *SAE J. Automot. Eng*, pp. 972-961, 1997.