

# STUDI KOMPARASI EKSPERIMENTAL EMISI GAS BUANG LSCS PISTON CHAMBER DAN FLAT PISTON CHAMBER FOUR STROKE SMALL MARINE DIESEL ENGINE PADA BEBAN KONSTAN 1000 WATT

Heroe Poernomo<sup>1</sup>, Edi Haryono<sup>2</sup>

Jurusan Teknik Pernesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya  
Kampus ITS, Keputih Sukolilo Surabaya 60111

Email: heroe\_p@gmail.com

## Abstrak

Performa pembakaran dan karakteristik emisi gas buang dari motor *diesel* dipengaruhi oleh pembentukan campuran bahan bakar/udara. Oleh karena itu, campuran bahan bakar/udara yang homogen dalam ruang bakar dan peningkatan daerah campuran bahan bakar/udara secara signifikan dapat meningkatkan pemanfaatan udara dan membatasi pembentukan jelaga dalam motor *diesel*. Saat ini, rasio udara berlebih dari motor *diesel* pada umumnya adalah sekitar 1,8-2,2 dan rasio udara berlebih dari motor *diesel* yang digunakan untuk alat berat seperti marine *diesel engine* adalah sekitar 1,6-1,8. Dengan demikian, perlu untuk mengusulkan sistem pembakaran baru untuk mengurangi beban pada sistem turbocharger dan sistem intake/exhaust dan menunjukkan kinerja yang sangat baik di bawah rasio udara berlebih yang rendah. Dalam penelitian ini, penulis mengusulkan sistem motor *diesel* pembakaran baru, yang memiliki nilai ekonomi yang sangat tinggi dan kinerja emisi gas buang pada rasio udara lebih dari 1/3. Beban dari sistem turbocharger dan sistem intake/exhaust berkurang. Densitas daya dan Efisiensi termal ditingkatkan, dan konsumsi bahan bakar berkurang secara cukup signifikan. Selain itu, sistem pembakaran baru ini menunjukkan kinerja emisi yang sangat baik di bawah kondisi udara tipis/berkurang. Sistem pembakaran baru ini kita kenal dengan nama *Lateral swirl combustion system* (LSCS). Dan pada penelitian ini kita membandingkan emisi gas buang yang dihasilkan dari dua buah bentuk *Piston Chamber* yaitu LSCS *Piston Chamber* dan *Flat Piston Chamber*. Untuk mengetahui kelayakan penggunaan LSCS *Piston Chamber*, maka dilakukanlah pengujian kandungan gas buang pada sebuah motor *diesel*. Gas buang yang dihasilkan motor *diesel* diukur dengan menggunakan alat GreenLine 4000 Gas Analyser. Gas yang diukur terdiri atas CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, dan HC. Hasil pengukuran tersebut nantinya akan dibandingkan dengan hasil pengukuran yang didapatkan pada penggunaan *Flat Piston Chamber*. Dari analisa dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke LSCS *Piston* pada beban 1000 Watt pada variasi putaran *engine* mengalami penurunan konsentrasi emisi gas buang rata-rata CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC dan (NO<sub>x</sub>+HC) sebesar 1,46 %, 1,56 %, 0,13 %, 0,31 %, 0,51 % dan 0,38 %. Hasil pengukuran emisi gas buang CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, dan HC pada beban konstan 1000 Watt dan variasi putaran *engine* dapat diperoleh kesimpulan bahwa LSCS *Piston Chamber* yang mempunyai konsentrasi emisi gas buang paling rendah dibandingkan dengan *Flat Piston Chamber*.

**Kata kunci** - Motor *diesel*, emisi gas buang, LSCS *Piston Chamber*, *Flat Piston Chamber*.

## Abstract

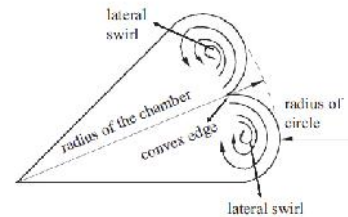
Combustion performance and the characteristics of exhaust emissions from diesel motors are influenced by the formation of fuel / air mixtures. Therefore, a mixture of homogeneous fuel / air in the combustion chamber and an increase in the fuel / air mixture region can significantly improve air utilization and limit the formation of soot in diesel motors. Currently, the ratio of excess air from diesel motors is generally about 1.8-2.2 and the ratio of excess air from diesel motors used for heavy equipment such as marine diesel engines is about 1.6 to 1.8. Thus, it is necessary to propose a new combustion system to reduce the load on the turbocharger system and the intake / exhaust system and show excellent performance under low excess air ratio. In this study, the authors propose a new combustion diesel motor system, which has a very high economic value and exhaust emissions performance at an air ratio of more than 1/3. The load from the turbocharger system and the intake / exhaust system is reduced. The power density and thermal efficiency are improved, and fuel consumption is significantly reduced. In addition, this new combustion system shows excellent emission performance under thin / reduced air conditions. This new combustion system we are familiar with the name of Lateral Swirl Combustion System (LSCS). And in this study we compare the exhaust emissions resulting from two forms of Piston Chamber namely LSCS Piston Chamber and Flat Piston Chamber. To determine the feasibility of using LSCS Piston Chamber, then tested the exhaust gas content on a diesel motor. The exhaust gas produced by the diesel motor is measured using the GreenLine 4000 Gas Analyzer tool. The measured gas consists of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, and HC. The results of these measurements will be compared with the measurement results obtained on the use of Flat Piston Chamber. From the analysis it can be concluded that at the turn of Flat Piston to LSCS Piston at 1000 Watt load on the engine rotation variation decrease the average exhaust emission concentration of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC and (NO<sub>x</sub> + HC) equal to 1.46% , 1.56%, 0.13%, 0.31%, 0.51% and 0.38% respectively. The results of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO and HC emissions measurements at a constant load of 1000 Watt and engine rotation variation can be concluded that LSCS Piston Chamber has the lowest exhaust gas emission concentration compared to Flat Piston Chamber.

**Keywords** - Diesel motor, exhaust emissions, LSCS Piston Chamber, Flat Piston Chamber.

## 1. PENDAHULUAN

Motor *diesel* yang mempunyai sistem pembakarannya *direct injection*(DI) yang banyak digunakan dalam bidang transportasi baik transportasi darat maupun laut dan juga banyak digunakan di permesinan industri mempunyai efisiensi termal yang sangat baik dan mempunyai nilai ekonomi yang sangat tinggi[4]. Namun karena pembakaran bahan bakarnya bersifat difusi, maka kebutuhan udara di motor *diesel* lebih tinggi dibandingkan motor bensin. Rasio udara berlebih antar motor *diesel* adalah sekitar 2,0 dan 1,0 kali motor bensin. Lebih banyak udara yang harus disediakan oleh sistem turbocharger dan sistem *intake/exhaust* untuk meningkatkan campuran bahan bakar/udara untuk motor *diesel*. Namun pada sistem *turbocharger* dibatasi oleh inefisiensinya dan sistem *intake/exhaust* dibatasi oleh resistensi dan inefisiensi volumetriknya. Oleh karena itu, ketika menggunakan sistem tersebut, sulit untuk meningkatkan densitas power motor *diesel*, khususnya di bawah kondisi udara tipis. Jika rasio udara berlebih terlalu tinggi, tekanan maksimum di silinder juga relatif tinggi, yang memiliki pengaruh negatif pada keandalan motor *diesel*. Sebaliknya apabila rasio udara berlebih rendah, emisi jelaga dan beban termal meningkat. Performa pembakaran dan karakteristik emisi gas buang dari motor *diesel* dipengaruhi oleh pembentukan campuran bahan bakar/udara. Oleh karena itu, campuran bahan bakar/udara yang homogen dalam ruang bakar dan peningkatan daerah campuran bahan bakar/udara secara signifikan dapat meningkatkan pemanfaatan udara dan membatasi pembentukan jelaga dalam motor *diesel*. Saat ini, rasio udara berlebih dari motor *diesel* pada umumnya adalah sekitar 1,8-2,2 dan rasio udara berlebih dari motor *diesel* yang digunakan untuk alat alat berat seperti marine *diesel engine* adalah sekitar 1,6-1,8. Dengan demikian, perlu untuk mengusulkan sistem pembakaran baru untuk mengurangi beban pada sistem *turbocharger* dan sistem *intake/exhaust* dan menunjukkan kinerja yang

sangat baik di bawah rasio udara berlebih yang rendah. Dalam penelitian ini, penulis mengusulkan sistem motor *diesel* pembakaran baru, yang memiliki nilai ekonomi yang sangat tinggi dan kinerja emisi gas buang pada rasio udara lebih dari 1/3. Beban dari sistem turbocharger dan sistem *intake/exhaust* berkurang. Densitas daya dan Efisiensi termal ditingkatkan, dan konsumsi bahan bakar berkurang secara cukup signifikan. Selain itu, sistem pembakaran baru ini menunjukkan kinerja emisi yang sangat baik di bawah kondisi udara tipis/berkurang. Ruang bakar *Lateral swirl combustion system* (LSCS) ditunjukkan pada Gambar 1 berikut. Di mana dapat diamati bahwa ketika semprotan memukul tepi cembung, dua *vortisitas swirl lateral* yang dibentuk pada kedua sisi tepi cembung, mempercepat pembentukan campuran bahan bakar/udara dan meningkatkan pemanfaatan udara dalam ruang.



**Gambar 1.** *Lateral swirl combustion system (LSCS).*

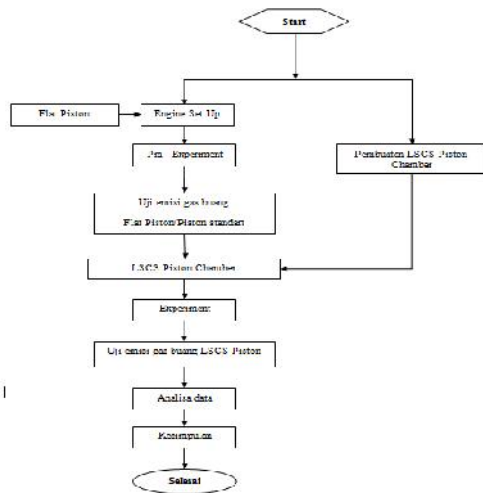
Sistem pembakaran baru ini kita kenal dengan nama *Lateral swirl combustion system* (LSCS). Dan pada penelitian ini kita membandingkan emisi gas buang yang dihasilkan dari dua buah bentuk *Piston Chamber* yaitu LSCS *Piston Chamber* dan *Flat Piston Chamber*. Untuk mengetahui kelayakan penggunaan LSCS *Piston Chamber*, maka dilakukanlah pengujian kandungan gas buang pada sebuah motor *diesel*. Gas buang yang dihasilkan motor *diesel* diukur dengan menggunakan alat *GreenLine 4000 Gas Analyser*. Gas yang diukur terdiri atas CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, dan HC. Hasil pengukuran tersebut nantinya akan dibandingkan dengan hasil pengukuran yang didapatkan pada penggunaan *Flat Piston Chamber*. Dari hasil

pengukuran dua buah bentuk *Piston Chamber* ini menjadi studi acuan penelitian emisi gas buang dari sistem pembakaran baru yang bernama *Lateral swirl combustion system(LSCS)*.

**2. METODE**

**2.1 Flowchart penelitian**

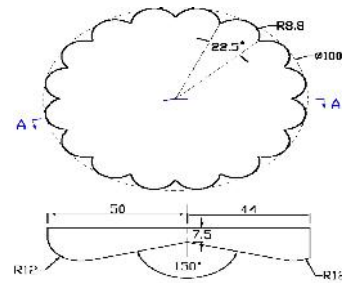
Metode Penelitian merupakan langkah-langkah yang dijadikan pedoman untuk melakukan penelitian, agar dapat diperoleh hasil yang baik dan memperkecil kesalahan – kesalahan yang mungkin terjadi untuk mencapai tujuan penelitian yang direncanakan. Langkah-langkah dalam melaksanakan penelitian akan diperlihatkan secara diagram berikut ini:



Gambar 2. Flowchart Experiment

**2.2 Metodologi tahap pertama**

Pada tahap pertama yang perlu dilakukan adalah pembuatan *Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber* dari *Flat Piston* sesuai konfigurasi yang ditunjukkan pada gambar 3. Pembuatan *LSCS Piston Chamber* dilakukan di Bengkel Reparasi Mesin *Diesel* dan Laboratorium CNC Jurusan Teknik Permesinan kapal - Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.



Gambar 3. Konfigurasi LSCS Piston Chamber

**2.3 Metodologi tahap kedua**

Pada tahap kedua ini setelah bahan bakar siap dilanjutkan dengan *engine set up*, dalam mensetup *engine* perlu mengecek alat – alat yang digunakan, instrumen – instrumen dan pengkalibrasian alat ukur yang digunakan. Setelah semua siap maka baru dilanjutkan dengan pra – eksperimen. Pra – eksperimen ini perlu sekali dilakukan untuk mengetahui uji emisi gas buang dari penggunaan *Flat Piston/Standart Piston* dari motor *diesel* sebenarnya dan bersifat sebagai pembanding. *Engine* yang digunakan ini sudah lama digunakan sehingga prestasinya sudah bergeser, sehingga perlu pengujian khusus. Setelah semua diketahui maka baru eksperimen untuk menguji emisi gas buang motor *diesel* dapat dimulai. Untuk lebih jelasnya *flowchart* pengerjaan penelitian tahap kedua ini akan di *brake down* sebagai berikut:

- a) *Engine set up.*  
*Engine set up* dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja dari motor *diesel* itu sendiri. Dengan demikian, dapat dianggap bahwa unjuk kerja *engine* pada saat ini, merupakan unjuk kerja mula – mula *engine*. Untuk keperluan ini digunakan sebuah motor *diesel* 4 langkah 1 silinder. Motor *diesel* dikopel dengan alternator/generator untuk mengukur besarnya *brake power* dari *engine*.
- b) *Pra – Experiment.*  
*Pra experimen* dilakukan untuk mengetahui data uji emisi gas buang dari motor *diesel* dengan menggunakan *Piston* standart dari pabrik pembuat yaitu *Flat Piston*. Diharapkan data yang dihasilkan dari percobaan ini dapat

digunakan sebagai data pembanding dengan data yang dihasilkan pada *Experiment* dengan menggunakan *Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber*.

c) Pembuatan LSCS Piston Chamber. Pembuatan *Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber* dari Flat Piston sesuai konfigurasi yang ditunjukkan pada gambar 3. Pembuatan LSCS Piston Chamber dilakukan di Bengkel Reparasi Mesin Diesel dan Laboratorium CNC Jurusan Teknik Permesinan kapal - Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

d) *Experiment*. *Experiment* ini dilakukan untuk mengetahui data uji emisi gas buang dengan pemakaian *Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber*. Percobaan dilakukan pada variable speed(1000 rpm, 1250 rpm, 1500 rpm, 1750 rpm, 2000 rpm) pada constand load 1000 Watt

e) Uji emisi gas buang. Parameter yang akan di ukur dalam pengujian adalah konsentrasi gas buang yang terdiri dari CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Nox, CO dan HC. Alat ukur yang digunakan dalam pengujian ini adalah *GreenLine 4000 Gas Analyser*. Alat yang berfungsi mengukur konsentrasi gas buang yang dihasilkan *engine*. Alat ini menggunakan oksigen, aliran sulfur, dan saringan partikel untuk mendeteksi kandungan gas buang *engine*.



Gambar 4. GreenLine 4000 Gas Analyser

f) Analisa data. Data hasil yang ingin diketahui adalah sebagai berikut:

- Produksi/pembuatan *Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber* dari Flat Piston.
- Pengujian emisi gas buang dengan pemakaian *Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber* dan Flat Piston.

2.3 Motor Diesel



Gambar 5. Jiandong Jianghuai Diesel Engine [8]

Tabel 1. Spesifikasi Mesin

SPECIFICATION	
<b>ENGINE</b>	
Type	4 Cycle, Jiandong Jianghuai ZH 1115 N Diesel Engine, Jiangsu China Dir. GMC, USA
Horse power	24 HP/2200 Rpm
<b>DYNAMOMETER</b>	
Type	Mindong, China
Rating	Continous
Output	5 Kw/6,3 KVA
Voltage	380/660 Volt
Ampere	5,5 A
Number of Phase	3 Phase
Cycles	60 Hz
Speed	1500 rpm
Cos	0,8

**2.4. Piston Chamber**

**2.4.1 Piston**

*Piston* adalah komponen motor yang membentuk ruang bakar bersama – sama dengan silinder blok dan silinder *head*. *Piston* jugalah yang melakukan gerakan naik turun untuk melakukan siklus kerja mesin, serta *Piston* harus mampu meneruskan tenaga hasil pembakaran ke crankshaft. Jadi dapat kita lihat bahwa *Piston* memiliki fungsi yang sangat penting dalam melakukan siklus kerja motor dan menghasilkan tenaga pembakaran.

**2.4.2 Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber**

*Lateral swirl combustion system(LSCS) Piston Chamber* ditunjukkan pada Gambar 7 dibawah, di mana dapat diamati bahwa ketika semprotan memukul tepi cembung, dua vortisitas swirl lateral yang dibentuk pada kedua sisi tepi cembung, mempercepat pembentukan campuran bahan bakar/udara dan meningkatkan pemanfaatan udara dalam ruang. Campuran bahan bakar/udara dari sistem pembakaran motor *diesel* tradisional, seperti ditunjukkan pada Gambar 6, terutama terkonsentrasi di dan zona A. Udara di zona b dan tidak sepenuhnya dimanfaatkan sampai suatu intake swirl dipergunakan. Namun, hilangnya aliran meningkat dan aliran udara menurun dalam sistem ini



**Gambar 6.** Fuel/air diffusion in traditional omega diesel combustion chamber

*Piston diesel* adalah jenis *Piston* yang digunakan pada silinder motor *diesel*. Pada jenis *Piston* jenis ini dibagian kepala *Piston* terdapat coakan sebagai penampung oli sebagai pendingin saat proses pembakaran

terjadi yang berguna untuk mengurangi efek kompresi karena benturan pada kepala *Piston*. Contoh *Piston diesel* yang sering kita kenal dipasaran berbentuk datar atau yang kita kenal dengan *Flat Piston*.



a b

**Gambar 7.** a) Flat Piston dan b) LSCS Piston

Dalam penelitian ini penulis membahas tentang *Piston diesel* yang mempunyai ruang bakar(chamber) dengan sistem Lateral swirl combustion atau kita mengenalnya dengan *Lateral swirl combustion system(LSCS)* dibandingkan dengan *Flat Piston* yang sering ada di pasaran.

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1 Analisa emisi gas buang dari motor diesel**

Parameter yang di ukur dalam pengujian adalah konsentrasi gas buang yang terdiri dari CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO dan HC. Dalam pengukuran hasil dari gas analyser dalam bentuk % atau ppm. Adapun dalam penelitian atau riset biasanya dikonversi ke satuan g/kWh. Tabel konversi pada tabel 2 adalah The general conversion from emission gas concentration (ppm) to spesific fuel oil consumption (g/kWh) for heavy duty vehicles(T.J. Pilusa at al 2012).



**Tabel 2.** The general conversion (g/kWh) to ppm or %

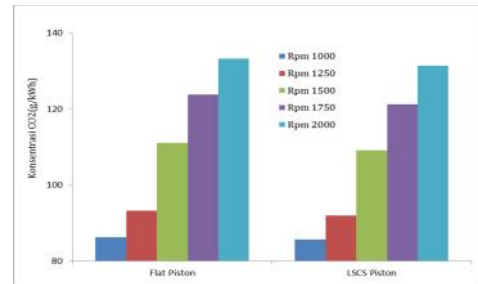
Satuan(g/kWh)	Satuan(ppm or %)
CO(g/kWh)	= $3,591.10^{-3} \times CO(ppm)$
NOx(g/kWh)	= $6,636.10^{-3} \times NOx(ppm)$
HC(g/kWh)	= $2,002.10^{-3} \times HC(ppm)$
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	= $63,470 \times CO_2(\%)$
SO <sub>2</sub> (g/kWh)	= -

**3.2 Konsentrasi emisi gas buang CO<sub>2</sub> Pada Beban 1000 Watt**

Karbon dioksida(CO<sub>2</sub>) telah menjadi topik yang menarik perhatian karena diklasifikasikan sebagai gas rumah kaca yang berdampak pada lingkungan bumi ketika mencapai konsentrasi tinggi di atmosfer. Senyawa ini terdiri dari dua molekul oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah molekul karbon. Gas ini dihasilkan melalui dekomposisi bahan organik serta melalui respirasi dan pembakaran. Emisi karbon, khususnya emisi gas CO<sub>2</sub>, merupakan Gas rumah kaca yang dapat memperbesar efek rumah kaca yang pada akhirnya akan meningkatkan suhu rata-rata permukaan bumi yang dikenal juga dengan pemanasan global. Pada standart emisi untuk international commercial marine *diesel engines* standards - MARPOL Annex VI untuk Category 1 and Category 2 bahwa kadar CO<sub>2</sub> secara implisit tidak tercantum diaturan tersebut. Adapun standart emisi MARPOL Annex VI 1999 untuk Category 1 and Category 2 untuk Commercial Marine *Diesel* lebih kecil sama dengan 37 kW dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

**Tabel 3.** Final Emission Standart and Dates – Commercial Marine *Diesel* < 37 kW

Engine Power kW<8	Tier	Model Year	NMHC + NOx (g/kW-hr)	CO (g/kW-hr)	PM (g/kW-hr)
kW<8	Tier 1	2000	10.5	8.0	1.0
	Tier 2	2005	7.5	8.0	0.80
8<kW<19	Tier 1	2000	9.5	6.6	0.80
	Tier 2	2005	7.5	6.6	0.80
19<kW<37	Tier 1	1999	9.5	5.5	0.80
	Tier 2	2004	7.5	5.5	0.60



**Gambar 8.** Grafik Konsentrasi CO<sub>2</sub> vs Variasi Piston pada beban 1000 Watt

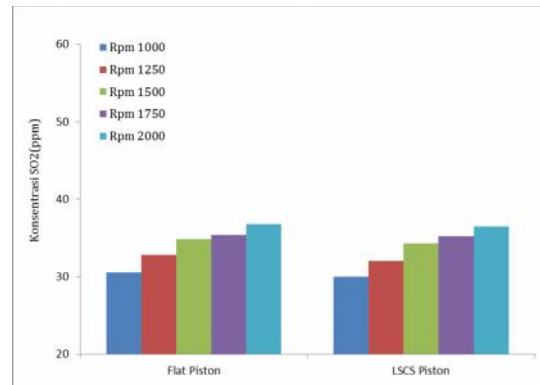
Dari grafik 8 dapat dilihat bahwa konsentrasi CO<sub>2</sub> pada masing – masing *Flat Piston* dan *LSCS Piston* untuk putaran *engine* 1000 rpm sampai 2000 rpm mengalami kenaikan. Pada putaran 1000 rpm konsentrasi CO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 86,32 g/kWh dan 85,68 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 0,74 %. Pada putaran 1250 rpm konsentrasi CO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 93,30 g/kWh dan 92,03 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1250 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 1,36 % . Pada putaran 1500 rpm konsentrasi CO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 111,07 g/kWh dan 109,17 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1500 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 1,71 % . Pada putaran 1750 rpm konsentrasi CO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 123,77 g/kWh dan 121,23 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1750 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 2,05 % . Pada putaran 2000 rpm konsentrasi CO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 133,29 g/kWh dan 131,38 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 2000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 1,43 % . Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Wattt pada putaran *engine* yang sama mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> rata – rata sebesar 1,46 % .

Dan apabila ditinjau dari standar emisi CO<sub>2</sub> teoritis, dapat dikatakan bahwa penggunaan *Flat Piston* dan *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt ini masih layak dan aman untuk digunakan karena berada jauh di bawah emisi CO<sub>2</sub> maksimal teoritis yang diizinkan yaitu 952,05 g/kWh.

### 3.3 Konsentrasi emisi gas buang SO<sub>2</sub> Pada Beban 1000 Watt

Sulfur dioksida adalah salah satu spesies dari gas-gas oksida sulfur (SO<sub>x</sub>). Gas ini sangat mudah terlarut dalam air, memiliki bau namun tidak berwarna. Sebagaimana O<sub>3</sub>, pencemar sekunder yang terbentuk dari SO<sub>2</sub>, seperti partikel sulfat, dapat berpindah dan terdeposisi jauh dari sumbernya. SO<sub>2</sub> dan gas-gas oksida sulfur lainnya terbentuk saat terjadi pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Sulfur sendiri terdapat dalam hampir semua material mentah yang belum diolah seperti minyak mentah, batu bara, dan bijih-bijih yang mengandung metal seperti alumunium, tembaga, seng, timbal dan besi. Di daerah perkotaan, yang menjadi sumber sulfur utama adalah kegiatan pemangkit tenaga listrik, terutama yang menggunakan batu bara ataupun bahan bakar *diesel* sebagai bahan bakarnya, juga gas buang dari kendaraan yang menggunakan *diesel* dan industri-industri yang menggunakan bahan bakar batu bara dan minyak mentah. Gas SO<sub>2</sub> telah lama dikenal sebagai gas yang dapat menyebabkan iritasi pada system pernafasan, seperti pada slaput lender hidung, tenggorokan dan saluran udara di paru-paru. Efek kesehatan ini menjadi lebih buruk pada penderita asma. Tingginya kadar SO<sub>2</sub> di udara merupakan salah satu penyebab terjadinya hujan asam. Hujan asam disebabkan oleh belerang(sulfur) yang merupakan pengotor dalam bahan bakar fosil serta nitrogen di udara yang bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan nitrogen oksida. Zat-zat ini berdifusi ke atmosfer dan bereaksi dengan air untuk membentuk asam sulfat dan asam nitrat yang

mudah larut sehingga jatuh bersama air hujan. Air hujan yang asam tersebut akan meningkatkan kadar keasaman tanah dan air permukaan yang terbukti berbahaya bagi kehidupan ikan dan tanaman.



**Gambar 9.** Grafik Konsentrasi SO<sub>2</sub> vs Variasi Piston pada beban 1000 Watt

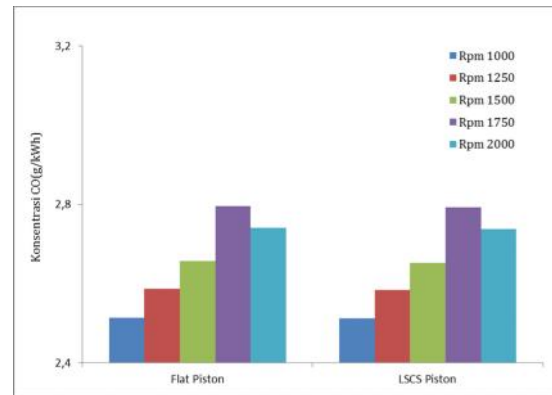
Dari grafik 9 dapat dilihat bahwa konsentrasi SO<sub>2</sub> pada masing – masing *Flat Piston* dan *LSCS Piston* untuk putaran *engine* 1000 rpm sampai 2000 rpm mengalami kenaikan. Pada putaran 1000 rpm konsentrasi SO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 30,54 ppm dan 30,00 ppm. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub> sebesar 1,77 %. Pada putaran 1250 rpm konsentrasi SO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 32,78 ppm dan 32,00 ppm. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1250 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub> sebesar 2,38 %. Pada putaran 1500 rpm konsentrasi SO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 34,80 ppm dan 34,32 ppm. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1500 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub> sebesar 1,38 %. Pada putaran 1750 rpm konsentrasi SO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 35,35 ppm dan 35,24 ppm. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1750 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi SO<sub>2</sub> sebesar 0,31 %. Pada putaran 2000 rpm konsentrasi SO<sub>2</sub> *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 36,80 ppm dan 36,45

ppm. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 2000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  sebesar 0,95 %. Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt pada putaran *engine* yang sama mengalami penurunan konsentrasi  $\text{SO}_2$  rata – rata sebesar 1,56 %. Dan apabila ditinjau dari standar emisi dapat dikatakan bahwa penggunaan *Flat Piston* dan *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt ini masih layak dan aman untuk digunakan karena masih berada dibawah standar emisi  $\text{SO}_2$  maksimal yang dibolehkan MARPOL Annex VI  $\text{SO}_x$  Limits(Regulation 14)  $\text{SO}_x$  Emission Control Areas for sulfur content yaitu 15000 ppm.

### 3.4 Konsentrasi emisi gas buang CO Pada Beban 1000 Watt

Karbon monoksida, rumus kimia CO, adalah gas yang tak berwarna, tak berbau, dan tak berasa. Ia terdiri dari satu atom karbon yang secara kovalen berikatan dengan satu atom oksigen. Dalam ikatan ini, terdapat dua ikatan kovalen dan satu ikatan kovalen koordinasi antara atom karbon dan oksigen. Karbon monoksida dihasilkan dari pembakaran tak sempurna dari senyawa karbon, sering terjadi pada motor pembakaran dalam. Karbon monoksida terbentuk apabila terdapat kekurangan oksigen dalam proses pembakaran. Karbon monoksida mudah terbakar dan menghasilkan lidah api berwarna biru, menghasilkan karbon dioksida. Walaupun ia bersifat racun, CO memainkan peran yang penting dalam teknologi *modern*, yakni merupakan prekursor banyak senyawa karbon. Salah satu dampak apabila tubuh menghirup kelebihan CO adalah menghambat pasokan oksigen untuk tubuh: Afinitas karbon monoksida (CO) dengan hemoglobin (Hb) 200 kali lebih cepat dari pada afinitas oksigen ( $\text{O}_2$ ) dengan hemoglobin (Hb). Proses ini akan membentuk karboksihemoglobin(CO<sub>2</sub>Hb). Reaksi ini yang menghambat pasokan oksigen ke seluruh tubuh. Jantung dan otak merupakan

organ yang butuh oksigen dalam jumlah yang cukup.



**Gambar 10.** Grafik Konsentrasi CO vs Variasi Piston pada beban 1000 Watt

Dari grafik 10 dapat dilihat bahwa konsentrasi CO pada masing – masing *Flat Piston* dan *LSCS Piston* untuk putaran *engine* 1000 rpm sampai 2000 rpm mengalami kenaikan. Pada putaran 1000 rpm konsentrasi CO *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 2,515 g/kWh dan 2,512 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO sebesar 0,10 %. Pada putaran 1250 rpm konsentrasi CO *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 2,587 g/kWh dan 2,583 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1250 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO sebesar 0,14 % . Pada putaran 1500 rpm konsentrasi CO *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 2,657 g/kWh dan 2,653 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1500 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 0,14 %. Pada putaran 1750 rpm konsentrasi CO *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 2,796 g/kWh dan 2,792 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1750 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO sebesar 0,13 % . Pada putaran 2000 rpm konsentrasi CO *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 2,742 g/kWh dan 2,738 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 2000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi CO

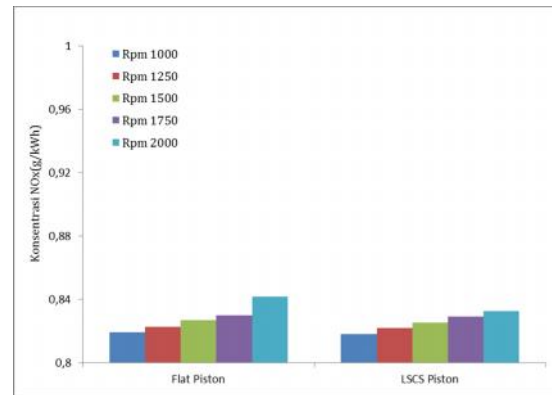


sebesar 0,13 %. Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt pada putaran *engine* yang sama mengalami penurunan konsentrasi CO rata – rata sebesar 0,13 %. Dan apabila ditinjau dari standar emisi dapat dikatakan bahwa penggunaan *Flat Piston* dan *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt ini masih berada dibawah standar emisi CO maksimal yang dibolehkan yaitu 6,6 g/kWh untuk Tier 1 dan 6,6 g/kWh untuk Tier 2 oleh international commercial marine *diesel engines standards - MARPOL Annex VI 1999* untuk Category 1 and Category 2 untuk daya mesin lebih kecil sama dengan 37 kW.

### 3.5 Konsentrasi emisi gas buang NOx Pada Beban 1000 Watt

Nitrogen oksida sering disebut dengan NOx, karena oksida nitrogen mempunyai 2 macam bentuk yang sifatnya berbeda, yaitu gas NO<sub>2</sub> dan gas NO. Sifat gas NO<sub>2</sub> adalah berwarna dan berbau, sedangkan gas NO tidak berwarna dan tidak berbau. Warna gas NO<sub>2</sub> adalah merah kecoklatan dan berbau tajam menyengat hidung. Dari seluruh jumlah NOx yang dibebaskan ke atmosfer, jumlah yang terbanyak adalah dalam bentuk NO yang diproduksi oleh aktivitas bakteri. Akan tetapi poluasi NO dari sumber alami ini tidak merupakan masalah karena tersebar secara merata sehingga jumlahnya menjadi kecil. Yang menjadi masalah adalah polusi NO yang diproduksi oleh kegiatan manusia karena jumlahnya akan meningkat hanya pada tempat-tempat tertentu. Konsentrasi NOx di udara di daerah perkotaan biasanya 10-100 kali lebih tinggi daripada di udara daerah pedesaan. Konsentrasi NOx di udara daerah perkotaan dapat mencapai 0,5 ppm(500 ppb). Seperti halnya CO, emisi nitrogen oksida dipengaruhi oleh kepadatan penduduk karena sumber utama NOx yang diproduksi manusia adalah dari pembakaran, dan kebanyakan pembakaran disebabkan oleh kendaraan, produksi energi dan pembuangan sampah. Sebagian besar emisi NOx yang dibuat

manusia berasal dari pembakaran arang, minyak solar, gas alam dan bensin.



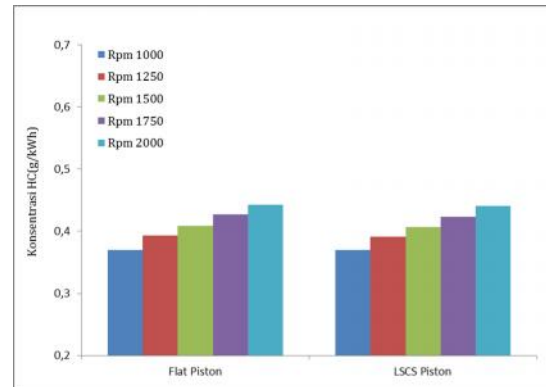
**Gambar 11.** Grafik Konsentrasi NOx vs Variasi Piston pada beban 1000 Watt

Dari grafik 11 dapat dilihat bahwa konsentrasi NOx pada masing – masing *Flat Piston* dan *LSCS Piston* untuk putaran *engine* 1000 rpm sampai 2000 rpm mengalami kenaikan. Pada putaran 1000 rpm konsentrasi NOx *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,819 g/kWh dan 0,818 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NOx sebesar 0,12 %. Pada putaran 1250 rpm konsentrasi NOx *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,823 g/kWh dan 0,822 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1250 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NOx sebesar 0,08 % . Pada putaran 1500 rpm konsentrasi NOx *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,827 g/kWh dan 0,826 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1500 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NOx sebesar 0,16 %. Pada putaran 1750 rpm konsentrasi NOx *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,830 g/kWh dan 0,829 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1750 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NOx sebesar 0,12 % . Pada putaran 2000 rpm konsentrasi NOx *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,842 g/kWh dan 0,833 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 2000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi

NO<sub>x</sub> sebesar 1,07 %. Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt pada putaran *engine* yang sama mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub> rata – rata sebesar 0,31 %.

### 3.6 Konsentrasi emisi gas buang HC Pada Beban 1000 Watt

Hidrokarbon adalah sebuah senyawa yang terdiri dari unsur karbon(C) dan hidrogen(H). Seluruh hidrokarbon memiliki rantai karbon dan atom-atom hidrogen yang berikatan dengan rantai tersebut. Istilah tersebut digunakan juga sebagai pengertian dari hidrokarbon alifatik. Sebagai contoh, metana(gas rawa) adalah hidrokarbon dengan satu atom karbon dan empat atom hidrogen CH<sub>4</sub>. Etana adalah hidrokarbon(lebih terperinci, sebuah alkana) yang terdiri dari dua atom karbon bersatu dengan sebuah ikatan tunggal, masing-masing mengikat tiga atom karbon C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Propana memiliki tiga atom C (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) dan seterusnya (C<sub>n</sub>H<sub>2•n+2</sub>). HC yang berupa gas akan tercampur dengan gas-gas hasil buangan lainnya, sedangkan bila berupa cair maka HC akan membentuk semacam kabut minyak, bila berbentuk padatan akan membentuk asap yang pekat dan akhirnya menggumpal menjadi debu. Emisi kendaraan bermotor yang mengandung senyawa karsinogenik diperkirakan dapat menimbulkan tumor pada organ lain selain paru. Akan tetapi untuk membuktikan apakah pembentukan tumor tersebut hanya diakibatkan karena asap solar atau gas lain yang bersifat sebagai iritan(Tugaswati, 2004). Hidrokarbon di udara akan bereaksi dengan bahan-bahan lain dan akan membentuk ikatan baru yang disebut plicyclic aromatic hidrocarbon (PAH) yang banyak dijumpai di daerah industri dan padat lalu lintas. Bila PAH ini masuk dalam paru-paru akan menimbulkan luka dan merangsang terbentuknya sel-sel kanker.



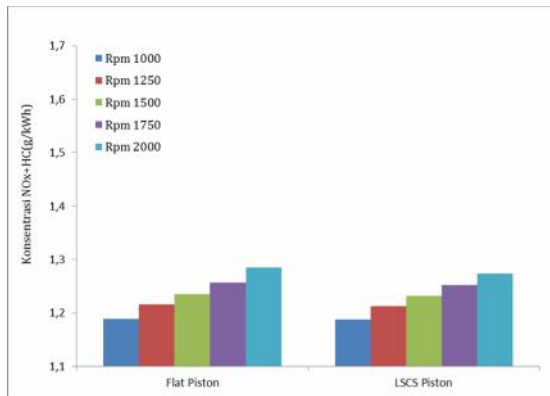
**Gambar 12.** Grafik Konsentrasi HC vs Variasi Piston pada beban 1000 Watt

Dari grafik 12 dapat dilihat bahwa konsentrasi HC pada masing – masing *Flat Piston* dan *LSCS Piston* untuk putaran *engine* 1000 rpm sampai 2000 rpm mengalami kenaikan. Pada putaran 1000 rpm konsentrasi HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,370 g/kWh dan 0,369 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi HC sebesar 0,12 %. Pada putaran 1250 rpm konsentrasi HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,393 g/kWh dan 0,391 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1250 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi HC sebesar 0,54 %. Pada putaran 1500 rpm konsentrasi HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,409 g/kWh dan 0,407 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1500 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi HC sebesar 0,50 %. Pada putaran 1750 rpm konsentrasi HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,427 g/kWh dan 0,423 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1750 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi HC sebesar 0,96 %. Pada putaran 2000 rpm konsentrasi HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 0,443 g/kWh dan 0,441 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 2000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi HC sebesar 0,47 %. Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt

pada putaran *engine* yang sama mengalami penurunan konsentrasi HC rata – rata sebesar 0,51 %.

### 3.7 Konsentrasi emisi gas buang NO<sub>x</sub>+HC Pada Beban 1000 Watt

Standart emisi MARPOL Annex VI 1999 untuk *engines* Category 1 and 2 di dasarkan pada standart dasar pada onroad *engine* dan locomotive *engine*. Pada standart emisi Tier 1 & 2 MARPOL Annex VI 1999 bahwa nilai NO<sub>x</sub> dan HC standart ambang maksimum adalah jumlah dari nilai (NO<sub>x</sub>+HC). Ambang maksimum nilai (NO<sub>x</sub>+HC) adalah 9,5 g/kWh untuk Tier 1 dan 7,5 g/kWh untuk Tier 2 sesuai dengan tabel 2 Final Emission Standart and Dates – Commercial Marine Diesel < 37 kW.



**Gambar 13.** Grafik Konsentrasi (NO<sub>x</sub>+HC) vs Variasi Piston pada beban 1000 Watt

Dari grafik 13 dapat dilihat bahwa konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC pada masing – masing *Flat Piston* dan *LSCS Piston* untuk putaran *engine* 1000 rpm sampai 2000 rpm mengalami kenaikan. Pada putaran 1000 rpm konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 1,189 g/kWh dan 1,188 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC sebesar 0,12 %. Pada putaran 1250 rpm konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 1,215 g/kWh dan 1,213 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1250 rpm

tersebut mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC sebesar 0,23 %. Pada putaran 1500 rpm konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 1,235 g/kWh dan 1,232 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1500 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC sebesar 0,27 %. Pada putaran 1750 rpm konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 1,257 g/kWh dan 1,252 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 1750 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC sebesar 0,40 %. Pada putaran 2000 rpm konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC *Flat Piston* dan *LSCS Piston* sebesar 1,285 g/kWh dan 1,274 g/kWh. Pada pergantian dari *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada putaran 2000 rpm tersebut mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC sebesar 0,86 %. Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt pada putaran *engine* yang sama mengalami penurunan konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC rata – rata sebesar 0,38 %. Dan nilai NO<sub>x</sub>+HC masih mempunyai konsentrasi sangat aman berdasarkan standart emisi Tier 1 & 2 MARPOL Annex VI 1999 bahwa nilai maksimum yang diijinkan adalah 9,5 g/kWh untuk Tier 1 dan 7,5 g/kWh untuk Tier 2.

## 4. KESIMPULAN

Setelah dilakukan eksperimen dalam pengujian terhadap uji emisi gas buang motor *diesel* untuk *Flat Piston Chamber* dan *LSCS Piston Chamber* maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari analisa diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pada pergantian *Flat Piston* ke *LSCS Piston* pada beban 1000 Watt pada variasi putaran *engine* mengalami penurunan konsentrasi rata – rata CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC dan (NO<sub>x</sub>+HC) sebesar 1,46 %, 1,56 %, 0,13 %, 0,31 %, 0,51 % dan 0,38 %.
2. Pada Pembebanan 1000 Watt dan variasi putaran *engine* untuk konsentrasi CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>

dan CO dari pemakaian variasi *Piston* yaitu *Flat Piston Chamber* dan *LSCS Piston Chamber* yang menghasilkan konsentrasi emisi paling rendah adalah *LSCS Piston Chamber*. Dan nilai SO<sub>2</sub> dan CO masih mempunyai konsentrasi sangat aman berdasarkan standart emisi Tier 1 & 2 MARPOL Annex VI 1999 bahwa nilai maksimum yang diijinkan 15000 ppm untuk konsentrasi SO<sub>2</sub> dan 6,6 g/kWh untuk Tier 1 & Tier 2 untuk konsentrasi CO.

3. Pada Pembebanan 1000 Watt dan variasi putaran *engine* untuk konsentrasi NO<sub>x</sub>+HC dari pemakaian variasi *Piston* yaitu *Flat Piston Chamber* dan *LSCS Piston Chamber* yang menghasilkan konsentrasi emisi paling rendah adalah *LSCS Piston Chamber*. Dan nilai NO<sub>x</sub>+HC masih mempunyai konsentrasi sangat aman berdasarkan standart emisi Tier 1 & 2 MARPOL Annex VI 1999 bahwa nilai maksimum yang diijinkan adalah 9,5 g/kWh untuk Tier 1 dan 7,5 g/kWh untuk Tier 2.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa penelitian ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan lancar apabila tanpa bantuan dan bimbingan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Eko Julianto, MT., MRINA selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
2. Bapak Ir. Arie Indartono, MMT selaku Ketua P3M Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak George Endri Kusuma, ST. M.Sc.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal.
4. Bapak Eko Purwanto, Mas Albert dan semua teknisi Laboratorium Motor Bakar yang selalu membantu, mengarahkan, saat dilakukannya pengerjaan penelitian ini.

Penulis sangat menyadari bahwa di dalam penelitian ini masih banyak dijumpai kekurangan. Segala saran dan kritik membangun dari para penelaah sangat bermanfaat untuk penyempurnaannya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wei SL, Wang FH, Leng XY, et al. *Numerical analysis on the effect of swirl ratios on swirl chamber combustion system of DI diesel engines*. Energy Convers Manage 2013;75:184–90.
- [2] Sahin Z, Tuti M, Durgun O. *Experimental investigation of the effects of water adding to the intake air on the engine performance and exhaust emissions in a DI automotive diesel engine*. Fuel 2014;115:884–95.
- [3] De Risi A, Donateo T, Domenico LD. *Optimization of the combustion chamber of direct injection diesel engines*. SAE Paper, 2003-01-1064; 2003.
- [4] Michela Costa, Paolo Sementa, Ugo Sorge, et al. *Split injection in a GDI engine under knock conditions: an Experimental and numerical investigation*. SAE Paper, 2015-24-2432; 2015.
- [5] Rong Wei, Xiangrong Li, Guodong Zhang, et al. *A new double swirls combustion system for DI diesel engine*. SAE Paper, 2000-01-2915; 2000.
- [6] Costa Michela, Catapano Francesco, Marseglia Guido, et al. *Experimental and numerical investigation of the effect of split injections on the performance of a GDI engine*

- under lean operation*. SAE Paper, 2015-24-2413; 2015.
- [6] Pang KM, Ng HK, Gan S. *Investigation of fuel injection pattern on soot formation and oxidation processes in a light-duty diesel engine using integrated CFD-reduced chemistry*. Fuel 2012;96:404–18.
- [7] LiWang Su, XiangRong Li, Xu He, FuShui Liu. *Experimental research on the diffusion flame formation and combustion performance of forced swirl combustion system for DI diesel engines* [J]. Energy Convers Manage 2015;106:826–34.
- [8] Jeon Joonho, Kwon Sang Il, Park Yong Hee. *Visualizations of combustion and fuel/air mixture formation processes in a single cylinder engine fueled with DME*. Appl Energy 2014;113 294–301.
- [9] Chen Z, Wu ZK, Liu JP, et al. *Combustion and emissions characteristics of high n-butanol/diesel ratio blend in a heavy-duty diesel engine and EGR impact*. Energy Convers Manage 2014;78:787–95.
- [10] Zamboni Giorgio, Capobianco Massimo. *Experimental study on the effects of HP and LP EGR in an automotive turbocharged diesel engine*. Appl Energy 2012;94:117–28.
- [11] Berggren Christian, Magnusson Thomas. *Reducing automotive emissions – the potentials of combustion engine technologies and the power of policy*. Energy Pol 2012;41:636–43.
- [12] Di Battista D, Mauriello M, Cipollone R. *Waste heat recovery of an ORC-based power unit in a turbocharged diesel engine propelling a light duty vehicle*. Appl Energy 2015;152:109–20