



**SKRIPSI - 141501**

**STUDI ANALISIS PERFORMA, PROSES PEMBAKARAN  
DAN NO<sub>x</sub> PADA MOTOR DIESEL MENGGUNAKAN *HOT*  
DAN *COLD EGR* BERBASIS EKSPERIMEN**

**Anugrah Des Putra  
4214106001**

**Dosen Pembimbing:  
Ir. Agung Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng, Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**

“Halaman Sengaja Dikosongkan”



**THESIS - 141501**

**AN STUDY ANALYSIS ON PERFORMANCE,  
COMBUSTION PROCESS, AND NO<sub>x</sub> OF DIESEL ENGINE  
USING EGR HOT AND COLD BASED EXPERIMENT**

**Anugrah Des Putra  
4214106001**

**Academic Supervisor:  
Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng, Ph.D**

**MARINE ENGINEERING DEPARTEMENT  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI ANALISIS PERFORMA, PROSES PEMBAKARAN DAN NO<sub>x</sub> PADA MOTOR DIESEL MENGGUNAKAN *HOT* *DAN COLD EGR* BERBASIS EKSPERIMEN

#### Skripsi

Diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan  
memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi Marine Power Plant (MPP) Program Studi S-1  
Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi  
Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Anugrah Des Putra  
NRP. 4214 106 001

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Skripsi :

Ir. Agung Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng. Ph.D  
NIP. 1956 0519 1986 10 1001



Surabaya

Januari, 2017

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

## LEMBAR PENGESAHAN

### STUDI ANALISIS PERFORMA, PROSES PEMBAKARAN DAN NO<sub>x</sub> PADA MOTOR DIESEL MENGGUNAKAN *HOT* DAN *COLD EGR* BERBASIS EKSPERIMEN

Skripsi

Diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan  
memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi Marine Power Plant (MPP) Program Studi S-1  
Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi  
Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Anugrah Des Putra**

**NRP. 4214 106 001**

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan:



Dr. Eng. Muhammad Badrus Zaman, ST. MT

NIP. 1977 0802 2008 01 1007

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

# **STUDI ANALISIS PERFORMA, PROSES PEMBAKARAN DAN NO<sub>x</sub> PADA MOTOR DIESEL MENGGUNAKAN *HOT* DAN *COLD* EGR BERBASIS EKSPERIMEN**

Nama Mahasiswa : Anugrah Des Putra  
NRP : 4214 106 001  
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan  
Dosen Pembimbing : Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah.,  
M.Eng, Ph.D

## **ABSTRAK**

Hasil pembakaran dari motor diesel salah satunya berupa NO<sub>x</sub> yang dapat menyebabkan polusi pada udara. Sebagian peneliti telah menemukan alat sederhana yang digunakan untuk mereduksi NO<sub>x</sub>. Alat sederhana tersebut ialah *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) yang dapat mereduksi NO<sub>x</sub> dengan cara mensirkulasikan kembali sebagian dari gas buang ke dalam ruang bakar. Sistem EGR saat ini sering disebut dengan istilah hot EGR dimana proses sirkulasi gas buang tanpa sistem pendinginan. Setelah sistem hot EGR dirancang dengan penambahan *cooling system* dengan jenis berpendinginan udara maka gas buang yang digunakan kembali akan didinginkan terlebih dahulu sehingga massa dari udara akan meningkat. Penelitian ini bertujuan untuk studi analisis terhadap performa motor, proses pembakaran, dan penurunan kandungan NO<sub>x</sub> pada sistem EGR setelah penambahan pendinginan udara. Eksperimen ini dilakukan pada motor diesel Yanmar TF 85-MHDI. Hasil dari emisi menurut uji statistik bahwa motor diesel yang telah dimodifikasi dengan sistem *hot* dan *cold* EGR mampu berada dalam ambang batas uji emisi TIER 2 dengan bukaan katup EGR 20% dan 30% dengan beban 25%, 50%, dan 75%. Sedangkan untuk beban 100% pada bukaan katup EGR 20% dan 30% motor diesel mampu masuk dalam ambang batas emisi TIER 3. Dari segi performa nilai SFOC mampu diperbaiki pada kondisi 10% *cold* EGR dengan penurunan sebesar 14,62% dan hasil untuk *combustion process*

*peak pressure* pada motor diesel menjadi rendah namun *rate of heat relase* (ROHR) mengalami penurunan.

**Keywords :** *Exhaust Gas Recirculation (EGR), EGR cooler, performa motor, proses pembakaran, NOx, peak pressure, ratw of heat relese.*

# **AN ANALYSIS STUDY ON PERFORMANCE, COMBUSTION PROCESS, AND NO<sub>x</sub> OF DIESEL ENGINE USING EGR HOT AND COLD BASED EXPERIMENT**

Student Name : Anugrah Des Putra  
NRP : 4214 106 001  
Departement : Teknik Sistem Perkapalan  
Academic Supervisor : Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah.,  
M.Eng, Ph.D

## **ABSTRACT**

The combustion process of a diesel engine that produces NO<sub>x</sub> cause air pollution. Some researchers have found a system that can reduce NO<sub>x</sub> content. One such system is the Exhaust Gas Recirculation (EGR) system is the most simple NO<sub>x</sub> reduction by means of circulating a portion of exhaust gas return into the combustion chamber. EGR system is often better known by the name the hot EGR where exhaust gas circulation process without cooling system. Hot EGR system is designed by the addition of cooling system with air-cooled type. So that the circulating of exhaust gas to be cooled in advance in such that the mass of air increases. This research aims to study the performance, the combustion process, and a reduction in NO<sub>x</sub> of diesel engine with EGR using addition of air cooling system. The experiments were used on diesel engine Yanmar TF 85-MHDI. The result show the emissions of diesel engines which have been modified with cold EGR system is able to be in the thresholds in the TIER 2 emissions standard on the EGR valve opening are 20% and 30% with load of 25%, 50%, and 75%. As for the only 100% load on the EGR valve opening are 20% and 30% of diesel engines able to enter the emission limits TIER 3. As for the performance of the SFOC able to be fixed at 10% cold conditions EGR with a decrease of 14.62% and the results for peak pressure of the combustion process in diesel engine to be low, however the rate of heat release (ROHR) decreased.

**Keywords :** *Exhaust Gas Recirculation (EGR), EGR cooler, perform of engine, combustion process, NOx, peak pressure, rate of heat release.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah S.W.T berkat limpahan rahmat, hidayah dan bimbingan-Nya sehingga skripsi dengan judul **“Studi Analisis Performa, Proses Pembakaran, dan NOx Pada Motor Diesel Dengan Menggunakan Hot dan Cold EGR Berbasis EKsperimen”** dapat diselesaikan dengan baik dan lancar. Sholawat serta salam atas junjungan nabi besar Muhammad SAW yang diharapkan syafaatnya hingga diakhir kiamat.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan doa berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Bapak Ir. Aguk Zuhdi Muhammad Fathallah., M.Eng, Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah memberikan semangat, arahan, masukan, dan ilmu kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, ST. MT selaku Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan.
3. Bapak Nur selaku teknisi Laboratorium Marine Power Plant yang telah membantu penulis dalam persiapan pra eksperimen hingga eksperimen selesai.
4. Tumdryono, Wihartutik serta Aini Putri Halifah tercinta selaku ayah, ibu dan adik dari penulis yang selalu memberikan doa, kasih sayangnya, masukan serta dukungan baik moral maupun material kepada penulis.
5. Achmad Maulana Yasin yang selalu ada dan memberikan support ketika semangat turun dan sudah sangat baik sebagai partner dalam mengerjakan skripsi ini.
6. Kawan seperjuangan dan seangkatan “lintas jalur genap 2014” yang selalu mendukung mencetak pola pikir terdepan hingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan baik dan lancar..

7. Teman-teman “Kawai Kos” yang selalu memberikan hiburan ketika penulis mulai merasa *Low Motivation*.
8. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari pula bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu perlunya saran dan masukan demi membangun kebaikan dan kemajuan skripsi ini. Akhir kata semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya, amin.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxi</b>
<b>BAB I</b> .....	<b>1</b>
<b>PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat Penulisan .....	3
<b>BAB II</b> .....	<b>4</b>
<b>TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Teori Umum Mengenai Sistem EGR .....	5
2.2 Metode Penjelasan Pitot .....	10
2.3 Penjelasan Ambang Batas Emisi .....	12
<b>BAB III</b> .....	<b>13</b>
<b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>13</b>
3.1 Identifikasi & Perumusan Masalah .....	13
3.2 Studi Literatur .....	13
3.3 Proses Desain dan Manufaktur sistem EGR yang dioptimalkan dengan EGR <i>Cooler</i> .....	15
3.3.1 Engine Set Up dan Pra eksperimen .....	28
3.4 Uji Eksperimen.....	31

3.5 Pengumpulan Data .....	32
3.6 Penggantian Sistem EGR .....	32
3.7 Analisa & Pembahasan.....	32
3.8 Kesimpulan & Saran .....	33
3.9 Jadwal pelaksanaan .....	33
<b>BAB IV .....</b>	<b>34</b>
<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>35</b>
4.1 Hasil Data Performa .....	35
4.2 Hasil Proses Pembakaran Motor Diesel Menggunakan <i>hot</i> dan <i>cold</i> EGR .....	46
4.3 Hasil Pengambilan Uji Emisi Nox Pada Motor Diesel Menggunakan <i>hot</i> dan <i>cold</i> EGR .....	66
4.4 Pembahasan.....	70
<b>BAB V.....</b>	<b>76</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>77</b>
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran.....	78
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>75</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Exhaust Gas Recirculation.....	5
Gambar 2. Grafik penurunan kandungan NOx sesuai variasi bukaan katup .....	6
Gambar 3. Exhaust gas recirculating (EGR) yang dilengkapi dengan pendinginan air .....	7
Gambar 4. Grafik perbandingan antara bahan bakar jatropha dengan solar pada bukaan katup 25%.....	8
Gambar 5. Grafik perbandingan antara penggunaan <i>hot</i> dan <i>cold</i> EGR pada variasi bukaan katup .....	9
Gambar 6. Pitot tube.....	10
Gambar 7. Diagram Nox <i>limits</i> .....	12
Gambar 8. Metodologi Penelitian .....	14
Gambar 9. Desain dan manufaktur sistem EGR dengan <i>cooler</i> .....	15
Gambar 10. Port <i>intake manifold</i> .....	16
Gambar 11. Port exhaust manifold.....	16
Gambar 12. <i>Angle globe valve</i> .....	17
Gambar 13. EGR <i>Cooler</i> .....	17
Gambar 14. Fan <i>Cooler</i> .....	18
Gambar 15. Baterai.....	19
Gambar 16. Elbow.....	19
Gambar 17. EGR hoses .....	19
Gambar 18. Clamp EGR .....	20
Gambar 19. Pipa pitot tube.....	20
Gambar 20. Pipa stagnasi dan statis tube .....	20
Gambar 21. Pitot tube manometer U.....	21
Gambar 22. Multimeter .....	21
Gambar 23. Tangampere .....	22
Gambar 24. Tachometer .....	22
Gambar 25. Infrared .....	22
Gambar 26. Stopwatch .....	23
Gambar 27. Beban lampu .....	23
Gambar 28. Sistem cold EGR .....	24
Gambar 29. Sistem hot EGR .....	24

Gambar 30. Inlet cold EGR.....	24
Gambar 31. Outlet cold EGR.....	24
Gambar 32. Pitot tube manometer U.....	25
Gambar 33. Manometer sinus air raksa.....	26
Gambar 34. Manometer V air raksa.....	26
Gambar 35. Manometer U air raksa.....	26
Gambar 36. Engine Set-Up.....	28
Gambar 37. Cold EGR dengan pitot tube.....	29
Gambar 38. Hot EGR dengan pitot tube.....	29
Gambar 39. Kipas pada <i>cold</i> EGR dihubungkan dengan baterai.....	29
Gambar 40. Performansi SFOC dengan power pada 0% EGR.....	34
Gambar 41. Performansi SFOC dengan power 10% <i>hot</i> EGR menggunakan <i>angle globe valve</i> .....	35
Gambar 42. Performansi SFOC dengan power 20% <i>hot</i> EGR menggunakan <i>angle globe valve</i> .....	36
Gambar 43. Performansi SFOC dengan power 30% <i>hot</i> EGR menggunakan <i>angle globe valve</i> .....	37
Gambar 44. Performansi SFOC dengan power 10% <i>cold</i> EGR menggunakan <i>angle globe valve</i> .....	38
Gambar 45. Performansi SFOC dengan power 20% <i>cold</i> EGR menggunakan <i>angle globe valve</i> .....	39
Gambar 46. Performansi SFOC dengan power 30% <i>cold</i> EGR menggunakan <i>angle globe valve</i> .....	40
Gambar 47. Performansi power vs RPM pada variasi % EGR menggunakan <i>hot</i> dan <i>cold</i> EGR.....	41
Gambar 48. Performansi torsi vs RPM pada variasi %EGR menggunakan <i>hot</i> dan <i>cold</i> EGR.....	42
Gambar 49. Performansi BMEP vs RPM pada variasi %EGR menggunakan <i>hot</i> dan <i>cold</i> EGR.....	43
Gambar 50. Grafik <i>combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 25% <i>load</i> .....	45
Gambar 51. Grafik <i>maximum combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 25% <i>load</i> .....	47

Gambar 52. Grafik <i>combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 50% load.....	48
Gambar 53. Grafik <i>maximum combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 50% load.....	49
Gambar 54. Grafik <i>combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 75% load.....	50
Gambar 55. Grafik <i>maximum combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 75% load.....	52
Gambar 56. Grafik <i>combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 100% load.....	53
Gambar 57. Grafik <i>maximum combustion pressure</i> pada 100% RPM dan 100% load.....	54
Gambar 58. Grafik <i>rate of heat release (ROHR)</i> pada 100% RPM dan 25% load.....	56
Gambar 59. Grafik <i>rate of heat release (ROHR)</i> pada 100% RPM dan 50% load.....	58
Gambar 59. Grafik <i>rate of heat release (ROHR)</i> pada 100% RPM dan 75% load.....	60
Gambar 60. Grafik <i>rate of heat release (ROHR)</i> pada 100% RPM dan 100% load.....	62
Gambar 61. Diagram batang kadar NO <sub>x</sub> pada kondisi 100% RPM dan variasi beban.....	65

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. MARPOL Annex VI, batas kandungan NO <sub>x</sub> (MARPOL, 1998).....	12
Tabel 2. Hasil kalibrasi $\Delta h$ manometer.....	27
Tabel 3. Kalkulasi error kalibrasi manometer.....	27
Tabel 4. <i>MARPOL Annex VI, Appendix II Test Cycle</i> .....	31
Tabel 5. Jadwal pelaksanaan.....	33

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada era sekarang sebagian besar kapal telah menggunakan motor diesel yang dilengkapi dengan teknologi EGR yang berasumsi dapat menurunkan kadar dari pada emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan oleh motor diesel. Tetapi disamping itu dengan teknologi EGR yang sekarang masih banyak menggunakan *hot EGR* tanpa adanya pendinginan gas buang.

Penelitian ini merancang sistem EGR dengan menggunakan EGR *cooler* yang berpendinginan udara. Sistem *cold EGR* ini mensirkulasikan kembali gas buang ke dalam engine dengan mendinginkan gas buang terlebih dahulu agar suhu mengalami penurunan dan berharap dengan pengoptimalan ini dapat mengurangi *weakness* yang ditimbulkan. Sistem pendingin dari EGR *cooler* ini sistem pendinginannya langsung disuplai oleh udara bebas yang ada disekitar. Sehingga dengan begitu jumlah dari prosentase hasil gas buang yang masuk melalui *intake manifold* terlebih dahulu didinginkan didalam *cooler* dengan bantuan kipas untuk mempercepat proses pendinginan. Setelah itu apabila suhu panas sudah berkurang selanjutnya baru gas buang dapat disuplai kembali kedalam *intake manifold*. Dengan adanya pengoptimalan pada sistem EGR yang dirancang ini diharapkan jumlah massa udara yang masuk lebih banyak, suhu panas berkurang, dan massa kepadatan dari pada udara akan meningkat.

Setelah perancangan yang dibuat telah selesai maka dipelajari performa, proses pembakaran, dan emisi NO<sub>x</sub> nya.

### 1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan di bahas pada usulan skripsi ini adalah

- a. Bagaimana perbedaan performa motor diesel dengan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan (*cold* dan *hot EGR*)?

- b. Bagaimana perbedaan proses pembakaran yang terjadi pada motor diesel dengan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan (*cold* dan *hot* EGR)?
- c. Bagaimana perbedaan kadar NO<sub>x</sub> pada motor diesel dengan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan (*cold* dan *hot* EGR)?

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk dapat melaksanakan penelitian ini diperlukan batasan masalah sebagai berikut :

- a. Penggunaan *valve* pada penelitian ini menggunakan jenis *angle globe valve*.
- b. Penggunaan *cooler* pada penelitian ini menggunakan pendinginan udara.
- c. Analisis performa, proses pembakaran, dan penurunan kandungan NO<sub>x</sub> dilakukan pada motor diesel **Yanmar TF85 MH-di** yang berada dilaboratorium Marine Power Plant FTK ITS.

### 1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari usulan skripsi ini adalah:

- a. Untuk mengetahui perbedaan dari performa pada motor diesel setelah penggunaan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan (*hot* dan *cold EGR*).
- b. Untuk mengetahui perbedaan dari dari proses pembakaran yang terjadi pada motor diesel setelah penggunaan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan (*hot* dan *cold EGR*).
- c. Untuk mengetahui perbedaan karakteristik penurunan kadar dari NO<sub>x</sub> pada motor diesel setelah penggunaan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan (*hot* dan *cold EGR*).

### **1.5 Manfaat Penulisan**

Manfaat yang diperoleh dari usulan skripsi ini adalah :

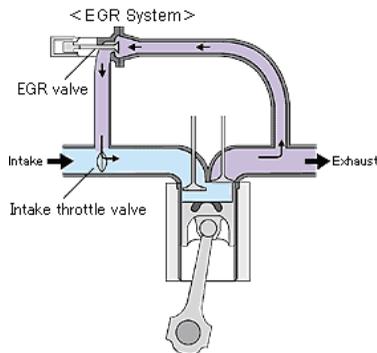
- a. Meningkatkan pemahaman terhadap teknologi yang ada pada seputaran *EGR* dimana dapat dioptimalkan dengan penambahan *EGR cooler* untuk memperbaiki sistem *EGR* yang sudah ada pada saat ini.
- b. Memberikan informasi tentang langkah – langkah yang harus dilakukan saat proses pemasangan *hot* dan *cold EGR* pada motor diesel.
- c. Mengetahui prosentase maksimal terhadap pemasangan *cooler* pada saluran *EGR* agar didapat karakteristik performa motor diesel, analisis proses pembakaran yang paling baik dan penurunan kandungan NOx.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

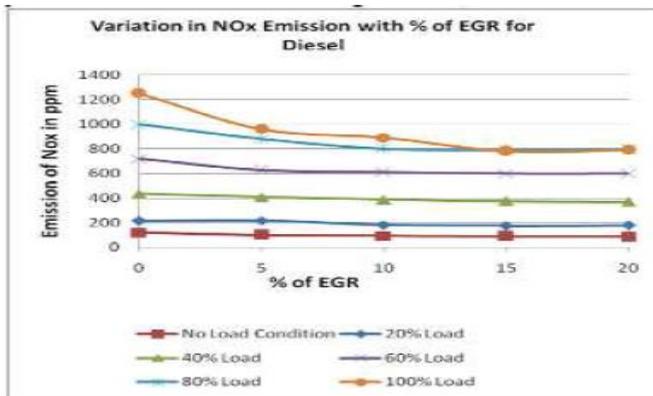
Motor diesel memiliki hasil pembakaran yang didalamnya terdapat kandungan emisi NO<sub>x</sub> yang susah terurai di udara bebas. Sehingga dari hasil pembakaran motor diesel dapat menyebabkan dampak yang buruk pada makhluk hidup di sekitarnya. Dengan berkembangnya zaman dewasa ini hasil gas buang dari motor diesel dapat dimanfaatkan kembali. Dengan pemanfaatan ini para peneliti melakukan beberapa eksperimen dengan mencoba berbagai cara agar kandungan emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan motor diesel dapat menurun. (Nursuhud dan Pudjanarsa, 2006)

Salah satu dari penelitian adalah penggunaan sistem *Exhaust Gas Recirculation* (EGR). Sistem sederhana ini bekerja dengan cara mensirkulasikan kembali sebagian dari gas buang agar dapat digunakan lagi. Gas buang yang dimanfaatkan kembali oleh sistem *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) itu sendiri yang memanfaatkan gas buang sekitar 10% - 30%. Lalu dimasukkan kembali kedalam ke *inlet manifold* dimana diatur oleh *EGR valve* untuk membuka dan menutupnya gas buang yang masuk kedalam manifold. (Sorathia dan Rahhod, 2012). Agar lebih jelas dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Exhaust gas recirculating* (EGR). (Sorathia dan Rahhod, 2012)

Didalam manifold terjadinya pertemuan antara udara segar dan udara bekas hasil pembakaran yang sekiranya sebanyak 20% dan pada umumnya dapat mengurangi kandungan NOx sebesar 34%. Untuk lebih detailnya dapat dilihat pada grafik dibawah ini 2.2.(Sorathia dan Rahhod,2012)



Gambar 2.2 Grafik penurunan kandungan NOx sesuai variasi bukaan katup.(Sorathia dan Rahhod,2012)

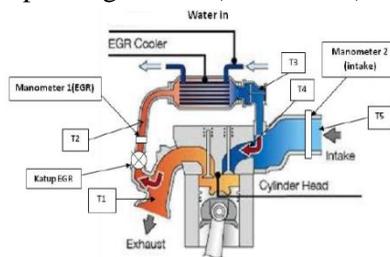
Dapat disimpulkan bahwa EGR mengurangi emisi NOx, karena terdapat muatan air pada udara masukan. Sehingga menurunkan suhu pembakaran. Suhu pembakaran yang rendah menyebabkan pembentukan jelaga yang meningkat. Sehingga pemakaian EGR akan membentuk *trade-off* antara penurunan emisi NOx dan peningkatan emisi jelaga, CO dan HC. Telah diklasifikasikan sistem EGR yang digunakan pada saat ini sebagian besar masih tergolong *hot EGR*. (Rajan dan Kumar,2009)

Definisi *hot EGR* ialah merupakan suatu metode yang digunakan untuk mensirkulasikan gas buang tanpa mendinginkan gas buang, sehingga menyebabkan peningkatan suhu udara masukan. Teknologi dari *hot EGR* ini memang dapat menurunkan kandungan emisi NOx dari sisa pembakaran motor diesel. Tetapi masih banyak kekurangan yang dihasilkan oleh *hot EGR* tersebut. (Legowo,2011)

Sebagai contoh jumlah masa udara yang masuk masih sedikit, kepadatan udara berkurang karena tidak ada pendinginan, suhu panas di *intake manifold* masih tinggi, dan performa engine menurun. Dari segi proses pembakaran dimana setelah diamati ketika penggunaan sistem EGR maka proses pembakaran, heat release, dan ignition delay menjadi lebih panjang. Oleh karena itu peneliti tidak hanya berkembang sebatas itu aja mereka harus dapat mengoptimalkan kinerja dari EGR agar jauh lebih baik. (Legowo,2011)

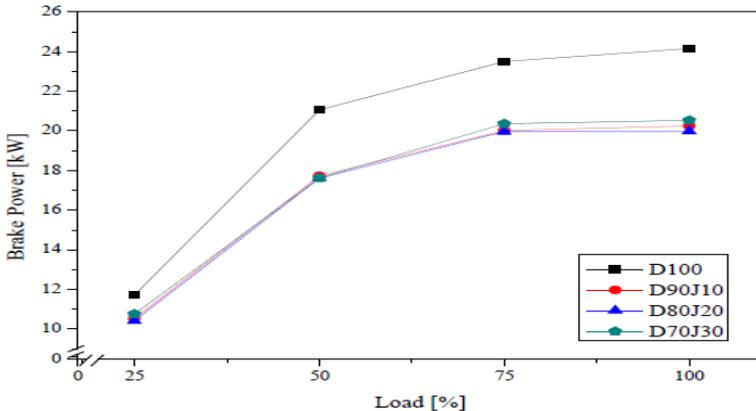
Adanya peraturan yang semakin diperketat maka perlu ide baru agar dapat memenuhi aturan regulasi. Pada kesempatan ini sistem EGR akan ditambahkan *cooling system (cold EGR)*. *Cooling system* dari *cold EGR* ini dirancang dengan menggunakan alat penukar kalor. Avinash dkk., (2004) telah membuat *cold EGR* dengan menggunakan pendinginan air.

Menurut Darmana,(2013) setelah dilakukan uji *cold EGR* dengan berpendinginan air dengan menggunakan bahan bakar jatropha dan bahan bakar solar bahwa power yang dihasilkan akan lebih baik dengan menggunakan solar. Untuk pembukaan katup yang digunakan pada uji coba ini digunakan sebesar 25% diikuti dengan variasi beban pada motor. Pada gambar 2.3 ditunjukkan sistem EGR yang dilengkapi dengan *cooling system* berpendinginan air (*cold EGR*).



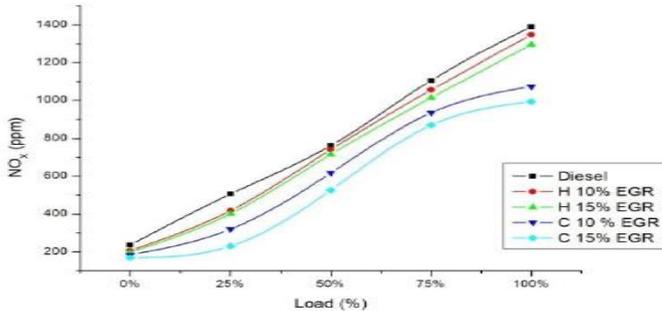
Gambar 2.3 Exhaust gas recirculating (EGR) yang dilengkapi dengan pendinginan air.(Darmana,2013)

Penunjukan hasil uji coba sistem *cold* EGR dengan bahan bakar jatropha dan bahan bakar solar ditunjukkan pada gambar 2.4. (Darmana, 2013)



Gambar 2.4 Grafik perbandingan antara bahan bakar jatropha dengan solar pada bukaan katup 25%. (Darmana, 2013)

Adapun pendapat yang dikemukakan oleh Saichaitanya dan Vamsidurgamohan, (2013) membahas mengenai dampak dari penggunaan *hot* dan *cold* EGR pada mesin diesel. Penggunaan bukaan katup pada penelitian ini sebesar 10 – 15% pada *hot* dan *cold* EGR. Dijelaskan pada journal bahwa penggunaan *hot* EGR akan meningkatkan efisiensi thermal dan dapat mereduksi kandungan Nox hingga 8% pada bukaan katup 15% pada kondisi engine full load. Tetapi dengan penambahan *cooler* pada sistem EGR ini akan menghasilkan dampak yang lebih baik dibandingkan dengan *hot* EGR dimana media pendinginan yang digunakan yaitu air. Sehingga dapat mereduksi kandungan NOx hingga 28% pada bukaan katup 15% pada kondisi engine yang sama. Dengan demikian penggunaan *cold* EGR memang lebih efektif dibandingkan dengan *hot* EGR. Penunjukan penurunan kandungan NOx dapat dilihat pada gambar 2.5. (Saichaitanya dan Vamsidurgamohan, 2013)



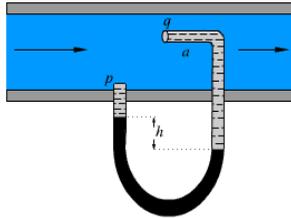
Gambar 2.5 Grafik perbandingan antara penggunaan *hot* dan *cold* EGR pada variasi bukaan katup. (Saichaitanya dan Vamsidurgamohan, 2013)

Telah dirancang sistem EGR dengan pengoptimalan menggunakan *EGR cooler* yang belum pernah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini dipilih *cooler* yang media pendinginannya berupa udara sebagai media yang digunakan untuk mendinginkannya gas buang yang dihasilkan *exhaust manifold*. Digunakan *cooler* dengan media pendinginan udara karena pendinginan yang ada seperti air sudah dilakukan penelitian oleh beberapa peneliti sesuai penjelasan dari journal yang ada.

Diharapkan dengan menggunakan pendinginan udara hasil dari sistem EGR lebih baik. Sehingga keuntungan dari pemakaian EGR dapat bertambah meliputi jumlah dari udara yang akan masuk lebih banyak, kepadatan udara akan lebih baik dibandingkan dengan yang tidak menggunakan sistem *cold* EGR. Prosentase suhu panas pada *intake manifold* juga akan berkurang karena sebelumnya gas buang sudah disirkulasikan didalam *EGR cooler*. Harapan terakhir emisi dari pada kandungan NOx akan jauh lebih baik dalam proses pereduksian setelah dilakukannya pengoptimalan dengan *EGR cooler*. Dari penelitian ini metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah ialah berbasis eksperimen. Eksperimen yang saya lakukan ini akan di

bagi menjadi tiga bagian untuk meninjau hasil setelah eksperimen. Tiga bagian eksperimen itu meliputi pengetesan performa motor diesel, proses pembakaran yang terjadi, dan penurunan kandungan emisi NOx.

Metode yang digunakan dalam pengambilan % massa EGR pada penelitian ini menggunakan metode Pitot Tube :



Gambar 2.6 Pitot tube

Untuk menyelesaikan metode diatas dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \rightarrow v_2 = 0$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho v_1^2 \rightarrow \text{Persamaan 1}$$

Keterangan :

$\rho = \text{Massa Udara}$

Pada metode pitot tube tidak hanya sampai pada persamaan 1 tetapi dilanjutkan ke persamaan 2 karena  $P_2 - P_1$  merupakan tekanan hidrostatik zat cair dalam manometer. Didalam manometer tersebut terdapat zat fluida yang memiliki nilai persamaan 2 yang dituliskan sebagai berikut :

$$P_2 - P_1 = \rho' g h \rightarrow \text{Persamaan 2}$$

Keterangan :

$\rho' = \text{Massa jenis fluida yang digunakan}$

Karena antara persamaan 1 dan persamaan 2 ruas sebelah kiri nya sama-sama  $P_2 - P_1$  sehingga untuk mendapatkan nilai kecepatan aliran udara dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho v_1^2 &= \rho' g h \\ \rho v_1^2 &= 2 \rho' g h \\ \rho v_1 &= \sqrt{2 \rho' g h} \\ v_1 &= \frac{\sqrt{2 \rho' g h}}{\rho} \\ v &= \frac{\sqrt{2 \rho' g h}}{\rho} \end{aligned}$$

Keterangan:

v = nilai dari kecepatan aliran udara yang melewati suatu penampang.

Sehingga dengan demikian nilai v untuk menentukan nilai dari kecepatan aliran udara sistem EGR dan *intake manifold* didapatkan dari persamaan tersebut.

Setelah nilai dari v (kecepatan aliran udara) sudah diketahui maka dapat dicari nilai dari jumlah massa gas buang pada sistem EGR dan *intake manifold* dengan menggunakan rumus :

$$Q = \pi \frac{d^2}{4} x v$$

Keterangan :

Q = massa aliran udara yang terkandung pada sistem tersebut. (*mass flow rate*)

Dengan demikian untuk menentukan variabel prosentase % massa EGR dalam penelitian ini dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\%EGR = \frac{\dot{m}(egr)}{\dot{m}(tot)} x 100\% \text{ (Rajan dan$$

*Kumar,2009)*

Dimana :

$\dot{m}(egr)$  = laju massa gas yang disirkulasikan kembali

$\dot{m}(tot)$  = total laju massa udara yang masuk ke silinder

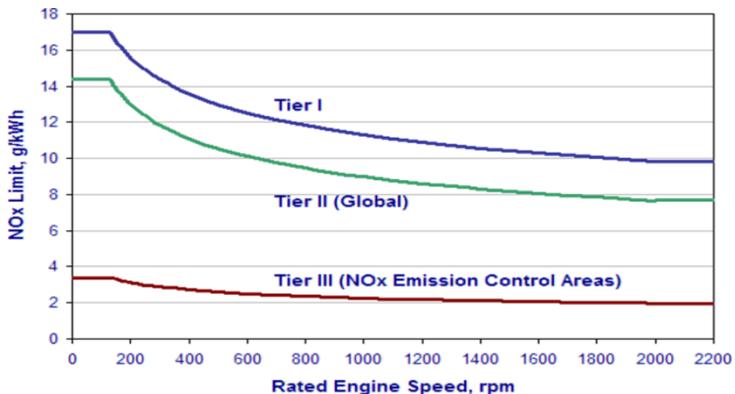
$(\dot{m}(egr) + \dot{m}(intake))$

Terhadap permasalahan gas buang yang dihasilkan oleh motor diesel menyangkut tentang kadar emisi yang diizinkan dibuang diudara bebas telah ditentukan oleh peraturan pemerintah. Dijelaskan pada peraturan pemerintah no 29 tahun 2014 dinyatakan pada pasal 30 bahwa regulasi emisi gas buang yang diizinkan mengacu pada IMO MARPOL ANNEX VI regulasi 13 dapat dilihat pada tabel 2.1 dan gambar dibawah ini 2.7. (PM No 29 tahun 2014)

Tabel 2.1. MARPOL Annex VI, batas kandungan NOx (MARPOL, 1998)

Tier	Date	NOx Limit, g/kWh		
		n < 130	$130 \leq n < 2000$	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016†	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

† In NOx Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).



Gambar 2.7. Diagram Nox limits

### **BAB III**

#### **METODOLOGI PENELITIAN**

Metode yang digunakan penulis dalam penelitian ini yaitu dengan metode eksperimen. Eksperimen terbagi menjadi 3 sub bagian seperti performa, proses pembakaran dan emisi. Untuk menguji kinerja dari pada motor diesel maka kita sebelumnya harus melakukan engine set up terhadap motor diesel yang akan dilakukan test bed, combustion analyzer, dan exhaust emission analyzer. Detail eksperimen dapat dilihat pada diagram alir 3.1

- **Keterangan :**

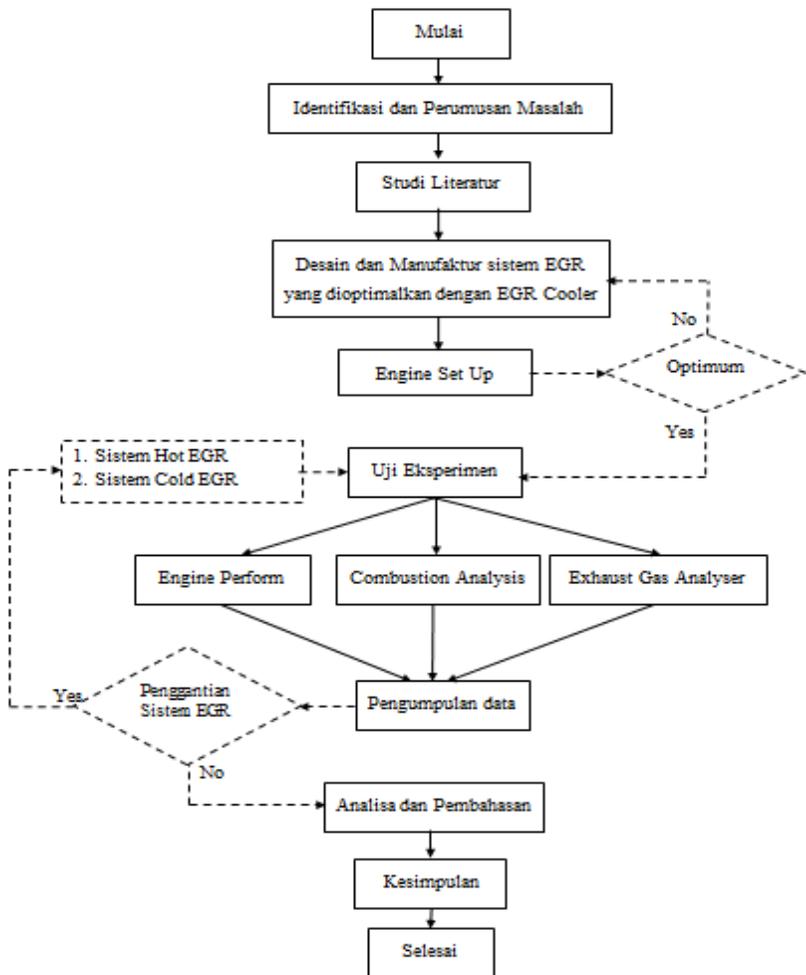
- **Identifikasi & Perumusan Masalah**

Pengidentifikasian masalah pada proses pengoptimalan sistem EGR yang dioptimalkan dengan EGR *cooler* yang sistem pendinginannya berupa udara. Dimana akan ditinjau berdasarkan performa dari motor diesel tersebut, proses pembakaran yang terjadi dan melihat karakteristik terhadap penurunan kadar NOx yang dihasilkan oleh motor diesel.

- **Studi Literatur**

Studi literatur merupakan acuan yang dimanfaatkan untuk mempelajari teori-teori yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang terkait pada penelitian ini. Studi literatur didapatkan dari beberapa sumber seperti buku, jurnal, tugas akhir, dan internet. Pada penelitian ini, dimana studi literatur tersebut mengacu pada penggunaan sistem EGR yang dioptimalkan dengan EGR *cooler* yang dimana pendinginannya berupa udara. Lalu untuk mengetahui performa motor, proses pembakaran, dan penurunan kadar NOx maka kita harus melakukan pengambilan data melalui uji coba terhadap motor diesel yang telah dilengkapi dengan sistem EGR yang dioptimalkan dengan *cooler* tersebut.

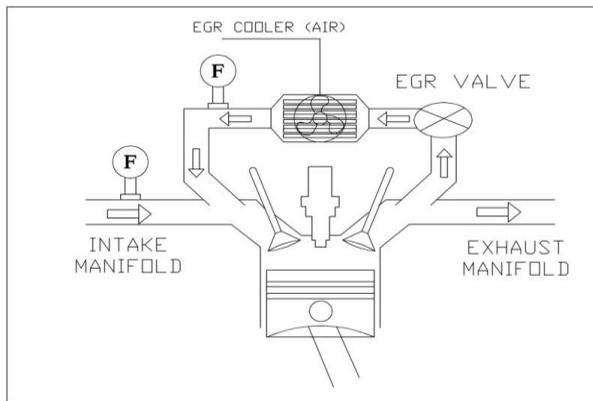
### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Metodologi Penelitian

- **Proses Desain dan Manufaktur sistem EGR yang dioptimalkan dengan EGR Cooler**

Pada tahap ini dilakukan proses pendesainan sistem EGR yang dioptimalkan dengan EGR cooler yang akan dipasang pada mesin *Yanmar TF85-MHDI*. Dimana jenis dari pendinginan EGR cooler ini berupa udara yang akan mendinginkan suhu udara panas melalui sirkulasi yang terdapat pada EGR cooler. Penggunaan EGR valve dalam proses pemasukan gas buang kedalam inlet manifold ini menggunakan jenis *angle globe valve*. Diharapkan dengan pengoptimalan menggunakan EGR cooler ini suhu udara yang akan disuplai kembali kedalam *intake manifold* mengalami penurunan suhu dan jumlah udara yang disuplai lebih banyak. Juga kepadatan dari udara meningkat sehingga meningkatkan massa udara yang akan disalurkan kembali.



Gambar 3.2 Desain dan manufaktur sistem EGR dengan cooler

Pada tahap manufaktur ini dibutuhkan beberapa bahan pendukung yang digunakan untuk menunjang pembuatan sistem *hot* dan *cold* EGR yang akan dipasang pada motor diesel. Manufaktur ini dilakukan melalui beberapa tahapan seperti modifikasi intake dan exhaust manifold pada motor diesel sesuai dengan data yang dibutuhkan untuk mendapatkan variabel

maksimum 30% dari sistem *hot* dan *cold* EGR. Pembuatan valve dan modifikasi *cooler* juga dilakukan pada tahap manufaktur ini agar sistem EGR yang dipasang pada motor diesel dapat bekerja maksimal. Oleh karena itu pada tahap manufaktur ini ada beberapa alat dan bahan yang akan dijelaskan dibawah ini dan juga alat yang dibutuhkan sebagai pengambilan data untuk penelitian yaitu sebagai berikut :

### 3.2.1 Alat dan bahan dalam proses pembuatan sistem *hot* dan *cold* EGR :

1. *Intake manifold* dengan port pada sistem *hot* dan *cold* EGR



Gambar 3.3. Port *intake manifold*

Fungsi : Pada gambar diatas dijelaskan bahwa *intake manifold* yang memiliki diameter 34.25 mm dilubangi sebagai saluran masuk dari sistem *hot* dan *cold* EGR yang akan diteruskan hingga keruang bakar.

2. Exhaust manifold dengan port pada sistem *hot* dan *cold* EGR



Gambar 3.4. Port exhaust manifold

Fungsi : Pada gambar diatas dibuat jalur percabangan pada exhaust manifold yang memiliki diamter 32 mm sebagai jalur dari gas buang yang akan digunakan kembali dan akan diteruskan melalui pipa EGR menuju *intake manifold*.

### 3. *Angle globe valve* yang digunakan pada sistem *hot* dan *cold* EGR



Gambar 3.5. *Angle globe valve*

Fungsi : Pada gambar diatas *angle globe valve* dibuat oleh team karena bekerja sama dalam membangun sistem EGR ini dengan mempunyai variabel yang beda satu sama lain. *Angle Glove Valve* dibuat bertujuan agar mendapatkan hasil yang lebih baik ketika mengatur debit udara dari gas buang yang akan disirkulasikan kembali. Valve ini dibuat berdasarkan dari beberapa data yang digunakan dalam penelitian ini dengan spesifikasi saluran in dan out yang ditunjukkan pada panah berdiameter 1 inch atau 25.4 mm. Sesuai dengan selang pada EGR yang dipilih sebagai penghubung satu sama lain sehingga gas buang dapat dialirkan kembali kedalam ruang bakar.

### 4. *EGR cooler* yang digunakan sebagai pendingin udara gas buang pada sistem *cold* EGR



Gambar 3.6. *EGR Cooler*

Fungsi : Pada gambar diatas EGR *cooler* yang telah dimodifikasi akan digunakan sebagai *heat exchanger* dimana udara panas dari gas buang akan didinginkan terlebih dahulu sebelum masuk kembali kedalam ruang bakar sehingga akan berdampak lebih baik pada engine. EGR *cooler* dapat bekerja optimal ketika sudah selesai tahapan modifikasi dengan melalui berbagai tahap pengelasan pada bodi *cooler* tersebut. Untuk pengelasan yang digunakan pada proses modifikasi ini menggunakan las alumunium karena material dari *cooler* tersebut terbuat dari bahan alumunium. Dipilih dari bahan alumunium agar mudah untuk dilakukan modifikasi ditunjukkan pada panah diatas bahwa dilakukan pemotongan pada bodi *cooler* untuk mengubah arah aliran udara yang masuk sehingga berbentuk seperti angka U dan proses pendinginannya akan semakin luas memenuhi semua kisi – kisi pada *cooler* tersebut. Dilakukan juga pembuatan lubang baru untuk saluran masuk dan buang udara agar mudah dalam pemasangan pada motor diesel.

#### 5. Kipas untuk sistem *cold* EGR



Gambar 3.7. Fan *Cooler*

Fungsi : Pada gambar diatas kipas digunakan sebagai media pembantu untuk mendinginkan gas buang yang berada didalam EGR *cooler*. Kipas bekerja dengan cara mendinginkan kisi – kisi pada EGR *cooler* sehingga suhu dari gas buang yang melewati EGR *cooler* mengalami penurunan suhu. Kipas tersebut dipilih tegangan 12 volt dc agar mudah diatur jika putaran dari kipas kurang maksimal. Untuk memutar kipas maka akan dihubungkan dengan aki yang memiliki tegangan 12 volt dc.

## 6. Aki atau Baterai pada sistem *cold* EGR



Gambar 3.8. Baterai

Fungsi : pada gambar diatas aki memiliki tegangan 12 volt digunakan untuk menyuplai arus pada kipas dengan menghubungkan kabel positif dan negatif kipas ke terminal aki sehingga kipas dapat berputar.

## 7. Elbow



Gambar 3.9. Elbow

Fungsi : Pada gambar diatas elbow digunakan untuk merubah arah aliran dari gas buang sebesar 90 derajat untuk diteruskan hingga masuk kembali kedalam ruang bakar dan bercampur dengan udara segar.

## 8. *Hot* dan *cold* EGR Hoses



Gambar 3.10. EGR Hoses

Fungsi : Pada gambar diatas selang berwarna hitam tersebut digunakan untuk menghubungkan arah aliran EGR dari exhaust manifold hingga ke *intake manifold*. Selang tersebut dibeli dengan spesifikasi harus tahan terhadap tekanan dan temperatur yang tinggi agar tidak mudah leleh. Selang EGR tersebut memiliki diameter 1 inch atau 25.4 mm dipilih ukuran tersebut agar dapat memberikan prosentase massa EGR dengan maksimal.

9. *Clamp* pada EGR



Gambar 3.11. Clamp EGR

Fungsi : pada gambar diatas clamp digunakan sebagai perapat selang dengan selang pada sistem *hot* dan *cold* EGR agar tidak terjadi kebocoran pada saluran *cold* EGR pada saat running.

10. *Pitot tube* pada sistem *hot* dan *cold* EGR



Gambar 3.12. Pipa Pitot Tube



Gambar 3.13. Stagnasi dan Statis Tube

Fungsi : pada gambar diatas Pitot tube digunakan sebagai metode pengambilan data % massa *hot* dan *cold* EGR pada penelitian. Pitot tube ini dibuat dengan 2 sisi yang berbeda dimana pada sisi yang pertama dibuat statis tube dan sisi yang kedua stagnasi. 2 saluran tersebut digunakan untuk mengukur tekanan dan nantinya hasil pembacaan nya dari perbedaan kedua tekanan tersebut

dihubungkan ke manometer untuk pembacaan hasil % massa *hot* dan *cold* EGR.

### 3.2.2 Alat dan bahan untuk pengambilan data pada sistem *hot* dan *cold* EGR

#### 1. Pitot Tube



Gambar 3.14. Pitot Tube

Fungsi : pada gambar diatas pitot tube digunakan untuk membaca perbedaan tekanan yang dihasilkan dari pitot tube.

#### 2. Multimeter



Gambar 3.15. Multimeter

Fungsi : pada gambar diatas multimeter digunakan untuk membaca tegangan pada saat uji performa yang dihasilkan ketika engine diberi beban lampu.

### 3. Tang ampere



Gambar 3.16. Tang Ampere

Fungsi : pada gambar diatas tang ampere digunakan untuk mengukur arus pada saat uji performa yang dihasilkan ketika engine diberi beban lampu.

### 4. Tachometer digital



Gambar 3.17. Tachometer

Fungsi : pada gambar diatas tachometer digital digunakan untuk mengatur RPM engine pada saat uji performa.

### 5. Infrared digital



Gambar 3.18. Infrared

Fungsi : pada gambar diatas infrared digital digunakan untuk mengukur suhu pada sistem *cold* EGR ketika melakukan uji performa. Yang ditembakkan langsung pada saluran masuk *cold* EGR dan saluran *cold* EGR.

#### 6. Stopwatch



Gambar 3.19. Stopwatch

Fungsi : pada gambar diatas stopwatch digunakan untuk menghitung SFOC pada saat melakukan uji performa engine.

#### 7. Beban lampu



Gambar 3.20. Beban Lampu

Fungsi : pada gambar diatas beban lampu digunakan untuk pembebanan pada motor diesel saat melakukan uji performa atau pengambilan data.

### 3.2.3 Proses manufaktur yang telah selesai pada sistem *hot* dan *cold* EGR lalu dipasang pada motor diesel

Pada beberapa gambar dibawah ini dijelaskan bahwa proses manufaktur yang telah dilakukan melalui berbagai tahap pada gambar diatas telah selesai dan dirakit pada motor diesel yanmar **TF MH 85-di**. Setelah terpasang dengan baik ke motor diesel maka perlu dilakukan engine set-up untuk mengetahui prestasi dari motor diesel tersebut dan uji coba sistem *hot* dan *cold* EGR untuk mengetahui dapat bekerja dengan baik atau tidak. Untuk pengambilan titik suhu *in* dan *out* pada sistem *cold* EGR dilakukan untuk melihat penurunan suhu yang terjadi setelah dilakukan penambahan EGR *cooler* pada sistem EGR. Untuk titik penembakan suhu dijelaskan oleh panah pada gambar dibawah ini. Apabila engine set-up belum sampai titik optimal maka perlu dilakukan kembali analisa terhadap motor diesel dan sistem EGR yang dibuat.



Gambar 3.21. Sistem *cold* EGR



Gambar 3.22. Sistem *hot* EGR



Gambar 3.23. Inlet *cold* EGR



Gambar 3.24. Outlet *cold* EGR

### 3.2.4 Kalibrasi manometer dan uji kehandalan dari pitot tube

Pitot tube merupakan salah satu metode untuk mengetahui velocity fluida yang mengalir pada pipa. Pada gambar diatas menunjukkan skema pitot tube dengan manometer U. Pitot tube terbagi menjadi 3 tekanan yaitu titik a adalah tekanan stagnasi, titik b adalah tekanan statis dan didalam manometer merupakan tekanan dinamis.  $\Delta h$  yang timbul didalam manometer digunakan untuk mengetahui velocity fluida yang mengalir didalam pipa. Dengan diketahuinya velocity fluida, maka mass flow rate dari fluida tersebut dapat dihitung.



Gambar 3.25. Manometer U

Manometer yang digunakan pada penelitian ini adalah manometer U dengan fluida yang digunakan adalah solar dex. Fluida ini digunakan karena memiliki massa jenis yang rendah yaitu  $850 \text{ kg/m}^3$ , lebih rendah dibanding air raksa dan air. Dengan massa jenis yang rendah diharapkan mampu memberikan pembacaan yang detail pada manometer U. Pada gambar diatas menunjukkan penampakan manometer U yang digunakan dalam pengukuran prosentase EGR.

Manometer U yang diciptakan harus dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui seberapa besar error yang dihasilkan. Kalibrasi manometer dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh menggunakan manometer U buatan sendiri

dengan hasil yang diperoleh menggunakan manometer lain yang berasal dari pabrik.



Gambar 3.26. Manometer sinus air raksa



Gambar 3.27. Manometer V air raksa



Gambar 3.28. Manometer U air raksa

Kalibrasi manometer dilakukan untuk menguji seberapa besar error yang dimiliki oleh manometer U buatan sendiri. Manometer U buatan sendiri ini dikalibrasi dengan 3 jenis manometer yaitu:

1. Manometer sinus air raksa (gambar 3.27)
2. Manometer V air raksa (gambar 3.28)
3. Manometer U air raksa (gambar 3.29)

Tabel 3.1 Hasil kalibrasi  $\Delta h$  manometer

	$\Delta H$ (mm)			
	manometer U	manometer V raksa	manometer U raksa	manometer sinus raksa
P1 (2 bar)	43	38	26	38
P2 (2 bar)	43	38	26	38
P3 (2bar)	43	38	26	38
P4 (3 bar)	61	53	38	53
P5 (3 bar)	61	53	38	53
P6 (3 bar)	61	53	38	53

Pada tabel diatas merupakan hasil  $\Delta h$  manometer yang diperoleh dengan membandingkan manometer U buatan sendiri dengan manometer buatan pabrik. Dari data diatas, error di hitung dengan cara membandingkan  $\Delta h$  aktual dengan  $\Delta h$  formula. Beberapa data yang diperlukan untuk melakukan perhitungan  $\Delta h$  formula adalah massa jenis solar dex sebesar  $850 \text{ kg/m}^3$  dan massa jenis air raksa sebesar  $1360 \text{ kg/m}^3$ . Sedangkan formula yang digunakan untuk menghitung  $\Delta h$  formula untuk manometer U air raksa adalah  $\rho_1 \cdot g \cdot \Delta H_1 = \rho_2 \cdot g \cdot \Delta H_2$  dan  $\Delta h$  formula untuk manometer V dan sinus air raksa adalah  $h_{vertical} (mm) = \sin 45^\circ \cdot x_{manometer}$ . Dari perhitungan tersebut didapatkan  $\Delta h$  formula untuk masing-masing manometer adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah.

Tabel 3.2 Kalkulasi error kalibrasi manometer

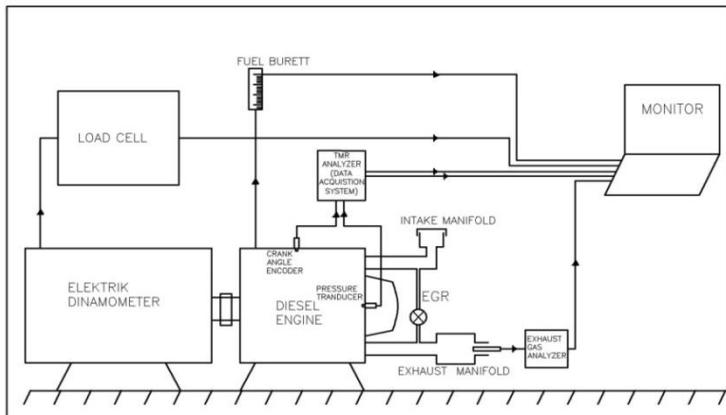
	$\Delta H$ (mm)						
	manometer U	manometer V raksa	error %	manometer U raksa	error %	manometer sinus raksa	error %
P1 (2 bar)	43	38,007	0,018	26,875	3,256	38,007	0,018
P2 (2 bar)	43	38,007	0,018	26,875	3,256	38,007	0,018
P3 (2bar)	43	38,007	0,018	26,875	3,256	38,007	0,018
P4 (3 bar)	61	53,917	1,701	38,125	0,328	53,917	1,701
P5 (3 bar)	61	53,917	1,701	38,125	0,328	53,917	1,701
P6 (3 bar)	61	53,917	1,701	38,125	0,328	53,917	1,701
		$\Sigma$	5,157	$\Sigma$	10,751	$\Sigma$	5,157
rata-rata error = 1,17%							

Kalibrasi dilakukan pada pipa udara yang sama dengan pengambilan data sebanyak 6 buah. Kesimpulan yang diperoleh adalah bahwa manometer U buatan sendiri memiliki ketelitian

yang sama dengan Manometer V air raksa, Manometer U air raksa dan Manometer sinus air raksa dengan error yang didapatkan pada tabel diatas 1.17 %.

### 3.2.5 Engine Set Up dan Pra eksperimen

Pada tahap ini dilakukan proses setting pada mesin diesel, komponen EGR dan peralatan-peralatan untuk proses pengujian. Pengaturan ini adalah memasang sensor-sensor yang terdiri *Hardware Vibrasindo TMR-Card Board & TMR-Crankangle-Rotary Encoder* pada mesin diesel YANMAR tipe TF 85 MH-di. Kemudian dilakukan proses pengistalan *software/tool* yang bernama *TMR Instrumen* untuk menampilkan hasil proses pembakaran mesin di layar computer. Setelah itu, mesin dihubungkan pada dinamometer sebagai alat uji performa. Output dinamometer dihubungkan pada lampu dengan variasi pembebanan 0 hingga 5000 watt. *Buret* juga disiapkan sebagai pengukur SFOC pada masing-masing pembebanan yang diterima oleh mesin diesel.

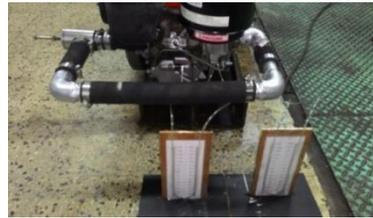


Gambar 3.29. Engine set-up yang telah dirangkai dengan alat uji

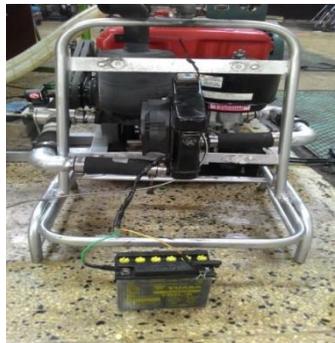
Setelah desain pada engine set up selesai lalu pada tahap selanjutnya yaitu menguji apakah sistem EGR yang telah dimanufaktur mampu mencapai prosentase hingga 30%. Dengan menggunakan pitot tube dan manometer, maka valve diatur hingga didapat prosentase EGR yang diinginkan yaitu 10%, 20% dan 30%. Hasil yang didapat yaitu sistem mampu memberikan prosentase EGR hingga 38%.



Gambar 3.30. *Cold* EGR dengan pitot tube



Gambar 3.31. *Hot* EGR dengan pitot tube



Gambar 3.32 Kipas pada *cold* EGR dihubungkan dengan baterai

Gambar diatas merupakan proses engine set up dan pra eksperimen pada motor diesel untuk mencari prosentase EGR. Proses pra eksperimen yaitu dengan cara menghubungkan mesin dengan dinamometer pembebanan. Prosentase EGR sebagai variabel bebas yaitu 10%, 20% dan 30% di coba untuk

mengetahui apakah sistem siap untuk dilakukan pada tahap eksperimen dan pengambilan data.

Setelah melalui beberapa tahap manufaktur dan pemasangan pada motor diesel yang telah dijelaskan diatas serta telah dilakukan engine set – up untuk mengetahui kondisi awal dari hasil eksperimen. Jika sudah optimal maka tahap selanjutnya pengambilan data untuk sistem *hot* dan *cold* EGR yang sudah dirancang pada penelitian ini akan dilakukan uji performa, proses pembakaran dan NOx pada motor diesel yang sudah dilengkapi dengan sistem EGR tersebut.

Pada *Engine Set Up* dilakukan pengecekan awal mengenai kondisi mesin untuk mengetahui kondisi awal mesin sebelum dilakukan penelitian terhadap mesin yang akan digunakan. Mesin yang digunakan dalam pengambilan data adalah YANMAR *Diesel Engine* dengan tipe TF 85 MH-di. Mesin ini berkapasitas 493 cc. Variabel yang digunakan dalam pengambilan data ialah sebagai berikut :

a) Variable EGR *Cooler* :

- *Cooler* yang digunakan udara

b) Variabel EGR valve :

- Valve Jenis *Angle globe valve*

c) Uji Performa :

- Variabel Tetap = 1. Bahan bakar yang digunakan pertamina dex

2. Sistem *Hot* dan *Cold* EGR

3. RPM

- Variabel Bebas = 1. Beban motor (berubah-ubah)

2. % EGR valve open

d) Uji emisi dan proses pembakaran :

- Variabel Tetap = 1. Bahan bakar yang digunakan Pertamina dex

2. Sistem *Hot* dan *Cold* EGR

3. RPM dan Beban motor (mengikuti aturan regulasi IMO Annex VI)

- Variabel Bebas = 1. % EGR valve open

## e) Variabel Hasil

- Performa dari motor diesel
- Proses dari pembakaran motor diesel (*pressure ignition*)
- Data penurunan kadar NOx

Untuk metode pengetesan pada uji emisi dan proses pembakaran, titik RPM dan beban mengikuti prosedur pada aturan *IMO Marpol Annex VI*. Tipe pengujian yang dipilih adalah *test cycle type E2*, tipe ini dipilih karena motor yang diuji akan difungsikan sebagai motor penggerak utama kapal. Metode pengujian untuk tipe E2 adalah seperti yang terlihat pada tabel 3.3 dibawah ini :

Tabel 3.3. *MARPOL Annex VI, Appendix II Test Cycle*

Test Cycle Type E2	Speed	100%	100%	100%	100%
	Power	100%	75%	50%	25%
	Weight Factor	0.2	0.5	0.15	0.15

## \*)Keterangan:

- Untuk mesin diesel kecepatan konstan dan digunakan untuk penggerak utama atau digunakan sebagai diesel electric menggunakan *Test Cycle E2*.
- Untuk *controllable-pitch propeller* menggunakan *Test Cycle E2*.
- Untuk *auxiliary engines* kecepatan konstan menggunakan *Test Cycle D2*.

- **Uji Eksperimen**

Eksperimen ini dilakukan setelah tahap-tahap sebelumnya sudah terlaksana. Eksperimen ini menggunakan mesin *Yanmar TF85-MH* yang berada di Laboratorium Power

Plant FTK ITS. Tujuan dari dilakukan sebuah eksperimen ini dimana diharapkan sebuah hasil yang baik yang ditinjau dari :

1. Performa terhadap motor diesel yang didalamnya akan dilakukan uji prestasi yang didalamnya akan diketahui daya, torsi, SFOC, dan BMEP dari motor diesel.
2. Proses pembakaran yang terjadi pada motor diesel yang didalamnya diketahui karakteristik proses pembakaran pada perubahan tekanan dan pelepasan panas yang terjadi.
3. Penurunan kandungan NO<sub>x</sub> yang dihasilkan oleh motor diesel beharap penurunan kandungan NO<sub>x</sub> lebih baik setelah dioptimalkan dengan EGR *cooler*.

- **Pengumpulan Data**

Pengumpulan data diperoleh setelah melakukan tahap eksperimen. Dari eksperimen ini akan diperoleh data karakteristik dari hasil prestasi motor diesel dimana ditinjau dari performa, proses pembakaran, dan penurunan kadar NO<sub>x</sub>. Pengumpulan data ini dilakukan pada sistem EGR yang sebelum dan setelah sistem EGR dioptimalkan dengan sistem pendinginan yang berupa udara. Diharapkan dengan sistem EGR yang dioptimalkan dengan EGR *cooler* akan memberikan data yang lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang belum dioptimalkan dengan sistem pendinginan.

- **Penggantian Sistem EGR**

Pada tahap ini dimana setelah pengumpulan data dilakukan maka akan membandingkan hasil akhir dari pengambilan data yaitu dengan cara mengganti sistem *Hot EGR* dengan *Cold EGR*. Diharapkan dengan menggunakan sistem *Cold EGR* hasil akhir yang didapatkan akan lebih baik pada penelitian ini.

- **Analisa & Pembahasan**

Pada penelitian ini analisa data yang dilakukan adalah mengamati proses eksperimen yang telah dilakukan terhadap pengoptimalan pada sistem EGR yang telah dioptimalkan dengan

EGR *cooler* yang ditinjau berdasarkan performa, proses pembakaran, dan penurunan kandungan NOx.

- **Kesimpulan & Saran**

Setelah semua tahapan yang dilakukan, maka selanjutnya adalah menarik kesimpulan dari analisa data dan percobaan. Diharapkan nantinya hasil kesimpulan dapat menjawab permasalahan yang menjadi tujuan skripsi. Selain itu diperlukan saran berdasarkan hasil penelitian untuk perbaikan tugas akhir supaya lebih sempurna.

**Tabel 3.4. Jadwal pelaksanaan**

NO	JENIS KEGIATAN	BULAN KE					
		7	8	9	10	11	12
1	Perumusan Masalah & Identifikasi	X					
2	Studi Literatur	X	X				
3	Desain dan manufaktur sistem EGR yang dioptimalkan dengan <i>cooler</i>			X	X		
4	Engine set up			X	X		
6	Uji Eksperimen				X	X	
7	Pengumpulan data ( <i>HOT</i> dan <i>COLD</i> EGR)				X	X	
8	Analisa & Pembahasan					X	
9	Kesimpulan & Saran						X

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

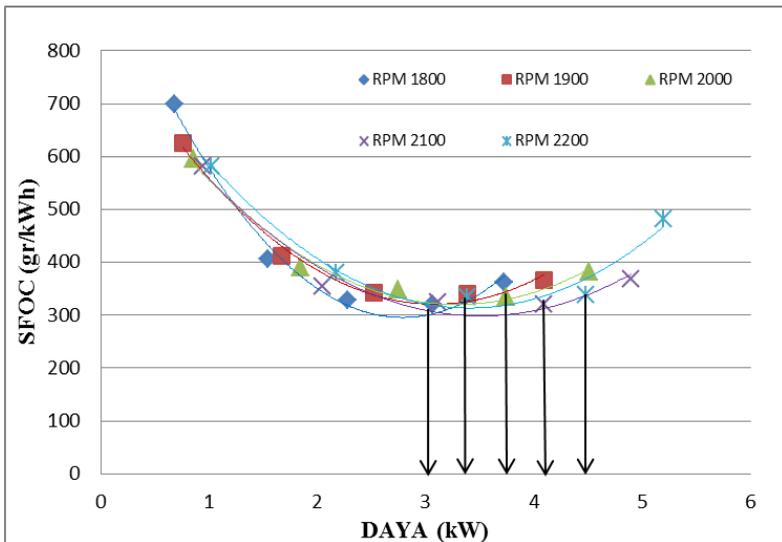
Pada bab ini menjelaskan mengenai manufaktur dari sistem EGR yang nantinya akan dipasang pada motor diesel. Sistem EGR yang dirancang pada penelitian ini menggunakan valve jenis *angle globe valve* dan EGR *cooler* (berpendinginan udara) sebagai pengoptimalan dari sistem EGR. Setelah penambahan EGR *cooler* berpendinginan udara maka sistem EGR diharapkan mampu menurunkan suhu dari gas buang sebelum disirkulasikan kembali kedalam ruang bakar melalui *intake manifold* dimana sistem EGR ini disebut dengan sistem *cold EGR*. Jika manufaktur telah selesai dan dapat dipasang dengan baik pada motor diesel maka sistem EGR berpendinginan udara (*cold EGR*) ini akan dibandingkan dari segi performa, proses pembakaran, dan NO<sub>x</sub> dengan sistem EGR yang tanpa pendinginan (*hot EGR*). Berharap dari eskperimen ini hasil yang akan diperoleh dari sistem *cold EGR* berpendinginan udara ini akan jauh lebih baik dengan sistem EGR yang tanpa pendinginan (*hot EGR*).

#### **4.1 Hasil Data Performa**

Setelah pengambilan data selesai maka data tersebut akan dianalisa dan diolah agar mendapatkan nilai dari power, torsi, sfoc, dan BMEP. Dari hasil data-data yang didapatkan pada tabel data diatas bahwa pengambilan data dilakukan dengan variabel 0, 10, 20, 30% pada bukaan katup yang diatur mass flow ratenya oleh *angle globe valve* yang digunakan pada *hot* dan *cold EGR*. Berdasarkan dengan data yang sudah diambil dengan variabel yang sama maka data tersebut akan dibandingkan dengan EGR berpendinginan udara dan tanpa pendinginan. Dijelaskan pada tabel data pada lampiran untuk penurunan suhu dapat dilihat pada data *cold EGR* ditunjukkan pada bukaan katup EGR 10% terjadi penurunan suhu sebesar 12.8 °C, pada variabel bukaan katup 20% penurunan yang terjadi sebesar 21.5 °C, dan pada

bukaan katup 30% EGR *cooler* mampu menurunkan suhu hingga 34 °C. Selanjutnya untuk menentukan nilai dari power, torsi, dan BMEP yang akan dibandingkan pada sistem *hot* dan *cold* EGR didapatkan nilainya dari 100% *full load* pada SFOC dan akan ditampilkan melalui grafik perbandingan. Dibawah ini akan disajikan grafik SFOC pada sistem *hot* dan *cold* EGR dengan variabel 0, 10, 20, 30% setelah itu baru dicari power, torsi, dan BMEP maksimum dari *full load* 100% SFOC.

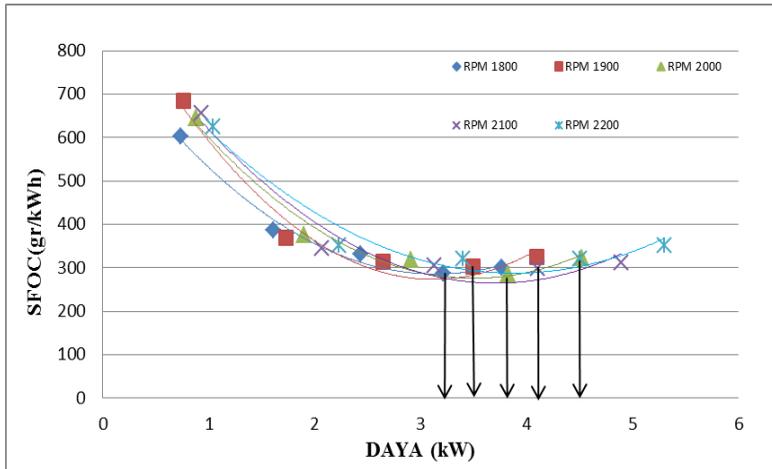
**Keterangan hasil grafik *hot* dan *cold* EGR :**



Gambar 4.1. Performansi SFOC dengan power pada 0% EGR

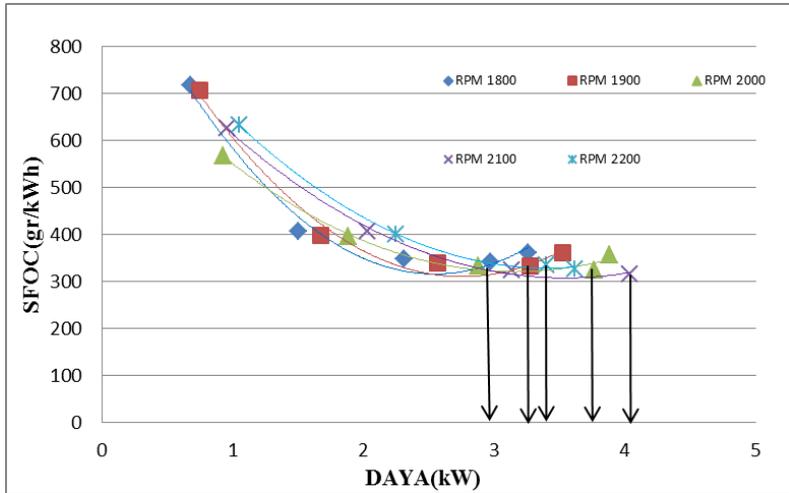
Pada grafik 4.1 dijelaskan bahwa pada bukaan katup 0% EGR *full load* 100% maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah pada RPM 1800 nilai dari sfoc 321.18 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 328.62 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 340.68 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 340.29 (gr/kWh) dan RPM 2200 nilai sfoc yang didapatkan 353.68 (gr/kWh) terdapat

pada masing – masing beban 4000 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold* EGR.



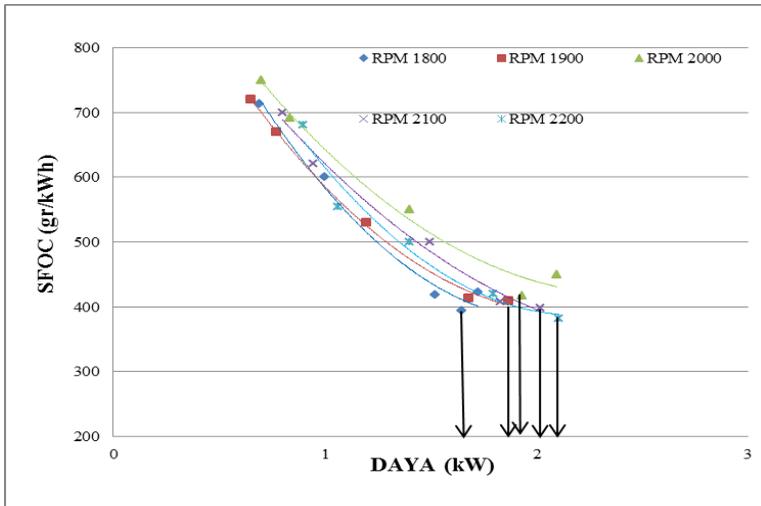
Gambar 4.2. Performansi SFOC dengan power 10% *hot* EGR menggunakan *angle globe valve*

Pada grafik 4.2 menunjukkan bahwa pada bukaan katup 10% *hot* EGR *full load* 100% maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah terdapat pada RPM 1800 nilai sfoc yang dihasilkan 288.32 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 301.99 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 285.92 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 297.94 (gr/kWh) dan RPM 2200 nilai dari sfoc yang didapatkan 320.69 (gr/kWh) terdapat pada masing – masing beban 4000 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold* EGR.



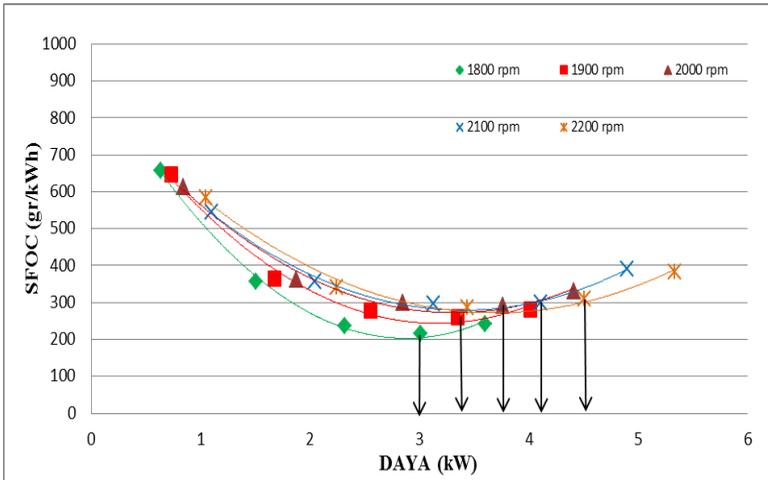
Gambar 4.3. Performansi SFOC dengan power 20% *hot EGR* menggunakan *angle globe valve*

Pada grafik 4.3 menjelaskan bahwa pada bukaan katup 20% *hot EGR full load 100%* maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah terdapat pada RPM 1800 nilai dari sfoc 343.15 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 333.54 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 325.09 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 315.68 (gr/kWh) dan RPM 2200 nilai sfoc yang dihasilkan 326.54 (gr/kWh) terdapat pada beban 4000 watt untuk RPM 1800s/d 2100 sedangkan untuk RPM 2200 hanya mampu dibebani sebesar 3200 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold EGR*.



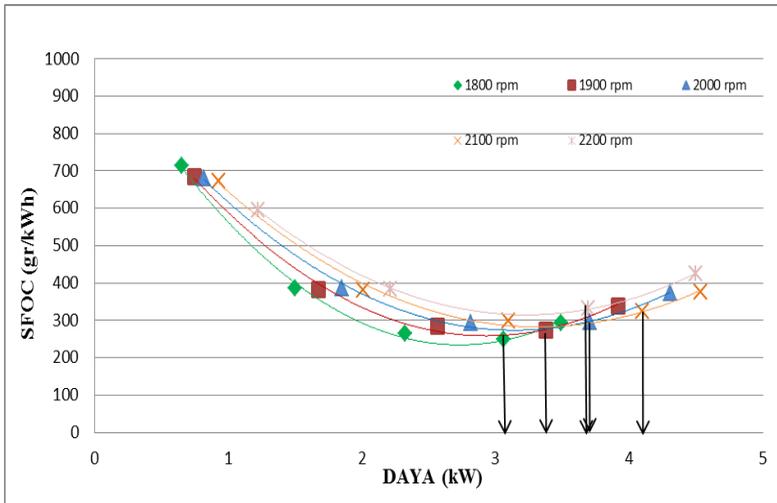
Gambar 4.4. Performansi SFOC dengan power 30% *hot EGR* menggunakan *angle globe valve*

Pada grafik 4.4 dijelaskan bahwa pada bukaan katup 30% *hot EGR full load 100%* maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah terdapat pada RPM 1800 nilai dari sfoc 394.88 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 408.81 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 416.96 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 398.40 dan RPM 2200 nilai dari sfoc yang dihasilkan 382.52 (gr/kWh) terdapat pada beban 2200 watt untuk RPM 1800 s/d 1900 sedangkan untuk RPM 2200 s/d 2100 dibebani sebesar 2000 watt dan untuk RPM 2200 hanya mampu bertahan pada beban 1800 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold EGR*.



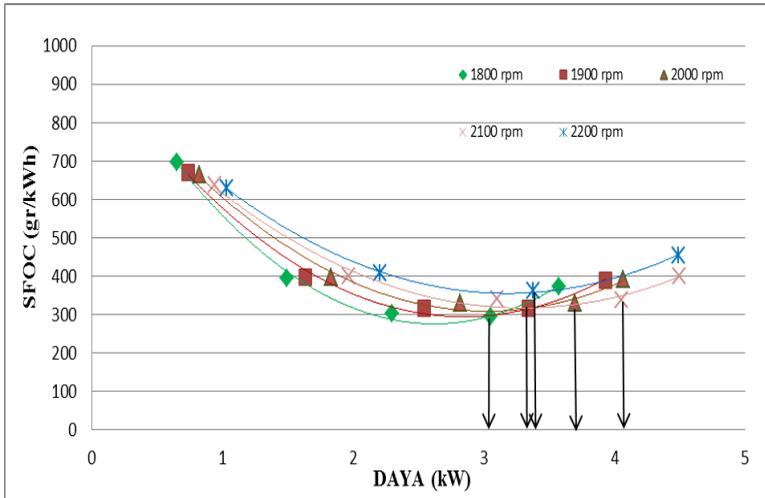
Gambar 4.5. Performansi SFOC dengan power 10% *cold* EGR menggunakan *angle globe valve*

Pada grafik 4.5 menunjukkan bahwa pada bukaan katup 10% *cold* EGR *full load* 100% maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah terdapat pada RPM 1800 nilai dari sfoc 216.02 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 260.99 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 290.36 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 297.88 (gr/kWh) dan RPM 2200 nilai dari sfoc yang dihasilkan 308.72 (gr/kWh) terdapat pada masing – masing beban 4000 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold* EGR.



Gambar 4.6. Performansi SFOC dengan power 20% *cold* EGR menggunakan *angle globe valve*

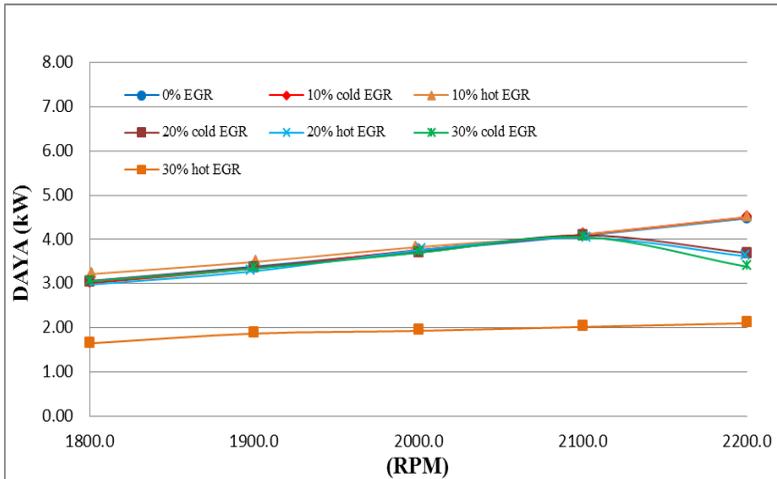
Pada grafik 4.6 dijelaskan bahwa pada bukaan katup 20% *cold* EGR *full load* 100% maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah terdapat pada RPM 1800 nilai dari sfoc 250.10 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 275.31 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 295.05 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 325 (gr/kWh), dan RPM 2200 nilai dari sfoc yang dihasilkan 331.69 (gr/kWh) terdapat pada beban 4000 watt untuk RPM 1800s/d 2100 sedangkan untuk RPM 2200 hanya mampu dibebani sebesar 3000 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold* EGR.



Gambar 4.7. Performansi SFOC dengan power 30% cold EGR menggunakan *angle globe valve*

Pada grafik 4.7 menjelaskan bahwa pada bukaan katup 30% cold EGR full load 100% maksimum SFOC dilihat pada grafik lengkung lembah SFOC terbawah. Didapatkan hasil setelah tarik garis ke bawah terdapat pada RPM 1800 nilai dari sfoc 312.98 (gr/kWh), RPM 1900 nilai dari sfoc 327.01 (gr/kWh), RPM 2000 nilai dari sfoc 285.18 (gr/kWh), RPM 2100 nilai dari sfoc 328.22 (gr/kWh), dan RPM 2200 nilai dari sfoc yang dihasilkan 361.93 (gr/kWh) terdapat pada beban 4000 watt untuk RPM 1800 s/d 2100 sedangkan untuk RPM 2200 hanya mampu bertahan pada beban 3000 watt. Sehingga dengan demikian nilai dari power, torsi, dan BMEP maksimum dapat diketahui dan akan dibandingkan dengan data *hot* dan *cold* EGR.

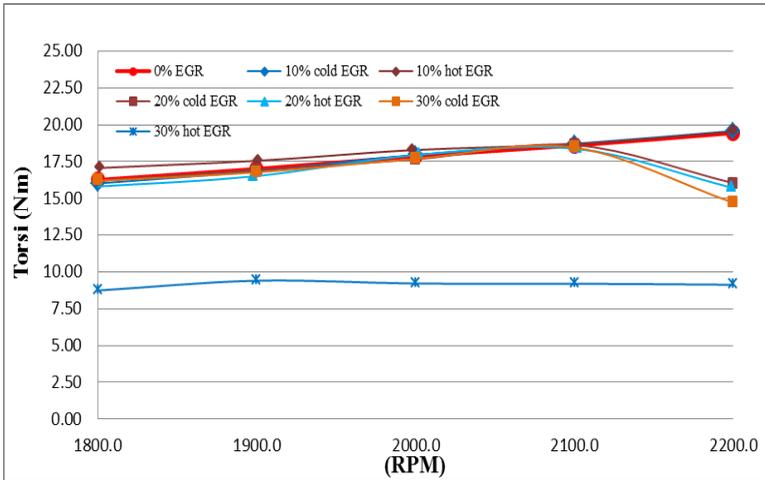
Keterangan hasil perbandingan grafik dari variabel 0, 10, 20, 30% sistem *hot* dan *cold* EGR pada motor diesel :



Gambar 4.8. Performansi power vs RPM pada variasi % EGR menggunakan *hot* dan *cold* EGR

Pada grafik 4.8 menunjukkan bahwa perbandingan nilai power yang dihasilkan ketika motor diesel menggunakan sistem *hot* dan *cold* EGR pada variabel bukaan katup EGR 0, 10, 20, 30%. Untuk bukaan katup 0% power maksimum yang dihasilkan 4.48 (kW) pada RPM 2200, pada bukaan katup 10% *hot* EGR power maksimum yang dihasilkan 4.5 (kW) pada rpm 2200, bukaan katup 20% *hot* EGR *peak power* ada pada rpm 2100 dengan power 4.03 (kW) dan untuk bukaan katup 30% *hot* EGR power yang dihasilkan 2.10 (kW) pada RPM 2200, sedangkan sistem *cold* EGR pada bukaan katup 10% power yang dihasilkan 4.5 (kW) , bukaan katup 20% *cold* EGR power yang dihasilkan 4.09 (kW) pada RPM 2100, dan untuk bukaan 30% *cold* EGR power yang dihasilkan mampu menghasilkan power 4.05 (kW) pada RPM 2100. Sehingga bisa terlihat jelas perbedaan

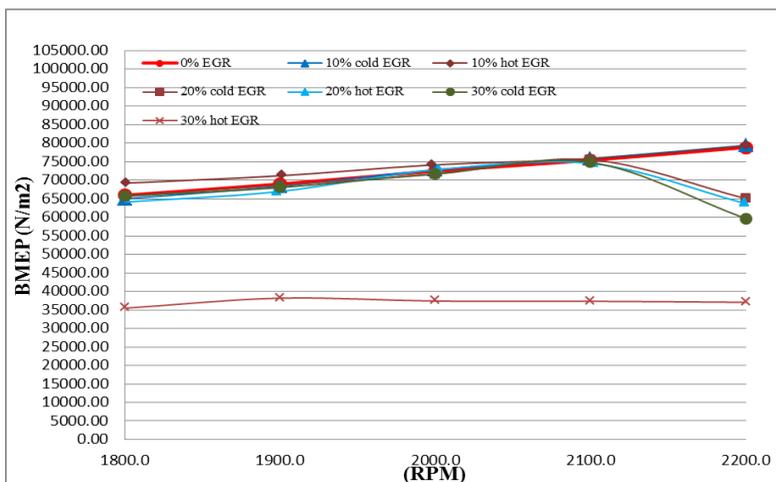
ketika menggunakan variabel bukaan katup 30% power lebih baik trendnya ketika menggunakan sistem *cold* EGR dibandingkan dengan *hot* EGR. Sehingga terlihat jelas bahwa ketika sistem EGR dilengkapi dengan *cooler* hingga menjadi *cold* EGR maka memiliki performa jauh yang lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tanpa pendinginan.



Gambar 4.9. Performansi torsi vs RPM pada variasi %EGR menggunakan *hot* dan *cold* EGR

Pada grafik 4.9 menjelaskan bahwa perbandingan nilai power yang dihasilkan ketika motor diesel menggunakan sistem *hot* dan *cold* EGR pada variabel bukaan katup EGR 0, 10, 20, 30%. Untuk bukaan katup 0% torsi maksimum yang dihasilkan 19.44 (Nm) pada RPM 2200, pada bukaan katup 10% *hot* EGR torsi maksimum yang dihasilkan 19.54 (Nm) pada rpm 2200, bukaan katup 20% *hot* EGR torsi maksimum ada pada rpm 2100 dengan torsi 18.35 (Nm) dan untuk bukaan katup 30% *hot* EGR torsi yang dihasilkan 9.13 (Nm) pada RPM 2200, sedangkan sistem *cold* EGR pada bukaan katup 10% torsi yang dihasilkan 19.58 (Nm) , bukaan katup 20% *cold* EGR torsi yang dihasilkan

18.6 (Nm) pada RPM 2100, dan untuk bukaan 30% *cold* EGR torsi yang dihasilkan mampu menghasilkan 18.45 (Nm) pada RPM 2100. Sehingga bisa terlihat jelas perbedaan ketika menggunakan variabel bukaan katup 30% torsi lebih baik trendnya ketika menggunakan sistem *cold* EGR dibandingkan dengan *hot* EGR. Sehingga terlihat jelas bahwa ketika sistem EGR dilengkapi dengan *cooler* hingga menjadi *cold* EGR maka memiliki performa jauh yang lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tanpa pendinginan.



Gambar 4.10. Performansi BMEP vs RPM pada variasi %EGR menggunakan *hot* dan *cold* EGR

Pada grafik 4.10 menunjukkan bahwa untuk perbandingan nilai power yang dihasilkan ketika motor diesel menggunakan sistem *hot* dan *cold* EGR pada variabel bukaan katup EGR 0, 10, 20, 30%. Untuk bukaan katup 0% BMEP maksimum yang dihasilkan 78865.97 (N/m<sup>2</sup>) pada RPM 2200, pada bukaan katup 10% *hot* EGR BMEP maksimum yang dihasilkan 79295.52 (N/m<sup>2</sup>) pada rpm 2200, bukaan katup 20% *hot* EGR BMEP maksimum ada pada rpm 2100 dengan nilai

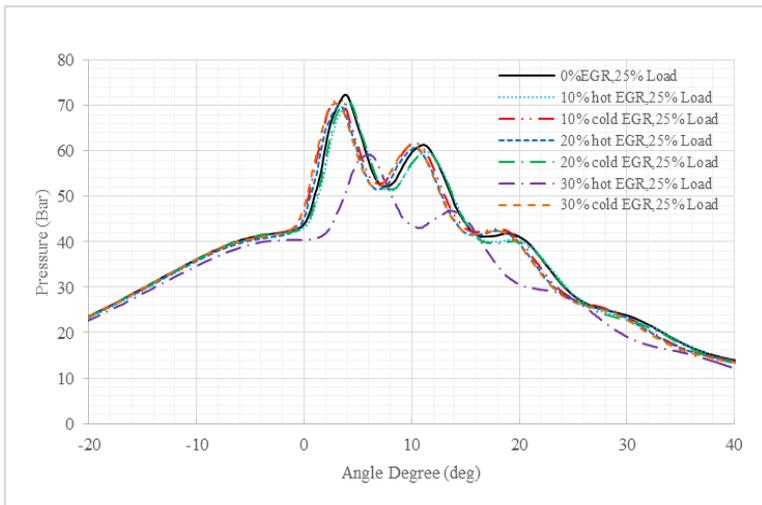
BMEP 74471.79 (N/m<sup>2</sup>) dan untuk bukaan katup 30% *hot* EGR BMEP yang dihasilkan 37053.79 (N/m<sup>2</sup>) pada RPM 2200, sedangkan sistem *cold* EGR pada bukaan katup 10% BMEP yang dihasilkan 79447.24 (N/m<sup>2</sup>) pada RPM 2200, bukaan katup 20% *cold* EGR BMEP yang dihasilkan 18.62 (N/m<sup>2</sup>) pada RPM 2100, dan untuk bukaan 30% *cold* EGR BMEP yang dihasilkan mampu menghasilkan nilai BMEP 18.45 (N/m<sup>2</sup>) pada RPM 2100. Sehingga bisa terlihat jelas perbedaan ketika menggunakan variabel bukaan katup 30% BMEP lebih baik trendnya ketika menggunakan sistem *cold* EGR dibandingkan dengan *hot* EGR. Sehingga terlihat jelas bahwa ketika sistem EGR dilengkapi dengan *cooler* hingga menjadi *cold* EGR maka memiliki performa jauh yang lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tanpa pendinginan.

#### **4.2 Hasil Proses Pembakaran Motor Diesel Menggunakan *hot* dan *cold* EGR**

Variabel titik untuk menentukan data hasil proses pembakaran ditentukan berdasarkan aturan IMO MARPOL Annex VI pada bab *test cycle*. Berdasarkan pada aturan yang digunakan bahwa test cycle berada pada titik RPM 100% motor diesel dengan pembebanan motor sebesar 25%, 50%, 75% dan 100%. Pengambilan data hasil dari proses pembakaran dapat diambil sesuai dengan aturan yang digunakan untuk mengambil data emisi Nox. Pengambilan data hasil proses pembakaran mengacu pada test cycle NOx dikarenakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan proses pembakaran terhadap penurunan kandungan NOx. Sesuai aturan tersebut didapatkan untuk masing-masing variabel posentase EGR terdapat 4 titik pengambilan data. Pada power motor diesel 100% RPM didapat dari hasil eksperimen performa motor diesel yang telah dilakukan dan dianalisa di bab 4.1. Hasil pembebanan 25%, 50%, 75% dan 100% didapatkan dari pembebanan motor diesel tanpa sistem

EGR atau 0% EGR. Dari pembebanan maka dapat digunakan sebagai acuan untuk memberikan pembebanan pada 10%, 20%, dan 30% EGR.

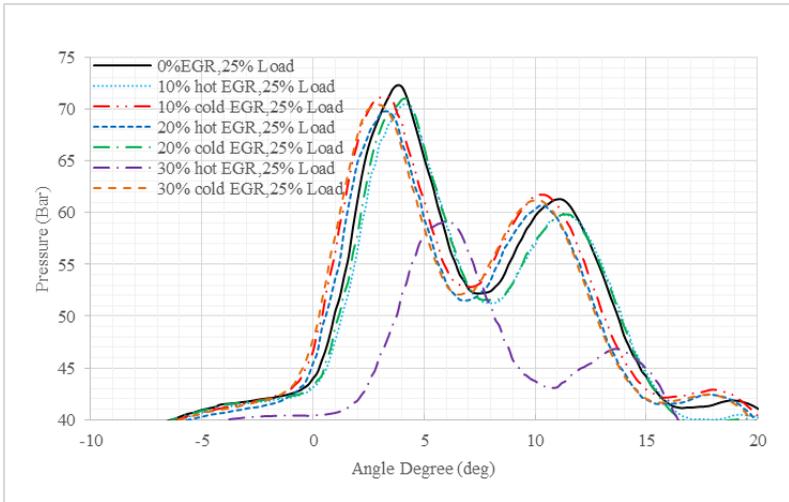
Proses hasil pembakaran yang akan dianalisa meliputi grafik *combustion pressure* dan *rate of heat release*. Hasil proses pembakaran didapat melalui kegiatan eksperimen. Hasil proses pembakaran adalah sebagai berikut :



Gambar 4.11. Grafik *combustion pressure* pada 100% RPM dan 25% load

Grafik 4.11 menunjukkan perbandingan *combustion pressure* pada variasi EGR di titik 100% RPM dengan load sebesar 25%. Grafik 4.11 menunjukkan bahwa penggunaan *hot* dan *cold* EGR mengakibatkan *peak power* bergeser beberapa derajat ke arah kiri. Selain itu penggunaan EGR juga mengakibatkan penurunan *maximum pressure* pada saat proses pembakaran. Gas buang yang dimasukkan kembali ke ruang

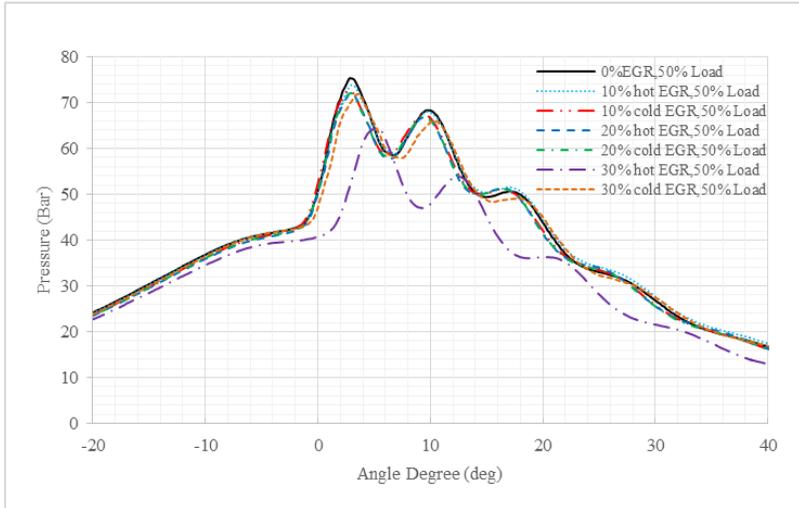
bakar melalui sistem EGR akan meningkatkan konsentrasi gas inert di dalam ruang bakar. Dampaknya, O<sub>2</sub> menjadi sulit bereaksi dengan butir-butir bahan bakar yang diinjeksikan saat proses pembakaran. Pada grafik 4.11 juga terlihat bahwa saat *control combustion period*, grafik dengan prosentase EGR sebesar 10% *hot* dan *cold* berhimpitan dengan grafik 0% EGR, hal ini menunjukkan bahwa power motor tidak terlalu banyak yang hilang akibat penambahan EGR sebesar 10%. Sedangkan grafik dengan prosentase EGR sebesar 20% terlihat bahwa *hot* dan *cold* EGR berada dibawah grafik 0% EGR, dan untuk grafik prosentase EGR 30% *hot* EGR mengalami penurunan power yang cukup drastis dibandingkan dengan *cold* EGR yang masih tidak berada jauh dibawah 0 % EGR, hal ini menunjukkan bahwa pada sistem *hot* EGR tidak mampu hingga prosentase 30% EGR dan untuk *cold* EGR prosentase 30% masih mampu dibebani. Dengan demikian penggunaan *cold* EGR tidak terlalu berdampak buruk bagi performa engine ketika di berikan variasi bukaan katup 10, 20, 30% EGR walaupun pada proses pembakaran kehilangan *pressure* yang menyebabkan performa motor diesel menurun.



Gambar 4.12. Grafik *maximum combustion pressure* pada 100% RPM dan 25% load

Berdasarkan grafik ditunjukkan *zooming* pada *combustion pressure* di 100% RPM dan 25% load. Pendetailan dilakukan untuk mengetahui titik *maximum pressure* pada variasi penggunaan EGR di motor diesel. Pada 0% EGR *peak pressure* terdapat pada 3.8 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 72,25 Bar. Pada 10% hot EGR *peak pressure* terdapat pada 4.2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 70,55 Bar. Pada 20% hot EGR *peak pressure* terdapat pada 3,2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 69,79 Bar. Pada 30% hot EGR *peak pressure* terdapat pada 6.05 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 59 Bar. Pada 10% cold EGR *peak pressure* terdapat pada 3.25 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 71.10 Bar. Pada 20% cold EGR *peak pressure* terdapat pada 4.2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure*

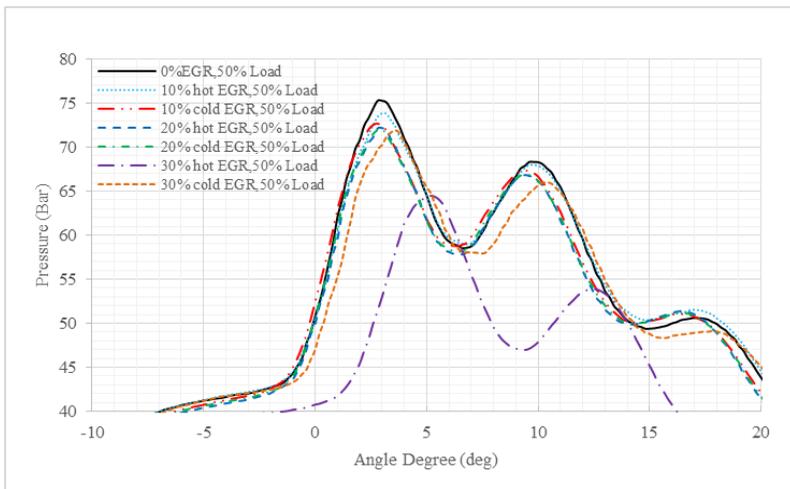
sebesar 70.90 Bar. Pada 30% *cold* EGR *peak pressure* terdapat pada 2.8 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 70.25 Bar.



Gambar 4.13. Grafik *combustion pressure* pada 100% RPM dan 50% load

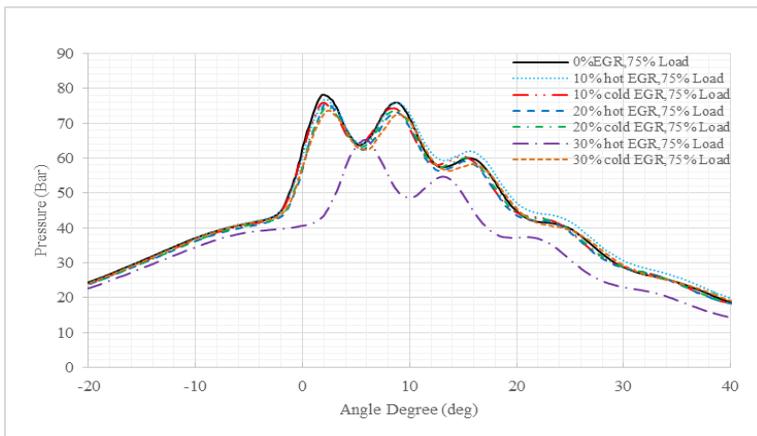
Grafik 4.13 menjelaskan perbandingan *combustion pressure* pada variasi EGR di titik 100% RPM dengan load sebesar 50%. Grafik 4.13 menunjukkan bahwa penggunaan *hot* dan *cold* EGR mengakibatkan *peak power* bergeser beberapa derajat ke arah kiri. Selain itu penggunaan EGR juga mengakibatkan penurunan *maximum pressure* pada saat proses pembakaran. Gas buang yang dimasukkan kembali ke ruang bakar melalui sistem EGR akan meningkatkan konsentrasi gas inert di dalam ruang bakar. Dampaknya, O<sub>2</sub> menjadi sulit bereaksi dengan butir-butir bahan bakar yang diinjeksikan saat proses pembakaran. Pada grafik 4.13 juga terlihat bahwa saat

*control combustion period*, grafik dengan prosentase EGR sebesar 10% *hot* dan *cold* berhimpitan dengan grafik 0% EGR, hal ini menunjukkan bahwa power motor tidak terlalu banyak yang hilang akibat penambahan EGR sebesar 10%. Sedangkan grafik dengan prosentase EGR sebesar 20% terlihat bahwa *hot* dan *cold* EGR berada dibawah grafik 0% EGR, dan untuk grafik prosentase EGR 30% *hot* EGR mengalami penurunan power yang cukup drastis dibandingkan dengan *cold* EGR yang masih tidak berada jauh dibawah 0 % EGR, hal ini menunjukkan bahwa pada sistem *hot* EGR tidak mampu hingga prosentase 30% EGR dan untuk *cold* EGR prosentase 30% masih mampu dibebani. Dengan demikian penggunaan *cold* EGR tidak terlalu berdampak buruk bagi performa engine ketika di berikan variasi bukaan katup 10, 20, 30% EGR walaupun pada proses pembakaran kehilangan *pressure* yang menyebabkan performa motor diesel menurun.



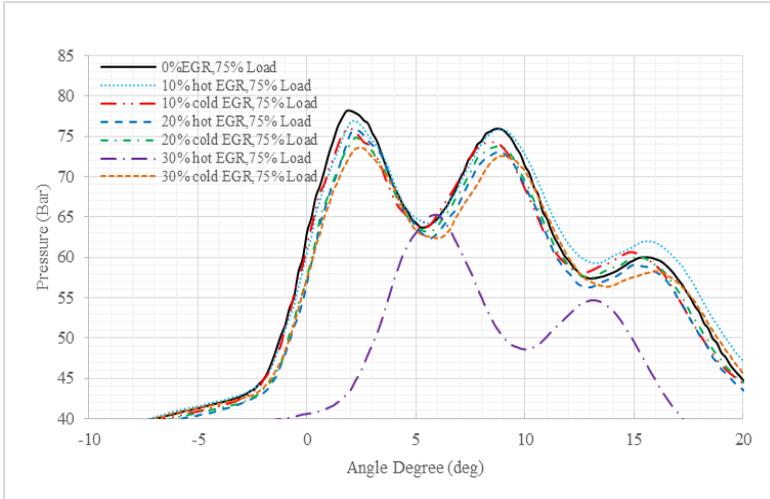
Gambar 4.14. Grafik *maximum combustion pressure* pada 100% RPM dan 50% load

Berdasarkan grafik ditunjukkan *zooming* pada *combustion pressure* di 100% RPM dan 50% load. Pendetailan dilakukan untuk mengetahui titik *maximum pressure* pada variasi penggunaan EGR di motor diesel. Pada 0% EGR *peak pressure* terdapat pada 2.8 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 75,25 Bar. Pada 10% hot EGR *peak pressure* terdapat pada 3.2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 73.95 Bar. Pada 20% hot EGR *peak pressure* terdapat pada 3 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 72.01 Bar. Pada 30% hot EGR *peak pressure* terdapat pada 5.3 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 64.35 Bar. Pada 10% cold EGR *peak pressure* terdapat pada 2.8 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 72.85 Bar. Pada 20% cold EGR *peak pressure* terdapat pada 3 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 72 Bar. Pada 30% cold EGR *peak pressure* terdapat pada 3.6 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 71.95 bar.



Gambar 4.15. Grafik *combustion pressure* pada 100% RPM dan 75% load

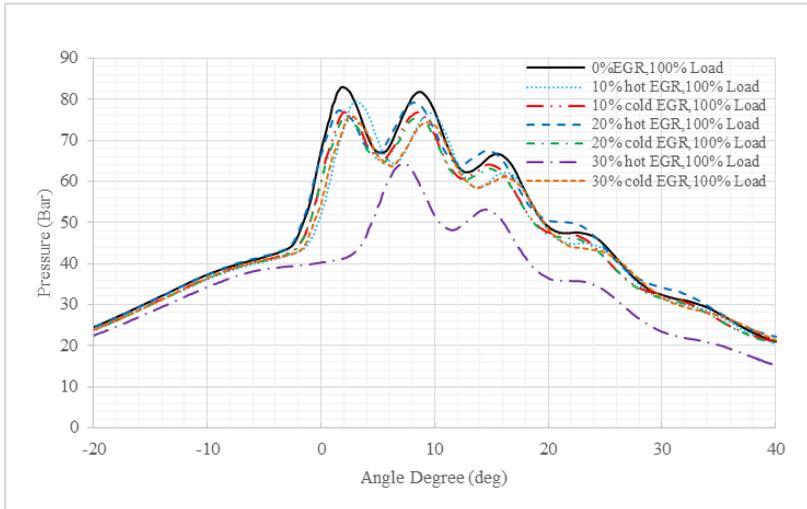
Grafik 4.15 menunjukkan perbandingan *combustion pressure* pada variasi EGR di titik 100% RPM dengan *load* sebesar 75%. Grafik 4.15 menunjukkan bahwa penggunaan *hot* dan *cold* EGR mengakibatkan *peak power* bergeser beberapa derajat ke arah kiri. Selain itu penggunaan EGR juga mengakibatkan penurunan *maximum pressure* pada saat proses pembakaran. Gas buang yang dimasukkan kembali ke ruang bakar melalui sistem EGR akan meningkatkan konsentrasi gas inert di dalam ruang bakar. Dampaknya, O<sub>2</sub> menjadi sulit bereaksi dengan butir-butir bahan bakar yang diinjeksikan saat proses pembakaran. Pada grafik 4.15 juga terlihat bahwa saat control combustion period, grafik dengan prosentase EGR sebesar 10% *hot* dan *cold* berhimpitan dengan grafik 0% EGR, hal ini menunjukkan bahwa power motor tidak terlalu banyak yang hilang akibat penambahan EGR sebesar 10%. Sedangkan grafik dengan prosentase EGR sebesar 20% terlihat bahwa *hot* dan *cold* EGR berada dibawah grafik 0% EGR, dan untuk grafik prosentase EGR 30% *hot* EGR mengalami penurunan power yang cukup drastis dibandingkan dengan *cold* EGR yang masih tidak berada jauh dibawah 0 % EGR, hal ini menunjukkan bahwa pada sistem *hot* EGR tidak mampu hingga prosentase 30% EGR dan untuk *cold* EGR prosentase 30% masih mampu dibebani. Dengan demikian penggunaan *cold* EGR tidak terlalu berdampak buruk bagi performa engine ketika di berikan variasi bukaan katup 10, 20, 30% EGR walaupun pada proses pembakaran kehilangan *pressure* yang menyebabkan performa motor diesel menurun.



Gambar 4.16. Grafik *maximum combustion pressure* pada 100% RPM dan 75% load

Berdasarkan grafik ditunjukkan *zooming* pada *combustion pressure* di 100% RPM dan 75% load. Pendetailan dilakukan untuk mengetahui titik *maximum pressure* pada variasi penggunaan EGR di motor diesel. Pada 0% EGR *peak pressure* terdapat pada 2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 78.10 Bar. Pada 10% *hot EGR peak pressure* terdapat pada 2.1 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 77.05 Bar. Pada 20% *hot EGR peak pressure* terdapat pada 2.2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 75.90 Bar. Pada 30% *hot EGR peak pressure* terdapat pada 4.8 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 65.03 Bar. Pada 10% *cold EGR peak pressure* terdapat pada 2.05 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 76 Bar. Pada 20% *cold EGR peak pressure* terdapat pada 2.2 derajat setelah TMA dengan nilai

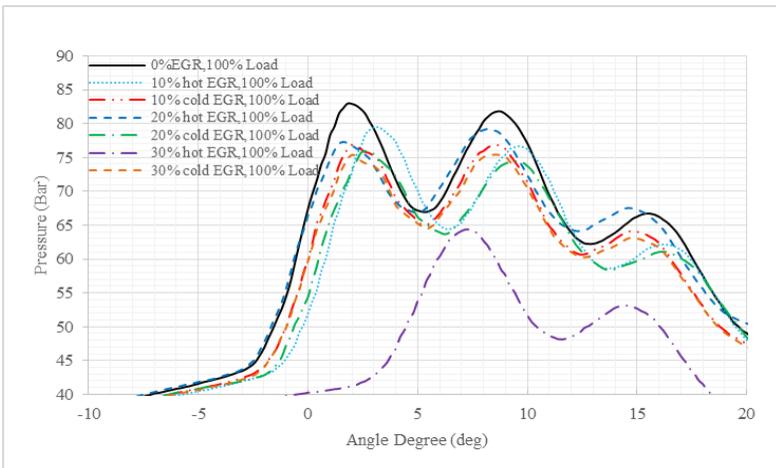
*pressure* sebesar 74.95 Bar. Pada 30% *cold EGR peak pressure* terdapat pada 5.8 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 65.15 Bar.



Gambar 4.17. Grafik *combustion pressure* pada 100% RPM dan 100% *load*

Grafik 4.17 menjelaskan perbandingan *combustion pressure* pada variasi EGR di titik 100% RPM dengan *load* sebesar 100%. Grafik 4.17 menunjukkan bahwa penggunaan *hot* dan *cold EGR* mengakibatkan *peak power* bergeser beberapa derajat ke arah kiri. Selain itu penggunaan EGR juga mengakibatkan penurunan *maximum pressure* pada saat proses pembakaran. Gas buang yang dimasukkan kembali ke ruang bakar melalui sistem EGR akan meningkatkan konsentrasi gas inert di dalam ruang bakar. Dampaknya, O<sub>2</sub> menjadi sulit bereaksi dengan butir-butir bahan bakar yang diinjeksikan saat proses pembakaran. Pada grafik 4.17 juga terlihat bahwa saat

control combustion period, grafik dengan prosentase EGR sebesar 10% *hot* dan *cold* berhimpitan dengan grafik 0% EGR, hal ini menunjukkan bahwa power motor tidak terlalu banyak yang hilang akibat penambahan EGR sebesar 10%. Sedangkan grafik dengan prosentase EGR sebesar 20% terlihat bahwa *hot* dan *cold* EGR berada dibawah grafik 0% EGR, dan untuk grafik prosentase EGR 30% *hot* EGR mengalami penurunan power yang cukup drastis dibandingkan dengan *cold* EGR yang masih tidak berada jauh dibawah 0 % EGR, hal ini menunjukkan bahwa pada sistem *hot* EGR tidak mampu hingga prosentase 30% EGR dan untuk *cold* EGR prosentase 30% masih mampu dibebani. Dengan demikian penggunaan *cold* EGR tidak terlalu berdampak buruk bagi performa engine ketika di berikan variasi bukaan katup 10, 20, 30% EGR walaupun pada proses pembakaran kehilangan *pressure* yang menyebabkan performa motor diesel menurun.



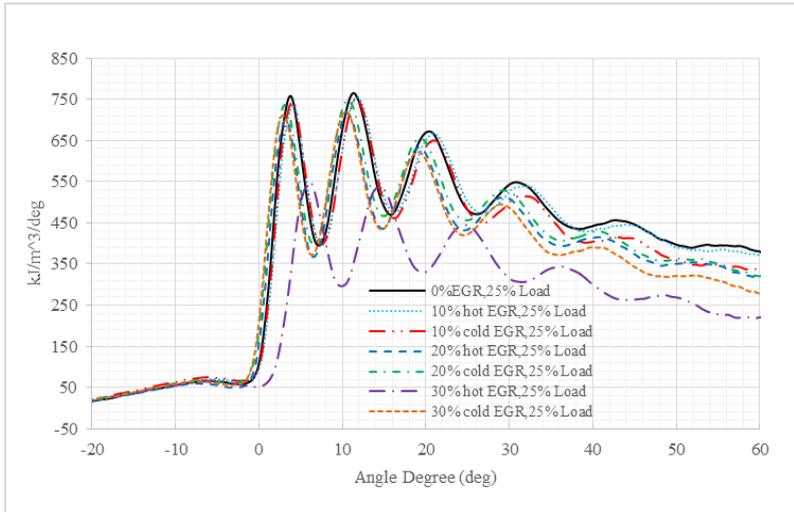
Gambar 4.18. Grafik *maximum combustion pressure* pada 100% RPM dan 100% load

Berdasarkan grafik ditunjukkan *zooming* pada *combustion pressure* di 100% RPM dan 100% *load*. Pendetailan dilakukan untuk mengetahui titik *maximum pressure* pada variasi penggunaan EGR di motor diesel. Pada 0% EGR *peak pressure* terdapat pada 2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 83 Bar. Pada 10% *hot* EGR *peak pressure* terdapat pada 3 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 79.25 Bar. Pada 20% *hot* EGR *peak pressure* terdapat pada 1.6 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 77 Bar. Pada 30% *hot* EGR *peak pressure* terdapat pada 7.2 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 64.25 Bar. Pada 10% *cold* EGR *peak pressure* terdapat pada 2.05 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 77 Bar. Pada 20% *cold* EGR *peak pressure* terdapat pada 2.05 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 76.05 Bar. Pada 30% *cold* EGR *peak pressure* terdapat pada 2.9 derajat setelah TMA dengan nilai *pressure* sebesar 72.05 Bar.

Berdasarkan grafik *combustion pressure* diatas, didapatkan sebuah kesimpulan dengan adanya penambahan beban akan mengakibatkan *peak power* bergerak kearah kiri. Selain itu diketahui bahwa pada penggunaan sistem EGR dapat mempengaruhi *peak power* motor diesel dan perubahan grafik *pressure* selama *premix combustion period*, *control combustion* dan *after burning period*.

Hal yang dilakukan selain analisa terhadap *combustion pressure*, analisa lain yang dilakukan didalam proses pembakaran adalah analisa terhadap *rate of heat release* (ROHR). ROHR ialah rata-rata pelepasan panas dari bahan bakar dan udara selama proses pembakaran. Pada penelitian ini akan dianalisa dampak dari penggunaan sistem hot dan cold EGR terhadap ROHR motor diesel. Grafik *rate of heat release* (ROHR) yang terbentuk selama

proses pengambilan data pada variasi EGR adalah sebagai berikut:



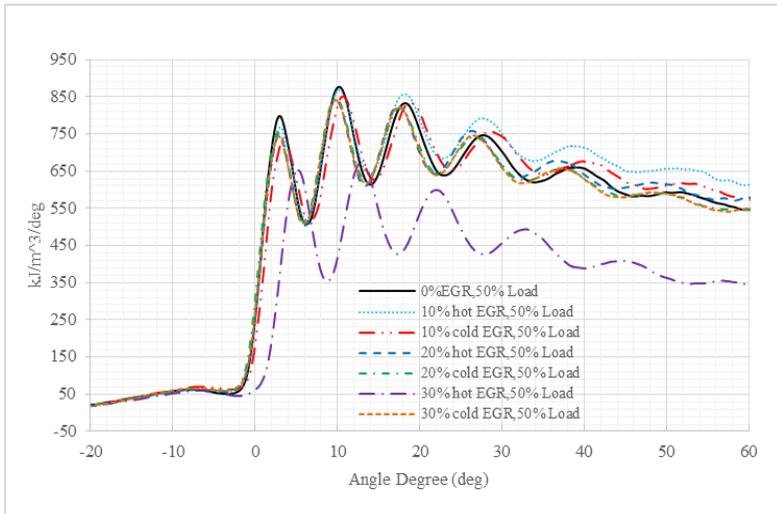
Gambar 4.19. Grafik *rate of heat release* (ROHR) pada 100% RPM dan 25% load

Grafik 4.19 menjelaskan mengenai perbandingan *rate of heat release* (ROHR) pada 100% RPM dan 25% load. Grafik tersebut menunjukkan perbandingan perubahan proses pelepasan panas atau heat release saat sistem EGR diaplikasikan ke motor diesel. Pada 0% EGR atau kondisi mesin tanpa sistem EGR, titik awal heat release antara bahan bakar dan udara terjadi pada  $4,4^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada saat penambahan prosentase EGR sebesar 10% menggunakan *hot* EGR awal heat release terjadi pada  $5^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada kondisi 10% *cold* EGR awal heat release terjadi pada  $4,8^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 20% *hot* EGR awal heat release terjadi pada  $7,4^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 20% *cold* EGR awal heat release terjadi pada  $5,2^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 30% *hot* EGR awal heat release terjadi pada  $5,2^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 30% *cold* EGR awal heat release terjadi

pada  $6,8^\circ$  CA sebelum TMA. Dari hasil tersebut menjelaskan bahwa penggunaan EGR dan penambahan *cooler* pada sistem EGR di kondisi 100% RPM dan 25% *load* dapat mengakibatkan awal heat release semakin bergerak kearah kiri dari derajat putaran poros engkol. Titik awal proses heat release, juga dapat digunakan untuk menganalisa kapan titik awal dan titik akhir terjadinya proses ignition delay. Dengan demikian, dapat dianalisa seberapa panjang durasi ignition delay pada proses pembakaran.

Sedangkan kondisi *peak* ROHR pada 0% EGR terjadi pada  $11,2^\circ$  CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $762,3 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 10% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $11,6^\circ$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $750,4 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 10% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $11,8^\circ$  CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $750 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 20% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $10,6^\circ$  CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $688,4 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 20% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $11,9^\circ$ CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $748,05 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 30% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $13,8^\circ$  CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $528,35 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 30% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $10,05^\circ$  CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $712,05 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa penambahan EGR sebesar 10% mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat kearah kanan dari kondisi 0% EGR sedangkan penambahan EGR sebesar 20% mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat kearah kiri dari kondisi 0% dan untuk 30% *cold* EGR mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat ke kiri dari kondisi 0%. Sedangkan untuk 30% *hot* EGR *peak* ROHR bergerak jauh kekanan dari kondisi 0% dan *peak* ROHR yang dihasilkan cukup rendah. Oleh karenanya, dengan penambahan sistem pendinginan udara pada sistem EGR menyebabkan sistem EGR beroperasi dapat lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tidak menggunakan

pendinginan. Hal ini terlihat jelas pada grafik ROHR diatas bahwa ketika 30% *cold* EGR *peak* ROHR yang dihasilkan masih cukup baik dibandingkan dengan 30% *hot* EGR.



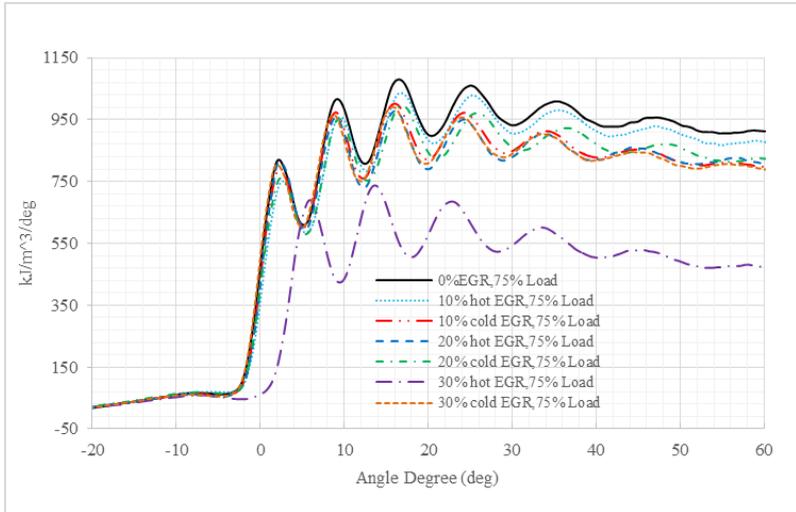
Gambar 4.20. Grafik *rate of heat release* (ROHR) pada 100% RPM dan 50% *load*

Grafik 4.20 menjelaskan mengenai perbandingan *rate of heat release* (ROHR) pada 100% RPM dan 50% *load*. Grafik tersebut menunjukkan perbandingan perubahan proses pelepasan panas atau heat release saat sistem EGR diaplikasikan ke motor diesel. Pada 0% EGR atau kondisi mesin tanpa sistem EGR, titik awal heat release antara bahan bakar dan udara terjadi pada 7,4° CA sebelum TMA. Pada saat penambahan prosentase EGR sebesar 10% menggunakan *hot* EGR awal heat release terjadi pada 6,4° sebelum TMA. Pada kondisi 10% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 5,8° CA sebelum TMA. Pada 20% *hot* EGR awal heat release terjadi pada 6,2° CA sebelum TMA. Pada 20% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 5,6° CA sebelum TMA.

Pada 30% *hot* EGR awal heat release terjadi pada 5,8° CA sebelum TMA. Pada 30% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 5,4° CA sebelum TMA. Dari hasil tersebut menjelaskan bahwa penggunaan EGR dan penambahan *cooler* pada sistem EGR di kondisi 100% RPM dan 50% *load* dapat mengakibatkan awal heat release semakin bergerak ke arah kanan dari derajat putaran poros engkol. Titik awal proses heat release, juga dapat digunakan untuk menganalisa kapan titik awal dan titik akhir terjadinya proses ignition delay. Dengan demikian, dapat dianalisa seberapa panjang durasi ignition delay pada proses pembakaran.

Sedangkan kondisi *peak* ROHR pada 0% EGR terjadi pada 10°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 874,5 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 10% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada 10,2°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 870 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 10% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada 10,3°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 860 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 20% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada 9,6°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 844 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 20% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada 10°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 849,5 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 30% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada 12,5°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 680 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 30% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada 9,8°CA setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 830,3 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa penambahan EGR sebesar 10% mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat ke arah kanan dari kondisi 0% EGR sedangkan penambahan EGR sebesar 20% mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat ke arah kiri dari kondisi 0% dan untuk 30% *cold* EGR mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat ke kiri dari kondisi 0%. Sedangkan untuk 30% *hot* EGR *peak* ROHR bergerak jauh ke kanan dari kondisi 0% dan *peak* ROHR yang dihasilkan cukup rendah. Oleh karenanya, dengan penambahan sistem pendinginan udara pada sistem EGR

menyebabkan sistem EGR beroperasi dapat lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tidak menggunakan pendinginan. Hal ini terlihat jelas pada grafik ROHR diatas bahwa ketika 30% *cold* EGR *peak* ROHR yang dihasilkan masih cukup baik dibandingkan dengan 30% *hot* EGR.



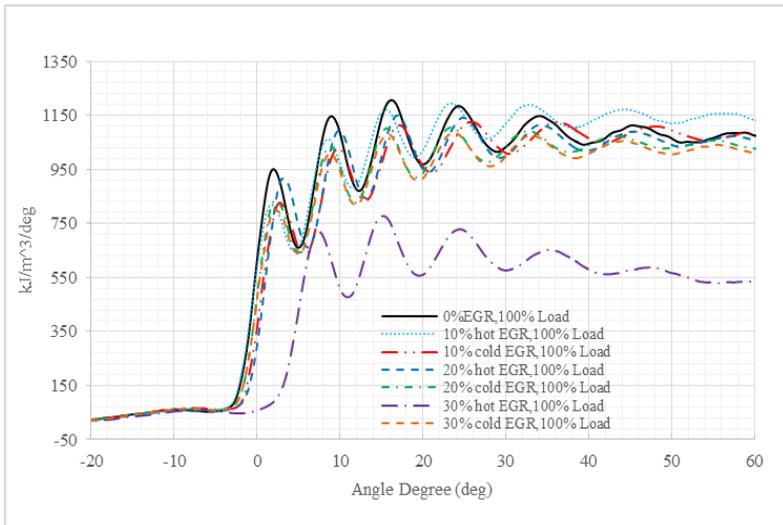
Gambar 4.21. Grafik *rate of heat release* (ROHR) pada 100% RPM dan 75% load

Grafik 4.21 menjelaskan mengenai perbandingan *rate of heat release* (ROHR) pada 100% RPM dan 75% load. Grafik tersebut menunjukkan perbandingan perubahan proses pelepasan panas atau heat release saat sistem EGR diaplikasikan ke motor diesel. Pada 0% EGR atau kondisi mesin tanpa sistem EGR, titik awal heat release antara bahan bakar dan udara terjadi pada 6,2°C sebelum TMA. Pada saat penambahan prosentase EGR sebesar 10% menggunakan *hot* EGR awal heat release terjadi pada 6,6°C sebelum TMA. Pada kondisi 10% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 6,8°C sebelum TMA. Pada 20% *hot*

EGR awal heat release terjadi pada  $8,6^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 20% *cold* EGR awal heat release terjadi pada  $6,6^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 30% *hot* EGR awal heat release terjadi pada  $4,8^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada 30% *cold* EGR awal heat release terjadi pada  $8,4^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Dari hasil tersebut menjelaskan bahwa penggunaan EGR dan penambahan *cooler* pada sistem EGR di kondisi 100% RPM dan 75% *load* dapat mengakibatkan awal heat release semakin bergerak kearah kiri dari derajat putaran poros engkol. Titik awal proses heat release, juga dapat digunakan untuk menganalisa kapan titik awal dan titik akhir terjadinya proses ignition delay. Dengan demikian, dapat dianalisa seberapa panjang durasi ignition delay pada proses pembakaran.

Sedangkan kondisi *peak* ROHR pada 0% EGR terjadi pada  $15,6^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $1053,7 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 10% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $15,8^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $1007,4 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 10% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $16^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $980,05 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 20% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $15,2^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $960,6 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 20% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $16,2^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $975,8 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 30% *hot* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $14^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $740,7 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Pada 30% *cold* EGR, *peak* ROHR terjadi pada  $15,8^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar  $970,35 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ . Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa penambahan EGR sebesar 10% mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat kearah kanan dari kondisi 0% EGR sedangkan penambahan EGR sebesar 20% mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat kearah kiri dari kondisi 0% dan untuk 30% *cold* EGR mengakibatkan *peak* ROHR bergerak beberapa derajat ke kiri dari kondisi 0%. Sedangkan untuk 30% *hot* EGR *peak* ROHR bergerak jauh kekanan dari kondisi 0% dan

*peak ROHR* yang dihasilkan cukup rendah. Oleh karenanya, dengan penambahan sistem pendinginan udara pada sistem EGR menyebabkan sistem EGR beroperasi dapat lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tidak menggunakan pendinginan. Hal ini terlihat jelas pada grafik ROHR diatas bahwa ketika 30% *cold* EGR *peak ROHR* yang dihasilkan masih cukup baik dibandingkan dengan 30% *hot* EGR.



Gambar 4.22. Grafik *rate of heat release (ROHR)* pada 100% RPM dan 100% load

Grafik 4.22 menjelaskan mengenai perbandingan *rate of heat release (ROHR)* pada 100% RPM dan 100% load. Grafik tersebut menunjukkan perbandingan perubahan proses pelepasan panas atau heat release saat sistem EGR diaplikasikan ke motor diesel. Pada 0% EGR atau kondisi mesin tanpa sistem EGR, titik awal heat release antara bahan bakar dan udara terjadi pada  $9,2^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA. Pada saat penambahan prosentase EGR sebesar 10% menggunakan *hot* EGR awal heat release terjadi

pada 8°C sebelum TMA. Pada kondisi 10% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 7,8°C sebelum TMA. Pada 20% *hot* EGR awal heat release terjadi pada 7,8°C sebelum TMA. Pada 20% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 7,8°C sebelum TMA. Pada 30% *hot* EGR awal heat release terjadi pada 5°C sebelum TMA. Pada 30% *cold* EGR awal heat release terjadi pada 8,6°C sebelum TMA. Dari hasil tersebut menjelaskan bahwa penggunaan EGR dan penambahan *cooler* pada sistem EGR di kondisi 100% RPM dan 100% *load* dapat mengakibatkan awal heat release semakin bergerak kearah kiri dari derajat putaran poros engkol. Titik awal proses heat release, juga dapat digunakan untuk menganalisa kapan titik awal dan titik akhir terjadinya proses *ignition delay*. Dengan demikian, dapat dianalisa seberapa panjang durasi *ignition delay* pada proses pembakaran.

Sedangkan kondisi *peak ROHR* pada 0% EGR terjadi pada 15,8°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 1190,2 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 10% *hot* EGR, *peak ROHR* terjadi pada 14,8°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 1152,6 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 10% *cold* EGR, *peak ROHR* terjadi pada 16,8°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 1125,6 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 20% *hot* EGR, *peak ROHR* terjadi pada 16,2°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 1149,8 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 20% *cold* EGR, *peak ROHR* terjadi pada 15,8°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 1110,3 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 30% *hot* EGR, *peak ROHR* terjadi pada 15,2°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 760,7KJ/m<sup>3</sup>/deg. Pada 30% *cold* EGR, *peak ROHR* terjadi pada 16°C setelah TMA dengan nilai pelepasan energi sebesar 1025,5 KJ/m<sup>3</sup>/deg. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa penambahan EGR sebesar 10% mengakibatkan *peak ROHR* bergerak beberapa derajat kearah kanan dari kondisi 0% EGR sedangkan penambahan EGR sebesar 20% mengakibatkan *peak ROHR* bergerak beberapa derajat kearah kiri dari kondisi 0% dan untuk 30% *cold* EGR mengakibatkan *peak ROHR*

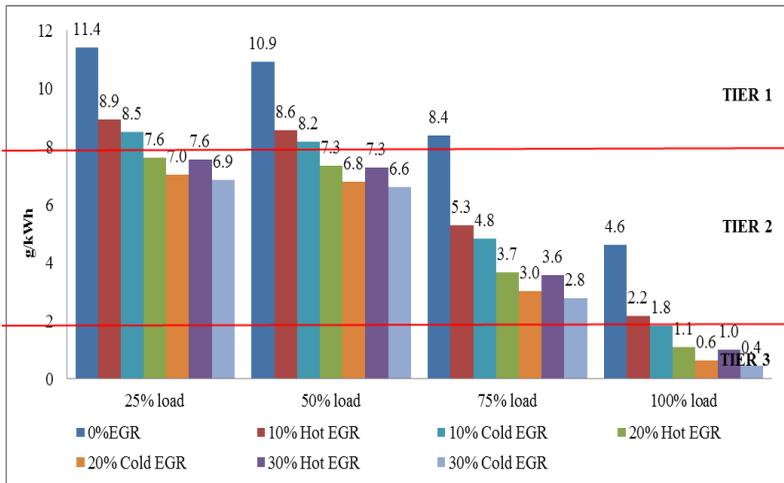
bergerak beberapa derajat kekiri dari kondisi 0%. Sedangkan untuk 30% *hot EGR peak* ROHR bergerak jauh kekanan dari kondisi 0% dan *peak* ROHR yang dihasilkan cukup rendah. Oleh karenanya, dengan penambahan sistem pendinginan udara pada sistem EGR menyebabkan sistem EGR beroperasi dapat lebih baik dibandingkan dengan sistem EGR yang tidak menggunakan pendinginan. Hal ini terlihat jelas pada grafik ROHR diatas bahwa ketika 30% *cold EGR peak* ROHR yang dihasilkan masih cukup baik dibandingkan dengan 30% *hot EGR*.

### **4.3 Hasil Pengambilan Uji Emisi Nox Pada Motor Diesel Menggunakan *Hot dan Cold EGR***

Hasil gas buang yang dikeluarkan oleh motor diesel sangat berbahaya bagi lingkungan karena mengandung banyak racun dan partikel jahat lainnya yang dapat menyebabkan polusi udara semakin meningkat. Salah satu diantaranya hasil gas buang motor diesel tersebut adalah NOx. Emisi NOx terbentuk selama proses pembakaran pada motor diesel berlangsung didalam combustion chamber. Partikel NOx dapat terbentuk karena oksigen dan nitrogen bebas bertemu pada kondisi temperatur ruang bakar yang sangat tinggi. Hasil emisi gas buang NOx telah diatur pada peraturan pemerintah no 29 tahun 2014 pasal 30. Pada peraturan tersebut menjelaskan bahwa untuk motor diesel dibawah 130 kW mengacu pada peraturan *International Maritime Organisation* (IMO) yang telah mengeluarkan mengenai standar ambang batas emisi NOx. IMO menjelaskan tentang aturan ambang batas emisi telah dijelaskan pada MARPOL Annex VI. Sehingga untuk mengetahui ambang batas emisi pada motor diesel masuk atau tidaknya dapat membaca literatur pada aturan MARPOL Annex VI.

Pada studi kasus digunakan Exhaust Gas Recirculation (EGR) sebagai salah satu teknologi yang digunakan untuk mereduksi emisi NOx. EGR akan mensirkulasikan kembali gas buang kedalam ruang bakar, sehingga tekanan dan suhu pada saat proses pembakaran menjadi menurun. Pada penelitian skripsi ini perlu dilakukan eksperimen terhadap pengujian kadar dari

kandungan NO<sub>x</sub> setelah motor diesel dimodifikasi dengan penambahan sistem EGR dengan pengoptimalan menggunakan EGR berpendinginan udara. Hasil emisi kandungan NO<sub>x</sub> yang diperoleh dari proses eksperimen terhadap motor diesel dijelaskan pada gambar 4.23 dengan diagram batang dibawah ini.



Gambar 4.23. Diagram batang kadar NO<sub>x</sub> pada kondisi 100% RPM dan variasi beban.

Gambar 4.23 menunjukkan diagram batang kadar NO<sub>x</sub> motor diesel setelah dimodifikasi dengan menambahkan sistem EGR dan dioptimalkan dengan EGR berpendinginan udara. Grafik diatas juga menjelaskan perbedaan saat penggunaan sistem EGR pada variabel *hot* dan *cold* EGR. Titik pengambilan data emisi menggunakan standar dari *Appendix Test Cycle, Marpol Annex VI*. Titik pengambilan data dilakukan pada 100% RPM dengan 4 variasi beban yang berbeda yaitu beban 25%, 50%, 75% dan 100%.

Kandungan NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 0% EGR atau tepatnya kondisi motor diesel standar tanpa ada penambahan sistem EGR mulai dari beban 25% - 100% secara bertahap adalah

11,4 g/kWh, 10,9 g/kWh, 8,4 g/kWh dan 4,6 g/kWh. Saat kondisi beban 25% dan 50% emisi NO<sub>x</sub> tidak masuk dalam kualifikasi TIER 1, sehingga dianggap sangat berbahaya. Saat beban motor berada pada 75%, kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 1. Sedangkan saat kondisi beban 100% pada 0% EGR masuk dalam kategori TIER 2. Seperti yang telah dijelaskan pada BAB II sebelumnya bahwa kualifikasi TIER 1 adalah emisi NO<sub>x</sub> antara 7,7 sampai 9,8 g/kWh pada putaran lebih dari 2000RPM. Kualifikasi TIER 2 adalah emisi NO<sub>x</sub> motor diesel antara 1,96 sampai 7,7 g/kWh pada putaran 2000RPM. Kualifikasi TIER 3 adalah emisi NO<sub>x</sub> motor diesel yang kurang dari 1,96 g/kWh pada putaran lebih dari 2000RPM.

Kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 10% *hot* EGR mulai dari beban 25%-100% secara berturut-turut adalah 8,9 g/kWh, 8,6 g/kWh, 5,3 g/kWh dan 2,2 g/kWh. Saat kondisi beban 25% dan 50% emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kualifikasi TIER 1. Sedangkan saat beban motor berada pada 75% dan 100%, kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 2.

Kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 10% *cold* EGR mulai dari beban 25%-100% secara berturut-turut adalah 8,5 g/kWh, 8,2 g/kWh, 4,8 g/kWh dan 1,8 g/kWh. Saat kondisi beban 25% dan 50% emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kualifikasi TIER 1. Sedangkan saat beban motor berada pada 75% kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 2 dan untuk beban motor 100% kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 3.

Kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 20% *hot* EGR mulai dari beban 25%-100% secara berturut-turut adalah 7,6 g/kWh, 7,3 g/kWh, 3,7 g/kWh dan 1,1 g/kWh. Saat beban motor berada pada 25%, 50% dan 75%, kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 2. Sedangkan saat beban motor berada pada 100%, kadar emisi NO<sub>x</sub> berada pada kualifikasi TIER 3.

Kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 20% *cold* EGR mulai dari beban 25%-100% secara berturut-turut adalah 7,0 g/kWh, 6,8 g/kWh, 3,0 g/kWh dan 0,6 g/kWh. Saat kondisi beban 25%, emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kualifikasi TIER 2. Saat

beban motor berada pada 50% dan 75%, kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 2. Sedangkan saat beban motor berada pada 100%, kadar emisi NO<sub>x</sub> berada pada kualifikasi TIER 3.

Kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 30% *hot* EGR mulai dari beban 25%-100% secara berturut-turut adalah 7,6 g/kWh, 7,3 g/kWh, 3,6 g/kWh dan 1,0 g/kWh. Saat beban motor berada pada 25%, 50% dan 75%, kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 2. Sedangkan saat beban motor berada pada 100%, kadar emisi NO<sub>x</sub> berada pada kualifikasi TIER 3.

Kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada 30% *cold* EGR mulai dari beban 25%-100% secara berturut-turut adalah 6,9 g/kWh, 6,6 g/kWh, 2,8 g/kWh dan 0,4 g/kWh. Saat kondisi beban 25%, emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kualifikasi TIER 2. Saat beban motor berada pada 50% dan 75%, kadar emisi NO<sub>x</sub> masuk dalam kategori standar TIER 2. Sedangkan saat beban motor berada pada 100%, kadar emisi NO<sub>x</sub> berada pada kualifikasi TIER 3.

Dari grafik 4.23 menunjukkan bahwa penggunaan teknologi EGR yang dihitung menurut data statistik berdasarkan titik sampel pengambilan data bahwa dengan prosentase sebesar 10% variabel *hot* EGR motor diesel mampu masuk dalam ambang batas yang diizinkan oleh TIER 1 pada kondisi beban 25% dan 50%. Sedangkan pada beban 75% dan 100% bukaan katup 10% *hot* EGR berada pada TIER 2. Untuk penggunaan EGR sebesar 20% *hot* EGR motor diesel mampu masuk dalam ambang batas emisi yang diizinkan pada TIER 2 pada kondisi beban 25%, 50%, dan 75%. Pada beban 100% motor diesel emisi yang dihasilkan semakin baik karena mampu masuk dalam ambang batas yang diizinkan oleh TIER 3. Pada prosentase 30% *hot* EGR motor diesel mampu masuk dalam ambang batas emisi yang diizinkan pada TIER 2 pada kondisi beban 25%, 50%, dan 75%. Pada beban 100% motor diesel emisi yang dihasilkan semakin baik karena mampu masuk dalam ambang batas yang diizinkan oleh TIER 3 sama halnya dengan penggunaan prosentase 20% *hot* EGR.

Sedangkan untuk *cold* EGR pada variasi 10% bukaan katup motor diesel mampu masuk dalam ambang batas yang diizinkan oleh TIER 1 pada kondisi beban 25% dan 50%. Sedangkan pada beban 75% dan 100% bukaan katup 10% *cold* EGR berada pada TIER 2. Untuk penggunaan bukaan katup 20% *cold* EGR motor diesel mampu masuk dalam batang emisi yang diizinkan pada TIER 2 pada kondisi beban 25%, 50%, dan 75%. Pada beban 100% motor diesel emisi yang dihasilkan semakin baik karena mampu masuk dalam ambang batas yang diizinkan oleh TIER 3. Pada prosentase 30% *cold* EGR motor diesel mampu masuk dalam batang emisi yang diizinkan pada TIER 2 pada kondisi beban 25%, 50%, dan 75%. Pada beban 100% motor diesel emisi yang dihasilkan semakin baik karena mampu masuk dalam ambang batas yang diizinkan oleh TIER 3 sama halnya dengan penggunaan prosentase 20% *cold* EGR. Dengan demikian, ditarik kesimpulan penggunaan *cold* EGR dengan berpendinginan udara sangat direkomendasikan karena mampu memperbaiki nilai fungsi EGR sebagai alat untuk mereduksi emisi NO<sub>x</sub>. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan sistem EGR dengan berpendinginan udara mampu mereduksi hingga 52,7% pada beban motor 100%.

#### **4.4 Pembahasan**

Pada sub bab ini menjelaskan secara keseluruhan mengenai pembahasan umum dari hasil performa, proses pembakaran dan hasil emisi dari motor diesel yang berupa kadar NO<sub>x</sub> yang mana sebelumnya telah dijelaskan pada sub bab 4.1, 4.2 dan 4.3. Sub bab pada pembahasan ini merupakan suatu analisa yang menghasilkan sebuah grafik yang diperoleh dari tahap-tahap yang telah dilakukan pada proses eksperimen di motor diesel menggunakan sistem EGR dengan variasi prosentase bukaan katup EGR menggunakan Angle Globe Valve. Sedangkan untuk variabel sistem EGR digunakan variabel sistem *hot* dan *cold* EGR pada motor diesel. Analisa yang didapatkan dari hasil eksperimen akan dibandingkan dengan dasar teori yang sudah ada

terkait dengan sistem EGR dan hasil-hasil yang sudah ada lainnya pada referensi penelitian sebelumnya.

Berdasarkan hasil eksperimen didapatkan grafik SFOC seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 sampai 4.7. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa penggunaan variabel EGR yang menggunakan pendinginan udara (*cold* EGR) sebesar 10% mampu memberikan nilai SFOC yang lebih baik dibandingkan dengan EGR tanpa pendinginan udara (*hot* EGR) pada performa motor diesel. Pada penggunaan 10% *hot* EGR, nilai SFOC berkurang sekitar 10,3% sedangkan penggunaan 10% *cold* nilai SFOC berkurang sekitar 14,62% dari nilai SFOC pada 0% EGR. Namun pada grafik 20% *hot* EGR mampu menurunkan nilai SFOC 12,06%, sedangkan penggunaan 20% *cold* EGR nilai SFOC berkurang 8,6% dari nilai SFOC 0% EGR. dan 30% *hot* EGR nilai SFOC menjadi meningkat, sedangkan 30% *cold* EGR nilai SFOC berkurang 7,62%. Mengacu pada penelitian sebelumnya dijelaskan bahwa penambahan prosentase EGR pada motor diesel akan mengakibatkan peningkatan nilai SFOC dan performa dari motor diesel menjadi turun. Tetapi jika dilakukannya perbandingan terhadap hasil eksperimen pada penelitian ini untuk pengaturan prosentase EGR yang terlalu banyak akan mengakibatkan nilai SFOC meningkat dan power motor menjadi turun. Sesuai pada hasil eksperimen yang telah dilakukan bahwa pada 10% EGR mengakibatkan nilai SFOC menjadi lebih baik dan power pada motor menjadi meningkat dibandingkan dengan motor diesel yang tanpa menggunakan sistem EGR. Untuk nilai SFOC dapat semakin baik jika prosentase EGR dibawah 10% dikarenakan motor diesel yang digunakan pada eksperimen ini masih menggunakan sistem penginjeksian bahan bakar konvensional, sehingga mesin tidak mampu mengontrol *air fuel ratio* (AFR) selama proses pembakaran. Dengan demikian penambahan *exhaust gas* pada EGR akan menyempurnakan AFR hanya pada batas maksimal 10% EGR. Sedangkan untuk nilai SFOC pada 20% dan 30% *cold* EGR masih mampu berada dibawah 0% EGR, sedangkan untuk

20% *hot* EGR masih mampu dibawah 0% EGR, tetapi untuk 30% *hot* EGR nilai SFOC berada diatas 0% EGR diakibatkan karena gas buang yang bersifat *innert gas* terlalu banyak yang dimasukkan kedalam ruang bakar sehingga mengubah nilai AFR menjadi campuran kaya.

Hasil dari performa selain nilai SFOC meliputi grafik power, torsi dan BMEP pada masing-masing variasi prosentase EGR dan juga variabel penggunaan *hot* dan *cold* EGR pada motor diesel. Hasil dari grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.8 sampai 4.10. Pada grafik tersebut secara visual menunjukkan bahwa penggunaan prosentase 10% EGR tidak menunjukkan perubahan trend grafik secara signifikan, bahkan terlihat jelas pada RPM awal terlihat penggunaan 10% *hot* dan *cold* EGR menyebabkan nilai power, torsi dan BMEP menjadi meningkat dibandingkan dengan 0% EGR. Beberapa analisa muncul dari hasil grafik penggunaan prosentase 10% EGR bahwa dengan penambahan 10% EGR pada motor diesel akan merubah nilai AFR menjadi lebih baik sehingga proses pembakaran menjadi lebih sempurna. Sedangkan pada penggunaan 20% *hot* dan *cold* EGR menunjukkan bahwa terjadi drop power, torsi, dan BMEP setelah 2100 RPM. Tetapi penggunaan prosentase 30% *hot* EGR tidak mampu memberikan power maksimal pada motor diesel sehingga performa dari motor mengalami penurunan yang cukup drastis. Sehingga pada variabel motor diesel pada penggunaan *hot* EGR hanya mampu hingga penambahan 20% bukaan katup pada EGR dan untuk 30% *cold* EGR power yang dihasilkan ketika melihat hasil eksperimen dan dijadikan trend grafik masih berada tidak jauh dari 0% EGR hanya berkurang sekitar 10,6% nilai power dari motor diesel. Sehingga berdasarkan hasil eksperimen pada sistem EGR yang dilengkapi dengan EGR berpendinginan udara mampu memberikan variasi prosentase bukaan katup hingga 30%. Pada eksperimen yang telah dilakukan jika dibandingkan dengan hasil analisa dari penelitian-penelitian sebelumnya dimana penggunaan EGR akan mengakibatkan

penurunan nilai power, torsi, BMEP serta peningkatan nilai dari SFOC.

Selain pengambilan nilai dari performa, hasil eksperimen lainnya pada penelitian ini dilakukan juga pengamatan terhadap proses pembakaran motor diesel yang akan dianalisa melalui grafik meliputi *combustion pressure* dan *heat release (ROHR)*. Untuk grafik proses pembakaran ditunjukkan pada gambar 4.11 sampai 4.22. Berdasarkan dari hasil eksperimen didapatkan analisa mengenai proses pembakaran bahwa dengan penambahan prosentase EGR akan mengakibatkan *peak pressure* pada saat pembakaran menjadi lebih rendah dibandingkan dengan motor diesel yang tidak menggunakan EGR atau 0%EGR. Hal ini serupa dengan beberapa referensi yang digunakan dan beberapa teori dari penelitian-penelitian sebelumnya yang menerangkan bahwa penambahan EGR akan mengakibatkan *combustion pressure* menjadi lebih rendah. Perubahan *combustion pressure* ini terjadi dikarenakan gas yang disirkulasikan kembali oleh sistem EGR bersifat inert dimana mampu mengikat kandungan oksigen ( $O_2$ ). Pada dasarnya oksigen berperan penting dalam proses pembakaran bisa jadi dikatakan sebagai komponen utama pada proses pembakaran, sehingga apabila oksigen terperangkap oleh gas inert maka proses pembakaran menjadi tidak sempurna. Hal inilah yang mengakibatkan *combustion pressure* menjadi turun.

Menggunakan atau mensirkulasikan kembali gas buang kedalam ruang bakar yang memiliki sifat *inert gas* dapat merubah proses pelepasan panas selama proses pembakaran terjadi pada motor diesel. Perlu kita ketahui bahwa proses pelepasan panas lebih sering dikenal dengan istilah *heat release*. Penggunaan gas buang yang bersifat *inert* selama proses pembakaran akan mengakibatkan *heat release* menjadi menurun. Pada grafik hasil eksperimen ditunjukkan bahwa grafik *heat release* pada saat penambahan prosentase EGR mengakibatkan awal pelepasan panas terjadi lebih lambat dibandingkan dengan motor diesel tanpa menggunakan EGR (0%EGR). Selain itu rata-rata pelepasan panas pada motor diesel yang menggunakan sistem

EGR (ROHR) menjadi menurun, hal ini terlihat ketika grafik telah mencapai *peak heat release*. Hasil dari eksperimen sesuai dengan hasil dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sejak dahulu bahwa menyatakan dengan penambahan prosentase EGR akan menyebabkan perubahan pada *heat release* yang jika kita lihat dengan kasat mata seakan-akan menjadi menurun.

Menurunnya *peak pressure* dapat dilihat pada grafik *combustion pressure* dimana ini dijadikan sebuah indikasi bahwa penggunaan sistem EGR mempengaruhi kinerja dari motor diesel. Diketahui bahwa secara fungsi sistem EGR merupakan alat sederhana yang digunakan oleh beberapa peneliti sebagai alat teknologi pereduksi  $\text{NO}_x$ . Metode yang digunakan pada sistem ini adalah dengan memotong *peak combustion pressure* sehingga temperatur saat proses pembakaran menjadi menurun. Dengan menurunnya temperatur proses pembakaran maka pembentukan nitrogen dan oksigen dapat diminimalisir atau dapat dikatakan tidak dapat terbentuk. Hasil dari uji emisi kadar  $\text{NO}_x$  pada eksperimen ini setelah penambahan sistem EGR yang dilengkapi dengan pendinginan udara ditunjukkan pada gambar 4.23. Menyatakan bahwa grafik tersebut terlihat secara signifikan penggunaan dari sistem EGR mampu mereduksi kadar  $\text{NO}_x$  hingga 44,2% pada penggunaan 20% *hot* EGR berada pada ambang batas TIER 2 dan untuk *cold* EGR mampu mereduksi kadar dari  $\text{NO}_x$  hingga 52,7% pada prosentase 30% bukaan katup EGR berada pada ambang batas TIER 3. Hal ini serupa dengan dasar teori dan beberapa referensi dari peneliti-peneliti terdahulu yang menjelaskan bahwa penggunaan EGR mampu mereduksi kadar  $\text{NO}_x$  dengan baik.

Dari beberapa eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian ini, menunjukkan bahwa penggunaan EGR yang dilengkapi dengan EGR *cooler* (berpendinginan udara) akan memberikan dampak yang lebih baik pada motor diesel sehingga mampu memperbaiki nilai performa, proses pembakaran dan kadar emisi  $\text{NO}_x$ . Dibandingkan dengan sistem yang tanpa memiliki pendinginan udara memiliki beberapa batasan yang

perlu diperhatikan saat penggunaan sistem EGR pada motor diesel, yaitu penggunaan EGR hanya dibatasi hingga 20% saja karena massa gas inert yang terlalu banyak akan mengakibatkan power motor diesel menjadi drop dan akan merugikan pemakai. Sedangkan untuk sistem EGR yang berpendinginan udara (*cold* EGR) mampu hingga variasi bukaan katup 30% EGR diikuti dengan nilai performa tidak berada jauh dengan 0% EGR dan 30% *cold* EGR ini paling optimal dalam menurunkan kadar emisi NOx hingga 18,6 g/kWh atau sebesar 52,7%.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan pada sistem *hot* dan *cold* EGR yang dipasangkan pada motor diesel dengan itu maka saya sebagai penulis menarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Penggunaan *hot* EGR hanya mampu hingga variasi 20% bukaan katup. Ketika bukaan katup 30% *hot* EGR performa dari motor diesel menjadi drop. Berdasarkan dari data yang diambil terlihat perbedaan bahwa penggunaan *cold* EGR mampu hingga 30% bukaan katup EGR. Meningkatnya performa motor diesel pada sistem *cold* EGR ditunjukkan pada bukaan katup 10% pada RPM 1800-2200 dimana grafik trend masih terus meningkat dan belum menunjukkan performa drop. Namun, ketika penggunaan sistem EGR pada prosentase 20 dan 30% performa pada motor diesel mengalami penurunan dan *peak power* ditunjukkan pada RPM 2100.
- b. Penggunaan EGR menghasilkan *peak pressure* proses pembakaran lebih rendah. Penggunaan EGR mengakibatkan penurunan nilai *heat release*.
- c. Pengoptimalan sistem EGR dengan menambahkan pendinginan udara (*cold* EGR) kadar emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pada motor diesel dapat berkurang hingga 18,6 g/kWh (52,7%). Secara garis besar kadar emisi motor diesel yang telah menggunakan EGR mampu diperbaiki hingga masuk pada spesifikasi TIER 2. Sedangkan pada kondisi 30%EGR dengan 100% *load* kadar emisi mampu direduksi hingga masuk ambang batas yang diizinkan oleh TIER 3.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan ada beberapa saran yang akan disampaikan seperti :

1. Pada sistem EGR berpendinginan udara (*cold* EGR) dan tanpa pendinginan (*hot* EGR) dapat dilakukan pengujian dengan bahan bakar yang berbeda untuk mengetahui perubahan performa, combustion process, dan NO<sub>x</sub> yang lebih baik.
2. Peneliti juga dapat menggunakan pendinginan lain selain udara untuk mengetahui prosentase hasil pendinginan yang lebih baik ketika diaplikasikan pada sistem EGR sehingga mendapatkan hasil yang maksimal pada heat realease dan uji emisi NO<sub>x</sub>.
3. Peneliti selanjutnya dapat meneliti sistem EGR dengan menggunakan jenis valve yang berbeda dengan yang sudah ada dipasaran lalu ditinjau berdasarkan dari segi performa, proses pembakaran, dan juga penurunan kandungan dari NO<sub>x</sub>.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A.K., Singh, S.K., Sinha, S., dan Shukla, M.K., 2004. *Effect of EGR on the exhaust gas temperatur and exhaust. Sadhana*, 29, 275–284.
- Darmana, E.2013. *Pengaruh methanol kadar tinggi terhadap performa dan emisi gas buang mesin dengan sistem EGR panas*. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik. UNDIP. Semarang.
- IMO, Annex VI MARPOL 73/78, 1998. *Regulation for the Prevention of Air Pollution from Ships and NOx Technical Code*. International Maritime Organization. London.
- Legowo, 2011. *Pengaruh Cold EGR terhadap performa mesin diesel dengan menggunakan bahan bakar campuran minyak jarak dengan solar*. Jurusan Teknik Perkapalan. UNDIP. Semarang.
- Nursuhud, D. dan Pudjanarsa, A. 2006. *Mesin Konversi Energi*. Yogyakarta
- PM No 29 pasal 30. 2014. Pencegahan Pencemaran Lingkungan Maritim. Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia.
- Rajan, K. dan Kumar, S.K.R. 2009. *The effect of exhaust gas recirculation (EGR) on the performance and emission characteristics of diesel engine with sunflower oil methyl ester*. *International Journal of Chemical Engineering Research*, 1, p: 31 – 39.

- Saichaitanya dan Vamsidurgamohan, 2013. *Impact of cold and hot exhaust gas recirculation on diesel engine*. GMR Institute of Engineering and Technology. India
- Soratha S., Harilal, Rahhod P., Pravin, 2012. *Effect Of Exhaust Gas Recirculation(EGR) On NOx Emission From C.I. Engine*. Review Study. India.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Hasil Data Performa

Pada lampiran ini disajikan hasil dari pengambilan data untuk mencari nilai dari performa. Setelah data ini diolah maka akan dibandingkan antara sistem EGR yang berpendinginan udara (*cold* EGR) dan tanpa pendinginan (*hot* EGR) dengan melihat dari sisi power, torsi, sfoc, dan BMEP yang dihasilkan dari motor diesel tersebut yang hasilnya nanti akan dibuat sebuah grafik perbandingan untuk melihat hasil yang lebih baik antara EGR berpendinginan udara dengan EGR yang tanpa pendinginan. Untuk memperoleh hasil dari performa tersebut maka dibutuhkan variabel pendukung seperti RPM Engine, RPM generator, nilai  $\cos \theta$ , arus, voltage, dan volume bahan bakar yang dibutuhkan untuk mendapatkan hasil dari sfoc. Hasil – hasil dari data *cold* EGR dan *hot* EGR yang telah diambil sebagai berikut :

### 4.13 Tabel Data 0% EGR menggunakan bahan bakar pertamina dex

RPM	Beban	RPM Engine	RPM Generator	Volt	Arus	Cos $\Phi$	Bahan Bakar		Power (Kw)	Torsi (Nm)	BMEP (N/m <sup>2</sup> )	SFOC (gr/kWh)
							Volume	t(s)				
1800	1000	1801	1308	183	3,5	0,9	10ml	64,2	0,682	3,616	14668,61	699,292
1800	2000	1802	1310	193	7,5	0,9	10ml	49	1,539	8,159	33099,77	405,808
1800	3000	1801	1299	190	11,2	0,9	10ml	41	2,280	12,096	49072,72	327,309
1800	4000	1800	1296	189	15,1	0,9	10ml	31,1	3,063	16,260	65964,68	321,182
1800	5000	1800	1292	185	18,7	0,9	10ml	22,7	3,725	19,772	80210	361,884
1900	1000	1902	1381	198	3,6	0,9	10ml	64,600	0,759	3,811	15461,5	624,312
1900	2000	1901	1372	202	7,7	0,9	10ml	44,500	1,666	8,371	33959,84	412,846
1900	3000	1902	1370	201	11,7	0,9	10ml	35,500	2,523	12,675	51420,83	341,600
1900	4000	1902	1370	201	15,7	0,9	10ml	26,500	3,386	17,009	69000,6	341,026
1900	5000	1902	1360	196	19,3	0,9	10ml	20,400	4,089	20,539	83320,56	366,862
2000	1000	2002	1449	211	3,8	0,9	10ml	60,1	0,856	4,086	16575,83	594,678
2000	2000	2000	1443	215	8	0,9	10ml	42,6	1,842	8,802	35705,89	389,867
2000	3000	2000	1439	213	12	0,9	10ml	29,3	2,746	13,116	53208,1	380,383
2000	4000	2002	1440	215	16,2	0,9	10ml	24,4	3,742	17,860	72455,05	335,099
2000	5000	2002	1435	208	20,1	0,9	10ml	17,8	4,508	21,513	87274,06	381,353
2100	1000	2102	1527	226	3,9	0,9	10ml	56,1	0,938	4,262	17290,67	581,686
2100	2000	2100	1513	230	8,3	0,9	10ml	42,2	2,048	9,317	37795,9	354,095
2100	3000	2100	1507	231	12,5	0,9	10ml	30,3	3,110	14,148	57396,64	324,749
2100	4000	2101	1506	227	16,7	0,9	10ml	23,3	4,087	18,587	75404,12	321,306
2100	5000	2102	1505	220	20,6	0,9	10ml	17	4,892	22,236	90205,1	367,945
2200	1000	2201	1590	239	4	0,9	10ml	51,4	1,023	4,440	18011,03	582,069
2200	2000	2201	1589	239	8,5	0,9	10ml	33,7	2,175	9,440	38297,52	417,518
2200	3000	2202	1583	244	12,9	0,9	10ml	26,5	3,384	14,682	59562,97	341,237
2200	4000	2202	1581	242	17,2	0,9	10ml	20,2	4,481	19,440	78865,97	338,094
2200	5000	2200	1580	230	21	0,9	10ml	12,2	5,198	22,573	91573,06	482,554

#### 4.14 Tabel data 10% *hot* EGR menggunakan bahan bakar pertamina dex

RPM	Beban	RPM Engine	RPM Generator	Volt	Arus	Cos $\Phi$	Bahan Bakar		Power (Kw)	Torsi (Nm)	BMEP (N/m <sup>2</sup> )	SFOC (gr/kWh)
							Volume	t(s)				
1800	1000	1800	1302	191	3,6	0,9	10ml	69	0,735	3,900	15819,858	603,632
1800	2000	1801	1300	198	7,6	0,9	10ml	49	1,611	8,547	34674,733	387,591
1800	3000	1800	1295	199	11,4	0,9	10ml	38	2,437	12,935	52476,621	330,426
1800	4000	1801	1289	196	15,2	0,9	10ml	33	3,217	17,066	69234,800	288,233
1800	5000	1801	1285	188	18,5	0,9	10ml	27	3,767	19,986	81078,210	300,825
1900	1000	1902	1376	197	3,6	0,9	10ml	59	0,758	3,806	15439,314	684,551
1900	2000	1899	1369	207	7,8	0,9	10ml	48	1,731	8,709	35329,639	368,291
1900	3000	1902	1366	208	11,8	0,9	10ml	37	2,641	13,268	53823,550	313,121
1900	4000	1901	1362	205	15,8	0,9	10ml	29	3,494	17,560	71237,971	301,998
1900	5000	1898	1353	198	19,1	0,9	10ml	23	4,100	20,639	83729,493	324,484
2000	1000	2002	1445	216	3,8	0,9	10ml	54	0,879	4,194	17015,597	644,750
2000	2000	2000	1444	219	8,1	0,9	10ml	43	1,899	9,071	36799,307	374,764
2000	3000	2000	1437	220	12,3	0,9	10ml	33	2,911	13,905	56409,042	318,569
2000	4000	1998	1429	217	16,3	0,9	10ml	28	3,822	18,277	74146,868	285,923
2000	5000	2000	1421	210	19,8	0,9	10ml	21	4,523	21,607	87653,267	322,165
2100	1000	2102	1519	224	3,9	0,9	10ml	50	0,934	4,247	17227,908	655,029
2100	2000	2101	1519	230	8,4	0,9	10ml	43	2,065	9,392	38100,182	344,568
2100	3000	2102	1513	231	12,6	0,9	10ml	32	3,125	14,205	57626,374	305,979
2100	4000	2100	1500	226	16,8	0,9	10ml	25	4,108	18,691	75823,558	297,943
2100	5000	2102	1489	220	20,4	0,9	10ml	20	4,897	22,256	90289,209	312,462
2200	1000	2202	1591	238	4,1	0,9	10ml	47	1,044	4,529	18372,503	623,753
2200	2000	2202	1586	242	8,6	0,9	10ml	39	2,233	9,690	39308,669	351,339
2200	3000	2201	1579	243	13	0,9	10ml	28	3,403	14,773	59930,127	321,124
2200	4000	2200	1571	239	17,4	0,9	10ml	21,2	4,501	19,546	79295,522	320,693
2200	5000	2202	1557	231	21	0,9	10ml	16,4	5,302	23,006	93329,806	351,896

**4.15 Tabel data 20% *hot* EGR menggunakan bahan bakar pertamina dex**

RPM	Beban	RPM Engine	RPM Genrator	Volt	Arus	Cos $\Phi$	Bahan Bakar		Power (Kw)	Torsi (Nm)	BMEP (N/m <sup>2</sup> )	SFOC (gr/kWh)
							Volume	t(s)				
1800	1000	1799	1302	181	3,5	0,9	10ml	63	0,677	3,593	14575,16	717,978
1800	2000	1799	1297	189	7,4	0,9	10ml	50	1,499	7,962	32302,136	408,191
1800	3000	1802	1294	190	11,3	0,9	10ml	38	2,311	12,252	49702,183	348,484
1800	4000	1798	1292	188	14,7	0,9	10ml	30	2,972	15,795	64075,259	343,159
1800	4400	1798	1285	185	16,3	0,9	10ml	26	3,261	17,328	70296,533	360,910
1900	1000	1900	1374	194	3,6	0,9	10ml	58	0,746	3,753	15226,329	706,837
1900	2000	1902	1374	203	7,7	0,9	10ml	46	1,672	8,400	34078,285	397,786
1900	3000	1899	1365	204	11,7	0,9	10ml	35	2,566	12,912	52379,467	340,676
1900	4000	1898	1361	200	15,2	0,9	10ml	28	3,277	16,493	66910,328	333,541
1900	4200	1899	1357	200	16,3	0,9	10ml	24	3,526	17,739	71964,026	361,613
2000	1000	2000	1447	235	3,7	0,9	10ml	58	0,929	4,437	18000,259	568,014
2000	2000	1999	1439	219	8	0,9	10ml	41	1,881	8,990	36471,28	396,779
2000	3000	2002	1439	221	12,1	0,9	10ml	32	2,875	13,722	55666,581	332,573
2000	4000	2002	1435	221	15,8	0,9	10ml	25	3,765	17,968	72891,21	325,100
2000	4200	2002	1435	213	16,9	0,9	10ml	22	3,881	18,523	75143,619	358,358
2100	1000	2099	1516	229	3,9	0,9	10ml	51	0,956	4,350	17647,313	627,820
2100	2000	2098	1515	231	8,2	0,9	10ml	37	2,027	9,232	37453,37	407,942
2100	3000	2102	1510	233	12,5	0,9	10ml	30	3,133	14,242	57778,556	325,518
2100	4000	2102	1508	230	16,3	0,9	10ml	24	4,039	18,357	74471,791	315,690
2200	1000	2199	1592	246	4	0,9	10ml	46	1,050	4,564	18515,257	633,262
2200	2000	2200	1587	247	8,5	0,9	10ml	34	2,249	9,769	39629,323	400,109
2200	3000	2199	1580	245	12,9	0,9	10ml	26,83	3,400	14,770	59920,635	335,486
2200	3200	2199	1574	243	13,8	0,9	10ml	25,88	3,621	15,732	63820,225	326,549

#### 4.16 Tabel data 30% *hot* EGR menggunakan bahan bakar pertamina dex

RPM	Beban	RPM Engine	RPM Generator	Volt	Arus	Cos $\Phi$	Bahan Bakar		Power (Kw)	Torsi (Nm)	BMEP (N/m <sup>2</sup> )	SFOC (gr/kWh)
							Volume	t(s)				
1800	1000	1800	1302	185	3,5	0,9	10ml	62	0,692	3,672	14897,263	713,387
1800	2000	1798	1298	192	7,4	0,9	10ml	48	1,521	8,083	32789,588	419,111
1800	2200	1802	1300	190	8,1	0,9	10ml	47	1,649	8,742	35462,795	394,885
1800	2300	1802	1298	189	8,5	0,9	10ml	42	1,724	9,139	37075,22	422,677
1900	1000	1902	1376	196	3,7	0,9	10ml	59	0,775	3,892	15787,634	669,448
1900	2000	1902	1371	204	7,7	0,9	10ml	44	1,684	8,460	34321,095	412,926
1900	2200	1900	1370	203	8,6	0,9	10ml	40	1,871	9,410	38172,589	408,819
2000	1000	1999	1444	211	3,7	0,9	10ml	53	0,835	3,992	16195,512	691,214
2000	2000	2002	1443	217	8,3	0,9	10ml	38	1,931	9,217	37389,46	416,965
2100	1000	2098	1516	227	3,9	0,9	10ml	52	0,947	4,312	17493,188	621,467
2100	1800	2102	1518	231	7,4	0,9	10ml	41	1,829	8,315	33732,585	407,972
2100	2000	2098	1513	230	8,2	0,9	10ml	38	2,021	9,204	37340,528	398,407
2200	1000	2198	1580	241	4,1	0,9	10ml	52	1,062	4,618	18733,612	553,916
2200	1800	2202	1591	246	8	0,9	10ml	38	2,105	9,134	37053,788	382,527

**4.17 Tabel data 10% cold EGR menggunakan bahan bakar pertamina dex**

RPM	Beban	RPM E/G	RPM	V	I	Cos 0	BB	t (detik)	P (kW)	SFOC	Torsi	BMEP	in (°C)	out (°C)
			GENERATOR							g/kwh	Nm	N/m2		
1800	1000	1800	1300	175	3.4	0.9	10ml	73	0.6367209	658.33877	3.3796228	13710.43749	41	30.4
1800	2000	1802	1302	188	7.5	0.9	10ml	57	1.5082243	355.94315	7.9965517	32440.37217	41.8	30.6
1800	3000	1800	1294	189	11.4	0.9	10ml	56	2.3163698	235.89867	12.294957	49878.12035	41.5	30.2
1800	4000	1798	1288	185	15.1	0.9	10ml	47	3.0138769	216.02203	16.015018	64969.64777	44	31.3
1800	5000	1802	1287	181	18.4	0.9	10ml	35	3.6039243	242.5927	19.107879	77516.74903	43.8	31.3
1900	1000	1900	1372	189	3.6	0.9	10ml	65	0.7282271	646.45941	3.661886	14855.52119	42.5	31.6
1900	2000	1901	1369	200	7.8	0.9	10ml	50	1.6741959	365.54861	8.414257	34134.91689	43	31.1
1900	3000	1900	1369	202	11.8	0.9	10ml	43	2.5567399	278.3341	12.856553	52156.4025	42.6	31.7
1900	4000	1899	1362	198	15.7	0.9	10ml	35	3.3497756	260.99829	16.853199	68369.97714	44.4	31.7
1900	5000	1902	1356	194	19.1	0.9	10ml	27	4.0168807	282.14264	20.177624	81856.48794	44.3	31.7
2000	1000	2002	1446	208	3.8	0.9	10ml	59	0.8457572	613.23041	4.0362054	16374.05852	42.5	31.2
2000	2000	2001	1443	216	8.1	0.9	10ml	45	1.8750918	362.6489	8.9529686	36320.3595	42.4	31.6
2000	3000	1999	1436	217	12.2	0.9	10ml	36	2.8482686	298.42692	13.613185	55225.9028	43.1	31.8
2000	4000	2002	1434	214	16.3	0.9	10ml	28	3.7637374	290.36487	17.961676	72866.83833	44.7	31.9
2000	5000	1998	1420	206	19.7	0.9	10ml	21	4.4130983	330.1859	21.102783	85609.66582	44.3	31.6
2100	1000	2102	1522	224	4.6	0.9	10ml	51	1.0998335	545.53714	4.9990309	20280.0442	44.5	31.3
2100	2000	2100	1514	230	8.3	0.9	10ml	42	2.0464558	356.01621	9.3105358	37770.93649	43.1	31.1
2100	3000	2101	1512	231	12.6	0.9	10ml	33	3.12579	296.65228	14.214296	57664.48709	47.5	32.6
2100	4000	2099	1499	226	16.8	0.9	10ml	25	4.1089565	297.88585	18.702976	75874.14106	49.1	32.7
2100	5000	2102	1488	220	20.4	0.9	10ml	16	4.8998823	390.3155	22.271247	90349.88761	50.1	33.3
2200	1000	2199	1590	239	4.1	0.9	10ml	50	1.0474007	584.30357	4.550711	18461.30226	49	33.7
2200	2000	2202	1586	243	8.6	0.9	10ml	40	2.2424454	341.14543	9.7296264	39471.10107	47	33.1
2200	3000	2198	1581	244	13.1	0.9	10ml	31	3.4344718	287.40861	14.928765	60562.94028	46.8	33.5
2200	4000	2198	1568	239	17.4	0.9	10ml	22	4.5053838	308.72155	19.583744	79447.23563	46.7	33.2
2200	5000	2202	1554	232	21	0.9	10ml	15	5.3355181	382.34338	23.149994	93914.78417	49	33.3
												Rata-rata Suhu	44.748	31.9

**4.18 Tabel data 20% cold EGR menggunakan bahan bakar pertamina dex**

RPM	Beban	RPM E/G	RPM	V	I	Cos 0	BB	t (detik)	P (kW)	SFOC	Torsi	BMEP	in (°C)	out (°C)
			GENERATOR							g/kwh	Nm	N/m2		
1800	1000	1798	1301	179	3.4	0.9	10ml	66	0.6500509	713.23088	3.4542143	14013.03966	48	37
1800	2000	1801	1301	189	7.4	0.9	10ml	53	1.4963492	385.84475	7.9379955	32202.82166	46	34
1800	3000	1804	1296	191	11.3	0.9	10ml	50	2.3219152	263.57551	12.297064	49886.66927	47	35
1800	4000	1804	1294	188	15.1	0.9	10ml	40	3.0587224	250.10442	16.199259	65717.07419	46	36
1800	5000	1799	1284	181	17.8	0.9	10ml	30	3.488733	292.36975	18.527984	75164.23696	46	38
1900	1000	1904	1377	193	3.6	0.9	10ml	60	0.7424989	686.86968	3.7258082	15114.84052	50.5	35
1900	2000	1902	1371	202	7.7	0.9	10ml	48	1.6677009	382.26279	8.3772073	33984.61384	56.7	37
1900	3000	1902	1369	204	11.7	0.9	10ml	42	2.5628672	284.27982	12.873813	52226.42285	51.8	38.6
1900	4000	1901	1361	200	15.6	0.9	10ml	33	3.3680738	275.31247	16.927433	68671.12597	65.3	37
1900	5000	1903	1357	195	18.5	0.9	10ml	23	3.9099238	340.27128	19.630037	79635.03801	63	39
2000	1000	1998	1441	206	3.7	0.9	10ml	55	0.8167769	681.16962	3.9057063	15844.65047	62.3	37.2
2000	2000	1999	1440	215	8	0.9	10ml	43	1.8453628	385.63035	8.8198374	35780.27337	66.7	35.2
2000	3000	1998	1434	216	12.1	0.9	10ml	37	2.8144172	293.85375	13.458126	54596.86046	58.3	37.2
2000	4000	2004	1434	213	16.1	0.9	10ml	28	3.7038813	295.05728	17.658384	71636.44535	58.8	36.5
2000	4800	1999	1426	207	19.2	0.9	10ml	19	4.3059389	374.02443	20.580062	83489.094	61.6	38.3
2100	1000	2102	1521	223	3.9	0.9	10ml	49	0.928915	672.27872	4.2221619	17128.44572	66.5	39.8
2100	2000	2096	1511	228	8.2	0.9	10ml	40	2.0043729	381.6655	9.136479	37064.82335	63.5	37.6
2100	3000	2100	1507	230	12.5	0.9	10ml	33	3.0963276	299.475	14.087023	57148.16583	61	38.3
2100	4000	2100	1503	227	16.7	0.9	10ml	23	4.0936024	325.00342	18.624215	75554.62378	63.9	37.6
2100	4500	2098	1493	222	18.8	0.9	10ml	18	4.5327265	375.0502	20.641708	83739.18227	63.9	37.6
2200	1000	2202	1589	238	4.8	0.9	10ml	42	1.22353	595.46674	5.308709	21536.34486	69.3	39.2
2200	2000	2200	1583	242	8.5	0.9	10ml	36	2.209424	384.71565	9.5950667	38925.22006	66.5	37.5
2200	3000	2198	1579	245	14	0.9	10ml	25	3.6901387	331.69485	16.040083	65071.33093	62.9	36.6
2200	4300	2201	1573	239	17.4	0.9	10ml	16	4.4971926	425.26531	19.521494	79194.7015	66.7	38.8
												Rata-rata Suhu	58.842	37.25

**4.19 Tabel data 30% cold EGR menggunakan bahan bakar  
pertamina dex**

RPM	Beban	RPM E/G	RPM	V	I	Cos 0	BB	t (detik)	P (kW)	SFOC	Torsi	BMEP	in (°C)	out (°C)	
			GENERATOR							g/kwh	Nm	N/m2			
1800	1000	1801	1301	180	3.4	0.9	10ml	67	0.6547731	697.51856	3.4735116	14091.32479	35	31.6	
1800	2000	1798	1299	189	7.4	0.9	10ml	51.7	1.4961567	395.59774	7.9502172	32252.4026	38.5	32.3	
1800	3000	1802	1295	191	11.2	0.9	10ml	44	2.300591	302.29386	12.197652	49483.37593	42.4	33.5	
1800	4000	1803	1293	189	15	0.9	10ml	34	3.0552959	294.57048	16.190086	65679.86296	54.6	35.2	
1800	5000	1804	1285	184	17.9	0.9	10ml	23	3.573611	372.29424	18.926153	76779.52587	61.8	37	
1900	1000	1901	1373	191	3.6	0.9	10ml	62	0.7357842	670.77871	3.6979408	15001.78822	62	38.2	
1900	2000	1902	1371	201	7.6	0.9	10ml	47	1.6378937	397.50065	8.2274797	33377.1995	67.2	36.2	
1900	3000	1903	1369	204	11.6	0.9	10ml	38	2.5422983	316.74613	12.763781	51780.04316	70.3	36.3	
1900	4000	1904	1363	201	15.4	0.9	10ml	29	3.3418802	315.74214	16.769324	68029.71037	70.7	37.3	
1900	5000	1902	1355	194	18.7	0.9	10ml	20	3.93566	388.7531	19.769636	80201.36149	81.1	40.3	
2000	1000	1999	1445	208	3.7	0.9	10ml	56	0.8228355	664.07996	3.9327092	15954.19557	79.1	38.1	
2000	2000	1998	1439	216	7.9	0.9	10ml	42	1.8311273	397.88135	8.7561798	35522.02766	82.3	36.9	
2000	3000	2002	1436	218	12	0.9	10ml	33	2.81871	328.97061	13.451723	54570.8853	79.3	37	
2000	4000	1998	1429	214	16	0.9	10ml	25	3.6999855	330.8121	17.692783	71775.99585	78	37.8	
2000	4500	2004	1429	211	17.8	0.9	10ml	19.2	4.0707175	391.51575	19.407288	78731.39171	78.7	37	
2100	1000	2104	1519	225	3.9	0.9	10ml	51	0.9393731	638.72387	4.2656378	17304.81859	80.8	39.1	
2100	2000	2100	1513	229	8	0.9	10ml	39	1.9652095	399.2528	8.9408985	36271.3935	79	36.7	
2100	3000	2102	1507	232	12.4	0.9	10ml	29	3.1012169	340.24463	14.095843	57183.94556	80.8	37.1	
2100	4000	2099	1499	227	16.5	0.9	10ml	22	4.0534388	343.14298	18.450273	74848.97686	76.6	37.1	
2100	4500	2104	1497	225	18.4	0.9	10ml	17	4.4970456	400.26278	20.420819	82843.08064	78	37.5	
2200	1000	2199	1590	242	4	0.9	10ml	47	1.034681	629.24111	4.4954467	18237.10643	75.7	34.4	
2200	2000	2200	1586	245	8.4	0.9	10ml	34	2.2063169	407.91965	9.581573	38870.47852	79.2	36.4	
2200	3000	2197	1581	246	12.8	0.9	10ml	25	3.3817872	361.9388	14.706449	59661.05192	77.2	36.4	
2200	4000	2201	1568	242	17.1	0.9	10ml	15	4.4894018	454.40352	19.487676	79057.50745	85.3	36.9	
													Rata- rata Suhu	70.567	36.513

**4.20 Tabel data full load 100% SFOC berdasarkan variabel bukaan katup 0,10,20,30% hot dan cold EGR.**

(full load 100%)		COLD EGR					HOT EGR						
Bukaan Katup	Beban	RPM	Power	Sfoc	Torsi	Bmep	Bukaan Katup	Beban	RPM	Power	Torsi	Bmep	Sfoc
30%	4000	1800	3.0552959	312.98114	16.190086	65679.86296	30%	2200	1800	1.6487434	8.7415791	35462.8	394.88487
	4000	1900	3.3418802	327.01864	16.769324	68029.71037		2200	1900	1.8712445	9.4095433	38172.6	408.81883
	4000	2000	3.6999855	285.18285	17.692783	71775.99585		2000	2000	1.9312504	9.2165019	37389.5	416.96466
	4000	2100	4.0534388	328.22372	18.450273	74848.97686		2000	2100	2.0212092	9.2044403	37340.5	398.40664
	3000	2200	3.3817872	361.9388	14.706449	59661.05192		1800	2200	2.1051122	9.1337588	37053.8	382.52743
20%	4000	1800	3.0587224	250.10442	16.199259	65717.07419	20%	4000	1800	2.9723871	15.794551	64075.3	343.15853
	4000	1900	3.3680738	275.31247	16.927433	68671.12597		4000	1900	3.276534	16.493396	66910.3	333.5406
	4000	2000	3.7038813	295.05728	17.658384	71636.44535		4000	2000	3.7649963	17.967683	72891.2	325.09992
	4000	2100	4.0936024	325.00342	18.624215	75554.62378		4000	2100	4.0387766	18.357296	74471.8	315.68966
	3000	2200	3.6901387	331.69485	16.040083	65071.33093		3200	2200	3.6208362	15.731685	63820.2	326.54894
10%	4000	1800	3.0138769	216.02203	16.015018	64969.64777	10%	4000	1800	3.2170919	17.066378	69234.8	288.23321
	4000	1900	3.3497756	260.99829	16.853199	68369.97714		4000	1900	3.4939684	17.56016	71238	301.99827
	4000	2000	3.7637374	290.36487	17.961676	72866.83833		4000	2000	3.8222018	18.277203	74146.9	285.92346
	4000	2100	4.1089565	297.88585	18.702976	75874.14106		4000	2100	4.1081735	18.690507	75823.6	297.94263
	4000	2200	4.5053838	308.72155	19.583744	79447.23563		4000	2200	4.500872	19.546346	79295.5	320.69257
0%	4000	1800	3.0634392	321.18242	16.260293	65964.67841	0	4000	1800	3.0634392	16.260293	65964.7	321.18242
	4000	1900	3.3860134	328.62459	17.008647	69000.59604		4000	1900	3.3860134	17.008647	69000.6	328.62459
	4000	2000	3.7424678	340.68429	17.860171	72455.05358		4000	2000	3.7424678	17.860171	72455.1	340.68429
	4000	2100	4.0873933	340.29246	18.587115	75404.11656		4000	2100	4.0873933	18.587115	75404.1	340.29246
	4000	2200	4.4805598	353.8603	19.440461	78865.96879		4000	2200	4.4805598	19.440461	78866	353.8603

## Lampiran II. Test Cycle point data proses pembakaran dan nilai NO<sub>x</sub>

### 4.20 Tabel data test cycle pada sistem *hot* dan *cold* EGR

Tabel MARPOL Annex VI, Appendix II Test Cycle

test cycle type E2	Speed	100%	100%	100%	100%
	Power	100%	75%	50%	25%
	Weight Factor	0.2	0.5	0.15	0.15

Tabel Titik test cycle pada 0% EGR

test cycle type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2200	2200	2200	2200
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		4.481	3.361	2.241	1.120

Tabel Titik test cycle pada 10% *hot* EGR

Test Cycle Type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2200	2200	2200	2200
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		4.501	3.376	2.251	1.125

Tabel Titik test cycle pada 20% *hot* EGR

test cycle type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2100	2100	2100	2100
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		4.039	3.029	2.019	1.010

Tabel Titik test cycle pada 10% *hot* EGR

test cycle type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2100	2100	2100	2100
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		2.105	1.579	1.053	0.526

Tabel Titik test cycle pada 10% *cold* EGR

test cycle type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2200	2200	2200	2200
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		4.500	3.375	2.250	1.125

Tabel Titik test cycle pada 20% *cold* EGR

test cycle type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2100	2100	2100	2100
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		4.090	3.068	2.045	1.023

Tabel Titik test cycle pada 30% *cold* EGR

test cycle type E2	Speed (RPM)	100%	100%	100%	100%
		2100	2100	2100	2100
	Power (kW)	100%	75%	50%	25%
		4.050	3.038	2.025	1.013

### Lampiran III. Rumus Perhitungan Performansi

- Daya Motor

Daya motor adalah parameter dalam menentukan performa motor. Pengertian dari daya itu adalah besarnya kerja motor dalam kurun waktu tertentu.

$$P = \frac{v \times i \times \cos \phi}{\text{eff gen} \times \text{eff slip}}$$

Dimana :

P : daya (kW)

V : tegangan listrik (Volt)

I : arus listrik (Ampere)

Cos  $\phi$  : 0.9

Eff Gen : efisiensi generator (0.85)

Eff Slip : effisisiensi slip (hitung)

- Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)

Konsumsi bahan bakar spesifik atau Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) adalah parameter unjuk kerja mesin yang berhubungan langsung dengan nilai ekonomis sebuah mesin, karena dengan mengetahui hal ini dapat dihitung jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah daya dalam selang waktu tertentu.

$$FCR = \frac{v \times \rho}{t}$$

Dimana :

FCR : laju aliran bahan bakar (gr/h)

$\rho$  : massa jenis bahan bakar (gr/m<sup>3</sup>)

v : volume bahan bakar (m<sup>3</sup>)

t : waktu yang diperlukan menghabiskan bahan bakar sebanyak 10 ml (h)

$$SFOC = \frac{FCR}{P}$$

Dimana :

SFOC : konsumsi spesifik bahan bakar (gr/kWh)  
 FCR : laju aliran bahan bakar (gr/h)  
 P : daya (kW)

- Torsi

Besaran torsi adalah besaran turunan yang biasa digunakan untuk menghitung energi yang dihasilkan dari benda yang berputar pada porosnya.

$$T = \frac{P \times 60000}{2 \pi \times rpm}$$

Dimana :

T : torsi (Nm)  
 P : daya (kW)  
 Rpm : putaran motor diesel (rpm)

- BMEP

Tekanan efektif rata-rata didefinisikan sebagai tekanan efektif dari fluida kerja terhadap torak sepanjang langkahnya untuk menghasilkan kerja persiklus.

$$BMEP = \frac{P \times Z \times 1000}{V \times 2 \times 3,14 \times rps \times i}$$

Dimana :

BMEP : tekanan efektif rata-rata (N/m<sup>2</sup>)  
 P : daya (kW)  
 Z : konstanta 2 untuk 4-stroke  
 V : volume langkah (m<sup>3</sup>)  
 I : jumlah silinder

Lampiran IV. Hasil emisi NO<sub>x</sub> dan konversi

EGR %	load	FCR	power	Nox							
		(gr/h)	(Kw)	ppm	Convert	mg/kWh	g/kWh	% excess Air	K multiply	weigh facto	g/kWh
0%	25% load	595.3307	1.022784	4211	1.76	7411.36	7.41136	5.21	1.339433	0.15	11.416076
	50% load	908.0119	2.174783	4266	1.76	7508.16	7.50816	4.22	1.263533	0.15	10.909832
	75% load	1154.717	3.383911	2567	1.76	4517.92	4.51792	3.85	1.235167	0.5	8.3705763
	100% load	1514.851	4.48056	1911	1.76	3363.36	3.36336	2.64	1.1424	0.2	4.610763
10% Hot EGR	25% load	651.0638	1.043785	3233	1.76	5690.08	5.69008	5.54	1.364733	0.15	8.9302581
	50% load	784.6154	2.233217	3288	1.76	5786.88	5.78688	4.55	1.288833	0.15	8.5770724
	75% load	1092.857	3.403224	1589	1.76	2796.64	2.79664	4.18	1.260467	0.5	5.2876072
	100% load	1443.396	4.500872	878	1.76	1545.28	1.54528	2.97	1.1677	0.2	2.1653081
20% Hot EGR	25% load	600	0.955688	2735	1.76	4813.6	4.8136	5.65	1.373167	0.15	7.6013563
	50% load	827.027	2.027317	2790	1.76	4910.4	4.9104	4.66	1.297267	0.15	7.325613
	75% load	1020	3.133464	1091	1.76	1920.16	1.92016	4.29	1.2689	0.5	3.6547365
	100% load	1275	4.038777	435	1.76	765.6	0.7656	3.08	1.176133	0.2	1.0805372
30% Hot EGR	25% load	522.67	0.7	2700	1.76	4752	4.752	5.76	1.3816	0.15	7.5501677
	50% load	588.4615	1.062367	2755	1.76	4848.8	4.8488	4.77	1.3057	0.15	7.2807399
	75% load	700.123	1.5	1056	1.76	1858.56	1.85856	4.4	1.277333	0.5	3.561001
	100% load	805.2632	2.105112	400	1.76	704	0.704	3.19	1.184567	0.2	1.0007219
10% Cold EGR	25% load	347.72	1.126346	3107	1.76	5468.32	5.46832	5.36	1.350933	0.15	8.4954361
	50% load	639.45	2.255269	3162	1.76	5565.12	5.56512	4.37	1.275033	0.15	8.1600705
	75% load	1043.18	3.379038	1463	1.76	2574.88	2.57488	4	1.246667	0.5	4.8150256
	100% load	1390.909	4.505384	752	1.76	1323.52	1.32352	2.79	1.1539	0.2	1.8326517
20% Cold EGR	25% load	332.6	1.023401	2556	1.76	4498.56	4.49856	5.47	1.359367	0.15	7.0324714
	50% load	665.21	2.046801	2611	1.76	4595.36	4.59536	4.48	1.283467	0.15	6.7826901
	75% load	997.82	3.070202	912	1.76	1605.12	1.60512	4.11	1.2551	0.5	3.0218792
	100% load	1330.435	4.093602	256	1.76	450.56	0.45056	2.9	1.162333	0.2	0.6284411
30% Cold EGR	25% load	347.72	1.01336	2475	1.76	4356	4.356	5.58	1.3678	0.15	6.8518573
	50% load	639.45	2.02672	2530	1.76	4452.8	4.4528	4.59	1.2919	0.15	6.6154582
	75% load	1043.18	3.040079	831	1.76	1462.56	1.46256	4.22	1.263533	0.5	2.77199
	100% load	1390.909	4.053439	175	1.76	308	0.308	3.01	1.170767	0.2	0.4327154

## Lampiran V. Hasil Data NOx dari Exhaust Gas Analyzer

<b>Gedung Robotika Lt. 2 Kampus ITS Sukolilo Surabaya, (031)9199931-32</b> <b>Laboratorium Energi LPPM ITS</b>	
Kode Sampel : E1 - 0% EGR	Tanggal Terima : 21 Nov 2014
Nama Sampel : SCR / EGR	Tanggal Pengerjaan : 25 Nov 2014
Jenis Uji : Uji Emisi	Tanggal Selesai : 25 Nov 2014
Metode Uji :	Diperiksa Oleh : Jua
0% EGR	
<pre> ***** E C O M - 3 2 K N * ***** Date      Time 11.25.16  09:09 AM Gas analysis Fuel type Gas-Natural T.Air      82  °F T.Gas     633  °F T.Sensor  83  °F O2        18,3  % NO        6002 1911 ppm NO2       6002 8  ppm CO2       6002 1,7  % EFF.      33,32 % Losses    75,77 % Exc. air  2,60  %  ECON America Ltd. 3028 Oakbrook Drive Gainesville Georgia 30607 Tel. 770-532-3288 Fax : 770-532-3289 Toll-Free 877-326-6411 www.ecomusa.com </pre>	
<pre> ***** E C O M - 3 2 K N * ***** Date      Time 11.25.16  09:04 AM Gas analysis Fuel type Gas-Natural T.Air      82  °F T.Gas     649  °F T.Sensor  86  °F O2        19,7  % NO        6002 2567 ppm NO2       6002 0  ppm CO2       6002 1,6  % EFF.      35,7  % Losses    65,77 % Exc. air  3,05  %  ECON America Ltd. 3028 Oakbrook Drive Gainesville Georgia 30607 Tel. 770-532-3288 Fax : 770-532-3289 Toll-Free 877-326-6411 www.ecomusa.com </pre>	
<pre> ***** E C O M - 3 2 K N * ***** Date      Time 11.25.16  08:59 AM Gas analysis Fuel type Gas-Natural T.Air      84  °F T.Gas     652  °F T.Sensor  85  °F O2        18,2  % NO        6002 4256 ppm NO2       6002 8  ppm CO2       6002 0  ppm EFF.      36,7  % Losses    64,32 % Exc. air  4,22  %  ECON America Ltd. 3028 Oakbrook Drive Gainesville Georgia 30607 Tel. 770-532-3288 Fax : 770-532-3289 Toll-Free 877-326-6411 www.ecomusa.com </pre>	
<pre> ***** E C O M - 3 2 K N * ***** Date      Time 11.25.16  08:54 AM Gas analysis Fuel type Gas-Natural T.Air      81  °F T.Gas     623  °F T.Sensor  83  °F O2        17,7  % NO        6002 4211 ppm NO2       6002 0  ppm CO2       6002 0  ppm EFF.      36,7  % Losses    71,65 % Exc. air  5,21  %  ECON America Ltd. 3028 Oakbrook Drive Gainesville Georgia 30607 Tel. 770-532-3288 Fax : 770-532-3289 Toll-Free 877-326-6411 www.ecomusa.com </pre>	

Gambar. Hasil data NOx pada 0% EGR

**Laboratorium Energi LPPM ITS**  
**Gedung Robotika Lt. 2 Kampus ITS Sukotilo Surabaya, (031)9199931-32**

Kode Sampel : 61 - 0517	Tanggal Terima : 21 Nov 2016
Nama Sampel : SCR / EGR	Tanggal Pengerjaan : 25 Nov 2016
Jenis Uji : Uji Emisi	Tanggal Selesai : 25 Nov 2016
Metode Uji :	Diperiksa Oleh : JHM

10% AGV

\*\*\*\*\*  
 \* ECOM - J2KN \*  
 \*\*\*\*\*  
 Date Time  
 11.25.15 09:20 PM  
 Gas analysis  
 -----  
 Fuel type  
 Gas-Natural

T.Air	ppm	87	%
T.Co	ppm	608	%
T.Sensor	ppm	86	%
O2	ppm	19,5	%
NO	ppm	8002	ppm
SO2	ppm	8002	ppm
H2	ppm	8002	ppm
CO2	%	1,8	%
EFF.	%	36,3	%
Losses	%	79,70	%
Exc. air	%	2,87	%

ECOM America Ltd.  
 1638 Oakbrook Drive  
 Gainesville  
 Georgia 30607  
 Tel. 770-532-3200  
 Fax : 770-532-3620  
 Toll-Free 877-326-6411  
 www.ecomusa.com

---

\*\*\*\*\*  
 \* ECOM - J2KN \*  
 \*\*\*\*\*  
 Date Time  
 11.25.15 09:24 PM  
 Gas analysis  
 -----  
 Fuel type  
 Gas-Natural

T.Air	ppm	80	%
T.Co	ppm	678	%
T.Sensor	ppm	17	%
O2	ppm	17,7	%
NO	ppm	8002	ppm
SO2	ppm	8002	ppm
H2	ppm	8002	ppm
CO2	%	1,7	%
EFF.	%	37,13	%
Losses	%	85,0	%
Exc. air	%	6,18	%

ECOM America Ltd.  
 1638 Oakbrook Drive  
 Gainesville  
 Georgia 30607  
 Tel. 770-532-3200  
 Fax : 770-532-3620  
 Toll-Free 877-326-6411  
 www.ecomusa.com

---

\*\*\*\*\*  
 \* ECOM - J2KN \*  
 \*\*\*\*\*  
 Date Time  
 11.25.16 09:30 PM  
 Gas analysis  
 -----  
 Fuel type  
 Gas-Natural

T.Air	ppm	87	%
T.Co	ppm	637	%
T.Sensor	ppm	85	%
O2	ppm	18,0	%
NO	ppm	8002	ppm
SO2	ppm	8002	ppm
H2	ppm	8002	ppm
CO2	%	1,6	%
EFF.	%	26,43	%
Losses	%	76,6	%
Exc. air	%	6,55	%

ECOM America Ltd.  
 1638 Oakbrook Drive  
 Gainesville  
 Georgia 30607  
 Tel. 770-532-3200  
 Fax : 770-532-3620  
 Toll-Free 877-326-6411  
 www.ecomusa.com

---

\*\*\*\*\*  
 \* ECOM - J2KN \*  
 \*\*\*\*\*  
 Date Time  
 11.25.16 09:14 PM  
 Gas analysis  
 -----  
 Fuel type  
 Gas-Natural

T.Air	ppm	84	%
T.Co	ppm	646	%
T.Sensor	ppm	19,7	%
O2	ppm	3233	ppm
NO	ppm	8002	ppm
SO2	ppm	8002	ppm
H2	ppm	8002	ppm
CO2	%	1,7	%
EFF.	%	35,77	%
Losses	%	86,43	%
Exc. air	%	5,24	%

ECOM America Ltd.  
 1638 Oakbrook Drive  
 Gainesville  
 Georgia 30607  
 Tel. 770-532-3200  
 Fax : 770-532-3620  
 Toll-Free 877-326-6411  
 www.ecomusa.com

Gambar. Hasil data NOx pada 10% hot EGR (AGV)

**Laboratorium Energi LPPM ITS**  
**Gedung Robotika Lt. 2 Kampus ITS Sukolilo Surabaya. (031) 81996931-32**

Kode Sampel : 01-0520	Tanggal Terima : 21 Nov 2016
Nama Sampel : LTR /GER	Tanggal Pengerjaan : 25 Nov 2016
Jenis Uji : Uji Emisi	Tanggal Selesai : 25 Nov 2016
Metode Uji : 10% Cold	Diperiksa Oleh : Jhu

```

*****
* E C O N - J 2 K N *
*****
Date       Time
11.25.16  10:29 PM

Gas analysis
Fuel type  Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      85      F
T.Gas      721     F
T.Sensor   89      F
O2         21.5     %
NO         8902   ppm
NO2        8902   ppm
SO2        8902   ppm
H2         8902   ppm
CO2        2,8    %
EFF.       46,9   %
Losses    53,1   %
Exc. air   2,79

ECOM America Ltd.
1828 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3288
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com

```

```

*****
* E C O N - J 2 K N *
*****
Date       Time
11.25.16  10:24 PM

Gas analysis
Fuel type  Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      87      F
T.Gas      692     F
T.Sensor   89      F
O2         21,3    %
NO         8902   ppm
NO2        1483   ppm
SO2        8902   ppm
H2         8902   ppm
CO2        1,9    %
EFF.       55,7   %
Losses    44,3   %
Exc. air   4,00

ECOM America Ltd.
1828 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3288
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com

```

```

*****
* E C O N - J 2 K N *
*****
Date       Time
11.25.16  10:19 PM

Gas analysis
Fuel type  Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      86      F
T.Gas      675     F
T.Sensor   89      F
O2         16,4    %
NO         8902   ppm
NO2        3152   ppm
SO2        8902   ppm
H2         8902   ppm
CO2        1,9    %
EFF.       41,12  %
Losses    58,88  %
Exc. air   4,37

ECOM America Ltd.
1828 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3288
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com

```

```

*****
* E C O N - J 2 K N *
*****
Date       Time
11.25.16  10:14 PM

Gas analysis
Fuel type  Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      87      F
T.Gas      645     F
T.Sensor   89      F
O2         19,7    %
NO         8902   ppm
NO2        3187   ppm
SO2        8902   ppm
H2         8902   ppm
CO2        1,7    %
EFF.       39,41  %
Losses    60,59  %
Exc. air   5,26

ECOM America Ltd.
1828 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3288
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com

```

Gambar. Hasil data NOx pada 10% cold EGR

**Laboratorium Energi LPPM ITS**  
**Gedung Robotika Lt. 2 Kampus ITS Sukolilo Surabaya, (031)91996931-32**

Kode Sampel : E1 -06R	Tanggal Terima : 01 Nop 2016
Nama Sampel : LCR /EGR	Tanggal Pengiriman : 05 Nop 2016
Jenis Uji : Uji emisi	Tanggal Selesai : 01 Nop 2016
Metode Uji :	Diperiksa Oleh : Jha

20% AGV

```
*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16 09:49 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T-Air      F      86
T-Gas     F      717
T-Sensor  F      88
O2        %      17,6
NO        ppm     8502
NO2       ppm     8502
H2        ppm     8502
CO2       %      1,8
EFF.      %      37,4
Losses    %      89,1
Exc. air  %      3,88

ECOM America Ltd.
2628 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3620
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
```

```
*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16 09:44 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T-Air      F      89
T-Gas     F      722
T-Sensor  F      87
O2        %      18,1
NO        ppm     8502
NO2       ppm     8502
H2        ppm     8502
CO2       %      1,6
EFF.      %      38,3
Losses    %      78,5
Exc. air  %      4,29

ECOM America Ltd.
2628 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3620
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
```

```
*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16 09:39 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T-Air      F      89
T-Gas     F      781
T-Sensor  F      85
O2        %      15,7
NO        ppm     8502
NO2       ppm     8502
H2        ppm     8502
CO2       %      1,5
EFF.      %      39,7
Losses    %      78,3
Exc. air  %      4,66

ECOM America Ltd.
2628 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3620
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
```

```
*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16 09:34 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T-Air      F      87
T-Gas     F      694
T-Sensor  F      85
O2        %      22,55
NO        ppm     8502
NO2       ppm     8502
H2        ppm     8502
CO2       %      1,3
EFF.      %      40,8
Losses    %      77,3
Exc. air  %      5,65

ECOM America Ltd.
2628 Oldbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3620
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
```

Gambar. Hasil data NOx pada 20% hot EGR(AGV)

Kode Sampel : E1 - 0521	Tanggal Terima : 28 Nov 2016
Nama Sampel : EER	Tanggal Pengiriman : 30 Nov 2016
Jenis Uji : U <sub>g</sub> Emisi	Tanggal Selesai : 30 Nov 2016
Metode Uji :	Diperiksa Oleh : <i>Juh</i>

20% Cold

```

*****
* E C O M - J 2 K N *
*****
Date      Time
11.36.16  09:12 PM

Gas analysis
Fuel type Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      %      81
T.Gas      %      653
T.Sensor   %      84
CO         ppm    17,7
NO         ppm    256
SO2        ppm    8
CO2        ppm    802
HC         ppm    1,1
EFF.       %      45,5
Losses     %      55,5
ERC: Air   2,9

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30597-3308
Tel. : 770-532-3200
Fax. : 770-532-3629
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
  
```

```

*****
* E C O M - J 2 K N *
*****
Date      Time
11.36.16  09:07 PM

Gas analysis
Fuel type Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      %      77
T.Gas      %      644
T.Sensor   %      80
CO         ppm    17,8
NO         ppm    912
SO2        ppm    8
CO2        ppm    802
HC         ppm    1,9
EFF.       %      40,4
Losses     %      55,6
ERC: Air   4,11

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30597-3308
Tel. : 770-532-3200
Fax. : 770-532-3629
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
  
```

```

*****
* E C O M - J 2 K N *
*****
Date      Time
11.36.16  09:02 PM

Gas analysis
Fuel type Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      %      76
T.Gas      %      617
T.Sensor   %      87
CO         ppm    19,0
NO         ppm    2011
SO2        ppm    8
CO2        ppm    802
HC         ppm    3,8
EFF.       %      45,6
Losses     %      55,4
ERC: Air   4,48

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30597-3308
Tel. : 770-532-3200
Fax. : 770-532-3629
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
  
```

```

*****
* E C O M - J 2 K N *
*****
Date      Time
11.36.16  08:57 PM

Gas analysis
Fuel type Gas-Natural
Gas-Natural
T.Air      %      79
T.Gas      %      621
T.Sensor   %      85
CO         ppm    19,3
NO         ppm    2336
SO2        ppm    8
CO2        ppm    802
HC         ppm    4,3
EFF.       %      45,7
Losses     %      58,7
ERC: Air   5,47

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30597-3308
Tel. : 770-532-3200
Fax. : 770-532-3629
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
  
```

Gambar. Hasil data NO<sub>x</sub> pada 20% cold EGR

**Laboratorium Energi LPPM ITS**  
**Gedung Robotika Lt. 2 Kampus ITS Sukohilo Surabaya, (031) 81990693 1-32**

Kode Sampel : E1 - 6519	Tanggal Terima : 21 Nov 2016
Nama Sampel : SCR / EGR	Tanggal Pengerjaan : 21 Nov 2016
Jenis Uji : Uj. Emisi	Tanggal Selesai : 21 Nov 2016
Metode Uji :	Diperiksa Oleh : JH

30% AGV

```

*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16  10:09 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      %F      87
T.Gas      %F      776
T.Sensor   %F      85
CO         ppm     15,3
NO         ppm     8602
SO2        ppm     8602
H2         ppm     0
CO2        ppm     3,4
EFF.       %      46,2
Losses     %      388,12
Exc. air   %      3,19

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

```

*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16  10:04 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      %F      85
T.Gas      %F      756
T.Sensor   %F      88
CO         %      16,4
NO         ppm     8602
SO2        ppm     0
H2         ppm     1,3
CO2        ppm     39,76
EFF.       %      79,3
Losses     %      4,4
Exc. air   %      4,4

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

```

*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16  09:59 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      %F      84
T.Gas      %F      724
T.Sensor   %F      86
CO         %      19,6
NO         ppm     2755
SO2        ppm     0
H2         ppm     0
CO2        ppm     43,12
EFF.       %      73,21
Losses     %      4,77
Exc. air   %      4,77

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

```

*****
* ECOM - J2KN *
*****
Date      Time
11.25.16  09:54 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      %F      88
T.Gas      %F      733
T.Sensor   %F      85
CO         %      26,1
NO         ppm     2780
SO2        ppm     0
H2         ppm     0
CO2        ppm     41,2
EFF.       %      73,2
Losses     %      5,76
Exc. air   %      5,76

ECOM America Ltd.
1628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3200
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

Gambar. Hasil data NOx pada 30% hot EGR(AGV)

**Laboratorium Energi LPPM ITS**  
Gedung Robotika Lt. 2 Kampus ITS Sukolilo Surabaya, (031) 81996931-32

Kode Sampel : E1 - 05.22	Tanggal Terima : 28 Nov 2016
Nama Sampel : EGE	Tanggal Pengerjaan : 30 Nov 2016
Jenis Uji : Uji Emisi	Tanggal Selesai : 30 Nov 2016
Metode Uji : 30% Cold	Diperiksa Oleh : Jui

```

*****
* ECOM-32KN *
*****
Date      Time
11.30.36  09:32 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      84  %
T.Gas      651  %
T.Sensor   85  %
CO         17,7  ppm
CO2        8802  0
SO2        8802  0
H2         8802  0
CO2        1,9  %
EFF.       46,7  %
Losses     53,3  %
Exc. air   1,17

ECOM America Ltd
3628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3280
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

```

*****
* ECOM-32KN *
*****
Date      Time
11.30.36  09:27 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      86  %
T.Gas      632  %
T.Sensor   85  %
CO         17,7  ppm
CO2        8802  831  ppm
SO2        8802  0
H2         8802  0
CO2        1,8  %
EFF.       44,08  %
Losses     55,82  %
Exc. air   1,26

ECOM America Ltd
3628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3280
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

```

*****
* ECOM-32KN *
*****
Date      Time
11.30.35  09:22 PM

Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      83  %
T.Gas      657  %
T.Sensor   85  %
CO         17,7  ppm
CO2        8802  3539  ppm
SO2        8802  0
H2         8802  0
CO2        3,2  %
EFF.       42,15  %
Losses     57,85  %
Exc. air   4,59

ECOM America Ltd
3628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3280
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

```

*****
* ECOM-32KN *
*****
Date      Time
11.30.16  09:17 PM

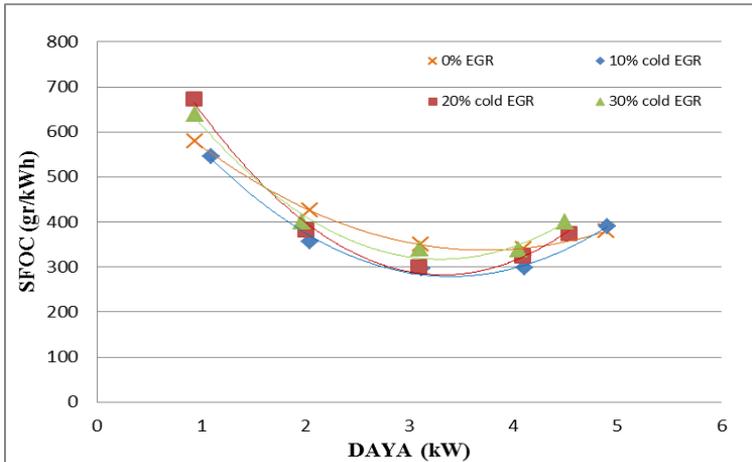
Gas analysis
-----
Fuel type
Gas-Natural

T.Air      82  %
T.Gas      664  %
T.Sensor   82  %
CO         17,7  ppm
CO2        8802  4795  ppm
SO2        8802  0
H2         8802  0
CO2        1,7  %
EFF.       41,2  %
Losses     58,8  %
Exc. air   5,38

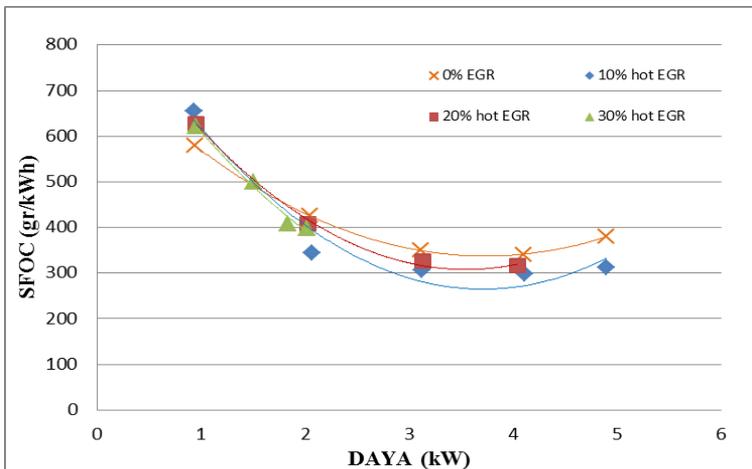
ECOM America Ltd
3628 Oakbrook Drive
Gainesville
Georgia 30607
Tel. 770-532-3280
Fax : 770-532-3628
Toll-Free 877-326-6411
www.ecomusa.com
    
```

Gambar. Hasil data NOx pada 30% cold EGR

Lampiran VI. Grafik perbandingan antara SFOC VS Power pada variasi %EGR



Gambar SFOC vs Power % EGR menggunakan *cold EGR*



Gambar SFOC vs Power % EGR menggunakan *hot EGR*

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta Utara pada tanggal 14 Desember 1992, merupakan anak ke-1 dari 2 bersaudara. Setelah beberapa tahun tinggal di Jakarta Utara, selanjutnya penulis dan orang tua beserta adik pindah ke Kota Bekasi (Jawa Barat). Pendidikan yang ditempuh penulis di SDN Kaliabang Tengah VII Bekasi pada tahun 1999-2005, SMP Negeri 5 Bekasi pada tahun 2005-2008, SMK Negeri 1 Bekasi pada tahun 2008-2011. Kemudian penulis melanjutkan studinya ke jenjang perguruan tinggi D3 yang bertempat di Politeknik Negeri Jakarta, UI Depok (Jawa Barat) jurusan Teknik Alat Berat. Setelah lulus kuliah D3 penulis melanjutkan studi ke jenjang sarjana di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan ITS, Surabaya pada tahun 2014-2016 dengan NRP 4214106001. Penulis aktif dalam berbagai kegiatan yang dilakukan pada waktu mengambil studi D3 di Politeknik Negeri Jakarta. Kegiatan dan organisasi yang diikuti meliputi sebagai berikut anggota KSM Alat Berat, Ketua VC Alat Berat, anggota MPM Se-Politeknik di Indonesia, TIM K3 TAB. Pesan yang ingin penulis sampaikan adalah jangan pernah putus asa dalam melakukan apapun, karena usaha yang baik akan menghasilkan hasil yang baik juga. (anugrahdesputra.me@gmail.com)