



**SKRIPSI**

**Pengaruh Variasi Jarak Offset Crankshaft Pada  
Mesin Diesel Direct Injection Berbasis Simulasi.**

**Mochammad Noer Novaldiansyah  
NRP 4215 105 019**

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

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



**FINAL PROJECT - ME141501**

**Simulation Study of the Effect of Offset  
Crankshaft Distances in Direct Injection Diesel  
Engine Performance.**

**Mochammad Noer Novaldiansyah  
NRP 4215 105 019**

**Supervisor:**

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

**DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

# Pengaruh Variasi Jarak Offset Crankshaft Pada Mesin Diesel Direct Injection Berbasis Simulasi

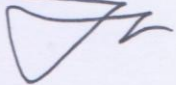
## Skripsi

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Marine Power Plant (MPP)  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Oleh :

**Mochammad Noer Novaldiansyah**  
**NRP. 4215 105 019**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Skripsi:

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

(  )

**SURABAYA**  
**Juli, 2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

# Pengaruh Variasi Jarak Offset Crankshaft Pada Mesin Diesel Direct Injection Berbasis Simulasi

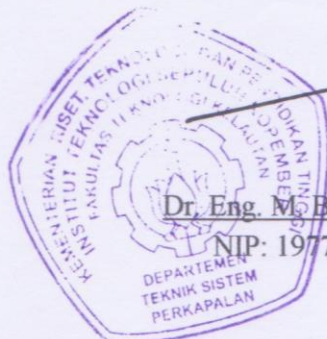
### Skripsi

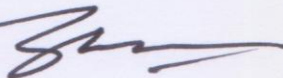
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi *Marine Power Plant* (MPP)  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Oleh :

**Mochammad Noer Novaldiansyah**  
**NRP. 4215 105 019**

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



  
Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T.

NIP: 1977 0802 2008 01 1007

# **Pengaruh Variasi Jarak Offset Crankshaft Pada Mesin Diesel *Direct Injection* Berbasis Simulasi.**

**Nama Mahasiswa** : Mochammad Noer Novaldiansyah  
**NRP** : 4215 105 019  
**Jurusan** : Teknik Sistem Perkapalan  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Aguk Zuhdi M.F. M. Eng., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Mesin diesel merupakan salah satu tipe penggerak yang paling banyak digunakan di sektor industri dan transportasi, terutama sebagai penggerak untuk peralatan yang membutuhkan daya yang besar. Seiring meningkatnya kebutuhan daya oleh mesin diesel, maka banyak cara bisa dilakukan demi tercapainya peningkatan performa dari mesin diesel tersebut.

Metode dalam tugas akhir ini yaitu mulai dari studi literatur, pengumpulan data-data penunjang yaitu spesifikasi mesin yang menjadi parameter pemodelan, pembuatan model mesin pada program, simulasi atau *running* model pada program untuk validasi model, berlanjut pada pengujian/*running* model mesin pada program dengan beberapa varian jarak *offset* sumbu *crankshaft*. Dari hasil pengujian tersebut akan disimpulkan pada jarak berapa sumbu *offset* yang paling ideal untuk peningkatan performa mesin diesel *direct injection*.

Berdasarkan hasil pengujian, daya tertinggi yang bisa dicapai pada putaran tinggi (2000 - 2400 rpm) adalah 118,18 kW pada putaran mesin 2400 rpm dengan *offset* 5 mm, namun pada *rate engine speed*, daya tertinggi adalah 101,91 kW dengan konfigurasi *offset* 10 mm. Pada poros engkol sudut -180 sampai 0 (langkah kompresi) kecepatan piston dengan konfigurasi *offset*, lebih lambat dari pada mesin tanpa konfigurasi *offset*, namun pada poros engkol sudut 0 sampai 180 (langkah usaha) kecepatan piston dengan konfigurasi *offset* lebih cepat dari pada konfigurasi mesin tanpa *offset*. FMEP pada mesin konfigurasi tanpa *offset* berkurang satu tingkat di bawah konfigurasi *offset* 5 mm. Nilai FMEP terendah dari putaran mesin 800-2400 rpm dengan penurunan signifikan terjadi pada konfigurasi 15 mm.

*Kata kunci: Offset engine, Diesel engine, offset crankshaft, performa motor.*

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



# **Simulation Study of the Effect of Offset Crankshaft Distances in Direct Injection Diesel Engine Performance.**

**Student Name** : Mochammad Noer Novaldiansyah  
**NRP** : 4215 105 019  
**Department** : Teknik Sistem Perkapalan  
**Supervisor** : Ir. Aguk Zuhdi M.F. M. Eng., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Diesel engine is one of the most widely used type of drivers in the industrial and transportation sectors, especially as drivers for equipment that requires substantial power. Along with the increasing demand for power by diesel engine, then many ways can be done for the achievement of increased performance of the diesel engine.

The method in this final project is arranged from literature study, collect supporting data of engine specification which become model parameter, making engine model in program, simulation or running model in program for model validation, continuing on test / running engine model on program with some variable of crankshaft axis offset distance. From the test results will be concluded at what distance offset axis is the most ideal for improving the performance of direct injection diesel engines.

Based on the test results, the highest power that can be achieved at high speed (2000 - 2400 rpm) is 118.18 kW at 2400 rpm engine speed with offset 5 mm, but at rate engine speed, the highest power is 101.91 kW with 10 mm offset configuration. At the crankshaft angle of -180 to 0 (compression step) engine piston speed with offset configuration is slower than the engine without offset configuration, but at the crankshaft angle 0 to 180 (power stroke) piston speed with offset configuration is faster than the configuration on engine without offset. FMEP in the configuration without offset decreases one level below the 5 mm offset configuration. The FMEP value is lower than the engine speed of 800-2400 rpm with significant decrease occurring in a 15 mm configuration.

*Keyword: Offset engine, Diesel engine, offset crankshaft, Engine Performance.*





***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan nikmat, rahmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul ***“Pengaruh Variasi Jarak Offset Crankshaft Pada Mesin Diesel Direct Injection Berbasis Simulasi”*** tepat pada waktunya.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Skripsi ini membahas tentang pengaruh jarak *offset crankshaft* terhadap performa, olah gerak dan kerugian mekanis mesin diesel hasil desain yang dilakukan peneliti sebelumnya, sehingga diketahui jarak offset ideal dengan konsumsi bahan bakar yang rendah yang bisa diterapkan pada mesin diesel. Penelitian ini menggunakan metode simulasi yang dilakukan dengan bantuan *software* terkait. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi banyak orang dan dapat menjadikan penelitian ini sebagai referensi pada penelitian selanjutnya.

Selesaiannya laporan dari skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak yang telah memberikan bantuan dari segi pengetahuan serta beberapa masukan kepada penulis. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, beserta Rosulnya yang telah memberikan kekuatan, kemudahan, keselamatan, dan kesehatan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua, serta keluarga besar penulis yang telah memberikan semangat, dukungan materil maupun moril, serta do'a agar terselesainya skripsi ini.
3. Bapak Dr.Eng. Muhammad Badrus Zaman, ST., MT. selaku ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, FTK-ITS.
4. Bapak Ir. Agung Zuhdi Muhammad Fathallah, M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberi arahan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Bapak Adi Kurniawan, ST., MT. selaku dosen wali yang telah membimbing selama menjalani perkuliahan di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan.
6. Teman-teman seperjuangan LJ 2015 dan rekan-rekan member Laboratorium Marine Power Plant yang selalu memberi semangat dan motivasinya.
7. Semua pegawai Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS yang ikut serta ambil bagian sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Akhir kata mudah-mudahan skripsi ini dapat membantu semua yang membacanya dan semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita semua.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>viii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Mekanisme Offset.....	3
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>11</b>
3.1 Diagram Alir .....	12
3.2 Studi Literatur .....	13
3.3 <i>Data Collecting</i> .....	13
3.4 Pemodelan Mesin Diesel <i>direct injection</i> .....	13
3.5 Validasi Pemodelan.....	17
3.6 Pengujian Variabel .....	18
3.7 Analisa data.....	20
3.8 Kesimpulan .....	20
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>21</b>
4.1 Validasi dan Analisa Data.....	21
4.2 Analisa Performa.....	22
4.2.1 Konsumsi Bahan Bakar Terhadap Putaran Mesin.....	22
4.2.2 Torsi Terhadap Putaran Mesin .....	23

4.2.3 Daya Terhadap Putaran Mesin .....	24
4.3 Analisa Olah Gerak.....	25
4.3.1 Kecepatan Piston .....	25
4.3.2 Percepatan Piston.....	26
4.3.3 Gaya Piston .....	27
4.3.4 Torsi Inersia Piston.....	28
4.4 Analisa Kerugian Mekanis.....	29
4.4.1 <i>Friction Power</i> terhadap Putaran Mesin.....	29
4.4.2 FMEP terhadap Putaran Mesin.....	30
4.4.3 <i>Sliding Friction Force</i> .....	31
4.4.3 <i>Sliding Friction Power Loss</i> .....	32
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>	<b>33</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>35</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS.....</b>	<b>37</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>38</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Posisi conrod dan crank saat langkah usaha. (Garvin, 1998).....	3
Gambar 2.2 Posisi conrod dan crank saat BDC. (Garvin, 1998).....	4
Gambar 2.3 Posisi conrod dan crank saat langkah buang. (Garvin, 1998) .....	4
Gambar 2.4 Posisi conrod dan crank saat TDC. (Garvin, 1998).....	4
Gambar 2.5 (Grafik perbandingan Torsi dan CA pada desain offset. Chhaniyara, 2014).....	5
Gambar 2.6 Perwujudan dari peralatan untuk mesin inline dari penemuan ini dengan posisi yang berbeda pada roller dari titik tumpu. (Inden et al, 2012).....	7
Gambar 2.7 Grafik variasi kerugian gesekan piston dengan Crank offset pada variasi putaran kondisi beban penuh. (Kumar 2013).....	8
Gambar 3.1 Diagram Alir.....	12
Gambar 3.2 Skema pemodelan mesin diesel.....	14
Gambar 3.3 Spesifikasi Mesin Diesel 4 langkah 93 kW (Raharjo, 2016).....	17
Gambar 3.4 Perencanaan jarak crank offset 15 mm.....	19
Gambar 3.5 Perencanaan jarak crank offset 10 mm.....	19
Gambar 3.6 Perencanaan jarak crank offset 5 mm.....	20
Gambar 4.1 Grafik BSFOC Vs engine speed dengan variasi jarak offset.....	22
Gambar 4.2 Grafik Torsi Vs engine speed dengan variasi jarak offset.....	23
Gambar 4.3 Grafik Daya Vs engine speed dengan variasi jarak offset.....	24
Gambar 4.4 Kecepatan piston Vs CA (complete) dengan variasi jarak offset.	25
Gambar 4.5 Kecepatan piston Vs CA dengan variasi jarak offset..	25
Gambar 4.6 Percepatan piston Vs CA (complete) dengan variasi jarak offset..	26
Gambar 4.7 Percepatan piston Vs CA dengan variasi jarak offset.....	26
Gambar 4.8 Grafik Gaya piston Vs CA (complete) dengan variasi jarak offset..	27
Gambar 4.9 Grafik Gaya Piston Vs CA dengan variasi jarak offset.....	27
Gambar 4.10 Grafik Torsi inersia Vs CA (complete) dengan variasi jarak offset.	28
Gambar 4.11 Grafik Torsi inersia Vs CA dengan variasi jarak offset..	28
Gambar 4.12 Grafik Daya Gesek Vs engine speed dengan variasi jarak offset..	29
Gambar 4.13 Grafik FMEP Vs engine speed dengan variasi jarak offset....	30
Gambar 4.14 Grafik Sliding Friction Force Vs CA dengan variasi jarak offset.....	31
Gambar 4.15 Grafik Sliding Friction Power Loss Vs CA dengan variasi jarak offset.....	32

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin Diesel 4 langkah 93 kW (Raharjo, 2016) .....	18
Tabel 4.1 Tabel validasi Model Mesin Tanpa <i>Turbocharger</i> . .....	21



***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini sebagian besar *Internal Combustion Engine*, terutama diesel, telah banyak digunakan oleh industri berat di seluruh dunia. Industri berat termasuk pembangkit listrik, penggerak *rotating equipment*, propulsi kapal, dan kendaraan lain yang membutuhkan tenaga besar untuk bergerak. Dalam industri perkapalan, jenis mesin diesel *direct injection*, banyak digunakan oleh kapal-kapal komersial sebagai propulsor utama atau sebagai pembangkit tenaga listrik di kapal.

Namun seiring dengan ketidakstabilan atau bahkan meningkatnya harga minyak di pasaran, konsumsi bahan bakar cenderung dikurangi, untuk menghemat biaya konsumsi bahan bakar. Sebuah inovasi dibutuhkan untuk mendapatkan gagasan bahwa dengan konsumsi bahan bakar lebih rendah, mesin diesel masih bisa menghasilkan tenaga yang sesuai dengan daya yang dibutuhkan. Sehingga pemilik kapal dapat terus mengoperasikan kapal tanpa takut akan ketidakstabilan harga minyak. Dalam rangka untuk mewujudkan gagasan mesin diesel hemat bahan bakar, maka diterapkan desain mesin diesel bermekanisme *offset*, yaitu ketidakselarasan antara sumbu vertikal dari piston-silinder dengan sumbu vertikal *crankshaft*.

Mekanisme *offset* digunakan untuk meningkatkan efisiensi mekanik, meningkatkan *output* torsi, mengurangi kontak lapisan antara piston dan silinder lapisan dalam, mengurangi daya yang hilang akibat gesekan, untuk menghasilkan desain akselerasi yang bagus. Perencanaan *offset crankshaft* sangat berpengaruh sekali pada langkah usaha, karena meningkatnya tekanan ruang bakar (BMEP) pada saat TDC, berkurangnya besar sudut langkah kembali, berkurangnya gesekan antara piston-silinder dan dapat mempersingkat waktu untuk langkah kembali piston (Chhaniyara, 2014).

Untuk mengetahui kinerja motor diesel dengan beberapa variasi jarak *offset crankshaft* tertentu, tolok ukur yang dipakai yaitu : Performa, olah gerak dan kerugian mekanis. Dalam skripsi ini yang dilakukan adalah suatu penelitian yang nantinya dapat menentukan jarak *offset crankshaft* yang mempunyai performa terbaik pada mesin diesel jenis *direct injection*. Simulasi perubahan jarak *offset* tentunya bisa dilakukan dengan metode eksperimen dan simulasi perangkat lunak, namun karena metode eksperimen memerlukan biaya yang besar dan waktu yang relatif lebih lama, maka penelitian ini menggunakan simulasi perangkat lunak.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap performa mesin ?
2. Bagaimana pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap olah gerak piston ?
3. Bagaimana pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap kerugian mekanis mesin ?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan yang ada agar tidak meluas sehingga pembahasan dapat terfokus maka digunakan batasan masalah sebagai berikut :

1. Mesin yang dimodelkan adalah mesin diesel Cummins 4 langkah, 4 silinder.
2. Performa mesin dianalisa berdasarkan variasi jarak *offset piston-silinder* pada proses pembakaran mesin. Dalam penulisan ini digunakan *distance* 5 mm s/d 15 mm dari sumbu *crankshaft*.
3. Performa mesin juga dianalisa berdasarkan variasi putaran mesin.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap performa mesin.
2. Mengetahui pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap olah gerak piston.
3. Mengetahui pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap performa mesin.

## 1.5 Manfaat Penelitian

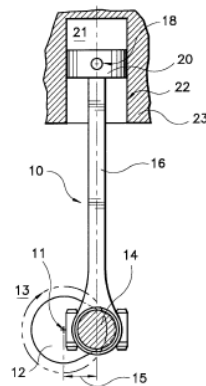
Manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi untuk umum dan khususnya mahasiswa tentang performa mesin dengan desain *offset crankshaft*.

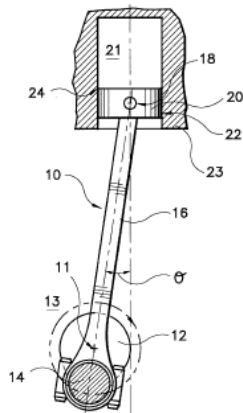
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Mekanisme Offset

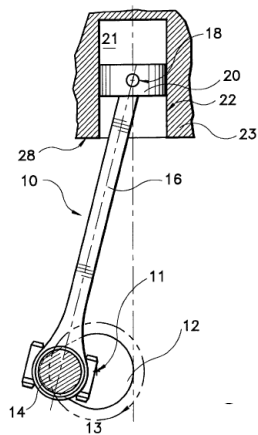
Garvin, (1998) mematenkan tentang *crankshaft* dengan mekanisme *offset* yang menjelaskan bahwa banyak percobaan yang telah dilakukan bertahun-tahun untuk meningkatkan efisiensi dari desain mesin konvensional. Suatu percobaan tersebut melibatkan penggeseran menyamping sumbu putar dari *crankshaft* terhadap sumbu dari piston-silinder. Hasil dari penemuan ini adalah perkembangan *crankshaft* dengan mekanisme *offset* yang bisa membuat mesin lebih efisien dan meningkatnya torsi yang dihasilkan. *Offset Crankshaft* ini di atur jaraknya pada saat piston berada pada langkah usaha, ketika sumbu crankshaft tegak lurus terhadap sumbu piston-silinder dan *connecting rod* secara substansial kolinear dengan sumbu vertikal dari piston silinder yang bisa memaksimalkan torsi pada *crankshaft*. Hasil lainnya adalah dengan memakai *connecting rod* yang lebih panjang, maka akan meningkatkan tekanan pembakaran pada saat piston berada di TDC yang dapat menimbulkan peningkatan keluaran daya dan torsi mesin serta dapat mengurangi gesekan antara piston dan silinder liner.



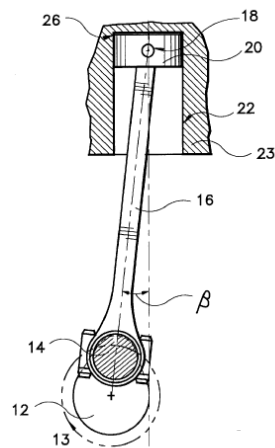
Gambar 2.1 Posisi conrod dan crank saat langkah usaha. (Garvin, 1998)



Gambar 2.2 Posisi conrod dan crank saat BDC. (Garvin, 1998)

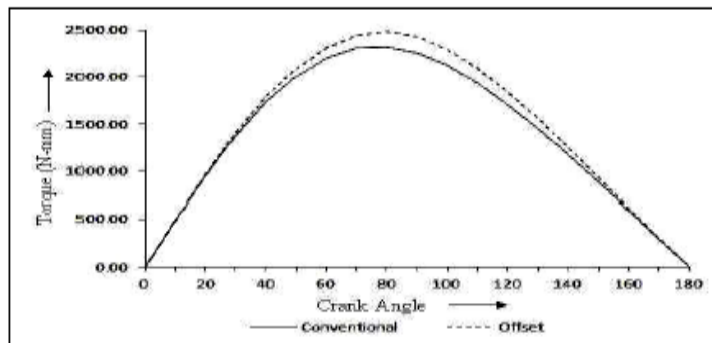


Gambar 2.3 Posisi conrod dan crank saat langkah buang. (Garvin, 1998)



Gambar 2.4 Posisi conrod dan crank saat TDC. (Garvin, 1998)

Chhaniyara (2014) menganalisa performa mesin dengan desain *offset crankshaft* menggunakan metode *kinematic* dan *dynamic analysis* yang hasilnya adalah pada analisa kinematis dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 2.5 (Grafik perbandingan Torsi dan CA pada desain *offset*. Chhaniyara, 2014)

Grafik torsi terhadap sudut *crankshaft* tersebut menunjukkan peningkatan pada torsi milik mesin desain *offset* dibanding mesin desain konvensional pada titik *Crank Angle* yang sama.

Pada analisa secara *dynamic* hasilnya yaitu dengan menggunakan mekanisme *crankshaft offset* maka bisa mengurangi getaran, kekasaran dan meningkatkan kehalusan operasional dari mesin juga mengurangi konsumsi bahan bakar. Dari analisa dan perhitungan yang dilakukan, telah di simpulkan bahwa kinerja dari mesin *offset crankshaft* 3,59% lebih baik dari mesin konvensional. Karena mekanisme *offset* ini, gaya reaktif di salah satu sisi yang timbul pada dinding silinder meningkat sehingga juga menghasilkan peningkatan dorongan yang berlawanan dan tahanan gesek terhadap piston. Hal ini bisa di hindari dengan meminimalisir berat piston dan panjang piston *skirt*. Selain itu hasil dari penelitian Akhil adalah lebih halusnya kecepatan sudut dan percepatan sudut pada *offset crankshaft* ini dibanding mesin pembakaran dalam konvensional.

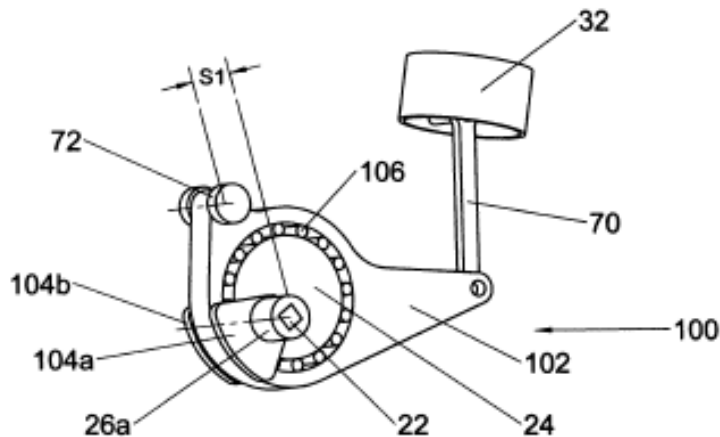
FEV (2009) dalam penelitiannya tentang desain *offset crankshaft* dan pengaruhnya terhadap gesekan piston dan ring piston terhadap silinder menyimpulkan bahwa mekanisme *offset* ini mempunyai potensi untuk mengurangi gesekan antara piston dan silinder. Besarnya gesekan bisa di kurangi pada kondisi beban penuh atau pada beban tertentu. FEV yang bergerak dibidang desain dan pengembangan berbagai mesin termasuk *diesel engine* menganalisa desain *offset* ini menggunakan metode simulasi dengan pendekatan *stribeck curve* dengan model engine berkapasitas 75 kW dengan volume 1800cc. Mereka juga mengatakan dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa mesin *offset* yang kesehariannya lebih sering di pakai pada titik beban yang rendah, maka manfaat dari desain *offset* tersebut akan terasa sepanjang *lifetime* mesin.

Begitu juga untuk mesin yang sering digunakan pada kondisi mendekati beban penuh, dengan desain *offset* ini, akan bisa mengurangi konsumsi bahan bakarnya.

Sementara Tomic *et al* (2012) yang juga membuat penelitian tentang optimasi *crankshaft offset* namun pada mesin SI menggunakan algoritma genetik NSGA-II. Analisa tersebut menggunakan karakteristik mesin SI 4 langkah dengan bore = 79mm, Stroke = 81,4mm dan kompresi rasio sebesar 11,11 di beri variasi putaran mesin pada 2000 rpm dan 5500 rpm, pada variasi jarak offset yaitu dari rentang 15 mm sampai 30 mm pada 2000 rpm dan 4 mm sampai 12 mm pada 5500 rpm. Hasilnya adalah pada 2000 rpm, didapatkan jarak *offset* ideal yaitu 17,5 mm dengan pengurangan gaya gesek 3,9%. Begitu juga pada 5500 rpm, didapatkan jarak *offset* ideal sebesar 4,9 mm dengan pengurangan gaya gesek sebesar 0,26%. Gaya yang dibutuhkan piston untuk langkah usaha pun berkurang dibanding mesin tanpa offset. Mereka menyimpulkan pada desain offset ini, kecepatan piston lebih rendah sekitar TDC yang menimbulkan peningkatan tekanan *in-cylinder* saat pembakaran dan berpengaruh pada peningkatan performa. Mereka juga menyimpulkan bahwa dengan desain mesin seperti itu, maka potensi untuk mengurangi *losses* mekanik pada putaran mesin yang lebih rendah akan meningkat. Potensi keseluruhan untuk pengurangan *losses* mekanik secara realistis adalah sekitar 3%.

Inden *et al* (2012) mematenkan tentang mekanisme resiprokal piston dengan perpanjangan jarak *offset* piston. Jenis mekanisme yang mempunyai satu silinder yang memiliki sumbu longitudinal, satu piston yang memiliki pin dan telah dipasang di silinder, *crankshaft* utama dengan poros tengah yang diberi jarak *offset* dari sumbu longitudinal silinder, badan silinder melingkar berbentuk *circular* eksentrik, yang tidak dapat berputar terpasang pada *crankshaft* utama dan rocker arm, yang intinya adalah tuas urutan kedua. Tuas tersebut dipasang secara memanjang pada *circular* eksentrik. Mekanisme ini juga dilengkapi dengan *connecting rod* yang menghubungkan silinder ke salah satu lengan *rocker arm*. Lengan lain dari rocker arm memiliki roller yang diarahkan dalam jalur terbatas dan bekerja sebagai titik tumpu tuas dan sekaligus bertindak sebagai stabilizer. Penemuan ini mengacu pada mekanisme piston resiprokal seperti mesin pembakaran dalam, kompresor dan pompa. Susunan geometris yang berubah ini menimbulkan peningkatan daya dan torsi untuk mesin pembakaran dalam. Tujuan dari penemuan ini adalah munculnya mekanisme piston resiprokal untuk meningkatkan gaya yang diberikan ke lengan momen *crankshaft*, mengurangi hubungan antara *stroke* piston dan panjang lengan momen *driveshaft/crank*, peningkatan torsi pada *crankshaft* mesin, dan meningkatkan efisiensi bahan bakar terhadap daya mesin yang dibutuhkan.

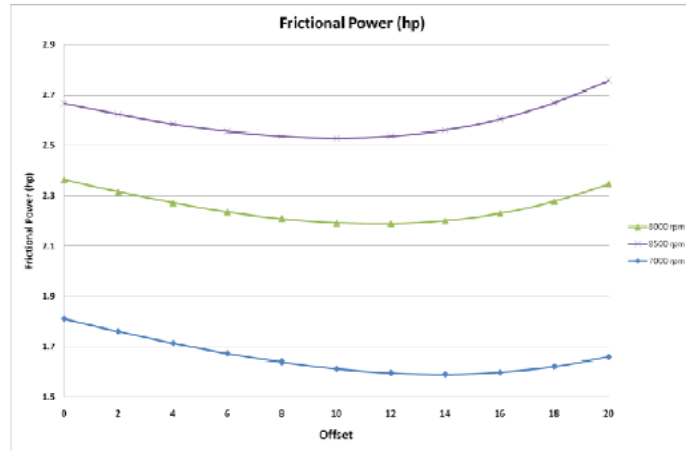




Gambar 2.6 Perwujudan dari peralatan untuk mesin inline dari penemuan ini dengan posisi yang berbeda pada roller dari titik tumpu. (Inden et al, 2012)

Kumar (2013) dalam penelitiannya tentang analisa *Multi Body Dynamic* pada mekanisme *slider crank* untuk mempelajari *crankshaft offset* menyatakan bahwa *crank offset* ini harus ditentukan setelah melalui diskusi yang sangat hati-hati jika ingin diterapkan pada mesin, karena jika hanya berpedoman pada satu nilai percobaan *offset*, mungkin tidak akan menghasilkan keuntungan yang sama disemua kondisi kerja mesin. Penelitiannya menggunakan metode simulasi dengan perangkat lunak *linear 3D model* untuk pemodelan, dan *Hypergraph* untuk analisa gaya gesek dan daya gesek pada kontak antara piston-liner. Data hasil penelitiannya menunjukkan bahwa ada peningkatan efisiensi mekanis yang patut dipertimbangkan pada mesin dengan desain *offset*, yaitu peningkatan efisiensi mekanis sekitar 6% pada 8000 rpm dan 8,2% pada 7000 rpm. Keseluruhan pengurangan *frictional losses* berkisar antara 4% sampai 10%. Peningkatan yang efektif pada daya mesin atau *Brake Horse Power* sekitar 0.5 %.

Dr. Taj et al (2008) juga membuat penelitian tentang studi perbandingan performa mesin pembakaran dalam antara konfigurasi *Inline*, *Offset*, dan *Twin Crankshaft*. Beliau mengatakan *Twin Crankshaft engine* adalah konfigurasi baru pada mesin pembakaran dalam yang bisa mengatasi masalah keausan pada liner mesin, meningkatkan efisiensi mesin dan beberapa keuntungan lainnya dibanding mesin konvensional.



Gambar 2.7. Grafik variasi kerugian gesekan piston dengan Crank offset pada variasi putaran kondisi beban penuh. (Kumar 2013)

Dalam *paper*-nya, dilakukan analisa komputasional untuk membandingkan tiga konfigurasi tersebut dengan ukuran yang sama pada silinder *bore*, putaran, *crank arm*, berat piston dan penambahan panas. Pada unjuk kerjanya telah didapatkan bahwa gaya *side thrust* yang menyebabkan keausan liner dan mengurangi torsi keluaran. Hasil dari penelitiannya adalah konfigurasi *twin crankshaft engine* meningkatkan torsi serta gaya *side thrust* pada *twin crankshaft engine* adalah nol. Pada konfigurasi *offset crankshaft*, hasilnya adalah mengurangi gaya *side thrust*, namun torsi yang dihasilkan lebih kecil dari pada *twin crankshaft*.

Hongwei *et al* (2015) membuat penelitian tentang analisa yang lebih mendetail tentang piston *crankshaft offset* yaitu tentang pengaruhnya terhadap gerakan sekunder piston. Gerakan sekunder piston ini adalah sisa-sisa gerakan kecil yang ada pada proses resipokal dari mesin pembakaran dalam. Gerakan sekunder piston ini juga berpengaruh pada performa mesin. Analisa tersebut menggunakan metode analisa dinamis yang berdasar pada teori lubrikasi dinamis pada *skirt* dan ring piston. Menggunakan bantuan perangkat lunak *AVL Glide*. Data hasil penelitiannya adalah *crankshaft offset* pada jarak -14,5 mm dapat mengurangi *piston impact energy* maksimum menjadi 44,7% , tetapi *losses* gesekan piston *skirt* bertambah besar menjadi 17,5%. Ketika jarak *offset* diatur sebesar 14,5 mm, *losses* piston *skirt* berkurang 10.1% dari *crankshaft* tanpa *offset*, dan *piston impact energy* berkurang sekitar 4.1 %. Pada jarak *offset* 7,25 mm, *losses* gesekan piston *skirt* menjadi 6 % lebih kecil dari pada *crankshaft* tanpa *offset*, *piston impact energy* menurun sekitar 2.3%. Hasil dari penelitian ini menyimpulkan bahwa menggunakan pengaturan *crankshaft offset* yang lebih

besar ini bisa mengurangi gerakan sekunder piston dan “*piston slap*” pada waktu yang sama. Dan dalam contoh ini, jarak *offset* optimal adalah sekitar 14,5 mm.

Sementara *Guzzomi et al (2008)* dalam *paper*nya yang membahas tentang pengaruh variasi inersia pada mesin termasuk gesekan piston dan *crank* atau *gudgeon pin offset* menyatakan bahwa hasil dari model yang di analisisnya mengindikasikan, untuk nilai tipikal, *gudgeon offset* pin tidak memberi pengaruh signifikan terhadap fungsi inersia., Namun, untuk nilai-nilai yang lebih luas yang digunakan dalam *crankshaft offset*, masuknya *offset* dalam model mesin, meningkatkan prediksi ketepatan. Jarak *crank offset* yang besar, mempermudah terlihatnya perubahan fasa dan asimetri amplitudo dalam fungsi inersia. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisa matematis untuk prediksi awal model dan eksperimen untuk verifikasi. Pada analisa kinetik, diketahui bahwa hubungan piston *side force* dan gaya gesek adalah *interdependent*. Metode eksperimen pada mesin kecil dengan satu silinder telah mengkonfirmasi prediksi model.

*Malpress et al (2007)* membuat penelitian tentang performa mesin SI *opposed piston* dengan konfigurasi *crankshaft offset* menggunakan metode analisa termodinamika berbasis simulasi (Matlab) dan *friction modeling* berbasis simulasi (FEA). Dari penelitiannya didapatkan bahwa efisiensi mesin meningkat sekitar 38% dengan konfigurasi *offset* ini. Mesin yang di gunakan adalah Mesin dengan *piston porting*, mesin bensin dengan pengapian yang terdiri dari dua piston berlawanan dalam silinder tunggal, dikendalikan oleh dua *crankshaft* yang telah disinkronisasi di sisi lain ujung silinder.

Dari beberapa metodologi penelitian tentang *offset crankshaft* yang telah dilakukan sebelumnya, maka pada penelitian ini akan dilakukan analisa tentang performa, olah gerak dan kerugian mekanis *crankshaft offset* pada mesin diesel jenis *direct injection* yang telah banyak dipakai pada industri perkapalan, dan metode penelitian yang digunakan adalah simulasi dengan perangkat lunak yang memang dirancang khusus untuk menganalisa berbagai permasalahan tentang *Internal Combustion Engine*.

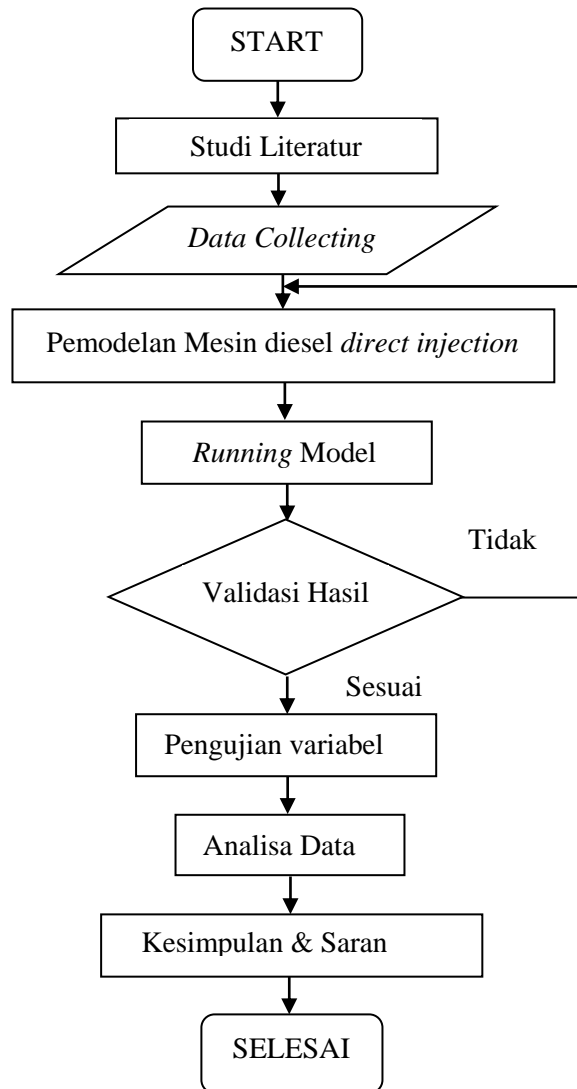
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

### **BAB III**

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Untuk menyelesaikan permasalahan penelitian, akan digunakan metode simulasi model 1D. Garis besar pemodelan diawali dengan *data collecting*. Data diperoleh dari membongkar mesin dan mengukur bagian-bagian utamanya. Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan model pada perangkat lunak. Setelah itu dilanjutkan dengan validasi model. Pada akhirnya dilakukan simulasi dengan beberapa variabel yang ditentukan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat *flowchart* pada gambar 3.1.

### 3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Metodologi Penelitian

### 3.2 Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan dengan pengumpulan referensi-referensi yang berhubungan dengan materi yang dibahas, dalam hal ini pengaruh perubahan jarak *offset crankshaft* terhadap performa pada *direct injection* diesel engine. Adapun Literatur tersebut didapatkan dari buku, internet dan paper.

### 3.3 Data Collecting

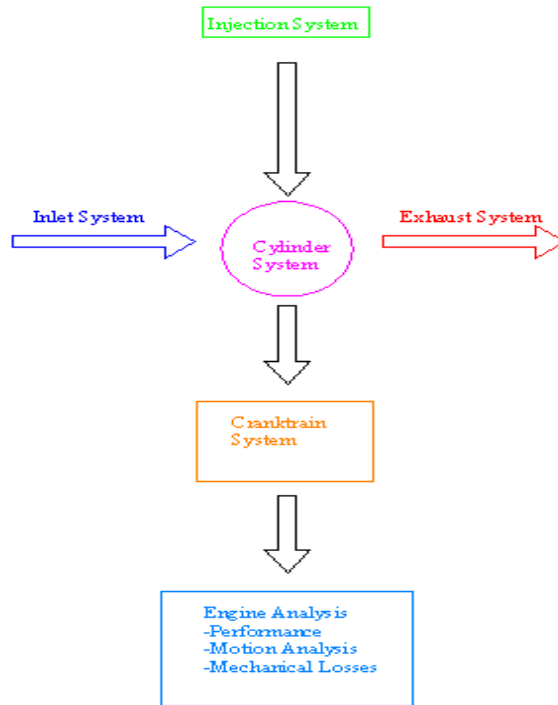
Untuk melakukan analisa unjuk kerja dari mesin, maka dilakukan pengumpulan parameter – parameter yang dibutuhkan dalam pemodelan engine pada perangkat lunak simulasi dengan mengambil data dari brosur engine, manual instalasi, *project guide*, pembongkaran *engine* dan melakukan pengukuran terhadap komponen *engine*.

### 3.4 Pemodelan Mesin diesel *direct injection*

Pemodelan pada perangkat lunak ini terdiri dari dua bagian besar komponen, yaitu bagian *engine performance* dan bagian *engine cranktrain*. Pada bagian *Engine performance* dirancang untuk simulasi *steady-state* dan *transient* dan dapat digunakan untuk analisis mesin dan kendali *powertrain*. Hal ini berlaku untuk semua jenis mesin pembakaran dalam dan menyediakan pengguna dengan banyak komponen untuk model untuk membuat konsep model yang lebih kompleks.

Kemudian salah satu dari dua sumber utama gaya, momen dan torsi yang mempengaruhi dinamika mesin pembakaran dalam adalah *engine cranktrain*, atau bagian yang bergerak yang mengirimkan torsi dan tenaga untuk penggunaan eksternal, misalnya untuk mendorong kendaraan. *Engine cranktrain* ini terdiri dari *crankshaft*, *connecting rod* dan piston.

Pada pemodelan ini yang dilakukan adalah memasukan parameter-parameter yang dibutuhkan dalam menjalankan perangkat lunak. Pemodelan dilakukan dengan mengintegrasikan komponen *engine performance* dan komponen *engine cranktrain* agar konfigurasi *offset crankshaft* bisa di terapkan dan berpengaruh pada *output* performa, olah gerak dan kerugian mekanis mesin.



Gambar 3.2 Skema pemodelan mesin diesel

### 3.1 Pembuatan Model per bagian

Untuk membuat model maka bagian-bagian mesin diesel harus dibuat dengan memasukkan data sesuai dengan parameter yang dibutuhkan. Pada dasarnya model dibagi atas 4 sistem utama, antara lain: sistem *intake*, silinder dan sistem injeksi bahan bakar, Sistem *cranktrain* dan *engine analyzer*, dan sistem *exhaust*.

a. Sistem *intake* terdapat beberapa komponen, yaitu:

#### 1. *Inlet Environment*

Langkah pertama adalah membuat batasan kondisi lingkungan, dengan menentukan nilai tekanan, temperatur, dan komposisi udara lingkungan sesuai dengan kondisi normal.

#### 2. *Intake runner*

Langkah selanjutnya adalah membuat *intake runner* berupa pipa (silinder) yang berfungsi untuk menyambung antara "*Environment*" dengan *intake port*. *Intake runner* dibuat dengan dimensi dan material yang sesuai.



### 3. Kompresor (*Turbocharger*)

Pada mesin diesel yang akan dimodelkan, terdapat kompresor pada *intake system* sebagai bagian dari perangkat *turbocharger*. Pemodelan kompresor sesuai dengan kompresor map dari spesifikasi kompresor yang dipakai pada mesin.

### 4. *Intercooler*

*Intercooler* diperlukan untuk menjaga kerapatan massa udara *intake* akibat panas yang dihasilkan dari proses *force induction* pada kompresor. Pada pemodelan *intercooler*, atribut yang harus diisi yaitu diameter pipa inlet dan outlet dan material pipa.

### 5. *Intake Manifold*

Langkah selanjutnya adalah membuat *intake manifold*, berupa pipa (silinder) yang berfungsi untuk menyambung dari sistem *turbocharger* menuju *intake port*. Atribut yang diisi adalah volume, luasan permukaan dan material yang sesuai.

### 6. *Intake port*

Langkah selanjutnya adalah membuat *intake port*, yang juga berupa pipa (silinder) yang berfungsi untuk menyambung antara *intake runner* dengan *intake valve*. *Intake port* dibuat dengan dimensi dan material yang sesuai.

### 7. *Intake valve*

Pembuatan model katup berfungsi untuk membuat karakteristik dari *camshaft* dan katup mesin diesel. *Intake model* dibuat dengan memasukkan nilai diameter katup, *valve lash*, *cam timing angle*, dan juga *lift arrays*.

### b. Silinder, komponen *engine-crank*, dan sistem injeksi bahan bakar, terdapat beberapa komponen yang harus didefinisikan, diantaranya:

#### 1. Silinder

Untuk membuat model silinder membutuhkan input data seperti, objek referensi, seperti temperatur dinding silinder, aliran fluida, transfer panas, model pembakaran.

#### 2. Injektor bahan bakar

Objek selanjutnya adalah injektor nozzle, untuk mesin dengan tipe *Direct Injection Compression Ignition (DICI)*. Atribut yang diisi antara lain, temperatur bahan bakar, jenis bahan bakar, sudut mulai terjadi pembakaran, massa bahan bakar yang diinjeksikan.

### c. Sistem *engine cranktrain* dan *engine analyzer*, terdapat beberapa komponen yang harus didefinisikan, diantaranya:

#### 1. *Piston guide*

Objek ini mendefinisikan piston yang digunakan pada mesin. Untuk membuat piston, atribut yang harus diisi pada *Piston guide* adalah diameter *bore* dan berat piston.

## 2. *Connecting rod*

Objek ini mendefinisikan *connecting rod* yang digunakan pada mesin. Untuk membuat *conrod*, atribut yang harus diisi pada *connecting rod* adalah panjang *conrod* dan berat *conrod*.

## 3. Journal

Pada objek ini, yang didefinisikan adalah jurnal utama yang digunakan pada mesin. Untuk membuat jurnal utama, atribut yang harus diisi pada *journal* adalah panjang jurnal utama, diameter luar dan berat jurnal utama.

## 4. *Crank Pin dan Crank Web*

Objek *crank pin* dan *crank web* ini mendefinisikan *crank pin* dan *web crankshaft* yang digunakan pada mesin. Untuk membuat *crank pin*, atribut yang harus diisi pada *Crank Pin* adalah radius *throw* yaitu dari titik pusat *crankshaft* ke *crank pin*, panjang pin, diameter luar pin, berat pin dan *conrod offset* jika ada, kemudian pada *crank web* atribut yang diisi adalah panjang *web* dan berat *web*.

## 5. *Crank analysis*

Objek selanjutnya adalah pengaturan secara khusus karakteristik *crankshaft*. Untuk membuat objek *crank analysis*, atribut yang harus diisi pada adalah diameter tipe mesin (*4-stroke* atau *2-stroke*), arah putaran *crankshaft*, jarak *crank offset*, *type of engine (trunk piston* atau *crosshead)*, putaran mesin, urutan pembakaran dan jumlah silinder.

## 6. *Engine analysis*

Objek ini mendefinisikan susunan geometris silinder, dan karakteristik blok mesin yang lainnya. Untuk membuat *engine analysis*, atribut yang harus diisi pada antara lain, nilai gesekan dan geometri silinder.

### d. Sistem *exhasut* terdapat beberapa komponen yang harus didefinisikan, diantaranya:

#### 1. *Exhaust valve*

Seperti pembuatan model katup *intake*, *exhaust valve* juga berfungsi untuk membuat karakteristik dari *camshaft* dan katup mesin diesel. *Intake* model katup dibuat dengan memasukkan nilai diameter katup, *valve lash*, *cam timing angle*, dan juga *lift arrays*.

#### 2. *Exhaust Port*

Selanjutnya adalah membuat *exhaust port* dari mesin. Yang berupa pipa (silinder) yang berfungsi untuk menyambung antara *exhaust port* dengan *exhaust valve*. Atribut utama yang harus diisi antara lain: diameter, panjang, material, nilai kekasaran, temperatur.

#### 3. Turbin (*Turbocharger*)

Untuk pemodelan turbin, atribut yang diisi, sama dengan kompresor yaitu, diameter *wheel* turbin, putaran turbin, turbine map yang dibuat berdasarkan data dari spesifikasi turbin yang di pakai pada mesin.

#### 4. *Exhaust runner*

Langkah selanjutnya adalah membuat *exhaust runner* yang berfungsi untuk menyambung antara *Environment* dengan *exhaust port*. Kemudian masukkan data dimensi dan jenis material sesuai dengan pengukuran.

#### 5. *EndEnvironment*

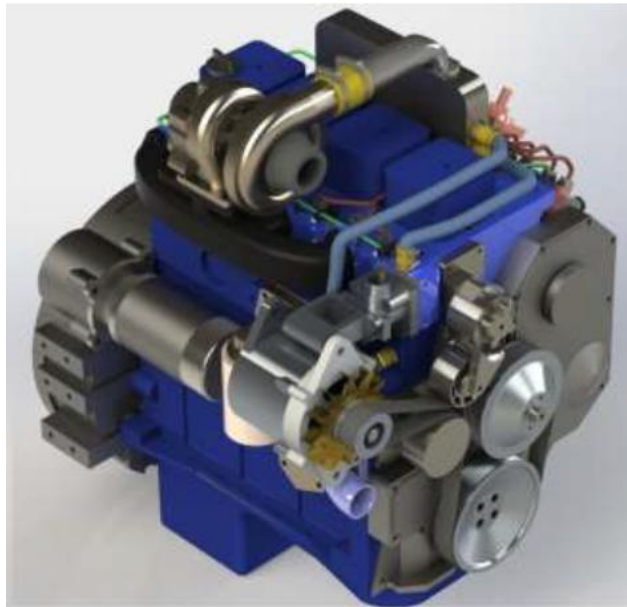
Langkah terakhir adalah membuat batasan kondisi lingkungan gas buang pembakaran. Pembuatan dilakukan seperti *environment* pada sisi inlet, yakni dengan menentukan nilai tekanan, temperatur, dan komposisi udara hasil sisa pembakaran.

### 3.2 Perangkaian objek

Setelah pendefinisian objek selesai dilakukan, maka selanjutnya adalah perangkaian objek. Objek dirangkai sesuai dengan urutan sistem sehingga membentuk model mesin diesel yang utuh sesuai dengan skema pada gambar 3.2.

### 3.5 Validasi Pemodelan

Pada tahapan validasi ini merupakan kesesuaian antara data hasil pemodelan dengan data mesin dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.



Gambar 3.3 Spesifikasi Mesin Diesel 4 langkah 93 kW (Raharjo, 2016).

Spesifikasinya adalah sebagai berikut:

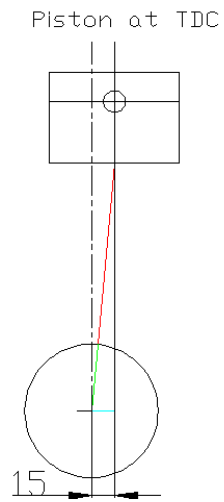
Tabel 3.1 *Spesifikasi Mesin Diesel 4 langkah 93 kW (Raharjo, 2016).*

<b>Tipe Mesin</b>	Diesel DI
<b>Tipe Langkah (Stroke)</b>	4
<b>Bore (mm)</b>	102
<b>Stroke (mm)</b>	120
<b>Panjang Connecting Rod (mm)</b>	191.7
<b>Displacement (liter)</b>	3.9
<b>Jumlah Silinder</b>	4
<b>Rasio Kompresi</b>	1: 16.5
<b>Putaran (rpm)</b>	2200
<b>Daya (Tanpa Turbocharger) (kW)</b>	39
<b>Torsi (Tanpa Turbocharger) (N.m)</b>	170.8
<b>BSFC (Tanpa Turbocharger) (g/kWh)</b>	536.8

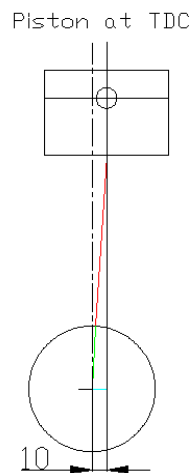
Setelah disimulasikan dan diperiksa hasil *running* dari model yang telah dibuat pada perangkat lunak tersebut, jika daya pada kondisi tanpa *turbocharger* yang dihasilkan sama atau lebih besar dari data penelitian sebelumnya, maka model sudah benar. Jika hasil pemodelan belum mencapai atau kurang dari data penelitian sebelumnya, maka dilakukan pemodelan ulang dengan melakukan analisa terhadap data-data inputnya.

### 3.6 Pengujian Variabel

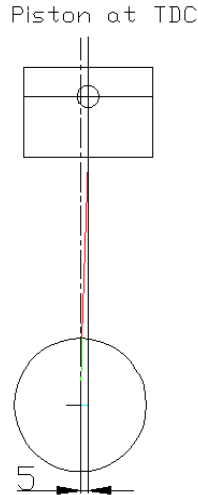
Apabila didapatkan pemodelan sesuai dengan karakteristik *engine* yang sesungguhnya, maka dapat dilakukan pengujian dengan merubah jarak *offset crankshaft* sebesar 5 mm, 10 mm dan 15 mm pada simulasi perangkat lunak. Masing-masing variabel tersebut juga disertai dengan variasi putaran mesin dengan rentang 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 2000, 2200 dan 2400 pada kondisi *full load*. Pada tahap ini, untuk bisa memberi variabel nilai pada perangkat lunak, maka harus diubah nilai pada kolom *crank offset* sesuai rentang jarak dari 0 hingga 15 mm dengan meng-*input*-nya pada *case setup* sebelum *running*. Kolom *crank offset* berada pada objek *Crank analysis*.



Gambar 3.4 *Perencanaan jarak crank offset 15 mm*



Gambar 3.5 *Perencanaan jarak crank offset 10 mm*



Gambar 3.6 Perencanaan jarak crank offset 5 mm

### 3.7 Analisa Data

Setelah didapatkan data-data dari *running* model dengan variabel jarak *offset* dan putaran mesin pada perangkat lunak, baru kita melakukan analisa untuk menjawab hal-hal yang berkaitan dengan penelitian, dalam hal ini pengaruh jarak *offset crankshaft* terhadap :

- Performa : -Torsi  
-Daya  
-SFOC
- Olah Gerak : -Kecepatan piston  
-Percepatan piston  
-Gaya piston  
-Torsi inersia
- Kerugian Mekanis : -*Friction power*  
-FMEP  
-*Sliding friction force*  
- *Friction power loss*

sehingga nantinya akan menghasilkan jarak *offset* ideal dengan performa terbaik.

### 3.8 Kesimpulan

Kesimpulan berisi tentang jawaban dari permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini. Sehingga penelitian ini jelas.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Validasi dan Analisa Data

Dalam bab ini dijelaskan analisa dan pembahasan penelitian hasil dari *running* pemodelan pada perangkat lunak. Berdasarkan rumusan masalah, ada beberapa parameter yang di analisa yaitu performa, olah gerak piston dan kerugian mekanis mesin. Pada parameter performa yang di analisa adalah: torsi, daya dan sfoc. Parameter olah gerak yang dianalisa adalah kecepatan, percepatan, torsi inersia dan gaya piston. Kemudian pada parameter kerugian mekanis yang dianalisa adalah *friction power*, FMEP, *sliding friction force* dan *sliding friction power loss*.

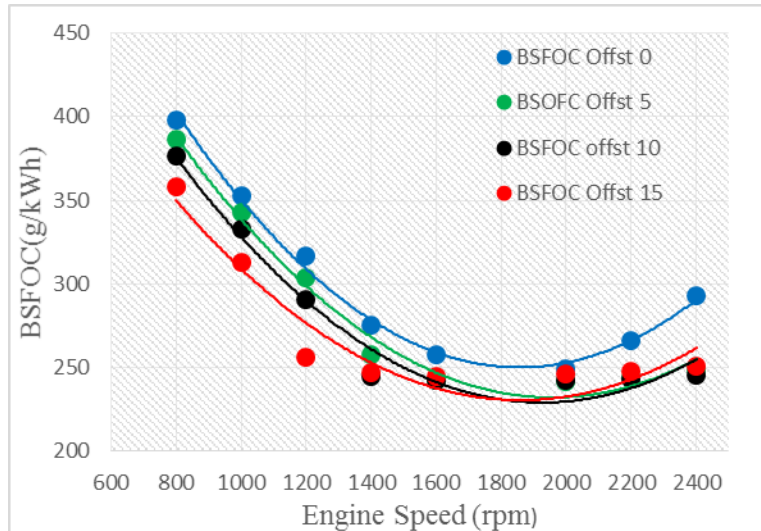
Sebelum dilakukan pengujian *offset crankshaft*, model telah divalidasi dengan data mesin dengan kondisi tanpa *turbocharger* yang dipakai pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Abdul Hakam Muwaffaq berjudul “Prediksi Performa Marine Diesel 4 Langkah 93 KW dengan Metode Simulasi” (2016).

Tabel 4.1 Tabel validasi model mesin tanpa *turbocharger*.

Data Validasi	Performance		Data Hasil <i>Running</i>	Performance
Brake Power [kW]	39.3		Brake Power [kW]	42.4
Brake Power [HP]	52.8		Brake Power [HP]	56.9
Brake Torque [N.m]	170.8		Brake Torque [N.m]	184
Fuel Flow Rate [kg/h]	21.1		Fuel Flow Rate [kg/h]	24.8
BSFC[g/kW.h]	536.8		BSFC[g/kW.h]	585.3

## 4.2 Analisa Performa

### 4.2.1 Konsumsi Bahan Bakar terhadap Putaran Mesin (BSFOC)

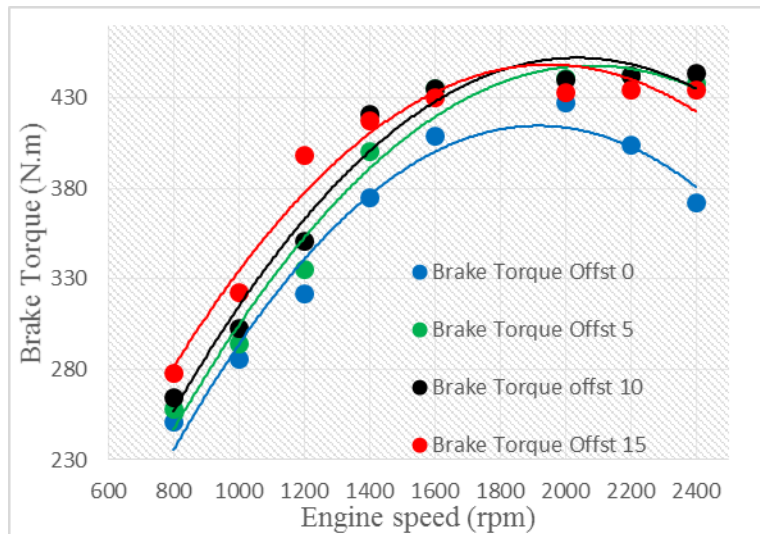


Gambar 4.1 Grafik BSFOC Vs engine speed dengan variasi jarak offset.

BSFOC adalah salah satu parameter performa mesin yang merepresentasikan jumlah bahan bakar yang di konsumsi untuk setiap satuan daya yang di keluarkan. Nilai BSFOC akan berbeda-beda sesuai variabel konfigurasi jarak *offset crankshaft* yang diterapkan pada model. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa pada *engine speed* yang rendah yaitu 800 – 1200 rpm dengan konfigurasi tanpa *offset crankshaft*, nilai konsumsi bahan bakar lebih tinggi dari pada konfigurasi dengan *offset* 5 mm. Kemudian berturut-turut semakin rendah dengan seiring bertambahnya jarak *offset crankshaft*. Namun pada *engine speed* menengah yaitu 1400-2000 rpm, konsumsi bahan bakar dengan konfigurasi *offset* 15 mm meningkat diatas konfigurasi *offset* 10 mm. Konfigurasi tanpa *offset* tetap pada nilai tertinggi yaitu 266.45 g/kwh , pada konfigurasi *offset* 5 mm nilai konsumsi bahan bakar hampir sama dengan konfigurasi *offset* 15 mm. Ketika mesin mencapai *rate engine speed* dan *high speed* yaitu 2200 -2400 rpm, nilai konsumsi bahan bakar pada konfigurasi tanpa *offset* mulai meningkat. Namun pada konfigurasi *offset* 5, 10 dan 15 mm cenderung stabil tanpa adanya kenaikan yang signifikan.



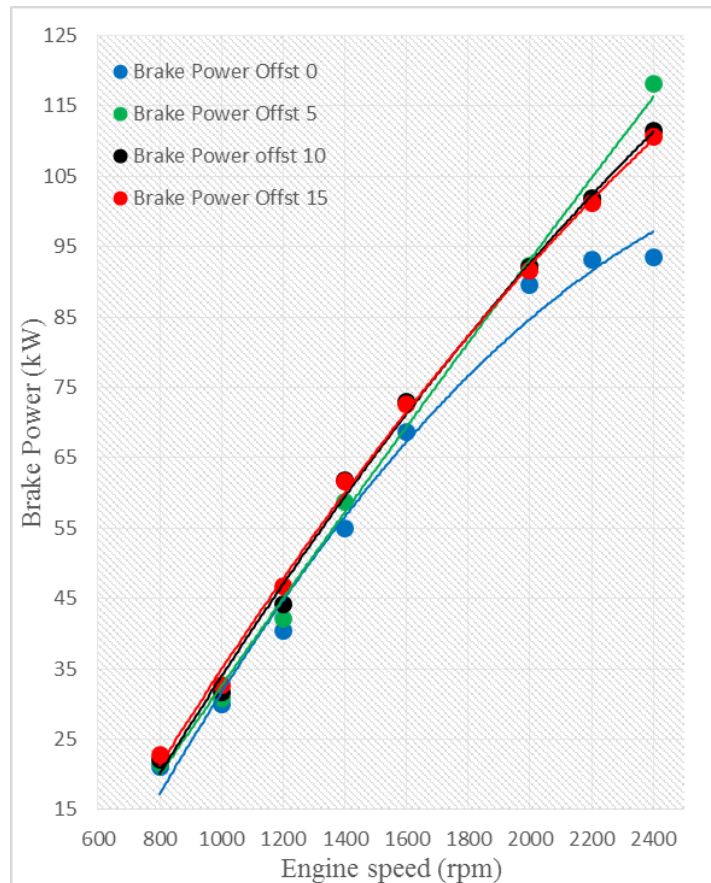
#### 4.2.2 Torsi terhadap Putaran Mesin (BTORQUE)



Gambar 4.2 Grafik Torsi Vs engine speed dengan variasi jarak offset.

BTORQUE atau torsi adalah unsur performa yang menghasilkan daya mesin diesel pada *rate engine speed*nya. Torsi berasal dari gaya yang di timbulkan oleh ledakan pembakaran yang mendorong piston ke BDC yang besarnya searah juga dengan total jarak pin-piston ke pusat *crankshaft*. Pada mesin diesel dengan konfigurasi tanpa *offset*, torsi tertinggi yang dihasilkan adalah 404.25 Nm pada *engine speed* 2000 rpm. Dengan adanya konfigurasi berbeda yaitu jarak *offset* sebesar 5 mm, torsi keluaran semakin meningkat. Peningkatan nilai torsi secara signifikan terjadi pada *high engine speed* 2400 rpm dengan nilai torsi sebesar 438.39 Nm. Ketika konfigurasi jarak *offset* ditambahkan lagi sepanjang 10 mm, nilai torsi maksimum pada *engine speed* 2400 rpm juga meningkat lagi yaitu sebesar 442.36 Nm. Namun penambahan *offset* lagi sepanjang 15 mm tidak menimbulkan peningkatan lagi pada nilai torsi maksimum. Hal yang terjadi adalah penurunan torsi yang menjadi sebesar 434.61 Nm pada *engine speed* 2400 rpm.

### 4.2.3 Daya terhadap Putaran Mesin (BPOWER)



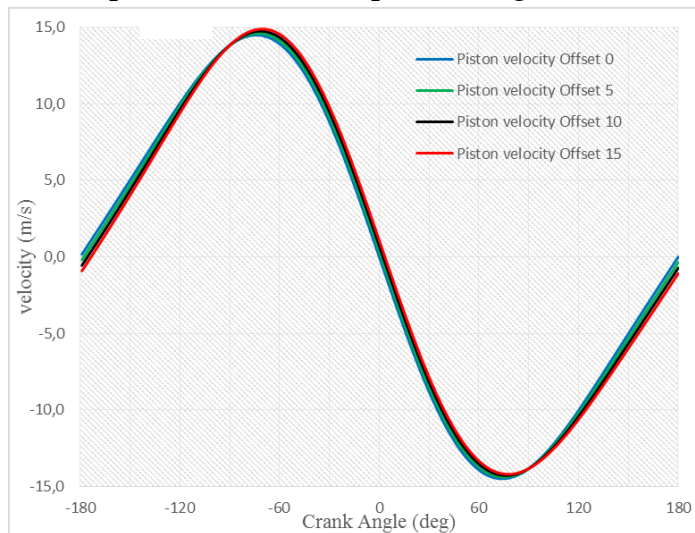
Gambar 4.3 Grafik Daya Vs engine speed dengan variasi jarak offset.

Parameter daya adalah identitas utama suatu mesin diesel. Karena dengan mengetahui nilai daya suatu mesin, kita bisa menentukan apakah mesin diesel tersebut cocok dengan kebutuhan kita seperti pada pemilihan *main engine* kapal dengan cara *engine propeller matching*. Pada proses EPM, yang menjadi acuan suatu pemilihan mesin adalah dayanya, lebih tepatnya daya mesin yang mampu menggerakkan kapal dengan tahanan-tahanannya pada kecepatan ( $V_s$ ) yang di inginkan. *Output* dari model menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan dari mesin berkonfigurasi *offset* lebih tinggi nilainya dibanding dengan mesin berkonfigurasi tanpa *offset*, tetapi tidak selalu berbanding lurus dengan penambahan jarak *offset*. Pada putaran rendah (800 – 1400 rpm), daya yang dihasilkan cenderung berbanding lurus dengan penambahan jarak *offset* crankshaft. Pada putaran menengah (1400 – 2000 rpm) daya pada konfigurasi *offset* 15 mm lebih rendah dibanding daya pada konfigurasi *offset* 10 dan 5 mm.

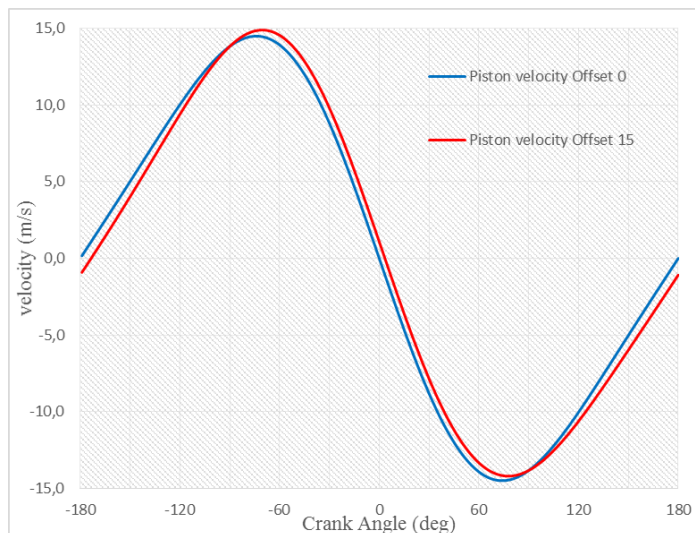
Daya tertinggi yang bisa dicapai pada putaran tinggi (2000 – 2400 rpm) adalah sebesar 118.18 kW pada *engine speed* 2400 rpm dengan *offset* 5 mm, tetapi pada *rate engine speed* nya, daya tertinggi adalah sebesar 101.91 kW dengan konfigurasi *offset* 10 mm.

### 4.3 Analisa Olah Gerak

#### 4.3.1 Kecepatan Piston terhadap Crank Angle



Gambar 4.4 Kecepatan piston Vs CA (Complete) dengan variasi jarak offset.

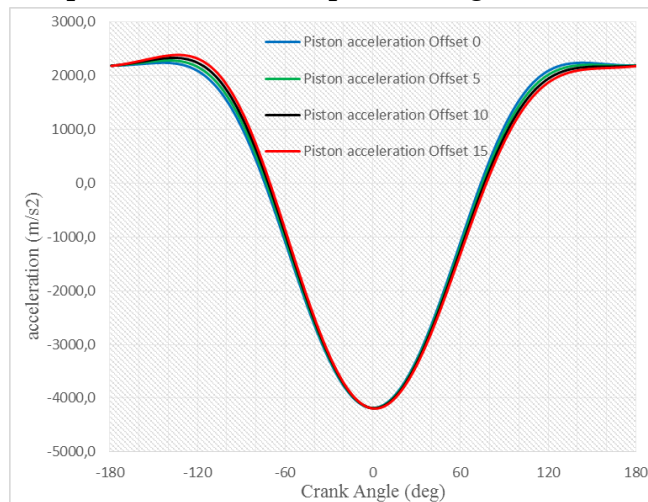


Gambar 4.5 Kecepatan piston Vs CA dengan variasi jarak offset.

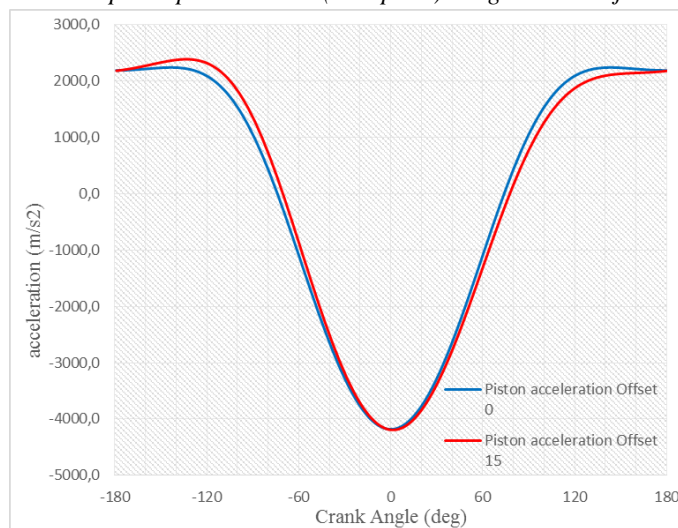
Mesin dengan konfigurasi *offset* dan tanpa *offset* memiliki olah gerak yang berbeda khususnya pada pergerakan pistonnya. Nilai kecepatan piston bisa

merepresentasikan bagaimana karakteristik mesin, dimensi mesin dan bentuk susunan geometri dalam mesin. Pada gambar 4.4 terlihat perbedaan kecepatan piston antara konfigurasi tanpa *offset*, 5 mm, 10 mm dan 15 mm yang bergerak pada putaran mesin 2200 rpm. Gambar 4.5 menunjukkan secara spesifik kurva kecepatan piston pada mesin konfigurasi *offset* 15 dan konfigurasi tanpa *offset* pada langkah kompresi dan langkah usaha. Pada sudut poros engkol -180 sampai 0 (langkah kompresi) kecepatan piston mesin dengan konfigurasi *offset* lebih lambat dari pada mesin tanpa konfigurasi *offset*, namun pada sudut poros engkol 0 sampai 180 (langkah usaha) kecepatan piston dengan konfigurasi *offset* lebih cepat daripada mesin konfigurasi tanpa *offset*.

### 4.3.2 Percepatan Piston terhadap Crank Angle



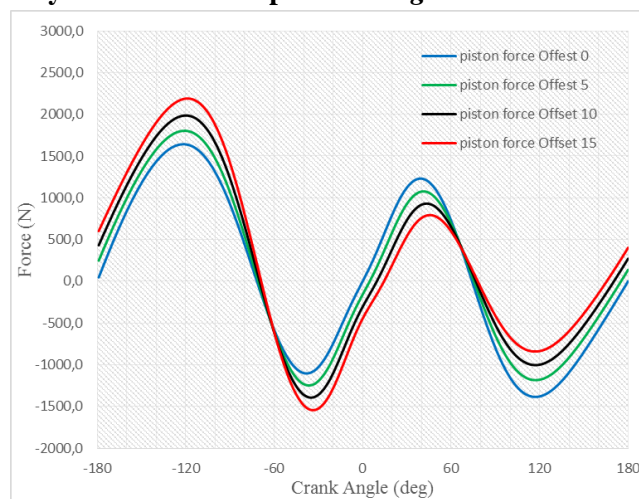
Gambar 4.6 Percepatan piston Vs CA (Complete) dengan variasi jarak *offset*.



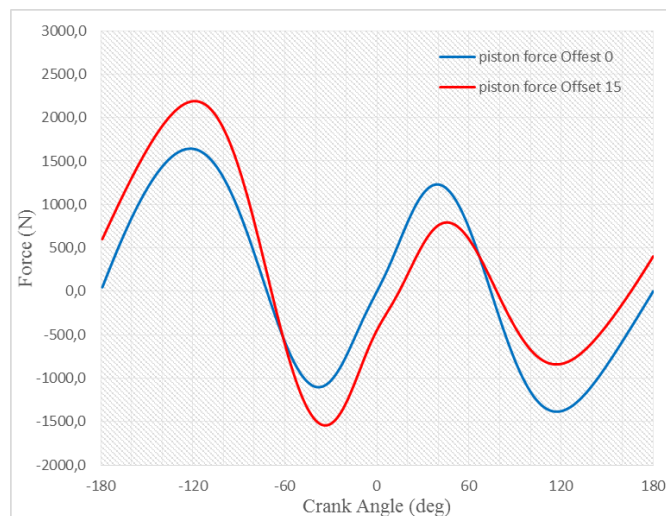
Gambar 4.7 Percepatan piston Vs CA dengan variasi jarak *offset*.

Pada olah gerak percepatan piston, mesin konfigurasi *offset* cenderung mendapatkan akselerasi maksimum yang lebih lambat namun lebih tinggi dengan nilai hampir 2500 m/s<sup>2</sup> pada sudut poros engkol -130 degCA (langkah kompresi) daripada mesin dengan konfigurasi tanpa *offset*. Ketika piston menuju TDCF (0 deg CA), piston pada mesin dengan konfigurasi *offset* mengalami deselerasi lebih lambat daripada mesin dengan konfigurasi tanpa *offset*. Pada saat langkah usaha, akselerasi mesin konfigurasi *offset* lebih lambat tetapi mampu mendapatkan akselerasi maksimum lebih tinggi daripada mesin konfigurasi tanpa *offset*.

#### 4.3.3 Gaya Piston terhadap Crank Angle



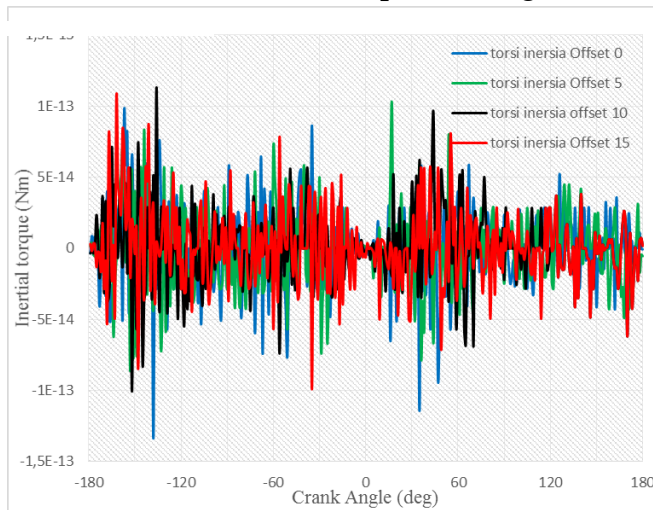
Gambar 4.8 Grafik Gaya piston Vs CA (Complete) dengan variasi jarak offset.



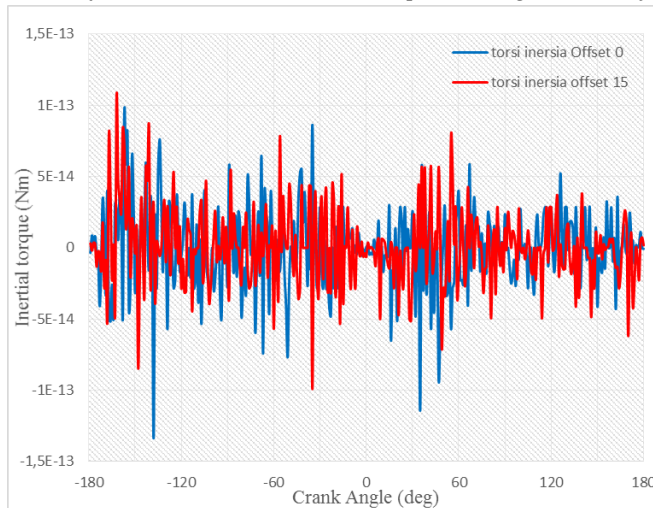
Gambar 4.9 Grafik Gaya Piston Vs CA dengan variasi jarak offset.

Gaya piston pada mesin dengan konfigurasi *offset* juga mengalami perubahan dibandingkan dengan konfigurasi tanpa *offset*. Seperti yang ditunjukkan gambar 4.9, ketika piston berada pada sudut poros engkol -50 degCA sampai dengan 80 degCA (langkah usaha) gaya piston lebih rendah pada mesin berkonfigurasi *offset*. Nilai gaya piston yang lebih rendah dan signifikan terjadi ketika piston berada pada sudut poros engkol 360degCA sampai 540 degCA pada gambar 4.8, yaitu tepatnya pada langkah ekspansi (*intake*). Penurunan nilai gaya piston ini adalah salah satu faktor pendukung dari penurunan kerugian mekanis yang terjadi pada mesin.

#### 4.3.4 Torsi Inersia Piston terhadap *Crank Angle*



Gambar 4.10 Grafik Torsi inersia Vs CA (Complete) dengan variasi jarak offset.

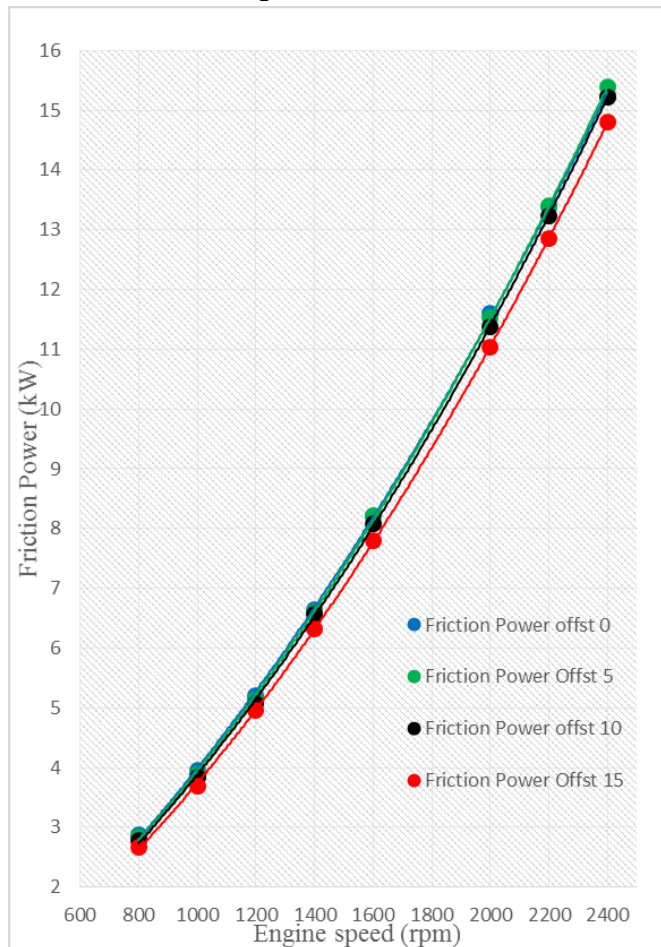


Gambar 4.11 Grafik Torsi inersia Vs CA dengan variasi jarak offset.

Torsi inersia adalah pemindahan sejumlah nilai momentum yang dihasilkan dari putaran *crankshaft* kembali menuju piston. Hal ini mengakibatkan kecepatan putar *crankshaft* dan dorongan torsi dari piston menuju *crankshaft* menjadi tidak stabil. Torsi inersia pada mesin sebenarnya bisa diatasi dengan pemasangan *flywheel* di ujung *crankshaft*, namun dengan konfigurasi *offset*, torsi inersia juga bisa berkurang seperti pada gambar 4.11. Dari rata-rata keseluruhan posisi sudut poros engkol (langkah kompresi dan langkah usaha), mesin dengan konfigurasi *offset* cenderung memiliki fluktuasi torsi yang lebih rendah dibanding dengan mesin konfigurasi tanpa *offset*. Pada gambar 4.10, fluktuasi terbesar antara kedua konfigurasi terjadi antara sudut poros engkol 380 degCA sampai 410 degCA (langkah ekspansi) tepatnya pada putaran mesin 2200 rpm.

#### 4.4 Analisa Kerugian Mekanis

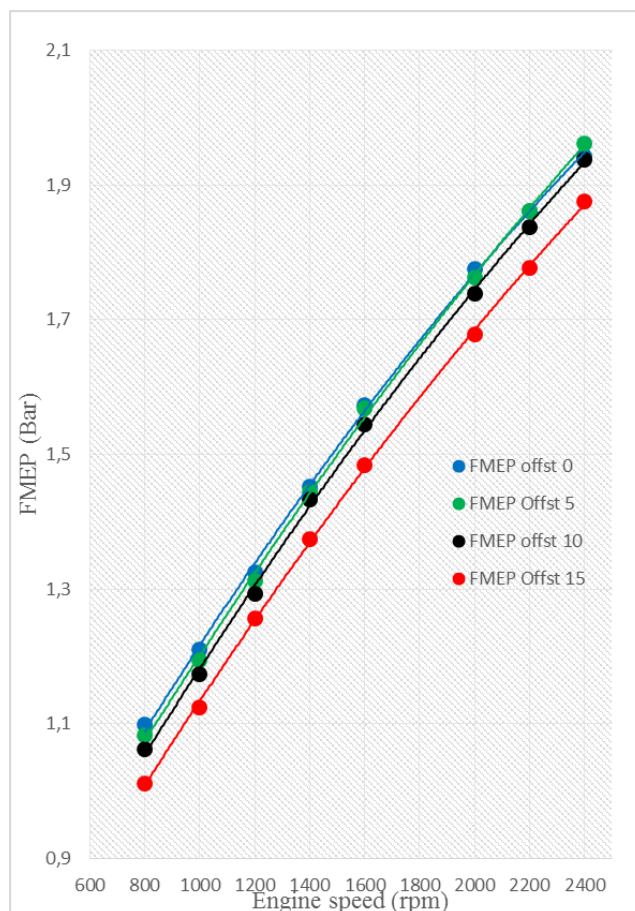
##### 4.4.1 Friction Power terhadap Putaran Mesin



Gambar 4.12 Grafik Daya Gesek Vs engine speed dengan variasi jarak *offset*.

Grafik *Friction Power vs Engine speed* pada hasil simulasi menunjukkan bahwa adanya penurunan daya gesek antara piston dan dinding silinder (silinder liner) seiring dengan bertambahnya jarak *offset crankshaft*. Hal ini dapat meningkatkan transmisi daya yang di hasilkan dari *combustion torque* pada pergerakan piston menuju *crankshaft* dan propulsor. Pada putaran 800-2000 rpm, daya gesek yang terbesar terjadi pada konfigurasi tanpa *offset* dan ketika jarak *offset* bertambah, nilai daya gesek semakin menurun. Namun pada *rate engine speed* nya (2200 rpm), nilai daya gesek terbesar terjadi pada jarak *offset* 5 mm, satu tingkat diatas konfigurasi tanpa *offset*. Pada saat mesin dinaikkan lagi putarannya sebesar 2400 rpm, daya gesek kembali pada trend ideal yaitu semakin bertambah jarak *offset*, semakin menurun daya geseknya. Konfigurasi *offset* yang paling bagus adalah berjarak 15 mm dengan perolehan daya gesek yang paling rendah.

#### 4.4.2 FMEP terhadap Putaran Mesin

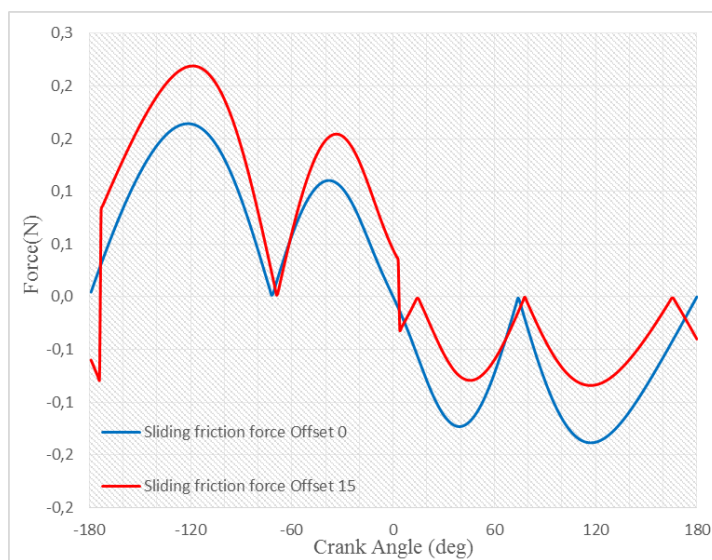


Gambar 4.13 Grafik FMEP Vs engine speed dengan variasi jarak offset.



FMEP adalah kerugian *mean effective pressure* akibat adanya gesekan antara piston dan silinder liner. FMEP adalah selisih antara IMEP dan BMEP. Berkurangnya *net indicated mean effective pressure* (IMEPn) hingga menjadi *brake mean effective pressure* yang besar bisa di artikan sebagai pengurangan tenaga yang besar juga. Pada grafik diatas, nilai FMEP semakin menurun seiring bertambahnya nilai jarak *offset* namun hanya pada putaran mesin 800 – 1800 rpm. Pada putaran mesin 1800-2400 rpm, FMEP pada konfigurasi tanpa *offset* menurun satu tingkat dibawah konfigurasi *offset* 5 mm. Nilai FMEP terendah dari putaran mesin 800-2400 rpm dengan penurunan signifikan terjadi pada konfigurasi 15 mm.

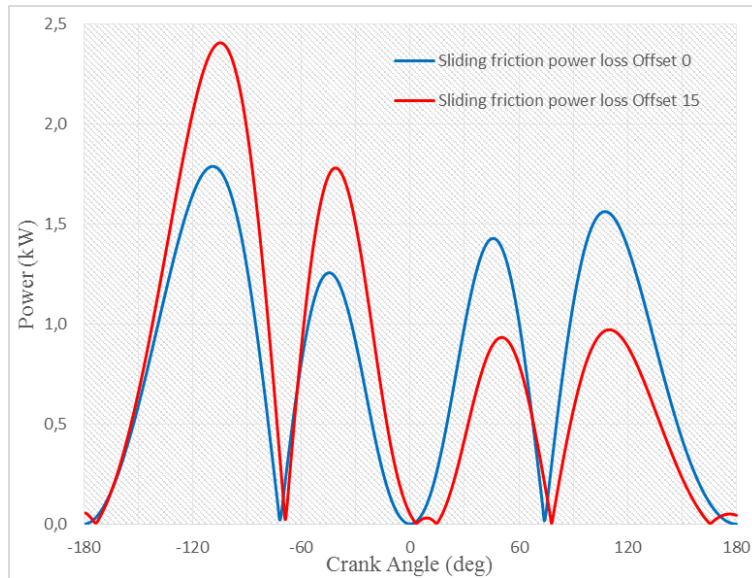
#### 4.4.3 Sliding Friction Force terhadap Crank Angle



Gambar 4.14 Grafik Sliding Friction Force Vs CA dengan variasi jarak *offset*.

Grafik *Sliding Friction Force Vs CA* pada hasil simulasi juga menunjukkan bahwa adanya penurunan gaya gesek antara piston dan dinding silinder (silinder liner). Ketika piston berada pada sudut poros engkol 0 degCA sampai 180 degCA (langkah usaha) dengan putaran 2200 rpm, mesin dengan konfigurasi *offset* mengalami gaya gesek lebih rendah dari pada mesin dengan konfigurasi tanpa *offset*. Akibat penurunan gaya gesek tersebut, torsi yang dihasilkan dari *combustion* dapat di konversi dengan baik menjadi daya keluaran yang nantinya ditransmisikan lagi menuju propulsor.

#### 4.4.4 *Sliding Friction Power Loss terhadap Crank Angle*



Gambar 4.15 Grafik *Sliding Friction Power Loss Vs CA* dengan variasi jarak *offset*.

*Sliding friction power loss vs Crank angle* menunjukkan tenaga yang hilang saat piston bergerak akibat gesekan yang terjadi antara piston dan silinder liner. Pada gambar 4.15 terlihat bahwa mesin dengan konfigurasi *offset*, pergerakannya cenderung lambat karena memiliki nilai *friction loss* yang lebih besar dari konfigurasi tanpa *offset* di sudut poros engkol dari -180 degCA sampai 0 degCA yaitu pada saat langkah kompresi dengan putaran mesin 2200 rpm. Namun pada sudut poros engkol dari 0 degCA sampai 180 degCA yaitu pada saat langkah usaha (*power stroke*) dengan putaran mesin 2200 rpm, *friction loss* pada mesin dengan konfigurasi *offset* 15 mm cenderung lebih rendah, sehingga daya yang dihasilkan oleh mesin meningkat.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian variabel jarak *crankshaft offset* dapat disimpulkan bahwa :

Pada performa mesin, torsi dan daya yang dihasilkan cenderung semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak *crank offset* yang di aplikasikan terutama pada putaran diatas *rate engine speed* nya dengan kondisi *full load*. Konsumsi bahan bakar juga semakin menurun seiring bertambahnya jarak *offset*. Pada putaran diatas *rate engine speed*, konsumsi bahan bakar bahkan cenderung stabil.

Olah gerak piston pada mesin dengan konfigurasi *offset* juga mengalami perubahan yang signifikan. Kecepatan piston lebih lambat pada langkah kompresi namun lebih cepat pada langkah usaha. Percepatan piston mengalami akselerasi maksimum lebih besar pada langkah usaha. Gaya normal piston cenderung lebih rendah pada mesin dengan konfigurasi *offset*. Dengan konfigurasi *offset*, Torsi inersia yang dihasilkan lebih rendah sehingga putaran mesin juga menjadi lebih halus.

Daya gesek dan FMEP yang terjadi pada mesin juga cenderung menurun seiring ditambahnya jarak *offset crankshaft*. Gaya gesek atau *Sliding friction force* mengalami penurunan pada saat langkah usaha. Daya yang hilang akibat gesekan antara piston dan silinder liner juga menunjukkan penurunan saat langkah usaha.

#### **5.2 Saran**

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan beberapa variasi pembebanan.
2. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang emisi yang dihasilkan dari mesin diesel dengan konfigurasi *offset crankshaft*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Garvin, E. A. 1998. "*Offset Crankshaft Mechanism for an Internal Combustion Engine*", U.S Patent Number 5,816,201.
- Chhaniyara, A. 2014. "*Analysis Of Offset Crankshaft Mechanism In The Internal Combustion Engines*", International Journal Of Emerging Technologies And Applications In Engineering, Technology And Sciences (Ij-Eta-Ets) Paper ISSN: 0974-3588.
- FEV. 2007. "*Investigations of Crank Offset and It's Influence on Piston and Piston Ring Friction Behavior Based on Simulation and Testing*", SAE Technical Paper 2007-01-1248.
- Tomic, R. 2012. "*The Optimization Of Crankshaft Offset Of Spark Ignition Engine*", Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology. Vol. 16, No. 1.
- Inden, M. et al. 2012. "*Reciprocating Piston Mechanism with Extended Piston Offset*", U.S Patent Number 0210866 A1.
- Kumar, V. 2013. "*Multi Body Dynamic Analysis of Slider Crank Mechanism to Study the effect of Cylinder Offset*", Altair Technology Conference.
- Hassan, T. E. 2008. "*Theoretical performance comparison between Inline, Offset and Twin crankshaft internal combustion engines*", Proceedings of the world congress on Engineering Vol II.
- Hongwei et al, 2015. "*Analysis of the Influences of Piston Crankshaft Offset on Piston Secondary Movements*", The Open Mechanical Engineering Journal, 9, 933-937.
- Guzzomi, A. et al, 2008. "*Variable inertia effects of an engine including piston friction and a crank or gudgeon pin offset*", Journal of Automobile Engineering, 222(D3), 397-414. DOI: 10.1243/09544070JAUTO590.
- Malpress. et al, 2007. "*A New Internal Combustion Engine Configuration: Opposed Pistons with Crank Offset*", 16th Australasian Fluid Mechanics Conference.

- Raharjo, J. 2016. "*Perancangan Marine Diesel 4 Langkah 125 Hp Dengan Metode Reverse Engineering*", Skripsi, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS, Surabaya.
- Muwaffaq, A. H. 2016. "*Prediksi Performa Marine Diesel 4 Langkah 93 KW dengan Metode Simulasi*", Skripsi, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS, Surabaya.



## **BIOGRAFI PENULIS**

Penulis dilahirkan di kota Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 2 November 1993. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara keluarga pasangan Bapak Abdul Latief Zairin dan Ibu Sri Maryati. Telah menempuh pendidikan formal di SDN Pepelegi II, SMP Negeri 3 Waru, SMK Negeri 12 Surabaya dengan jurusan Teknik Permesinan Industri. Melanjutkan studi Diploma-3 sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Bangunan Kapal, dengan Prodi Teknik Desain dan Konstruksi Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012 dan telah menyelesaikan studi pada tahun 2015. Kemudian melanjutkan studi Strata-1 melalui program lintas jalur sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan nomor registrasi mahasiswa 4215105019. Penulis menyelesaikan skripsi di Bidang Marine Power Plant (MPP).

## 1.1 Lampiran Pengolahan Data (*Major Data*)

### 1.1.1 Tabel Putaran mesin terhadap Daya

offset 15	
RPM (rpm)	Power (kW)
800	22,771
1000	32,673
1200	46,666
1400	61,611
1600	72,666
2000	91,589
2200	101,216
2400	110,611

offset 10	
RPM (rpm)	Power (kW)
800	22,164
1000	31,715
1200	44,105
1400	61,739
1600	72,957
2000	92,141
2200	101,910
2400	111,451

offset 5	
RPM (rpm)	Power (kW)
800	21,606
1000	30,803
1200	42,166
1400	58,673
1600	72,975
2000	92,320
2200	101,829
2400	118,180

offset 0	
RPM (rpm)	Power (kW)
800	20,996
1000	29,904
1200	40,440
1400	54,954
1600	68,586
2000	89,505
2200	93,136
2400	93,455

### 1.1.2 Tabel Putaran mesin terhadap Torsi

offset 15	
RPM (rpm)	Torque (N.m)
800	278,133
1000	322,503
1200	398,624
1400	417,804
1600	430,332
2000	432,810
2200	434,320
2400	434,619

offset 10	
RPM (rpm)	Torque (N.m)
800	264,592
1000	302,859
1200	350,977
1400	421,117
1600	435,430
2000	439,942
2200	442,365
2400	443,448

offset 5	
RPM (rpm)	Torque (N.m)
800	257,903
1000	294,155
1200	335,551
1400	400,205
1600	435,540
2000	440,799
2200	441,996
2400	438,392

offset 0	
RPM (rpm)	Torque (N.m)
800	250,628
1000	285,568
1200	321,811
1400	374,846
1600	409,331
2000	427,345
2200	404,253
2400	371,846



## 1.1.2 Tabel Putaran mesin terhadap Konsumsi Bahan Bakar

offset 15	
RPM (rpm)	SFOC (g/kwh)
2400	250,477
2200	248,011
2000	246,228
1600	244,984
1400	246,844
1200	255,846
1000	312,681
800	358,442

offset 10	
RPM (rpm)	SFOC (g/kwh)
2400	245,490
2200	243,500
2000	242,237
1600	242,115
1400	244,902
1200	290,578
1000	332,962
800	376,787

offset 5	
RPM (rpm)	SFOC (g/kwh)
2400	248,321
2200	243,704
2000	241,766
1600	242,054
1400	257,699
1200	303,937
1000	342,815
800	386,559

offset 0	
RPM (rpm)	SFOC (g/kwh)
2400	292,761
2200	266,457
2000	249,377
1600	257,552
1400	275,133
1200	316,914
1000	353,123
800	397,779

## 1.1.3 Tabel Putaran mesin terhadap Daya gesek

offset 15	
RPM (rpm)	FPower(kW)
2400	14,8053
2200	12,8514
2000	11,0358
1600	7,8044
1400	6,32304
1200	4,95979
1000	3,69853
800	2,66141

offset 10	
RPM (rpm)	FPower(kW)
2400	15,2219
2200	13,2332
2000	11,3838
1600	8,08872
1400	6,5669
1200	5,08102
1000	3,84249
800	2,78029

offset 5	
RPM (rpm)	FPower(kW)
2400	15,3886
2200	13,395
2000	11,5309
1600	8,20682
1400	6,61271
1200	5,14618
1000	3,9062
800	2,832

offset 0	
RPM (rpm)	FPower(kW)
2400	15,2425
2200	13,3839
2000	11,6103
1600	8,22315
1400	6,64409
1200	5,19868
1000	3,95797
800	2,87327

1.1.4 Tabel Putaran mesin terhadap *Friction Mean Effective Pressure*

offset 15	
RPM (rpm)	FMEP (Bar)
2400	1,87558
2200	1,77605
2000	1,67773
1600	1,48347
1400	1,3738
1200	1,25717
1000	1,12481
800	1,01174

offset 10	
RPM (rpm)	FMEP (Bar)
2400	1,93717
2200	1,83713
2000	1,73856
1600	1,54456
1400	1,43325
1200	1,29365
1000	1,17393
800	1,06174

offset 5	
RPM (rpm)	FMEP (Bar)
2400	1,96059
2200	1,86172
2000	1,76303
1600	1,56885
1400	1,44476
1200	1,31167
1000	1,19477
800	1,08271

offset 0	
RPM (rpm)	FMEP (Bar)
2400	1,94279
2200	1,86093
2000	1,77582
1600	1,57245
1400	1,4521
1200	1,32556
1000	1,21103
800	1,0989

1.1.5 Tabel Kecepatan piston terhadap Crank Angle  
 - Kecepatan Piston Offset 0 (DegCA vs m/s)

540	-1,08494	-143	5,265124	-106	11,72653
-179	-0,91977	-142	5,444323	-105	11,87964
-178	-0,75436	-141	5,623816	-104	12,03038
-177	-0,58869	-140	5,803577	-103	12,17862
-176	-0,42276	-139	5,983579	-102	12,32424
-175	-0,25654	-138	6,163791	-101	12,46714
-174	-0,09003	-137	6,344183	-100	12,60714
-173	0,076792	-136	6,52472	-99	12,74418
-172	0,24393	-135	6,705363	-98	12,87813
-171	0,4114	-134	6,886074	-97	13,00883
-170	0,579213	-133	7,066811	-96	13,13618
-169	0,74738	-132	7,247528	-95	13,26006
-168	0,915912	-131	7,428179	-94	13,38035
-167	1,084819	-130	7,608712	-93	13,4969
-166	1,254113	-129	7,789076	-92	13,60959
-165	1,423801	-128	7,969214	-91	13,71833
-164	1,593893	-127	8,149067	-90	13,82298
-163	1,764397	-126	8,328575	-89	13,92343
-162	1,93532	-125	8,507673	-88	14,01955
-161	2,106673	-124	8,686294	-87	14,11121
-160	2,278457	-123	8,864368	-86	14,1983
-159	2,450677	-122	9,041821	-85	14,28071
-158	2,623337	-121	9,218578	-84	14,35834
-157	2,796445	-120	9,394562	-83	14,43106
-156	2,969997	-119	9,569691	-82	14,49879
-155	3,143995	-118	9,74388	-81	14,56141
-154	3,318439	-117	9,917042	-80	14,61882
-153	3,493328	-116	10,08908	-79	14,67092
-152	3,668657	-115	10,25992	-78	14,71761
-151	3,84442	-114	10,42945	-77	14,75881
-150	4,020616	-113	10,59758	-76	14,79442
-149	4,197232	-112	10,7642	-75	14,82433
-148	4,374258	-111	10,92923	-74	14,8485
-147	4,551689	-110	11,09254	-73	14,86684
-146	4,729506	-109	11,25403	-72	14,87927
-145	4,907694	-108	11,41361	-71	14,88574
-144	5,08624	-107	11,57114	-70	14,88617

-69	14,8805
-68	14,86868
-67	14,85067
-66	14,8264
-65	14,79585
-64	14,75897
-63	14,71573
-62	14,6661
-61	14,61004
-60	14,54759
-59	14,47867
-58	14,40331
-57	14,3215
-56	14,23325
-55	14,13857
-54	14,03748
-53	13,92997
-52	13,81609
-51	13,69586
-50	13,56932
-49	13,43649
-48	13,29742
-47	13,15216
-46	13,00077
-45	12,84328
-44	12,67978
-43	12,51032
-42	12,33497
-41	12,15381
-40	11,96691
-39	11,77436
-38	11,57624
-37	11,37264
-36	11,16365
-35	10,94938
-34	10,72992
-33	10,50538

-32	10,27586
-31	10,04149
-30	9,80236
-29	9,558602
-28	9,310331
-27	9,057671
-26	8,800746
-25	8,539686
-24	8,274622
-23	8,005686
-22	7,733015
-21	7,456744
-20	7,177014
-19	6,893966
-18	6,607768
-17	6,318512
-16	6,026372
-15	5,7315
-14	5,434048
-13	5,134171
-12	4,832017
-11	4,527718
-10	4,221458
-9	3,913386
-8	3,603642
-7	3,292409
-6	2,979817
-5	2,66605
-4	2,351243
-3	2,035574
-2	1,719194
-1	1,402261
0	1,084938
1	0,767383
2	0,449754
3	0,132212
4	-0,18509

5	-0,50198
6	-0,81832
7	-1,13394
8	-1,44868
9	-1,7624
10	-2,07493
11	-2,38613
12	-2,69583
13	-3,00389
14	-3,31017
15	-3,6145
16	-3,91675
17	-4,21678
18	-4,51442
19	-4,80954
20	-5,102
21	-5,39168
22	-5,67841
23	-5,96207
24	-6,24254
25	-6,5197
26	-6,79337
27	-7,06347
28	-7,32987
29	-7,59245
30	-7,85107
31	-8,10566
32	-8,35607
33	-8,60219
34	-8,84395
35	-9,08123
36	-9,31391
37	-9,54192
38	-9,76518
39	-9,98355
40	-10,197
41	-10,4054

42	-10,6087
43	-10,8068
44	-10,9997
45	-11,1873
46	-11,3695
47	-11,5462
48	-11,7174
49	-11,8831
50	-12,0432
51	-12,1977
52	-12,3465
53	-12,4896
54	-12,6269
55	-12,7585
56	-12,8843
57	-13,0042
58	-13,1184
59	-13,2267
60	-13,3291
61	-13,4258
62	-13,5166
63	-13,6015
64	-13,6807
65	-13,754
66	-13,8216
67	-13,8834
68	-13,9395
69	-13,9898
70	-14,0346
71	-14,0736
72	-14,1071
73	-14,1351
74	-14,1575
75	-14,1746
76	-14,1862
77	-14,1925
78	-14,1936

79	-14,1895
80	-14,1802
81	-14,166
82	-14,1467
83	-14,1225
84	-14,0935
85	-14,0598
86	-14,0214
87	-13,9784
88	-13,931
89	-13,8791
90	-13,823
91	-13,7626
92	-13,6982
93	-13,6297
94	-13,5573
95	-13,481
96	-13,401
97	-13,3174
98	-13,2303
99	-13,1397
100	-13,0458
101	-12,9486
102	-12,8482
103	-12,7449
104	-12,6386
105	-12,5294
106	-12,4175
107	-12,3029
108	-12,1858
109	-12,0661
110	-11,9442
111	-11,8199
112	-11,6934
113	-11,5649
114	-11,4343
115	-11,3017

116	-11,1673
117	-11,0312
118	-10,8934
119	-10,7539
120	-10,613
121	-10,4706
122	-10,3268
123	-10,1817
124	-10,0353
125	-9,8878
126	-9,73918
127	-9,5895
128	-9,43885
129	-9,28727
130	-9,13483
131	-8,98156
132	-8,82754
133	-8,67281
134	-8,51741
135	-8,36139
136	-8,2048
137	-8,04768
138	-7,89007
139	-7,732
140	-7,57351
141	-7,41463
142	-7,2554
143	-7,09584
144	-6,93599
145	-6,77586
146	-6,61549
147	-6,45489
148	-6,29408
149	-6,13308
150	-5,97192
151	-5,8106
152	-5,64914

153	-5,48754
154	-5,32583
155	-5,16401
156	-5,00209
157	-4,84007
158	-4,67796
159	-4,51576
160	-4,35348
161	-4,19111
162	-4,02867
163	-3,86613
164	-3,70351
165	-3,5408
166	-3,378
167	-3,2151
168	-3,05209
169	-2,88898
170	-2,72575
171	-2,56239
172	-2,3989
173	-2,23526
174	-2,07147
175	-1,90752
176	-1,7434
177	-1,57909
178	-1,41459
179	-1,24987
180	-1,08494

- Kecepatan  
Piston offset 15  
(DegCA vs m/s)

540	1,65E-16
-179	-3,57E-15
-178	8,70E-15
-177	4,32E-16
-176	8,21E-15
-175	-3,18E-15
-174	-5,28E-15
-173	-4,10E-14
-172	-1,24E-14
-171	3,48E-14
-170	1,01E-14
-169	-3,30E-14
-168	4,00E-14
-167	-5,01E-14
-166	-5,17E-14
-165	-2,59E-14
-164	-4,90E-14
-163	3,12E-14
-162	2,70E-14
-161	5,53E-15
-160	3,77E-14
-159	2,40E-14
-158	-4,96E-14
-157	9,49E-14
-156	5,85E-14
-155	8,03E-14
-154	-4,36E-14
-153	-2,57E-14
-152	6,44E-14
-151	2,84E-14
-150	-3,18E-14
-149	1,35E-14

-148	-5,14E-14
-147	1,63E-15
-146	2,60E-14
-145	0
-144	1,68E-14
-143	5,98E-14
-142	1,13E-14
-141	-1,54E-14
-140	3,63E-14
-139	1,57E-14
-138	-1,34E-13
-137	2,08E-14
-136	-2,84E-14
-135	5,68E-14
-134	7,58E-14
-133	3,15E-14
-132	-1,71E-14
-131	2,84E-14
-130	9,57E-15
-129	-5,68E-14
-128	3,25E-14
-127	2,84E-14
-126	-9,74E-16
-125	-2,84E-14
-124	-2,26E-14
-123	3,66E-14
-122	1,18E-14
-121	-1,67E-14
-120	-5,85E-15
-119	5,07E-15
-118	3,17E-14
-117	1,36E-14
-116	-1,93E-14
-115	0
-114	-2,01E-14
-113	3,76E-14
-112	-2,84E-14

-111	-2,46E-14
-110	1,64E-14
-109	-3,85E-14
-108	5,79E-15
-107	-5,34E-14
-106	-3,02E-15
-105	4,03E-14
-104	-8,17E-15
-103	-2,11E-14
-102	-2,84E-14
-101	-2,62E-14
-100	0
-99	-2,99E-14
-98	-2,10E-14
-97	0
-96	2,84E-14
-95	-2,84E-14
-94	-5,02E-14
-93	2,04E-15
-92	9,72E-16
-91	0
-90	-2,60E-14
-89	5,68E-14
-88	2,68E-14
-87	1,14E-14
-86	-1,76E-14
-85	2,27E-14
-84	-2,03E-14
-83	2,53E-14
-82	1,71E-14
-81	-4,78E-14
-80	-2,57E-14
-79	-1,40E-14
-78	-3,19E-14
-77	4,94E-14
-76	3,24E-14
-75	-4,38E-15

-74	9,32E-16
-73	8,15E-15
-72	-5,96E-14
-71	-8,90E-15
-70	2,55E-14
-69	-1,91E-14
-68	6,39E-14
-67	-7,41E-14
-66	4,02E-14
-65	2,35E-14
-64	1,59E-14
-63	-4,63E-14
-62	3,83E-14
-61	7,59E-15
-60	-1,42E-14
-59	-2,27E-14
-58	5,71E-15
-57	-1,69E-14
-56	-1,64E-14
-55	1,31E-15
-54	1,91E-14
-53	-1,96E-14
-52	-4,20E-14
-51	-7,67E-14
-50	-2,46E-14
-49	8,16E-16
-48	0
-47	1,87E-14
-46	-1,40E-14
-45	-4,64E-15
-44	3,46E-14
-43	5,25E-14
-42	5,52E-14
-41	1,78E-14
-40	3,92E-14
-39	8,17E-15
-38	-2,63E-14

-37	3,65E-14
-36	-1,46E-14
-35	8,61E-14
-34	8,04E-15
-33	7,83E-16
-32	-2,84E-14
-31	-4,61E-15
-30	2,84E-14
-29	-1,57E-14
-28	-2,84E-14
-27	5,49E-15
-26	-2,84E-14
-25	-2,24E-14
-24	-4,18E-14
-23	-4,76E-14
-22	0
-21	-2,84E-14
-20	1,43E-14
-19	1,44E-14
-18	-2,84E-14
-17	2,84E-14
-16	1,97E-14
-15	2,84E-14
-14	0
-13	2,41E-15
-12	1,42E-14
-11	7,72E-15
-10	6,71E-15
-9	1,35E-14
-8	-3,35E-15
-7	1,70E-15
-6	-4,35E-15
-5	1,06E-14
-4	0
-3	-5,49E-15
-2	-9,20E-16
-1	-4,90E-15

0	6,39E-16	37	-3,00E-14	74	-1,67E-14
1	1,26E-15	38	3,84E-14	75	1,02E-14
2	-4,63E-15	39	-3,13E-14	76	-2,06E-14
3	-3,52E-15	40	-8,30E-15	77	3,06E-15
4	-4,55E-15	41	2,37E-14	78	-1,79E-14
5	5,73E-15	42	-5,68E-14	79	2,46E-14
6	0	43	-2,23E-15	80	1,78E-14
7	-1,54E-15	44	-4,57E-14	81	9,16E-15
8	1,90E-14	45	0	82	-1,22E-14
9	-1,54E-14	46	0	83	1,54E-14
10	1,01E-15	47	-9,29E-14	84	-6,97E-15
11	-1,69E-14	48	-5,68E-14	85	5,62E-15
12	-5,33E-15	49	-1,95E-14	86	1,42E-14
13	-7,08E-15	50	6,57E-15	87	-1,17E-14
14	-5,92E-15	51	2,84E-14	88	4,03E-15
15	2,84E-14	52	-3,36E-14	89	-9,41E-15
16	-6,45E-14	53	-3,09E-14	90	2,36E-14
17	-1,58E-14	54	-5,24E-15	91	0
18	-1,75E-14	55	-5,68E-14	92	0
19	1,31E-14	56	-2,84E-14	93	-1,34E-14
20	-5,14E-14	57	-2,42E-14	94	-2,50E-14
21	6,35E-16	58	1,76E-14	95	-1,90E-14
22	2,84E-14	59	2,51E-14	96	-8,44E-15
23	1,90E-14	60	3,86E-14	97	-2,68E-14
24	-1,96E-14	61	-2,27E-14	98	0
25	2,84E-14	62	-2,25E-14	99	-7,84E-15
26	-2,02E-15	63	-2,59E-14	100	2,74E-14
27	1,32E-14	64	9,09E-16	101	0
28	0	65	1,42E-14	102	0
29	0	66	-4,00E-14	103	2,61E-15
30	2,58E-14	67	5,85E-14	104	-5,13E-15
31	0	68	-1,40E-14	105	-2,84E-14
32	-4,83E-14	69	5,89E-15	106	0
33	4,86E-15	70	3,55E-14	107	0
34	0	71	1,73E-14	108	-2,27E-14
35	-1,14E-13	72	1,41E-14	109	-3,17E-14
36	5,68E-14	73	1,50E-14	110	1,02E-14



111	2,34E-14
112	0
113	0
114	5,03E-15
115	2,29E-14
116	2,84E-14
117	2,84E-14
118	-1,26E-14
119	9,95E-15
120	2,84E-14
121	0
122	-1,71E-14
123	0
124	1,63E-14
125	6,76E-16
126	5,22E-14
127	9,78E-15
128	-1,36E-14
129	2,84E-14
130	2,84E-14
131	-1,52E-15
132	1,80E-14
133	1,88E-14
134	1,45E-14
135	-1,81E-14
136	2,84E-14
137	-2,27E-15
138	0
139	-2,84E-14
140	0
141	4,26E-15
142	2,84E-14
143	-7,90E-15
144	0
145	2,84E-14
146	-2,84E-14
147	-2,96E-16

148	-2,72E-14
149	1,42E-14
150	-4,12E-14
151	-7,73E-15
152	-1,38E-14
153	-1,73E-14
154	7,41E-15
155	-1,42E-14
156	3,25E-14
157	0
158	0
159	2,84E-14
160	-9,38E-15
161	6,21E-15
162	-4,26E-14
163	3,58E-14
164	-2,47E-14
165	-3,83E-15
166	2,77E-15
167	1,65E-14
168	0
169	-4,25E-15
170	2,48E-15
171	2,47E-14
172	6,45E-15
173	4,94E-15
174	-1,10E-14
175	1,78E-15
176	4,55E-17
177	1,73E-15
178	1,12E-14
179	-1,52E-16
180	-7,00E-16

- Percepatan piston  
offset 0 (DegCA vs  
m/s<sup>2</sup>)

540	2187,85
-179	2187,928
-178	2188,16
-177	2188,546
-176	2189,085
-175	2189,773
-174	2190,607
-173	2191,584
-172	2192,7
-171	2193,949
-170	2195,325
-169	2196,823
-168	2198,434
-167	2200,151
-166	2201,965
-165	2203,866
-164	2205,846
-163	2207,892
-162	2209,994
-161	2212,139
-160	2214,314
-159	2216,506
-158	2218,7
-157	2220,88
-156	2223,032
-155	2225,138
-154	2227,181
-153	2229,143
-152	2231,004
-151	2232,746
-150	2234,347
-149	2235,788
-148	2237,045
-147	2238,096
-146	2238,919

-145	2239,488
-144	2239,78
-143	2239,768
-142	2239,428
-141	2238,732
-140	2237,654
-139	2236,165
-138	2234,238
-137	2231,841
-136	2228,946
-135	2225,524
-134	2221,545
-133	2216,977
-132	2211,788
-131	2205,947
-130	2199,424
-129	2192,187
-128	2184,198
-127	2175,431
-126	2165,856
-125	2155,429
-124	2144,13
-123	2131,92
-122	2118,769
-121	2104,647
-120	2089,519
-119	2073,356
-118	2056,13
-117	2037,804
-116	2018,358
-115	1997,757
-114	1975,973
-113	1952,984
-112	1928,765
-111	1903,286
-110	1876,522
-109	1848,456

-108	1819,066
-107	1788,332
-106	1756,236
-105	1722,761
-104	1687,893
-103	1651,619
-102	1613,928
-101	1574,807
-100	1534,246
-99	1492,245
-98	1448,803
-97	1403,916
-96	1357,573
-95	1309,793
-94	1260,574
-93	1209,916
-92	1157,848
-91	1104,35
-90	1049,471
-89	993,1927
-88	935,5649
-87	876,5792
-86	816,2806
-85	754,6829
-84	691,8113
-83	627,707
-82	562,3839
-81	495,8854
-80	428,2513
-79	359,5068
-78	289,6956
-77	218,8643
-76	147,0534
-75	74,29632
-74	0,65132
-73	-73,8347
-72	-149,115

-71	-225,146
-70	-301,868
-69	-379,227
-68	-457,172
-67	-535,652
-66	-614,606
-65	-693,976
-64	-773,707
-63	-853,741
-62	-934,02
-61	-1014,48
-60	-1095,07
-59	-1175,72
-58	-1256,38
-57	-1336,98
-56	-1417,47
-55	-1497,78
-54	-1577,86
-53	-1657,63
-52	-1737,06
-51	-1816,07
-50	-1894,61
-49	-1972,61
-48	-2050,02
-47	-2126,79
-46	-2202,86
-45	-2278,16
-44	-2352,66
-43	-2426,28
-42	-2498,99
-41	-2570,71
-40	-2641,42
-39	-2711,04
-38	-2779,55
-37	-2846,88
-36	-2912,99
-35	-2977,84

-34	-3041,37
-33	-3103,55
-32	-3164,33
-31	-3223,66
-30	-3281,52
-29	-3337,86
-28	-3392,64
-27	-3445,83
-26	-3497,39
-25	-3547,29
-24	-3595,5
-23	-3641,98
-22	-3686,7
-21	-3729,63
-20	-3770,75
-19	-3810,03
-18	-3847,46
-17	-3882,98
-16	-3916,6
-15	-3948,29
-14	-3978,02
-13	-4005,79
-12	-4031,56
-11	-4055,33
-10	-4077,09
-9	-4096,82
-8	-4114,49
-7	-4130,12
-6	-4143,68
-5	-4155,17
-4	-4164,58
-3	-4171,9
-2	-4177,14
-1	-4180,28
0	-4181,33
1	-4180,28
2	-4177,14

3	-4171,91
4	-4164,58
5	-4155,17
6	-4143,68
7	-4130,12
8	-4114,49
9	-4096,82
10	-4077,09
11	-4055,34
12	-4031,57
13	-4005,79
14	-3978,02
15	-3948,29
16	-3916,6
17	-3882,98
18	-3847,45
19	-3810,04
20	-3770,76
21	-3729,64
22	-3686,7
23	-3641,98
24	-3595,5
25	-3547,3
26	-3497,4
27	-3445,84
28	-3392,65
29	-3337,86
30	-3281,52
31	-3223,67
32	-3164,33
33	-3103,55
34	-3041,37
35	-2977,84
36	-2913
37	-2846,88
38	-2779,55
39	-2711,05

40	-2641,42
41	-2570,72
42	-2498,99
43	-2426,29
44	-2352,66
45	-2278,16
46	-2202,86
47	-2126,79
48	-2050,03
49	-1972,61
50	-1894,61
51	-1816,07
52	-1737,06
53	-1657,64
54	-1577,86
55	-1497,78
56	-1417,47
57	-1336,98
58	-1256,38
59	-1175,72
60	-1095,07
61	-1014,48
62	-934,02
63	-853,742
64	-773,707
65	-693,975
66	-614,605
67	-535,651
68	-457,172
69	-379,226
70	-301,866
71	-225,146
72	-149,118
73	-73,8351
74	0,652917
75	74,29687
76	147,0493

77	218,8645
78	289,6986
79	359,5096
80	428,2517
81	495,8871
82	562,3835
83	627,7075
84	691,8141
85	754,6808
86	816,286
87	876,5795
88	935,5624
89	993,1938
90	1049,467
91	1104,351
92	1157,845
93	1209,916
94	1260,576
95	1309,791
96	1357,573
97	1403,916
98	1448,8
99	1492,245
100	1534,25
101	1574,8
102	1613,921
103	1651,621
104	1687,894
105	1722,758
106	1756,234
107	1788,337
108	1819,066
109	1848,452
110	1876,518
111	1903,284
112	1928,763
113	1952,981

114	1975,97
115	1997,755
116	2018,36
117	2037,803
118	2056,124
119	2073,353
120	2089,522
121	2104,645
122	2118,766
123	2131,917
124	2144,128
125	2155,432
126	2165,853
127	2175,429
128	2184,195
129	2192,183
130	2199,424
131	2205,949
132	2211,787
133	2216,974
134	2221,542
135	2225,523
136	2228,945
137	2231,841
138	2234,238
139	2236,165
140	2237,653
141	2238,731
142	2239,427
143	2239,767
144	2239,779
145	2239,487
146	2238,919
147	2238,096
148	2237,045
149	2235,787
150	2234,347

151	2232,745
152	2231,004
153	2229,142
154	2227,181
155	2225,138
156	2223,032
157	2220,88
158	2218,7
159	2216,506
160	2214,314
161	2212,139
162	2209,994
163	2207,892
164	2205,846
165	2203,866
166	2201,965
167	2200,151
168	2198,434
169	2196,823
170	2195,325
171	2193,949
172	2192,7
173	2191,585
174	2190,607
175	2189,773
176	2189,085
177	2188,547
178	2188,16
179	2187,928
180	2187,85

- Percepatan Piston  
Offset 15 (DegCA vs  
m/s<sup>2</sup>)

540	2178,626
-179	2181,772
-178	2185,082
-177	2188,557
-176	2192,197
-175	2196,002
-174	2199,97
-173	2204,101
-172	2208,391
-171	2212,838
-170	2217,437
-169	2222,184
-168	2227,074
-167	2232,1
-166	2237,255
-165	2242,532
-164	2247,922
-163	2253,416
-162	2259,004
-161	2264,675
-160	2270,417
-159	2276,217
-158	2282,063
-157	2287,94
-156	2293,833
-155	2299,726
-154	2305,601
-153	2311,442
-152	2317,23
-151	2322,945
-150	2328,566
-149	2334,073
-148	2339,443
-147	2344,651
-146	2349,677

-145	2354,493
-144	2359,074
-143	2363,392
-142	2367,422
-141	2371,135
-140	2374,498
-139	2377,485
-138	2380,065
-137	2382,204
-136	2383,869
-135	2385,03
-134	2385,651
-133	2385,7
-132	2385,137
-131	2383,929
-130	2382,041
-129	2379,435
-128	2376,075
-127	2371,924
-126	2366,943
-125	2361,094
-124	2354,34
-123	2346,643
-122	2337,965
-121	2328,269
-120	2317,516
-119	2305,671
-118	2292,697
-117	2278,554
-116	2263,205
-115	2246,621
-114	2228,769
-113	2209,609
-112	2189,108
-111	2167,245
-110	2143,979
-109	2119,285

-108	2093,143
-107	2065,51
-106	2036,385
-105	2005,721
-104	1973,519
-103	1939,747
-102	1904,391
-101	1867,451
-100	1828,883
-99	1788,706
-98	1746,91
-97	1703,47
-96	1658,397
-95	1611,695
-94	1563,366
-93	1513,401
-92	1461,813
-91	1408,62
-90	1353,832
-89	1297,466
-88	1239,538
-87	1180,067
-86	1119,071
-85	1056,585
-84	992,6373
-83	927,2588
-82	860,4832
-81	792,3467
-80	722,8878
-79	652,1475
-78	580,1689
-77	506,9973
-76	432,679
-75	357,261
-74	280,7986
-73	203,3447
-72	124,9542

-71	45,68329
-70	-34,4102
-69	-115,267
-68	-196,828
-67	-279,03
-66	-361,811
-65	-445,108
-64	-528,857
-63	-612,994
-62	-697,452
-61	-782,167
-60	-867,071
-59	-952,099
-58	-1037,18
-57	-1122,26
-56	-1207,26
-55	-1292,12
-54	-1376,76
-53	-1461,14
-52	-1545,18
-51	-1628,82
-50	-1711,99
-49	-1794,63
-48	-1876,67
-47	-1958,07
-46	-2038,75
-45	-2118,66
-44	-2197,73
-43	-2275,92
-42	-2353,16
-41	-2429,39
-40	-2504,57
-39	-2578,65
-38	-2651,56
-37	-2723,26
-36	-2793,7
-35	-2862,83

-34	-2930,61
-33	-2996,99
-32	-3061,92
-31	-3125,37
-30	-3187,3
-29	-3247,66
-28	-3306,41
-27	-3363,53
-26	-3418,97
-25	-3472,7
-24	-3524,69
-23	-3574,91
-22	-3623,33
-21	-3669,92
-20	-3714,65
-19	-3757,49
-18	-3798,45
-17	-3837,46
-16	-3874,52
-15	-3909,62
-14	-3942,72
-13	-3973,83
-12	-4002,93
-11	-4029,97
-10	-4054,97
-9	-4077,93
-8	-4098,8
-7	-4117,61
-6	-4134,31
-5	-4148,95
-4	-4161,46
-3	-4171,89
-2	-4180,22
-1	-4186,43
0	-4190,55
1	-4192,57
2	-4192,48

3	-4190,29
4	-4186,02
5	-4179,67
6	-4171,24
7	-4160,74
8	-4148,18
9	-4133,58
10	-4116,94
11	-4098,28
12	-4077,62
13	-4054,97
14	-4030,35
15	-4003,78
16	-3975,28
17	-3944,87
18	-3912,57
19	-3878,4
20	-3842,39
21	-3804,57
22	-3764,97
23	-3723,6
24	-3680,5
25	-3635,72
26	-3589,25
27	-3541,16
28	-3491,47
29	-3440,22
30	-3387,43
31	-3333,16
32	-3277,44
33	-3220,3
34	-3161,8
35	-3101,96
36	-3040,84
37	-2978,48
38	-2914,92
39	-2850,2

40	-2784,38
41	-2717,51
42	-2649,62
43	-2580,77
44	-2511,02
45	-2440,4
46	-2368,98
47	-2296,79
48	-2223,9
49	-2150,37
50	-2076,23
51	-2001,56
52	-1926,39
53	-1850,8
54	-1774,82
55	-1698,52
56	-1621,95
57	-1545,18
58	-1468,24
59	-1391,21
60	-1314,13
61	-1237,06
62	-1160,06
63	-1083,17
64	-1006,47
65	-929,987
66	-853,79
67	-777,926
68	-702,45
69	-627,412
70	-552,858
71	-478,846
72	-405,415
73	-332,62
74	-260,501
75	-189,107
76	-118,477

77	-48,6613
78	20,31206
79	88,38891
80	155,542
81	221,7382
82	286,9281
83	351,0908
84	414,1968
85	476,2151
86	537,1067
87	596,8585
88	655,4465
89	712,8485
90	769,0443
91	824,0082
92	877,7291
93	930,1954
94	981,3951
95	1031,318
96	1079,955
97	1127,3
98	1173,349
99	1218,098
100	1261,544
101	1303,688
102	1344,535
103	1384,091
104	1422,362
105	1459,354
106	1495,078
107	1529,544
108	1562,765
109	1594,754
110	1625,527
111	1655,099
112	1683,488
113	1710,713

114	1736,79
115	1761,743
116	1785,596
117	1808,369
118	1830,088
119	1850,775
120	1870,465
121	1889,164
122	1906,909
123	1923,727
124	1939,644
125	1954,689
126	1968,888
127	1982,269
128	1994,861
129	2006,693
130	2017,791
131	2028,186
132	2037,905
133	2046,976
134	2055,428
135	2063,288
136	2070,586
137	2077,347
138	2083,6
139	2089,372
140	2094,689
141	2099,578
142	2104,065
143	2108,174
144	2111,932
145	2115,363
146	2118,491
147	2121,339
148	2123,932
149	2126,29
150	2128,437

151	2130,394
152	2132,181
153	2133,819
154	2135,327
155	2136,724
156	2138,03
157	2139,262
158	2140,436
159	2141,57
160	2142,679
161	2143,779
162	2144,885
163	2146,01
164	2147,168
165	2148,371
166	2149,633
167	2150,964
168	2152,374
169	2153,876
170	2155,477
171	2157,187
172	2159,015
173	2160,966
174	2163,05
175	2165,271
176	2167,637
177	2170,151
178	2172,818
179	2175,642
180	2178,626