



SKRIPSI – ME184834

**ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH *GAS SPLIT INJECTION*
TERHADAP PERFORMA *DUAL-FUEL ENGINE***

**YUDHA PRASETIYO
NRP 04211745000002**

Dosen Pembimbing 1 :
Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.

Dosen Pembimbing 2 :
Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



SKRIPSI – ME184834

**ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH GAS *SPLIT INJECTION*
TERHADAP PERFORMA *DUAL-FUEL ENGINE***

YUDHA PRASETIYO
NRP 0421174500002

Dosen Pembimbing 1 :
Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.

Dosen Pembimbing 2 :
Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



FINAL PROJECT – ME184834

***EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GAS SPLIT INJECTION EFFECT
ON DUAL-FUEL ENGINE PERFORMANCE***

YUDHA PRASETIYO
NRP 0421174500002

Supervisor 1 :
Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.

Supervisor 2 :
Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D.

**DEPARTMENT TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH *GAS SPLIT INJECTION* TERHADAP PERFORMA *DUAL-FUEL ENGINE*

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
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 :

Yudha Prasetyo

NRP. 04211745000002

Disetujui oleh Pembimbing Skripsi :

Prof. Semin S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.
NIP 1971 0110 1997 02 1001

Beny Cahyono S.T., M.T., Ph.D.
NIP 1979 0319 2008 01 1008



Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH *GAS SPLIT INJECTION* TERHADAP PERFORMA *DUAL-FUEL ENGINE*

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada

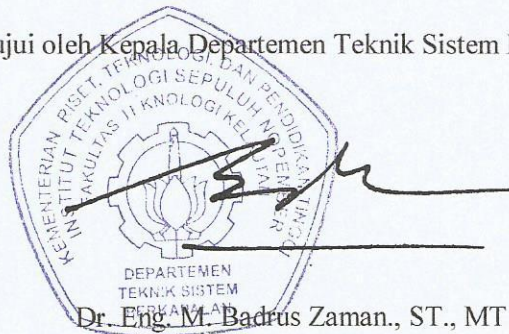
Bidang Studi *Marine Power Plant* (MPP)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Yudha Prasetyo

NRP. 04211745000002

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



Dr. Eng. M. Badrus Zaman., ST., MT

NIP. 1977 0802 2008 01 1007

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH GAS *SPLIT INJECTION* TERHADAP PERFORMA *DUAL-FUEL ENGINE*

Nama : Yudha Prasetyo
NRP : 04211745000002
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan ITS
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.
Dosen Pembimbing 2 : Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Dual-fuel engine telah secara masif digunakan sebagai penggerak mesin utama. Namun pada operasional *dual-fuel engine*, permasalahan terjadi pada operasional beban rendah terjadi pembakaran yang tidak stabil dan efisiensi termal yang relatif rendah. Pada penelitian kali ini dilakukanlah strategi *gas split injection* pada *dual-fuel engine*. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja mesin antara operasional *dual-fuel* tanpa strategi *gas split injection* dan operasional mesin *dual-fuel* dengan strategi *gas split injection*. *Split injection* merupakan sistem penginjeksian bahan bakar dengan membagi injeksi menjadi beberapa waktu penginjeksian dengan kuantitas tertentu. Sistem injeksi ini dapat dilakukan pada sistem *dual-fuel engine* yaitu yang sebelumnya merupakan modifikasi dari mesin diesel konvensional Yanmar TF 85 MH. Variasi pada penelitian ini yaitu *injection split ratio (ISR)* 25%:75%; 50%:50%; 75%:25%, variasi waktu injeksi dan variasi *load* dengan ditetapkan putaran mesin pada 2000 RPM. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini yaitu variasi terbaik terdapat pada *gas split injection* ISR 75%:25% dengan jarak penginjeksian pada 260°bTDC & 244°bTDC . Dikarenakan pada jarak injeksi tersebut prosentase perbedaan terbesar terjadi pada semua parameter yang diuji antara *single injection* dan *split injection*. Prosentase perbedaan daya, torsi, BMEP, SFOC dan efisiensi termal terbesar hanya terjadi pada *load 100%* yaitu masing-masing sebesar 4.3%; 4.2%; 4.2%; 16%; 18.3%.

Kata kunci: *Diesel, Dual-fuel Engine, Gas split injection, Injection Split Ratio, Performance*

Halaman ini sengaja dikosongkan

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GAS SPLIT INJECTION EFFECT ON DUAL-FUEL ENGINE PERFORMANCE

Name : Yudha Prasetiyo
NRP : 04211745000002
Department : *Marine Engineering* (Teknik Sistem Perkapalan)
Supervisor 1 : Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.
Supervisor 2 : Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The use of a dual-fuel engine massively used as the main engine. However, in dual-fuel engine operations, problems occur in low load operations. The combustion quality with unstable combustion conditions and relatively low thermal efficiency. In this research, a *gas split injection* strategy has been completed do on the dual-fuel engine. The purpose of this research is to compare the performance of the engine between *dual-fuel* operations without the *gas split injection* strategy and *dual-fuel* engine operation with the *gas split injection* strategy. Furthermore, *split injection* is a fuel injection system by dividing the injection into several injection stage with a certain mass and period. This injection system applied on a *dual-fuel* engine system, which was previously a modification of the conventional diesel Yanmar TF 85 MH. The variation in this study is the injection split ratio (ISR) 25%:75%; 50%:50%; 75%:25%, variations in injection time and variations in *load* with specified engine speed at 2000 RPM. The results obtained in this study are the best variations found in ISR 75%:25% *gas split injection* with injection distance at 260°bTDC & 244°bTDC . Due to the injection distance, the largest percentage difference occurred in all parameters tested between *single injection* and *split injection*. The greatest percentage of difference in power, torque, BMEP, SFOC, and the thermal efficiency only occurs at 100% *load*, which is 4.3%; 4.2%; 4.2%; 16%; 18.3%.

Keyword: *Diesel, Dual-fuel Engine, Gas split injection, Injection Split Ratio, Performance*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul “Analisa Eksperimen Pengaruh *Gas split injection* Terhadap Performa *Dual-fuel Engine*”.

Skripsi ini merupakan syarat kelulusan sarjana S-1 pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penelitian ini juga merupakan bagian dari Disertasi Frengki M Felayati. Dalam penyelesaian Skripsi ini, banyak dukungan yang diperoleh dari berbagai pihak. Untuk itu penulis memberikan apresiasi dan mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala berkat, anugerah yang telah diberikanNya.
2. Ibu Juminah dan Bapak Mujiya selaku orangtua yang telah memberi dukungan tiada henti berupa semangat, moral, materi, dan hal lainnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
3. Bapak Ir Hari Prastowo M.Sc selaku Dosen Wali penulis selama menjalani masa kuliah di Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
4. Bapak Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng. selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah membimbing penulis dan memotivasi untuk selesainya Skripsi.
5. Bapak Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Workshop Laboratorium Marine Power Plant dan selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah membimbing penulis dan memotivasi untuk selesainya Skripsi.
6. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
7. Tim peneltian *dual-fuel* Mas Frengki, Mas Dimas, Istiqlal S yang telah bekerja dan berjuang bersama dalam penelitian ini.
8. Bapak Muh. Nurafandi selaku Teknisi Laboratorium Marine Power Plant.
9. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Sistem Perkapalan yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat.
10. Teman sejawat KONS KTT B63 Achmad Islahul F, Miftah M, Tadjudin, Hafidh yang telah hidup dan berbagi rumah kontrakan dan tambahan Alvyn H sebagai sahabat diskusi.
11. Teman-teman di Laboratorium Marine Power Plant yang telah membantu memberi solusi tentang diskusi-diskusi permasalahan kuliah.
12. Teman-teman Siskal yang bermutual bersama sejak awal kuliah.
13. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.

Semoga skripsi ini dapat berguna sebagai rujukan untuk penelitian selanjutnya dan menjadi referensi kepada pembaca untuk mendapat pemikiran-pemikiran yang lainnya. Akhir kata dari penulis, semoga Allah Subhanahu wa Ta'ala memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Mesin Bahan Bakar Diesel	3
2.2 Bahan Bakar Gas (CNG).....	4
2.3 <i>Dual-fuel Engine</i>	5
2.4 Performa Diesel <i>Engine</i>	6
2.4.1 Daya	6
2.4.2 Torsi	7
2.4.3 Break Mean Effective Pressure (BMEP)	7
2.4.4 Konsumsi Bahan Bakar	7
2.4.5 Efisiensi Termal	8
2.5 Injeksi Bahan Bakar pada <i>Dual-fuel Engine</i>	8
2.6 <i>Split injection</i> Bahan Bakar	9
2.7 Efek <i>Split injection</i> Bahan Bakar pada Mesin.....	10
2.8 Studi Pada Penelitian Sebelumnya	11
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 <i>Engine Set Up</i>	14
3.2 Persiapan Instrumen Pengukuran	15
3.2.1 Bagian Pertama Skema Jalur Gas	15

3.2.2. Bagian Kedua Skema Jalur Diesel	19
3.3 Investigasi Performa Mesin <i>Dual-fuel</i>	19
3.4 Investigasi Efek <i>Split injection</i> pada Performa Mesin <i>Dual-fuel</i>	20
3.5 Variabel Eksperimen Pengambilan Data	21
BAB 4 Hasil dan pembahasan	23
4.1 Performa Mesin <i>Dual-fuel</i>	23
4.1.1 Perbandingan <i>Load</i> terhadap Daya.....	24
4.1.2 Perbandingan <i>Load</i> terhadap Torsi.....	25
4.1.3 Perbandingan <i>Load</i> terhadap BMEP	26
4.1.4 Perbandingan <i>Load</i> terhadap SFOC	27
4.1.5 Perbandingan <i>Load</i> terhadap efisiensi termal.....	28
4.2 Performa Mesin <i>Dual-fuel</i> dengan <i>Split injection</i> Bahan Bakar	29
4.2.1 Perbandingan <i>Load</i> terhadap Daya.....	30
4.2.2 Perbandingan <i>Load</i> terhadap Torsi.....	31
4.2.3 Perbandingan <i>Load</i> terhadap BMEP	32
4.2.4 Perbandingan <i>Load</i> terhadap SFOC	33
4.2.5 Perbandingan <i>Load</i> terhadap Efisiensi termal	34
4.3 Efek <i>Split injection</i> Bahan Bakar pada Performa Mesin Dual	35
4.3.1 <i>Dual-fuel</i> dengan <i>Dual-fuel Split</i> pada ISR 25%:75%	35
4.3.2 <i>Dual-fuel</i> dengan <i>Dual-fuel Split</i> pada ISR 50%:50%	43
4.3.3 <i>Dual-fuel</i> dengan <i>Dual-fuel Split</i> pada ISR 75%:25%	51
BAB 5 Penutup	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63
BIODATA PENULIS.....	72

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Kombinasi Setingan pada Vemstune.....	18
Tabel 3.2 <i>Dual-Fuel Mode</i>	21
Tabel 4.1 Ratio untuk <i>Gas split injection</i>	23
Tabel 4.2 Kombinasi Vemstune pada <i>Dual-fuel</i>	23
Tabel 4.3 Kombinasi Vemstune pada <i>gas split injection dual-fuel</i>	29
Tabel 4.4 Kombinasi <i>Dual-fuel</i> (260 °bTDC) dan <i>Gas split injection</i> (25%:75%)	35
Tabel 4.5 Prosentase perbedaan daya antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	36
Tabel 4.6 Prosentase perbedaan torsi antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	38
Tabel 4.7 Prosentase perbedaan BMEP antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	39
Tabel 4.8 Prosentase perbedaan SFOC antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	41
Tabel 4.9 Prosentase perbedaan efi termal antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	42
Tabel 4.10 Kombinasi <i>Dual-fuel</i> (260 °bTDC) dan <i>Gas split injection</i> (50%:50%) ..	43
Tabel 4.11 Prosentase perbedaan daya antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	44
Tabel 4.12 Prosentase perbedaan torsi antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	46
Tabel 4.13 Prosentase perbedaan BMEP antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i> ...	47
Tabel 4.14 Prosentase perbedaan SFOC antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	49
Tabel 4.15 Prosentase perbedaan efi termal antara <i>single injection & split injection</i> ..	50
Tabel 4.16 Kombinasi <i>dual-fuel</i> (260°bTDC) dan <i>gas split injection</i> (75%:25%)	51
Tabel 4.17 Prosentase perbedaan daya antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	52
Tabel 4.18 Prosentase perbedaan torsi antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	54
Tabel 4.19 Prosentase perbedaan BMEP antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i> ...	55
Tabel 4.20 Prosentase perbedaan SFOC antara <i>single injection</i> dan <i>split injection</i>	57
Tabel 4.21 Prosentase perbedaan efi termal antara <i>single injection & split injection</i> ..	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mesin diesel.....	3
Gambar 3.1 Flowchart metodologi penelitian.....	13
Gambar 3.2 Skema diagram <i>dual-fuel gas split injection</i>	14
Gambar 3.3 Regulator gas	15
Gambar 3.4 PLC panel	16
Gambar 3.5 Flowmeter CNG	16
Gambar 3.6 Gas manifold	17
Gambar 3.7 Dua unit ECU	18
Gambar 3.8 <i>Interface</i> dari Vemstune	18
Gambar 3.9 Tabung ukur	19
Gambar 4.1 Perbandingan <i>load</i> terhadap daya pada <i>dual-fuel</i>	24
Gambar 4.2 Perbandingan <i>load</i> terhadap torsi pada <i>dual-fuel</i>	25
Gambar 4.3 Perbandingan <i>load</i> terhadap BMEP pada <i>dual-fuel</i>	26
Gambar 4.4 Perbandingan <i>load</i> terhadap SFOC pada <i>dual-fuel</i>	27
Gambar 4.5 Perbandingan <i>load</i> terhadap efisiensi termal pada <i>dual-fuel</i>	28
Gambar 4.6 Perbandingan <i>load</i> terhadap daya pada <i>gas split injection</i>	30
Gambar 4.7 Perbandingan <i>load</i> terhadap torsi pada <i>gas split injection</i>	31
Gambar 4.8 Perbandingan <i>load</i> terhadap BMEP pada <i>gas split injection</i>	32
Gambar 4.9 Perbandingan <i>load</i> terhadap SFOC pada <i>gas split injection</i>	33
Gambar 4.10 Perbandingan <i>load</i> thd efisiensi termal pd <i>gas split injection</i>	34
Gambar 4.11 Perbandingan <i>load</i> terhadap daya pada split 25%:75%.....	36
Gambar 4.12 Perbandingan <i>load</i> terhadap torsi pada split 25%:75%	37
Gambar 4.13 Perbandingan <i>load</i> terhadap BMEP pada split 25%:75%	39
Gambar 4.14 Perbandingan <i>load</i> terhadap SFOC pada split 25%:75%	40
Gambar 4.15 Perbandingan <i>load</i> terhadap efisiensi termal pada split 25%:75%	42
Gambar 4.16 Perbandingan <i>load</i> terhadap daya pada split 50%:50%.....	44
Gambar 4.17 Perbandingan <i>load</i> terhadap torsi pada split 50%:50%	45
Gambar 4.18 Perbandingan <i>load</i> terhadap BMEP pada split 50%:50%	47
Gambar 4.19 Perbandingan <i>load</i> terhadap SFOC pada split 50%:50%	48
Gambar 4.20 Perbandingan <i>load</i> terhadap efisiensi termal pada split 50%:50%	50
Gambar 4.21 Perbandingan <i>load</i> terhadap daya pada split 75%:25%.....	52
Gambar 4.22 Perbandingan <i>load</i> terhadap torsi pada split 75%:25%	53
Gambar 4.23 Perbandingan <i>load</i> terhadap BMEP pada split 75%:25%	55
Gambar 4.24 Perbandingan <i>load</i> terhadap SFOC pada split 75%:25%	56
Gambar 4.25 Perbandingan <i>load</i> terhadap efisiensi termal pada split 75%:25%	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin diesel telah secara luas digunakan pada bidang komersial, seperti transportasi, otomotif, sektor industri dan sektor lainnya. Alasan tersebut dikarenakan mesin diesel memiliki efisiensi konversi bahan bakar yang baik dan mudah dalam operasional (Bayraktar, 2008). Telah banyak penelitian dan pengembangan agar terjadi peningkatan pada mesin diesel. Beberapa teknologi pengembangan diharapkan dapat meningkatkan performa mesin diesel.

Penggunaan bahan bakar selain bahan bakar diesel telah diteliti untuk mengamati bagaimana pengaruhnya terhadap performa dan efisiensi mesin diesel. *Natural gas* adalah salah satu bahan bakar yang menjanjikan dan menarik karena ketersediaannya, biaya rendah, dan kualitas pembakaran bersih untuk digunakan sebagai bahan bakar transportasi (Wei and Geng, 2016). Pada perkembangan selanjutnya, mesin diesel, mesin bensin, dan mesin berbahan bakar gas menjadi dasar untuk pengembangan *dual-fuel engine* (Zhongshu Wang et al., 2016). Penggunaan *dual-fuel engine* adalah teknologi mesin dengan proses pembakarannya menggunakan dua jenis bahan bakar yang berbeda, seperti gas dan bahan bakar diesel. Penggunaan sistem *dual-fuel engine* pada mesin diesel dipengaruhi oleh proses pembakaran diesel-gas (Zhongshu Wang et al., 2016).

Proses pembakaran pada *dual-fuel engine* dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya pencampuran bahan bakar-udara dan sistem injeksi pada bahan bakar yang diinjeksikan (Zhongshu Wang et al., 2016). Namun pada operasional *dual-fuel engine*, permasalahan terjadi pada operasional beban yaitu terjadi kondisi pembakaran yang tidak stabil dan efisiensi termal yang relatif rendah (Yang and Zeng, 2018). Untuk mengatasi permasalahan tersebut dilakukan beberapa metode yaitu *exhaust gas recirculation* (EGR), *premix charge compression ignition*, *ultra-high injection pressure*, dan *split/multiple injection* (X. R. Li et al., 2016). Pada penelitian kali ini dianalisa penggunaan metode *gas split injection* pada *dual-fuel engine* menjadi solusinya untuk permasalahan tersebut.

Strategi *split injection* merupakan strategi untuk merubah karakteristik secara tekanan injeksi, waktu penginjeksian, interval penginjeksian pada injeksi bahan bakar (Park et al., 2018). Dengan dilakukannya strategi *split injection* pada beberapa variasi pembebanan sehingga diharapkan dapat meningkatkan kualitas pembakaran yang menghasilkan daya, dan efisiensi termal yang lebih unggul juga pada konsumsi bahan bakar yang lebih hemat daripada operasional *single injection dual-fuel engine*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian pengaruh *gas split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* yaitu :

1. Bagaimana perbandingan *single injection* dan *split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* pada ISR yang berbeda?

2. Bagaimana perbandingan *single injection* dan *split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* pada jarak waktu injeksi yang berbeda?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian pengaruh *gas split injection* terhadap performa *dual-fuel engine*, yaitu:

1. Penelitian dilakukan dengan menggunakan diesel *dual-fuel engine* Yanmar TF 85 MH *Direct Engine Single Cylinder*.
2. Penelitian ini berfokus pada analisa performa mesin.
3. *Dual-fuel Engine* yang digunakan berbahan bakar Solar Dex – CNG.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian pengaruh *gas split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui perbandingan *single injection* dan *split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* pada ISR.
2. Mengetahui perbandingan *single injection* dan *split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* pada jarak waktu injeksi.

1.5 Manfaat Penelitian

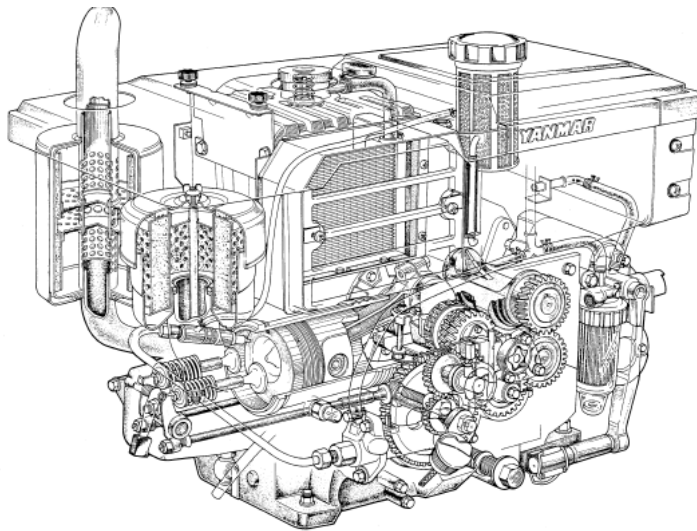
Manfaat yang diperoleh pada penelitian ini adalah hasil analisa terhadap pengaruh penggunaan sistem *gas split injection* terhadap performa mesin pada *dual-fuel engine*. Sehingga diharapkan dapat meningkatkan performa mesin serta menjadi studi untuk mengetahui pengembangan pada *dual-fuel engine* selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Bahan Bakar Diesel

Salah satu mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yaitu mesin diesel, penyebutan tersebut dikarenakan pada mesin diesel terjadi pembakaran pada ruang bakar di dalam silinder. Pada proses pembakarannya, mesin diesel menggunakan pompa injeksi sebagai sarana bahan bakar disalurkan menuju injektor kemudian diinjeksikan ke dalam ruang bakar. Saat injeksi bahan bakar terjadi proses pengkabutan menuju ruang bakar atau silinder dan proses injeksi dilakukan sebelum langkah kerja. Pada saat langkah kompresi, udara murni dimampatkan sampai tekanan tertentu agar bisa terbakar bersamaan dengan kabut bahan bakar. Motor diesel sering disebut juga mesin penyalaan kompresi (*compression ignition engine*) (Semin et al., 2013).



Gambar 2.1 Mesin diesel
Sumber : Katalog YANMAR

Gambar 2.1 merupakan mesin konvensional diesel produk dari YANMAR. Mesin konvensional tersebut biasa digunakan untuk penggerak utama dengan pembebanan yang rendah sampai medium. Pada mesin YANMAR tersebut menggunakan proses *direct injection* sebagai proses injeksi bahan bakar menuju ruang bakar. Tekanan udara masuk pada mesin diesel merupakan parameter yang mempengaruhi kinerja dari komponen mesin diesel (Hoseini et al., 2017). Udara pada saluran masuk tersebut bisa memiliki tekanan yang rendah maupun tinggi, yang selanjutnya merubah kinerja dari mesin tersebut. Dengan pengaturan tekanan udara yang masuk menuju ruang bakar, hal tersebut dapat berpengaruh pada aliran bahan bakar yang digunakan.

Jumlah bahan bakar yang diproses menjadi kabut atau pengkabutan bahan bakar, juga memiliki efek terhadap kinerja mesin diesel (Hoseini et al., 2017).

Proses pengkabutan bahan bakar tersebut dipengaruhi oleh posisi dinamika dari injektor bahan bakar. Sehingga pada posisi dinamika injektor yang digunakan sebagai pengkabutan bahan bakar, juga mempengaruhi kualitas pembakaran yang terjadi.

2.2 Bahan Bakar Gas (CNG)

Compressed natural gas (CNG) merupakan bahan bakar yang telah lama digunakan sebagai bahan bakar untuk mesin penggerak utama, antara lain dikembangkan mesin pada alat transportasi (Semin and Bakar, 2008). Penggunaan mesin dengan bahan bakar CNG memiliki keuntungan secara ekonomis dan ramah lingkungan. Pada modifikasi *dual-fuel engine* penggunaan bahan bakar alternative pada umumnya adalah penggunaan bahan bakar gas, dimana gas tersebut dicampurkan pada suplai udara masuk di *intake manifold* dan disalurkan ke dalam silinder kemudian dipantik oleh suplai bahan bakar diesel yang kecil ketika *piston* hampir mendekati titik mati atas saat kompresi (TMA kompresi). Campuran bahan bakar dengan udara terjadi akibat bahan bakar diinjeksikan sampai pada pengkabutan yang cukup sampai tekanan tertentu dan akhirnya mencapai suhu yang tinggi dan terbakar. Bahan bakar diesel tersebut terbakar dan selanjutnya campuran udara pembakaran tersebut yang sudah bercampur dengan gas langsung ikut terbakar.

CNG diproduksi dengan mengkompresi konvensional *natural gas* (didominasi mengandung metana) kurang dari 1% dari volume yang ditempatkan pada tekanan atmosfer standar. CNG disimpan dan didistribusikan dengan standar tekanan 20-25 MPa (2.900-3.600 psi) (Khan et al., 2015). Pada standard penyimpanan seperti diatas, perlakuan CNG harus dilakukan dengan penuh perhatian. Kandungan bahan bakar dengan *flashpoint* yang rendah mengharuskan untuk ditempatkan pada tabung yang dapat menahan dari standar tekanan CNG untuk disimpan. Jalur distribusi juga mengharuskan untuk memasang lebih banyak alat pengaman untuk mencegah dari kebocoran.

Gas alam atau metana merupakan salah satu jenis hidrokarbon dengan susunan unsur yang cukup sederhana dan tidak memiliki ikatan karbon-karbon (C-C) dan memiliki rasio ikatan karbon hidrogen yang lebih rendah (Akbarian and Naja, 2019). Unsur pada ikatan gas tersebut dapat menghasilkan pembakaran yang bersih dibandingkan dengan bahan bakar jenis yang lain. Bahan bakar gas sangat cocok digunakan pada jenis mesin pembakaran dalam dengan rpm yang tinggi. Penggunaan gas alam dapat berhasil jika dikombinasi dengan bahan bakar diesel pada jenis mesin pembakaran dalam.

Kandungan *octane number* pada CNG diperuntukan untuk mesin dengan rasio tinggi hal tersebut dikarenakan CNG memiliki *octane number* yang tinggi (Ryu, 2013). Dengan kandungan *octane number* yang tinggi performa mesin saat terjadi pembakaran meningkat. Bahan bakar dengan *octane number* yang tinggi juga memiliki efek yang baik pada mesin yaitu ruang bakar lebih bersih sehingga lebih sedikit meninggalkan jelaga.

Kelebihan penggunaan CNG pada kendaraan antara lain yaitu konsumsi yang lebih murah dari penggunaan bensin dan diesel. CNG juga memiliki kelebihan yaitu rendahnya efek pada *greenhouse gas emission* dan cenderung

memiliki gas buang yang lebih bersih (Ryu, 2013). Kelebihan pada penggunaan CNG tersebut memicu untuk digunakannya bahan bakar CNG secara lebih besar.

2.3 *Dual-fuel Engine*

Pada operasional *dual-fuel engine* didasarkan pada teknologi konvensional mesin pembakaran dalam. Mesin tersebut dioperasikan pada sistem diesel saja atau pada sistem campuran *natural gas* dan diesel, dengan *natural gas* yang diinjeksikan bersamaan dengan masuknya udara sehingga terjadi campuran *natural gas* dengan udara masuk (Khan et al., 2015). Sistem *dual-fuel engine*, *natural gas* diinjeksikan menuju ruang bakar sebelum habis langkah kompresi (McTaggart-Cowan et al., 2010).

Proses campuran CNG dan udara dibutuhkan katup dengan mengatur tekanan pada *spray* CNG, memberikan strategi pada penginjeksian, dan membuat sistem injeksi yang dapat meningkatkan campuran tersebut (Semin et al., 2016). Dari upaya tersebut dapat digunakan untuk memperbaiki proses pencampuran bahan bakar. Sehingga terjadi peningkatan kondisi optimum pada pencampuran bahan bakar gas dan udara.

Selain itu, *peak heat release* pada *dual-fuel engine* memiliki nilai yang tinggi, ketika terjadi durasi pembakaran yang pendek dan aliran konsumsi bahan bakarnya yang rendah (Zheng et al., 2019). Titik puncak aliran tersebut mempengaruhi nilai pembakaran, dari bahan bakar pada saat dipantik. Campuran udara pembakaran selanjutnya mempengaruhi kualitas nilai pembakaran.

Pencampuran bahan bakar yang terjadi pada *dual-fuel engine* yaitu antara *natural gas* dan diesel merupakan dua jenis bahan bakar yang berbeda. Pada pencampuran yang terjadi di bahan bakar diesel, pencampuran terjadi karena pengaruh difusi pembakaran. Sedangkan yang terjadi pada *natural gas*, pencampuran terjadi terlebih dahulu sebelum proses pembakaran (Wei and Geng, 2016).

Pada *dual-fuel engine* metode utama untuk mengalirkan bahan bakar menuju saluran injeksi pada *natural gas* yaitu membuat campuran *premix fuel-air* (Yousefi et al., 2018). Seperti yang disebutkan sebelumnya, *premix fuel-air* merupakan pencampuran udara dan bahan bakar sebelum masuk ke dalam ruang bakar. Pembakaran pada metode ini menggunakan sedikit injeksi dari diesel untuk pemantik dari campuran bahan bakar dengan udara yang telah tercampur sebelumnya.

Telah diteliti pada penelitian sebelumnya titik puncak pada tekanan disilinder dan meningkatnya tekanan tersebut merupakan parameter yang masih berhubungan dengan kebisingan mesin, getaran, dan operasional mesin (Wei and Geng, 2016). Titik puncak tekanan pada silinder dan meningkatnya tekanan akibat mode *dual-fuel* lebih rendah bila dibandingkan dengan mode diesel konvensional. Alasan yang mempengaruhi kondisi tersebut yaitu, pertama, pada pembakaran mode *dual-fuel* terjadi pencampuran dengan *lean mixture* dan *slowing burning rate*. Artinya, terjadi pencampuran dengan sedikit masa bahan bakar sehingga terjadi aliran pembakaran yang lambat. Kedua, terjadi perlambatan pada pengapian, yang menyebabkan menggeser proses pembakaran hampir menuju langkah ekspansi.

Pada operasional bahan bakar gas pada mesin otto, teknologi *spark plug* sudah dapat diterima dan memiliki performa yang baik. Sedangkan penggunaannya pada mesin diesel masih banyak dilakukan pengembangan. Penggunaan *natural gas* di mesin diesel berdasar pada karakteristik pengapian yang buruk karena suhu pengapian otomatis yang tinggi dan jumlah *cetane* rendah dibandingkan dengan solar. Oleh karena itu, sumber pengapian selalu diperlukan untuk menyalakan secara alami *natural gas* dalam silinder.

Pembakaran yang terjadi pada *dual-fuel engine* dapat mengalami permasalahan jika CNG yang diinjeksikan tidak terbakar sempurna pada ruang bakar di silinder (Huang et al., 2019). Emisi HC mengalami peningkatan pada hasil pembakaran yang tidak sempurna, sehingga didapat emisi gas metana yang menyebabkan gas rumah kaca. Maka teknologi mesin pembakaran dalam selanjutnya dapat diteliti agar terjadi penurunan emisi gas.

Mode *dual-fuel engine* telah dibuktikan dapat meningkatkan aspek performa dan emisi, tetapi disisi lain memiliki masalah besar yaitu pada beban rendah (Lounici et al., 2014). Efisiensi lebih kecil dibandingkan dengan mesin diesel konvensional pada operasional beban rendah. Kondisi beban rendah tersebut diakibatkan tidak sepenuhnya materi hidrokarbon pada bahan bakar yang ikut terbakar pada proses pembakaran.

Pada pembuatan mode *dual-fuel engine* cukup mudah diimplementasikan, yaitu dengan memodifikasi mesin diesel yang sudah ada (Wei and Geng, 2016). Perubahan yang dilakukan terjadi yaitu penambahan injektor gas pada modifikasi *dual-fuel engine*. Injektor gas tersebut dibutuhkan untuk suplai aliran bahan bakar gas yang selanjutnya dibakar menuju ruang bakar. Suplai bahan bakar *natural gas* pada mode *dual-fuel engine* dapat menggantikan sampai 40-80% dari total pemakaian bahan bakar yang dibutuhkan

2.4 Performa Diesel Engine

2.4.1 Daya

Daya motor merupakan salah satu parameter dalam menentukan performa motor. Pengertian dari daya adalah kecepatan yang menimbulkan kerja motor selama waktu tertentu. Daya dihasilkan oleh operasional mesin dengan pengaruh bahan bakar dan efisiensi mesin yang dihasilkan.

$$P = \frac{v \times i \times \cos \theta}{\text{eff gen} \times \text{eff slip}} \quad (1)$$

Dimana

P = Daya (kW)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\cos \theta$ = 0.85

Eff gen = Eff generator 0.85

Eff slip = Eff slip dihitung

2.4.2 Torsi

Torsi atau momen putar motor adalah gaya yang dikalikan dengan jarak panjang lengan. Gaya yang dimaksud adalah daya motor, sedangkan panjang lengan adalah panjang langkah torak. Torsi dihasilkan dari daya dengan putaran mesinnya.

$$T = \frac{P \times 6000}{2\pi \times n} \quad (2)$$

Dimana

T = Torsi (Nm)

P = Daya (kW)

n = Putaran mesin (rpm)

2.4.3 Break Mean Effective Pressure (BMEP)

BMEP adalah tekanan efektif dari fluida kerja terhadap piston sepanjang langkahnya untuk menghasilkan kerja per siklus. Proses pembakaran campuran udara-bahan bakar menghasilkan tekanan yang bekerja pada piston sehingga melakukan langkah kerja. Besarnya tekanan ini berubah-ubah sepanjang langkah piston tersebut. Bila diambil tekanan konstan yang bekerja pada piston dan menghasilkan kerja yang sama, maka tekanan tersebut dikatakan sebagai kerja per siklus per volume langkah piston. Tekanan efektif rata-rata teoritis yang bekerja sepanjang volume langkah piston sehingga menghasilkan daya yang besarnya sama dengan daya efektif.

$$BMEP = \frac{P \times Z \times 1000}{V \times 2\pi \times rps \times i} \quad (3)$$

Dimana

BMEP = Tekanan efektif rata-rata (N/m²)

P = Daya (kW)

Z = Konstanta 2 untuk 4-stroke

V = Volume langkah (m³)

I = Jumlah silinder

2.4.4 Konsumsi Bahan Bakar

Konsumsi bahan bakar merupakan banyaknya jumlah bahan bakar yang dipakai untuk menghasilkan daya untuk setiap satuan waktu. Bahan bakar tersebut merupakan kuantitas dari konsumsi hasil dari operasional mesin. Konsumsi bahan bakar sendiri juga dipengaruhi dari daya yang dihasilkan oleh mesin.

$$FCR = \frac{v \times \rho}{t} \quad (4)$$

Dimana

FCR = Laju aliran bahan bakar (gr/h)

ρ = Massa jenis bahan bakar (gr/m³)

v = Volume bahan bakar (m³)

t = waktu (s) yang diperlukan menghabiskan bahan bakar sebanyak 10 ms

$$SFOC = \frac{FCR}{P} \quad (5)$$

Dimana

FCR = Laju aliran bahan bakar (gr/h)

SFOC = Konsumsi spesifik bahan bakar (gr/kWh)

P = Daya (kW)

$$SEC = \frac{LHV_{dex} \times FCR_{dex} + LHV_{cng} \times FCR_{cng}}{P} \quad (6)$$

Dimana

SEC = *Specific Energy Consumption* (gr/kWh)

LHV = *Low Heating Value* (J/kg)

2.4.5 Efisiensi Termal

Efisiensi termal adalah nilai dari pembakaran energy panas yang dihasilkan dari bahan bakar untuk dirubah menjadi daya efektif pada mesin, dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\eta_{th} = \frac{\text{daya efektif yang dihasilkan} \times 3600}{\text{mass flowrate bahan bakar} \times \text{nilai kalor bahan bakar}} \times 100\% \quad (7)$$

Pada sistem single fuel dapat ditulis

$$\eta_{ths} = \frac{P_{efektif} \times 3600}{\dot{m} \times LHV} \times 100\% \quad (8)$$

Pada sistem *dual-fuel* dapat ditulis

$$\eta_{ths} = \frac{P_{efektif} \times 3600}{\dot{m}_{solar} \times LHV_{solar} + \dot{m}_{CNG} \times LHV_{CNG}} \times 100\% \quad (9)$$

2.5 Injeksi Bahan Bakar pada *Dual-fuel Engine*

Injeksi bahan bakar merupakan hal yang perlu diperhatikan karena merupakan parameter yang penting dan berdampak pada penguapan bahan bakar serta pembentukan pencampuran bahan bakar selama proses pembakaran (Gong et al., 2019). Pada proses pembakaran yang terjadi di ruang bakar, campuran bahan bakar dengan udara yang membentuk karakteristik pembakaran yang ada. Penginjeksian bahan bakar juga menentukan tekanan dan kapasitas bahan bakar yang dibakar. Pengaturan injeksi yang tepat membentuk proses pembakaran yang optimal tanpa *lean fuel* atau *rich fuel* yang tergantung pada kebutuhan mesin. Pengaturan tersebut juga berakibat pada waktu injeksi bahan bakar yang disuplai.

Berdasarkan penyaluran gas ke dalam silinder dan sumber pengapian, ada tiga metode utama untuk menerapkan *natural gas* terkompresi dalam mesin diesel

(Wei and Geng, 2016). Tiga cara itu adalah pertama, *Dual-fuel*. Dalam mode ini, bahan bakar *natural gas* diinjeksikan dengan bermacam-macam bentuk turbulensi untuk mencampur secara seragam dengan udara dan kemudian disalurkan pada silinder dan dinyalakan oleh bahan bakar yang disuntikkan langsung dengan angka cetane tinggi. Kedua, *High pressure direct injection (HPDI)*. Dalam mode ini, sejumlah kecil pilot diesel pertama kali disuntikkan di akhir langkah kompresi dan menyebabkan *natural gas* langsung disuntikkan dan tercampur. Di beberapa titik selama ini interval antara dua suntikan atau di awal injeksi *natural gas*, bahan bakar diesel menyala otomatis, menyediakan sumber pengapian ke dalam ruang bakar sehingga memulai pembakaran *natural gas*. Ketiga, Pengapian kompresi dibantu permukaan panas. Dalam mode ini, *natural gas* disuntikkan langsung ke silinder dekat dengan permukaan panas di ujung kompresi. Permukaan panas umumnya merupakan steker cahaya dengan kisaran suhu 1200 - 1400 Kelvin. Keuntungan terpenting dari konsep ini adalah daya spesifik yang tinggi dan efisiensi termal tanpa keterbatasan ketukan pembakaran. Namun, elemen kritis dari sistem ini adalah daya tahan dari permukaan yang panas karena permukaan yang tinggi suhu sesuai suhu yang dibutuhkan. Mode ini jarang digunakan dalam beberapa tahun terakhir karena kekurangan tersebut.

2.6 *Split injection* Bahan Bakar

Strategi *split injection* merupakan strategi untuk merubah karakteristik pada tekanan injeksi, waktu penginjeksian dan interval penginjeksian pada injeksi bahan bakar (Park et al., 2018). *Split injection* berarti mengatur jumlah bahan bakar yang diinjeksikan untuk proses pembakaran. Hasilnya menunjukkan bahwa *split* atau *multiple injection* memiliki efek pada peningkatan campuran bahan bakar udara dan mengurangi konsentrasi campuran udara/bahan bakar (X. R. Li et al., 2016). Selanjutnya strategi ini dapat memberikan keuntungan seperti konsumsi bahan bakar dan pengurangan jelaga atau *particulate matter* yaitu zat emisi.

Homogenitas campuran bahan bakar–udara juga dipengaruhi secara signifikan oleh kondisi di dalam ruang bakar. Sehingga untuk mengendalikan kondisi di dalam ruang bakar, digunakanlah strategi *split injection* (Jain et al., 2017). Campuran bahan bakar-udara merupakan hal yang perlu diperhatikan untuk membentuk karakteristik pembakaran pada ruang bakar. Mulai dari kuantitas bahan bakar, kuantitas udara sampai tekanan masing-masing *properties* yang digunakan pada proses pembakaran. *Split injection* dapat mengendalikan kuantitas bahan bakar dan tekanan yang dialirkan menuju ruang bakar.

Injection Split Ratio (ISR) merupakan parameter yang harus diperhatikan pada strategi *split injection*. *ISR* merupakan perbandingan injeksi pertama terhadap total masing-masing injeksi pada *control injector* (Ma et al., 2015). Perbandingan pada *ISR* dapat diamati pada formula (1). Dimana *PW1* merupakan control ratio injeksi bahan bakar pertama dan *PW2* merupakan control ratio injeksi bahan bakar kedua. Pada control *ISR* dapat dioptimalkan pada injeksi pertama atau kedua, sehingga terjadi pembakaran yang optimum pula dengan strategi *split injection*. Untuk penggunaannya *ISR* bisa digunakan ratio 25, 50, 75, sehingga memiliki injeksi bahan bakar yang berbeda. Apabila diinginkan dengan penginjeksian pertama dan kedua yang bisa digunakan *ISR* 50, yang artinya

strategi *split* dijadikan pembagian yang sama rata terhadap pengaturan injeksi bahan bakarnya.

$$ISR = \frac{PW1}{PW1+PW2} \quad (10)$$

Membandingkan dengan penginjeksian ISR 1.0, yaitu penginjeksian tunggal, *split injection* dapat menghasilkan nilai IMEP lebih tinggi dan emisi lebih rendah (Ziman Wang et al., 2016b). *Interval* saat *delay* tersebut merupakan parameter yang mengatur performa pembakaran. *Delay* yang pendek mengakibatkan interaksi *spray-combustion* yang lebih kuat. Interaksi pada penginjeksian yang pertama dan kedua meningkat akibat waktu *delay* yang pendek. Sehingga injeksi pertama mempengaruhi injeksi kedua dengan mengubah komposisi suhu dan gas.

Pada banyak penelitian sebelumnya untuk *split injection* difokuskan pada *pilot injection* bahan bakar cair sehingga didapat peningkatan untuk penghematan bahan bakar dan emisi pada *direct diesel*. Jika waktu *delay* yang terlalu pendek, bahan bakar pada injeksi kedua menembus zona area *rich fuel* pada injeksi pertama, dengan demikian *split injection* mirip dengan injeksi tunggal. Sebaliknya jika waktu *delay* yang terlalu lama pada injeksi kedua, akan memberikan efek negatif pada emisi jelaga dan efisiensi termal (X. R. Li et al., 2016). Maka dari itu diperlukan setingan injeksi yaitu pada injeksi pertama dan kedua harus dilakukan untuk pengoptimalan mode *split injection*.

2.7 Efek *Split injection* Bahan Bakar pada Mesin

Distribusi massa bahan bakar dan campuran bahan bakar ketika dilakukan *split injection* akan menghasilkan pembakaran dengan *ignition delay* yang lebih pendek (Ziman Wang et al., 2016a). Strategi tersebut memiliki fleksibilitas yang tinggi untuk bisa mengendalikan karakteristik hasil pembakaran secara efektif. Pengaruh interval pada tahapan injeksi dianggap lebih besar karena area yang berinteraksi pada semprotan pertama berpengaruh kepada semprotan kedua dengan hasil pembakaran pada strategi ini.

Hasil penelitian Yousefi et al (2018) menunjukkan pada operasional *dual-fuel* beban rendah menunjukkan bahwa semakin pendek *dwel time* maka akan menghasilkan tekanan puncak di dalam ruang bakar, sehingga meningkatkan *heat release rate (HRR)* dan emisi NOx. Pada kondisi berlawanan, yaitu semakin panjang *dwel time* maka menyebabkan penurunan tekanan di dalam ruang bakar. Hal tersebut juga dapat mengakibatkan penundaan pengapian (*ignition delay*) yang lebih lama dan penurunan emisi NOx.

Strategi *split injection* dapat mengendalikan proses pembakaran untuk lebih cepat atau lebih lambat, dengan cara mengontrol ukuran dan aliran pada inti pembakaran (*flame kernel*), pada kondisi tersebut juga dipengaruhi oleh waktu penginjeksian kedua pada strategi *split injection* (Aksu et al., 2016). Proses pembakaran yang terjadi pada injeksi kedua yang dipengaruhi oleh injeksi pertama selanjutnya yang membentuk karakteristik pembakaran. Aliran dan tekanan masing-masing injeksi dapat dikendalikan sehingga pembakaran yang terjadi dapat

diseuaikan dengan karakteristik dari mesin itu sendiri. Strategi *split injection* pada setiap mesin memiliki komposisi yang berbeda pada kombinasi aliran, tekanan, dan waktu penginjeksian.

Aliran turbulen pada ruang bakar akan memberikan efek terhadap proses pembakaran yang menghasilkan peningkatan performa mesin (Semin et al., 2018). Berdasarkan hal tersebut dapat menguatkan bahwa dengan memberikan efek turbulen terhadap aliran bahan bakar maka menghasilkan efek tersebut yang terjadi juga pada strategi *gas split injection*. Efek turbulen tersebut terjadi karena penginjeksian gas terjadi bertahap dan membuat aliran bahan bakar gas menjadi turbulen. Sehingga efek turbulen dapat berhubungan dengan strategi *split injection*.

Pada *split injection* peningkatan performa terjadi dimungkinkan karena jarak injeksi yang terjadi antara awal pembakaran dan injeksi selanjutnya yang menyusul (Felayati et al., 2019). Oleh karena itu, strategi ini menghasilkan jarak penginjeksian yang mengakibatkan peningkatan performa. Selanjutnya injeksi tersebut mempengaruhi campuran bahan bakar dengan udara.

Telah dibuktikan bahwa *split injection* dapat menunjukkan efek pada karakteristik pembakaran dan memberikan kontrol terhadap tekanan dan suhu pada ruang bakar. Selanjutnya *split injection* juga dapat secara signifikan mengurangi pembentukan NO_x dibandingkan dengan injeksi bahan bakar secara berkelanjutan (Hiwase et al., 2013). Pada karakteristik pembakaran tersebut dimaksudkan untuk mengoptimalkan hasil pembakaran agar didapat performa yang baik.

2.8 Studi Pada Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian Ma et al. (2015) meneliti *split injection* pada mode *stoichiometric dual-fuel compression ignition (SDCI)* yang memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi termal dan kontrol emisi. Penelitian tersebut juga meneliti efek *injection timing* dan *ratio pilot-to-total*, terjadi pembakaran *overmixing* akibat pengaruh *injection timing*. Pengoptimalan *injection timing* terhadap *split injection* juga dapat menghindari tingkat kenaikan tekanan yang sangat tinggi pada efisiensi termal operasional mesin. Efek lainnya yaitu dapat mengontrol emisi. Selanjutnya *ratio pilot-to-total* yang lebih tinggi juga menghasilkan emisi yang lebih rendah, efisiensi pembakaran yang tinggi (Ma et al., 2015).

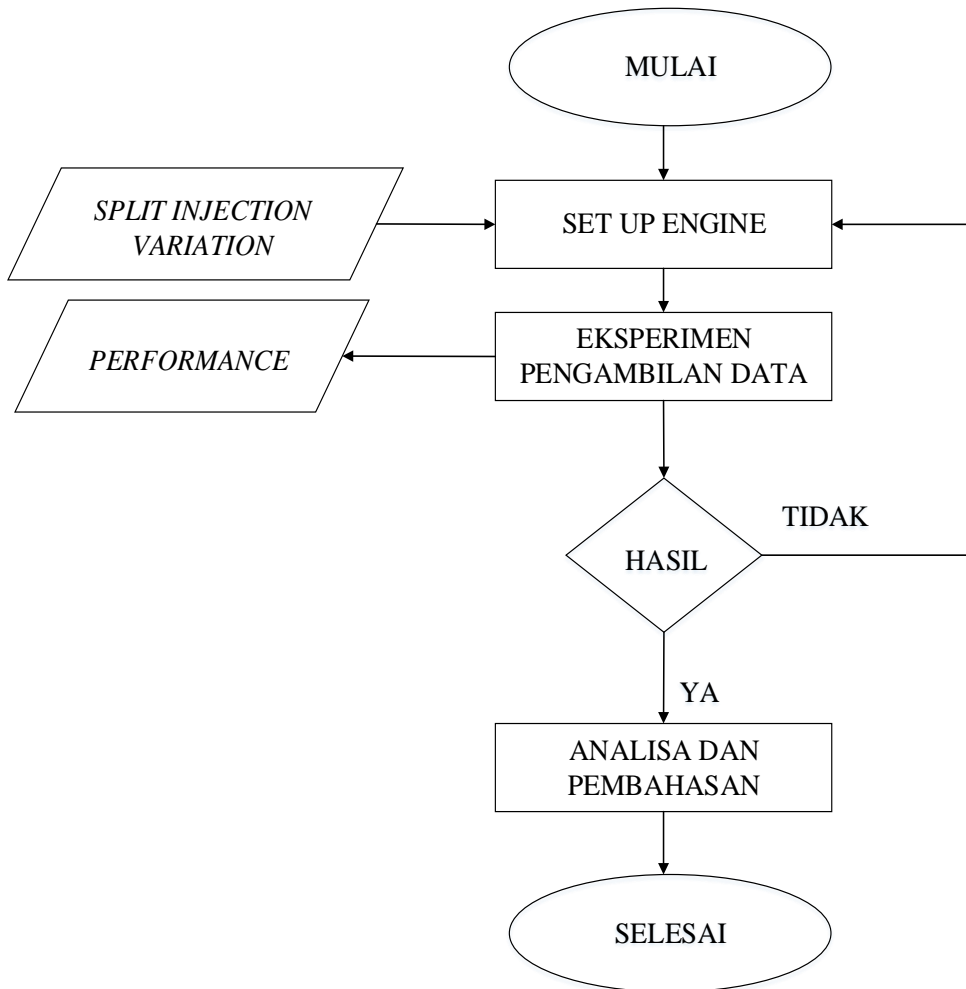
Selanjutnya strategi *split injection* pada *dual-fuel engine* juga mendasari (Guo et al., 2018) untuk mengidentifikasi performa pembakaran dan kadar emisi pada *dual-fuel engine* dengan beban rendah dan medium. Bahan bakar diesel diinjeksikan langsung pada ruang bakar, dan bahan bakar gas diinjeksikan pada katup masukan. Efek yang terjadi yaitu menurunkan *brake thermal efficiency* pada beban rendah dan medium, juga berdampak pada menurunnya CO₂ dan PM pada kadar emisi *dual-fuel engine* (Guo et al., 2018).

Berdasarkan pada beberapa penelitian diatas selanjutnya melakukan penelitian dengan ketertarikan juga pada *split injection*. Penelitian ini difokuskan pada *gas split injection* dengan variasi ISR. Sebelumnya pada penggunaan simulasi GT Power. Strategi *split injection* pada *natural gas* di mesin diesel *dual-fuel* memiliki dampak yang signifikan pada proses dan hasil pembakarannya. Pada simulasi tersebut, *split injection* memiliki dampak yang dominan terhadap proses

dan hasil pembakaran. Variasi *gas split injection* diharapkan dapat menghasilkan performa yang lebih baik pada operasional *dual-fuel engine*.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan penelitian, yaitu sesuai dengan batasan dan latar belakang yang sudah dijelaskan sebelumnya. Penjelasan dari tiap-tiap tahapan, selanjutnya diberikan dengan diagram alir. Sehingga didapat alur pengerjaan penelitian ini.

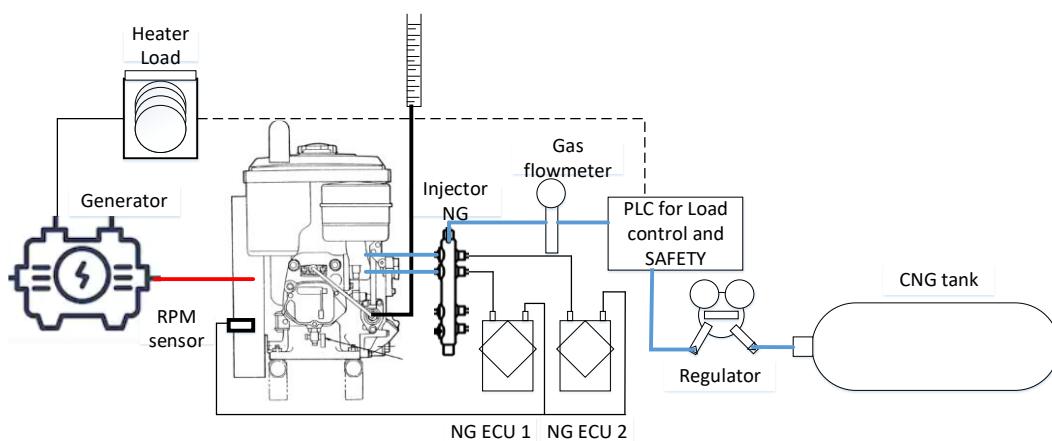


Gambar 3.1 Flowchart metodologi penelitian

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Secara khusus penelitian ini terfokus pada analisa performa mesin. Pada Gambar 3.1 merupakan proses metodologi pada penelitian ini. Berikut data mesin yang digunakan dalam penelitian ini:

<i>Engine (four stroke cycle)</i>	: Yanmar TF 85 MH
<i>Number of cylinders</i>	: 1
<i>Combustion system</i>	: <i>Direct Injection</i>
<i>Bore x stroke</i>	: 85 mm x 87 mm
<i>Displacement</i>	: 493 cc
<i>Compression Ratio</i>	: 18 : 1
<i>Injection timing</i>	: 18 bTDC
<i>Injection pressure</i>	: 200 kg/cm ³
<i>Max. Engine speed at full load</i>	: 2200 RPM
<i>Continous Power Output</i>	: 7.5 kW
<i>Specific Fuel Consumption</i>	: 229.31 gr/kWh

3.1 Engine Set Up



Gambar 3.2 Skema diagram *dual-fuel gas split injection*

Pengaturan mesin dilakukan untuk mengatur keadaan mesin yang digunakan untuk pengambilan data. Pengaturan tersebut dilakukan pada mesin Yanmar TF 85 MH modifikasi *dual fuel*, Solar-CNG. Skema pada penelitian kali ini dapat direfleksikan dengan Gambar 3.2. Gambar tersebut sudah detail dengan kelengkapan peralatan dan instrumen pendukungnya. Selanjutnya hal yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Pengaturan mesin bisa beroperasi pada kondisi operasional normal diesel atau operasional *dual-fuel*.
2. Pengaturan pada jalur input gas disuplai melalui saluran *intake* udara masuk
3. Pemasangan *gas injector manifold* disesuaikan sedekat mungkin dengan saluran *intake* udara masuk menuju ruang bakar.
4. Penggunaan PLC dibutuhkan untuk pengaturan beban dan *safety control*.
5. *Control gas injector manifold* dilakukan dengan 2 *Electronic Control Unit* (ECU) untuk mengontrol *injector 1* dan *injector 2*, karena akan dilakukan *split injection* untuk injeksi gas kedalam saluran intake udara masuk.

6. Mesin dikopel dengan generator untuk menghasilkan daya listrik yang digunakan kepada pembebanan *heater* dengan variasi 25%, 50%, 75% dan 100%.
7. Konsumsi bahan bakar diesel diamati pada gelas ukur untuk mengetahui waktu untuk *fuel oil consumption* yang parallel dengan konsumsi CNG.

3.2 Persiapan Instrumen Pengukuran

Persiapan alat-alat dan instrumen pendukung sebagai sarana penunjang untuk pengukuran pada penelitian *gas split injection on dual-fuel* telah dipersiapkan. Instrumen tersebut meliputi alat ukur dan sensor. Instrumen pengukuran pada skema penelitian ini dibagi menjadi beberapa bagian. Bagian pertama skema jalur untuk bahan bakar CNG dan bagian kedua skema jalur untuk bahan bakar diesel.

3.2.1 Bagian Pertama Skema Jalur Gas

Skema jalur untuk aliran masa bahan bakar gas CNG yang dimulai dari tangki penyimpanan sampai masukan injeksi gas, antara lain

- a. *Pressure reducer*, atau regulator gas, yang digunakan sebagai control tekanan pada aliran gas CNG. Gambar 3.3 merupakan detail dari regulator yang terpasang pada skema penelitian kali ini. Pada penelitian kali ini regulator gas diset pada tekanan 3 bar tetap, artinya tekanan pada tabung CNG diturunkan dari 200 bar menjadi 3 bar. Tidak ada variasi tekanan pada aliran masuk gas CNG menuju ruang bakar.



Gambar 3.3 Regulator gas

- b. *Programable Logic Control (PLC)*, merupakan pengaturan untuk aliran CNG pada sistem skema bahan bakar gas. PLC disini digunakan sebagai *stop valve safety equipment* sehingga menghindari berbagai kemungkinan yang tidak diinginkan. PLC juga berfungsi sebagai control *load* yang dibebankan kepada generator. Sesuai dengan Gambar 3.4 merupakan panel untuk pengaturan *load* yang digunakan untuk pembebanan pada percobaan. *Load* pada pembebanan generator terdapat empat pembebanan, mulai dari *load* 1 sampai 4, masing-masing *load* diberikan 25%. Jadi untuk set *load* 25%-100% digunakan panel

PLC sebagai input process, untuk *load 50%* terlebih dahulu harus menekan pushbutton *load 25%* dan seterusnya sampai *load 100%* yang terpasang.



Gambar 3.4 PLC panel

- c. *Gas Flowmeter*, merupakan alat ukur aliran CNG dengan satuan l/min. *Gas flowmeter* yang terpasang merupakan alat ukur dari tabung oksigen yang bukan peruntukannya sebagai alat ukur CNG, pembacaan untuk *flowmeter* CNG cenderung tidak akurat karena bola pemberat didalam *flowmeter* yang fluktuatif. Gambar 3.5 merupakan instrumen untuk pembacaan aliran gas. Saran untuk *gas flowmeter* menggunakan *digital flowmeter* khusus CNG agar pembacaan aliran massa lebih akurat.



Gambar 3.5 Flowmeter CNG

- d. *Gas Manifold*, pada instrumen pengatur aliran gas dengan parameter waktu lamanya bukaan dan waktu bukaan digunakanlah *gas manifold*. *Gas manifold* disini diperuntukan untuk mesin empat silinder tetapi pada penelitian kali ini

hanya digunakan dua bukaan untuk satu silinder. Pada Gambar 3.6 dapat diamati bahwa *manifold* terdapat dua saluran menuju *air intake* menuju ruang bakar. Dua bukaan tersebut dimaksudkan untuk strategi *gas split injection*, karena terdapat penginjeksian bertahap yang dilakukan oleh *manifold* sebanyak dua kali penginjeksian. Sehingga hanya dua bukaan *manifold* yang digunakan.

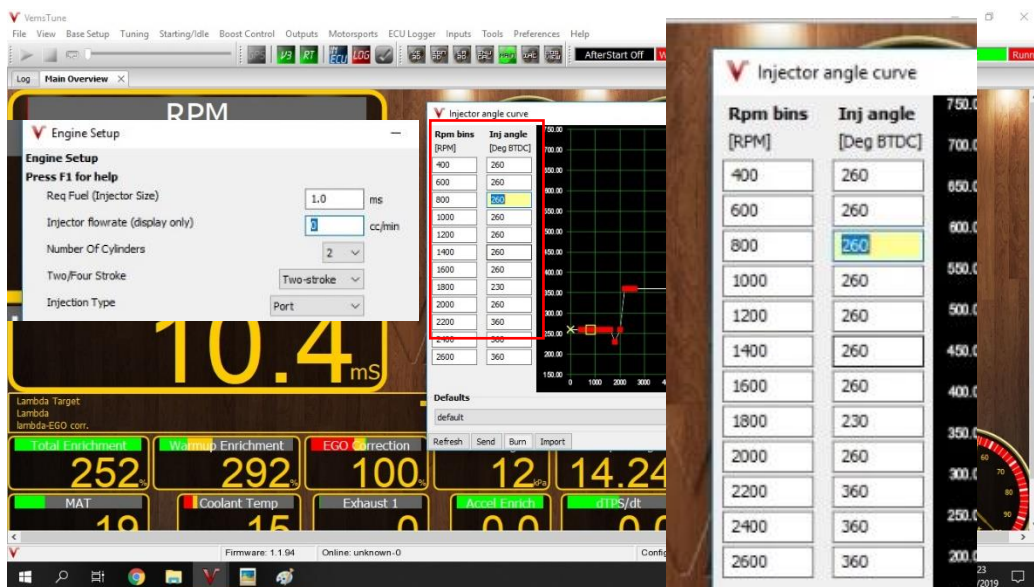


Gambar 3.6 Gas manifold

- e. *Instrument Control*, pada penelitian ini digunakan *Electronic Control Unit* (ECU) sebagai sarana kontrol untuk *manifold*. Pembuatan ECU disesuaikan dengan aplikasi yang digunakan yaitu Vemstune sebagai pengaturan *manifold*. Pada Gambar 3.7 menunjukkan bahwa digunakan ECU dua unit sebagai pengaturan menuju *manifold* yang digunakan. Selanjutnya Gambar 3.8 merupakan tampilan *interface* dari Vemstune yang merupakan sarana pengaturan untuk *manifold*. Digunakan pengaturan Tabel 3.2 untuk pengaturan *start of injection* atau *injector angle valve* dan poengaturan Tabel 3.1 untuk pengaturan *fuel req*. Pengaturan tersebut masing-masing digunakan untuk pengaturan pada *load* dan pada variasi penelitian ini.



Gambar 3.7 Dua unit ECU



Gambar 3.8 Interface dari Vemstone

Tabel 3.1 Kombinasi Setingan pada Vemstone

Load %	Kombinasi Dual-fuel (ms)	Kombinasi Gas split injection Dual-fuel (ms)					
		Split 50%:50%		Split 25%:75%		Split 75%:25%	
		ECU 1	ECU 2	ECU 1	ECU 2	ECU 1	ECU 2
25	8	3	3	0.5	5.5	5.5	0.5
50	9.5	4	4	1	6.5	6.5	1
75	10.5	4.5	4.5	1	7.5	7.5	1
100	12	5	5	1.5	8.5	8.5	1.5

Pengaturan Vemstune disesuaikan dengan kombinasi yang sudah kami lakukan *trial and error*, dan kombinasi pada Tabel 3.1 merupakan kombinasi yang cukup optimum untuk substitusi dari penggunaan CNG. Pada Tabel 3.1 maka pengaturan pada Vemstune harus disesuaikan dengan Tabel tersebut.

3.2.2. Bagian Kedua Skema Jalur Diesel

Bagian kedua, skema jalur untuk aliran masa bahan bakar diesel hanya diukur dengan tabung ukur. Tabung ukur, digunakan untuk mengukur habisnya bahan bakar diesel untuk ukuran ml volume dari bahan bakar cair diesel yang digunakan. Dicatat menggunakan *stopwatch* untuk volume yang diinginkan dengan skala ditabung ukur, setiap garis memiliki ukuran 5 ml volume. Sesuai dengan Gambar 3.9 merupakan sarana untuk pengukuran bahan bakar diesel yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3.9 Tabung ukur

3.3 Investigasi Performa Mesin *Dual-fuel*

Pada tahapan membuat investigasi awal dari performa mesin *dual-fuel* terlebih dahulu harus mengamati karakteristik dari dijadikanya mesin diesel konvensional menjadi mesin modifikasi *dual-fuel*. Pada tahapan ini kondisi mesin diesel konvensional merupakan diesel dengan bahan bakar cair diesel dengan pembakarannya yang *direct injection* melalui sistem kompresi udara yang tinggi kemudian diinjeksikan bahan bakar cair kemudian campuran tersebut terbakar pada tekanan tertentu.

Pada operasionalnya mesin *dual-fuel* merupakan mesin dengan bahan bakar diesel dengan penambahan bahan bakar gas sebagai tambahan massa bahan bakar yang akan diolah menjadi energi. CNG tersebut diinjeksikan melalui saluran udara *intake* sebagai tambahan bahan bakar yang dikompres bersamaan dengan

udara masuk. Artinya, udara yang menjadi *feed* tersebut merupakan campuran udara dan CNG yang selanjutnya dikompres pada tahap kompres didalam ruang bakar.

Dengan penambahan CNG pada suplai bahan bakar yang masuk dengan tekanan 3 bar pada bukaan penuh melalui saluran *intake* udara, ruang bakar mengalami kondisi *rich fuel*. Kondisi tersebut merupakan kondisi dimana campuran bahan bakar dan udara memiliki komposisi yang lebih menitik beratkan kepada kuantitas bahan bakar daripada udara. Pada kondisi *rich fuel* ruang bakar lebih banyak membakar bahan bakar yang menghasilkan daya lebih besar, sehingga putaran mesin menjadi lebih cepat saat katup saluran CNG dibuka.

Pada kondisi tersebut performa mesin merupakan kondisi dimana pembakaran didapat dari bahan bakar diesel yang awalnya untuk putaran mesin yang ditentukan, karena katup saluran CNG dibuka maka putaran mesin meningkat. Kondisi seperti ini dimungkinkan untuk pengurangan *throttle* pada bahan bakar diesel sehingga konsumsi bahan bakar diesel dapat digantikan dengan CNG untuk substitusi pembakaran bahan bakarnya. Sehingga sudah dapat terlihat bahwa dengan penambahan CNG sebagai bahan bakar yang masuk melalui saluran *intake* udara meningkatkan putaran mesin pada kondisi *fuel mixed dual-fuel* dengan bukaan *throttle* diesel tanpa pengurangan untuk putaran tertentu. Pada akhirnya putaran tersebut menghasilkan performa yang lebih tinggi. Selanjutnya untuk konsumsi bahan bakar pada kondisi *dual-fuel* mengurangi konsumsi bahan bakar diesel untuk energi pembakaran pada kondisi tersebut.

3.4 Investigasi Efek *Split injection* pada Performa Mesin *Dual-fuel*

Metodologi untuk investigasi efek *split injection* pada performa mesin *dual-fuel* dapat dimulai dengan operasional mesin *dual-fuel* untuk injeksi gas yang pada umumnya yaitu satu kali injeksi bahan bakar gas CNG. Sistem ini membutuhkan beberapa penyesuaian untuk saluran injeksi gas dan pengaturan *manifold* dari sistem *dual-fuel* satu injeksi sebelumnya. Dengan penambahan satu saluran lagi pada *intake* saluran udara dan mengatur *manifold* agar dapat menginjeksikan bahan bakar gas secara bertahap.

Pada operasional mesin *dual-fuel* dengan strategi *gas split injection*, memiliki perbedaan pada sistem injeksinya daripada sistem *dual-fuel* untuk satu kali penginjeksian. Strategi ini menggunakan skema penginjeksian dengan ratio yang telah ditentukan untuk penginjeksian bertahap. Artinya, ada beberapa penginjeksian dengan ditentukan lama injeksi dan waktu injeksi untuk satu kali siklus pembakaran.

Hampir serupa dengan sistem *dual-fuel* penginjeksian satu kali, strategi *gas split injection* memerlukan putaran mesin dengan kondisi operasional diesel terlebih dahulu. Kemudian setelah *steady state* pada putaran mesin yang diinginkan, sistem injeksi *gas split injection* diaktifkan. Injeksi CNG tersebut tetap melalui saluran *intake* udara masukan. Hanya saja diberikan dua jalur masuk CNG untuk melakukan strategi *split injection*.

Pengaktifan strategi ini menghasilkan injeksi yang bertahap pada masukan CNG disalurkan *intake* udara masukan. Sehingga diharapkan dapat mengakuisisi pemerataan campuran CNG dengan udara yang semakin baik untuk dikompresi

pada ruang bakar. Udara yang bercampur dengan CNG tersebut memiliki massa CNG yang sama seperti saat kondisi *dual-fuel* pada satu kali injeksi CNG. Sesuai dengan kombinasi pengaturan *manifold* gas yang telah diberikan maka diperoleh massa injeksi yang sama seperti kondisi *dual-fuel* pada satu kali penginjeksian CNG.

Alhasil pada operasional mesin diesel konvensional sebagai awalan operasional strategi ini mengalami perubahan setelah diaktifkan sistem *split injection*. Pada kondisi *steady state* putaran mesin yang diinginkan, mula-mula sistem diesel konvensional digunakan selanjutnya pengaktifan sistem *split injection* dimulai. Hasil dari strategi tersebut menaikkan putaran mesin *steady state* sebelumnya pada kondisi diesel konvensional. Putaran naik maka performa juga naik. Selanjutnya pada kondisi ini throttle diesel dikurangi sehingga putaran mesin sesuai dengan kondisi *steady state* awal. Tetapi konsumsi diesel berkurang karena ter-substitusi oleh CNG untuk mengganti dikurangnya *throttle* bahan bakar diesel tersebut. Pada akhirnya konsumsinya menurun tetapi hasil daya yang didapat meningkat.

3.5 Variabel Eksperimen Pengambilan Data

Dalam hal ini variabel mempengaruhi hasil yang diuji. Pengumpulan data diperoleh dari hasil eksperimen yang sudah dilakukan, dari tahap pra eksperimen hingga tahap eksperimen. Hasil yang diperoleh merupakan data eksperimen pada *gas split injection* tertentu pada variasi putaran yang bertahap. Ditampilkan Tabel 3.2 dasar untuk rasio bahan bakar strategi *gas split injection*.

Tabel 3.2 *Dual-Fuel Mode*

<i>Mode</i>	Putaran mesin (RPM)	Injeksi Pertama (%)	Injeksi Kedua (%)	Variasi CA injeksi gas
<i>Dual-fuel</i>	1800			
	1900			
	2000	100	0	260
	2100			
	2200			
<i>Dual-fuel gas split injection</i>		25	75	230
	2000	50	50	244
		75	25	260

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dijelaskan hasil dan deskripsi pembahasan dari penelitian pada pengujian performa *dual-fuel engine* dengan perbandingan *dual-fuel single injection engine* dan operasional *dual-fuel engine* dengan *gas split injection*. Tabel 4.1 merupakan Tabel sebagai dasar untuk penentuan rasio bahan bakar strategi *gas split injection*. Pada pengambilan data yang telah dilakukan, ditetapkan parameter substitusi prosentase gas berdasarkan energi yang digunakan pada prosentase konstan pada setiap beban di RPM tertentu. Adapun variasi pengujian *gas split injection* sebagai berikut:

Tabel 4.1 Ratio untuk *Gas split injection*

Fuel <i>Split</i>	Putaran mesin (RPM)	Injeksi Pertama (%)	Injeksi Kedua (%)	Variasi CA injeksi gas
<i>Compress</i>	2000	100	0	230
<i>Natural</i>		50	50	244
<i>Gas</i>		25	75	260
		75	25	

4.1 Performa Mesin *Dual-fuel*

Pembahasan bab ini merupakan pembahasan dari hasil pengambilan data yang diolah menjadi beberapa grafik. Data yang diambil merupakan operasional *dual-fuel engine* pada *injection timing* 260°bTDC. Pengambilan data tersebut dilakukan pada putaran mesin 1800-2200 RPM dengan kondisi mesin sudah modifikasi mode *dual-fuel*.

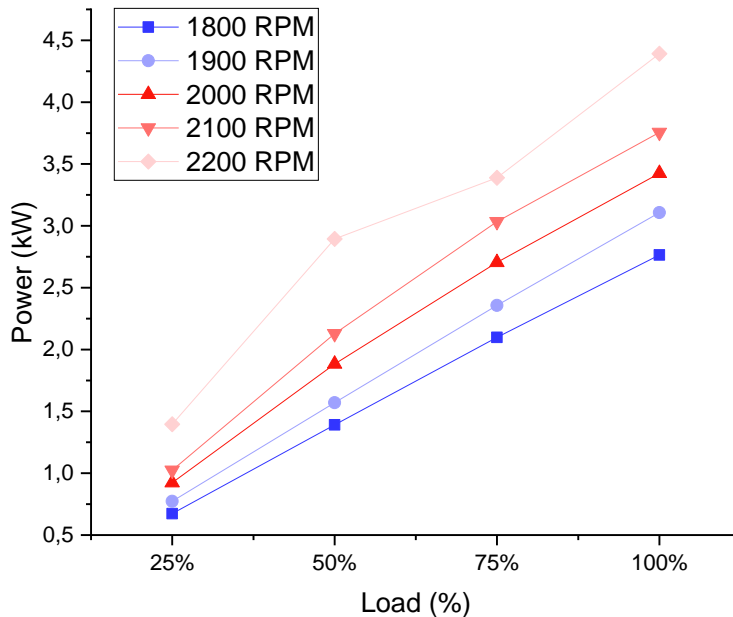
Hasil yang didapat pada performa mesin *dual-fuel* yaitu daya, torsi, BMEP, SFOC, efisiensi termal. Masing-masing parameter performa tersebut didapat setelah dilakukan pengolahan data dari rumusan yang terdapat pada Bab 2. Masukkan data sebagai olahan untuk hasil parameter yang didapat berupa putaran mesin, putaran generator, kuantitas aliran CNG, tegangan pada generator sesuai beban, arus pada generator sesuai beban, waktu konsumsi bahan bakar cair, waktu konsumsi bahan bakar gas. Pada Tabel 4.2 ditampilkan kombinasi untuk pengaturan Vemstune.

Tabel 4.2 Kombinasi Vemstune pada *Dual-fuel*

Putaran Mesin (RPM)	Load %	Kombinasi <i>Dual-fuel</i> (ms)
1800, 1900,	25%	8
2000, 2100,	50%	9.5
2200	75%	10.5
	100%	12

4.1.1 Perbandingan *Load* terhadap Daya

Pada Gambar 4.1 parameter yang didapat merupakan olahan berdasarkan data *load* yang dibandingkan dengan daya. Pada pengambilan data tersebut, diambil pada putaran mesin 1800, 1900, 2000, 2100, dan 2200. Tujuan diambil beberapa putaran mesin tersebut yaitu sebagai data pemetaan untuk mengamati karakteristik mesin terhadap daya mesin yang dikeluarkan.



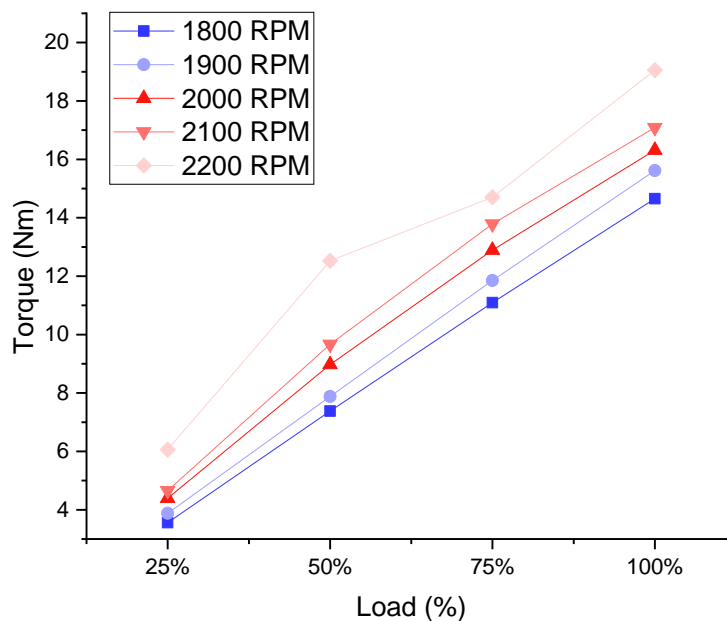
Gambar 4.1 Perbandingan *load* terhadap daya pada *dual-fuel*

Grafik pada Gambar 4.1 didapat data pemetaan mesin *dual-fuel* dengan waktu injeksi (260°bTDC). Dari operasional mesin *dual-fuel* daya didapat trend semakin besar pembebanan *load* maka semakin besar daya yang dihasilkan untuk memenuhi kebutuhan *load* pada generator. Pada grafik tersebut didapat daya terendah pada putaran mesin 1800 RPM=0,672 kW dan didapat daya tertinggi pada putaran mesin 2200 RPM=4,391 kW.

Dapat diamati Gambar 4.1, grafik pada masing-masing putaran mesin untuk *load* menghasilkan daya yang memiliki trend yang baik yaitu, trend naik. Sehingga pemetaan pada mesin *dual-fuel* sudah didapat untuk parameter daya. Hanya terjadi penyimpangan pada putaran 2200 yaitu *load* 75%.

4.1.2 Perbandingan *Load* terhadap Torsi

Pemetaan data pada mesin *dual-fuel*, dilakukan pada parameter torsi. Data olahan tersebut merupakan hasil dari perhitungan torsi sesuai dengan rumusan pada Bab 2. Gambar 4.2 didapat perbandingan *load* dengan torsi, sehingga dapat diamati bagaimana pengaruhnya terhadap pembebanan yang diberikan. Operasional mesin pada pengambilan data dioperasikan pada putaran mesin 1800, 1900, 2000, 2100, dan 2200. Setelah didapat grafik tersebut, maka didapatkan pemetaan data torsi pada operasional yang diuji tersebut sesuai dengan masing-masing *load* yang diberikan.



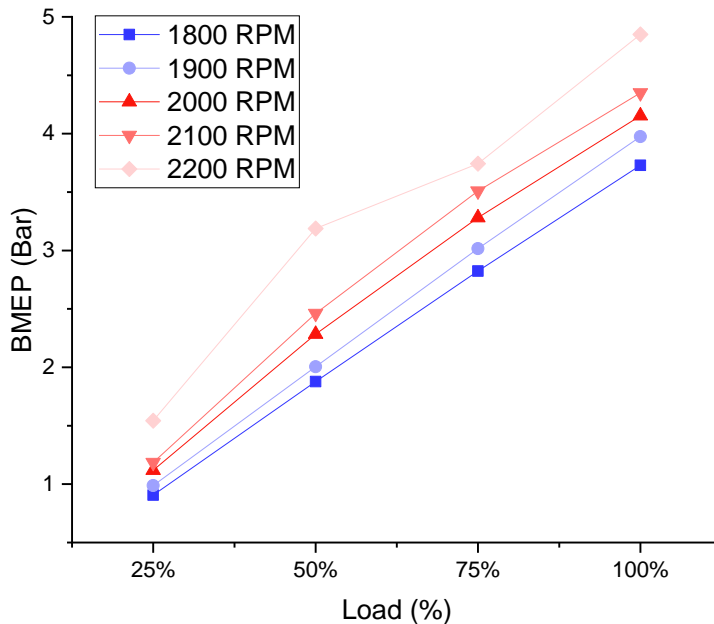
Gambar 4.2 Perbandingan *load* terhadap torsi pada *dual-fuel*

Gambar 4.2 dapat menunjukkan pemetaan torsi sesuai dengan masing-masing *load* yang diberikan pada putaran mesin operasional seperti penjelasan sebelumnya. Sesuai dengan nilai daya yang dibandingkan dengan *load*, nilai torsi akan fluktuatif naik sesuai dengan pembebanan *load* yang diberikan. Data didapat, nilai torsi terendah terjadi pada putaran mesin 1800 RPM dan *load* 25%at yaitu = 3.559 Nm dan tertinggi terjadi pada putaratr mesin 2200 RPM dan *load* 100% yaitu =19.05 Nm.

Data yang didapat relatif sesuai dengan tren naik, tetapi terjadi anomali kembali seperti data *load* terhadap daya. Yaitu pada *load* 75% dan putaran mesin 2200 RPM. Tetapi pemetaan pada torsi sudah dapat menghasilkan kesimpulan bahwa semakin besar diberikan pembebanan *load* maka semakin besar pula torsi yang dihasilkan.

4.1.3 Perbandingan *Load* terhadap BMEP

Data BMEP pada pembahasan ini merupakan data olahan yang didapat dari perhitungan sesuai dengan rumusan di Bab 2. Pengambilan data BMEP dimaksudkan sebagai data pemetaan yang dilakukan pada operasional mesin *dual-fuel*. Operasional mesin tersebut diberikan pada putaran 1800, 1900, 2000, 2100, dan 2200 RPM. Setelah didapat data BMEP maka kemudian data tersebut disajikan dalam bentuk grafik sesuai pada Gambar 4.3.



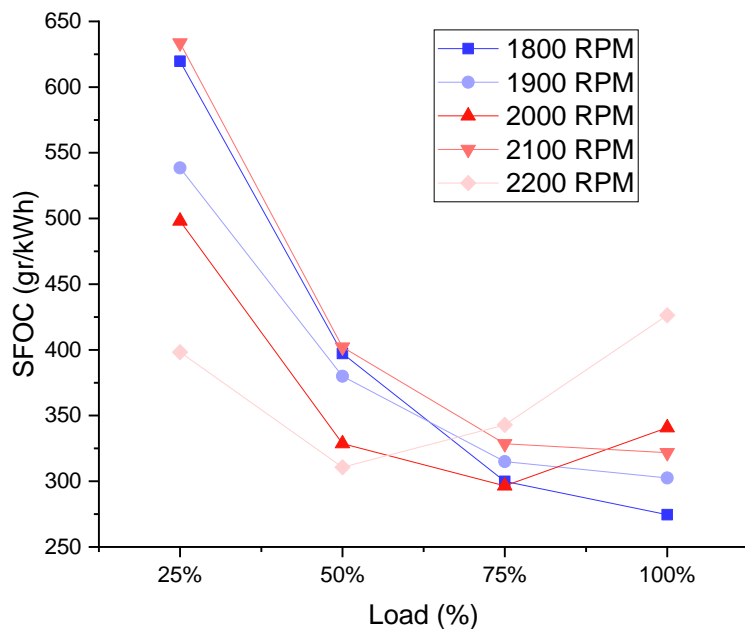
Gambar 4.3 Perbandingan *load* terhadap BMEP pada *dual-fuel*

Berdasarkan Gambar 4.3 dari grafik tersebut dapat diamati bahwa dengan diberikan pembebanan *load* yang semakin meningkat maka menghasilkan nilai BMEP yang semakin tinggi. Nilai BMEP yang didapat tersebut merupakan data pada setiap putaran mesin sesuai dengan operasional yang telah disebutkan sebelumnya. Dengan diberikan *load* 25% sampai 100% maka akan diketahui tren yang terjadi.

Didapat nilai BMEP yang terendah terjadi pada putaran mesin 1800 RPM dan *load* 25% sebesar 0.91 Bar. Sedangkan untuk data yang tertinggi didapat pada putaran mesin 2200 RPM pada *load* 100%. Kecenderungan yang sama pada setiap putaran mesin, tetapi terdapat anomaly kembali pada putaran mesin 2200 RPM di *load* 75%. Hasil tersebut merupakan pemetaan dari mesin yang menghasilkan karakteristik dari operasional mesin *dual-fuel*.

4.1.4 Perbandingan *Load* terhadap SFOC

Pengolahan data pada pembahasan ini merupakan data perbandingan dari pembebanan *load* dibandingkan dengan SFOC. Nilai SFOC merupakan nilai konsumsi bahan bakar cari dan bahan bakar gas. Dengan penjumlahan nilai konsumsi pada masing-masing bahan bakar, maka didapat nilai konsumsi total bahan bakar operasional *dual-fuel*. Mesin yang digunakan dioperasikan pada RPM tertentu mulai dari 1800, 1900, 2000, 2100, sampai 2200. Setelah itu data tersebut disajikan dalam bentuk grafik antara *load* yang diberikan dibandingkan dengan SFOC pada masing-masing nilai putaran mesin.



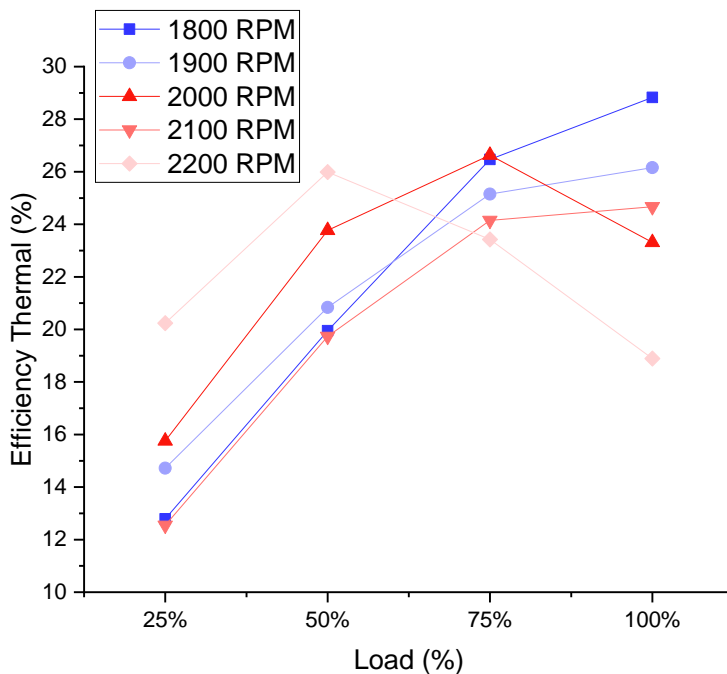
Gambar 4.4 Perbandingan *load* terhadap SFOC pada *dual-fuel*

Pada Gambar 4.4 disajikan grafik olahan *load* dibandingkan dengan SFOC. Tren yang didapat yaitu, semakin besar *load* yang diberikan maka nilai konsumsi semakin turun tetapi meningkat pada *load* yang tinggi. Nilai SFOC yang disajikan merupakan nilai SFOC berdasarkan *load* yang bebaskan kepada mesin mulai dari 25%, 50%, 75%, dan 100%.

Kecenderungan dara yang menurun kemudian meningkat lagi merupakan karakteristik yang didapat dari operasional mesin *dual-fuel* sesudah dilakukan pemetaan data SFOC. Data tersebut merupakan acuan untuk pengambilan putaran yang optimum pada mesin. Kecenderungan nilai SFOC yang optimum didapat pada putaran 2000 RPM, sehingga putaran tersebut yang kami beranggapan merupakan putaran yang optimum sesuai dengan karakteristik operasional mesin *dual-fuel*.

4.1.5 Perbandingan *Load* terhadap efisiensi termal

Pembahasan pada Gambar 4.5 merupakan hasil olahan data dari efisiensi termal untuk operasional mesin *dual-fuel*. Data tersebut disajikan dalam bentuk grafik, yang berdasar pada perhitungan sesuai dengan dasar teori Bab 2. Pengambilan data efisiensi termal tersebut dilakukan untuk pemetaan terhadap putaran mesin yang diberikan mulai dari 1800, 1900, 2000, 2100, dan 2200 RPM untuk *load* mulai dari 25%, 50%, 75%, dan 100%.



Gambar 4.5 Perbandingan *load* terhadap efisiensi termal pada *dual-fuel*

Gambar 4.5 yang merupakan grafik perbandingan *load* berbanding dengan efisiensi termal sudah diamati. Hasil dari pengamatannya yaitu nilai dari efisiensi termal cenderung fluktuatif naik kemudian terjadi penurunan pada beban tinggi. Kecenderungan tersebut merupakan karakteristik mesin *dual-fuel* yang didapatkan pada percobaan kali ini. Sehingga dengan pemetaan efisiensi termal yang didapatkan menghasilkan kecenderungan sesuai dengan karakteristik operasional mesin *dual-fuel*.

Efisiensi termal tertinggi didapat pada putaran mesin 1800 RPM dengan *load* 100%. Penurunan efisiensi termal terjadi pada putaran mesin 2000 RPM dengan anomaly penurunan yang significant pada beban tinggi. Anomaly tersebut dimungkinkan karena pada beban tinggi panas yang terbuang semakin banyak dan energy yang digunakan semakin berkurang karena sudah mencapai titik optimum dari operasional mesin pada putaran mesin 2000 RPM.

4.2 Performa Mesin *Dual-fuel* dengan *Split injection* Bahan Bakar

Pembahasan sub Bab 4.2 merupakan hasil dari pengamatan beberapa grafik pengolahan data. Data-data yang dijadikan grafik merupakan data hasil praktikum dengan sepenuhnya strategi *gas split injection* pada operasional mesin *dual-fuel*. Operasional mesin diberikan pada putaran 2000 dan kombinasi pengaturan Vemstone seperti yang tertera pada Tabel 4.3.

Hasil yang dapat diamati pada pembahasan ini adalah daya, torsi, BMEP, SFOC, efisiensi termal. Masing-masing parameter performa tersebut didapat setelah dilakukan pengolahan data dari rumusan yang terdapat pada Bab 2. Masukkan data sebagai olahan untuk hasil parameter yang didapat berupa putaran mesin, putaran generator, kuantitas aliran CNG, tegangan pada generator sesuai beban, arus pada generator sesuai beban, waktu konsumsi bahan bakar cair, waktu konsumsi bahan bakar gas. Selanjutnya olahan data tersebut dibuat grafik untuk setiap *load* yang dibebankan kepada mesin saat uji performa.

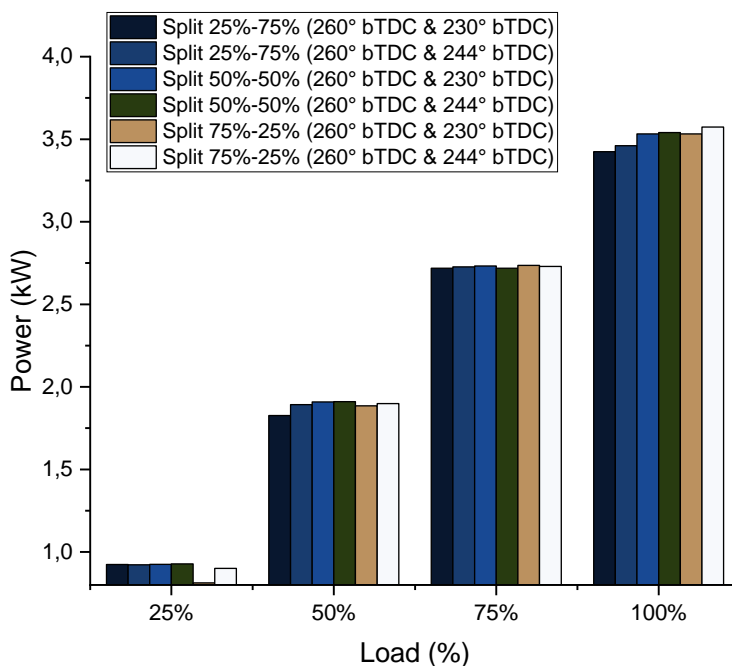
Tabel 4.3 Kombinasi Vemstone pada *gas split injection dual-fuel*

Kombinasi <i>Split injection Dual-fuel</i> (ms)						
<i>Load</i> %	<i>Split</i> 50%:50%		<i>Split</i> 25%:75%		<i>Split</i> 75%:25%	
	ECU 1	ECU 2	ECU 1	ECU 2	ECU 1	ECU 2
25%	3	3	0.5	5.5	5.5	0.5
50%	4	4	1	6.5	6.5	1
75%	4.5	4.5	1	7.5	7.5	1
100%	5	5	1.5	8.5	8.5	1.5

Pengaturan pada Vemstone sebagai acuan aliran gas pada *manifold* CNG terlebih dahulu dilakukan sesuai kombinasi pada Tabel 4.3. Kombinasi pada tabel tersebut merupakan kombinasi yang optimum pada operasional mesin saat percobaan. Sehingga kombinasi tersebut hanya berlaku pada strategi *gas split injection* pada penelitian ini.

4.2.1 Perbandingan *Load* terhadap Daya

Pengolahan data pada pembahasan ini merupakan data perbandingan dari pembebanan *load* dibandingkan dengan daya pada strategi *gas split injection*. Hasil dari pembakaran yang terjadi pada bahan bakar dan udara akhirnya menghasilkan daya. Operasional mesin dijalankan pada putaran 2000 RPM. Setelah itu data tersebut disajikan dalam bentuk grafik antara *load* yang diberikan dibandingkan dengan daya.



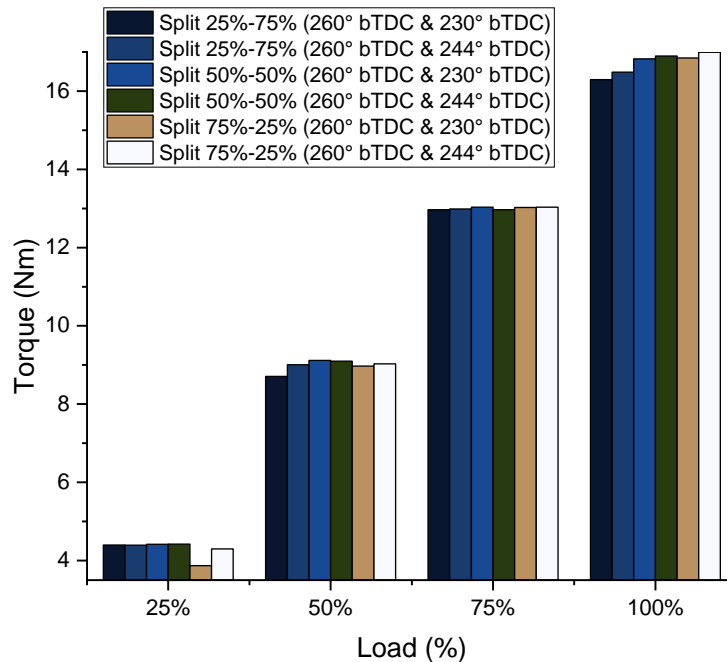
Gambar 4.6 Perbandingan *load* terhadap daya pada *gas split injection*

Grafik pada Gambar 4.6 merupakan hasil dari pengolahan data praktikum dengan keluaran berupa daya pada mesin. Dapat diamat pada *load* 25% dan 50% daya yang dihasilkan terbesar terdapat pada kombinasi *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 244°bTDC) berturut-turut yaitu 0.927 kW dan 1.91 kW. Pada *load* 75% dan 100% berturut-turut kombinasi yang optimum terjadi pada *split* 75%:25% (260°bTDC dan 230°bTDC) = 2.735 kW dan *split* 75%:25% (260°bTDC dan 244°bTDC)=3.57 kW.

Pada analisa daya strategi *gas split injection* yang optimum untuk *load* rendah 25%, 50% terdapat pada *split* 50%:50% (260°bTDC dan 244°bTDC) dan *load* tinggi 75%, 100% terdapat pada *split* 75%:25% (260°bTDC dan 230°bTDC) & *split* 75%:25% (260°bTDC dan 244°bTDC). Dengan strategi tersebut, *gas split injection* dapat menghasilkan daya yang berbeda pada setiap kombinasi variasinya

4.2.2 Perbandingan *Load* terhadap Torsi

Pembahasan pada Gambar 4.7 merupakan hasil olahan data dari torsi untuk strategi *gas split injection dual-fuel*. Data tersebut disajikan dalam bentuk grafik, yang berdasar pada perhitungan sesuai dengan dasar teori Bab 2. Pengambilan data untuk nilai torsi dilakukan pada putaran konstan yaitu 2000 RPM dengan variasi *load* 25%, 50%, 75%, 100%.



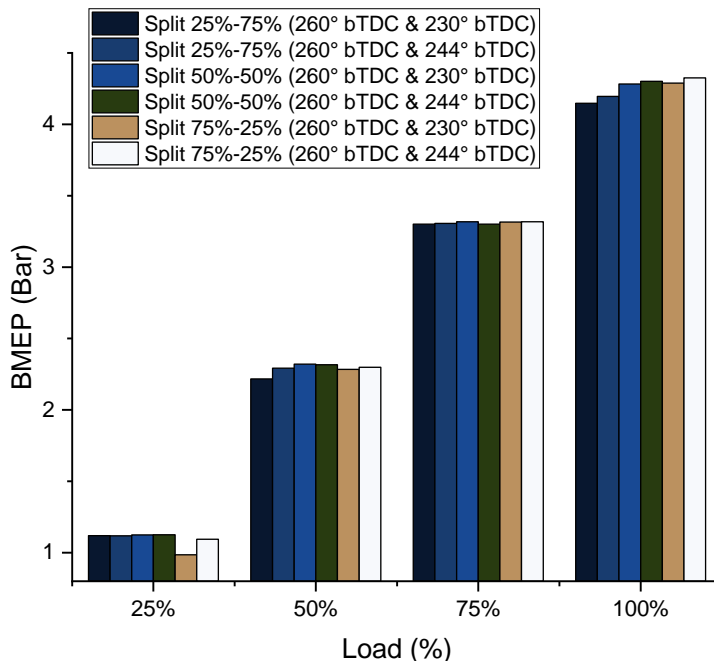
Gambar 4.7 Perbandingan *load* terhadap torsi pada *gas split injection*

Gambar 4.7 menunjukkan grafik perbandingan antara *load* dan torsi. Pada grafik tersebut disajikan beberapa data berdasarkan operasional mesin *dual-fuel* dengan strategi *gas split injection*. Setelah dilakukan pengamatan pada grafik tersebut, nilai torsi pada *load* 25% dan 50% yang terbesar terdapat pada kombinasi *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 230°bTDC) yaitu 4.41 Nm dan 9.1 Nm. Selanjutnya untuk *load* 75% dan 100% kombinasi yang menghasilkan torsi tertinggi masing-masing terdapat pada *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 230°bTDC) dan *gas split injection* 75%:25% (260°bTDC dan 244° bTDC).

Dengan penyajian grafik di Gambar 4.7 menunjukkan bahwa strategi *gas split injection* dapat membuat nilai torsi bervariasi berdasarkan dengan masing-masing variasi strategi *gas split injection* – nya. Sehingga untuk nilai optimum torsi dengan strategi *split injection* pada *load* 25%, 50%, dan 75% terdapat pada kombinasi *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 230°bTDC) dan untuk *load* 100% strategi tersebut terdapat pada *gas split injection* 75%:25% (260°bTDC dan 244°bTDC).

4.2.3 Perbandingan *Load* terhadap BMEP

Pembahasan untuk perbandingan *load* terhadap BMEP disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.8. Hasil pengolahan tersebut didapat dari perhitungan dengan dasar pada Bab 2. Operasional mesin *dual-fuel* tersebut dilakukan pada putaran 2000 RPM karena mesin lebih cepat mendapatkan titik *steady state*.



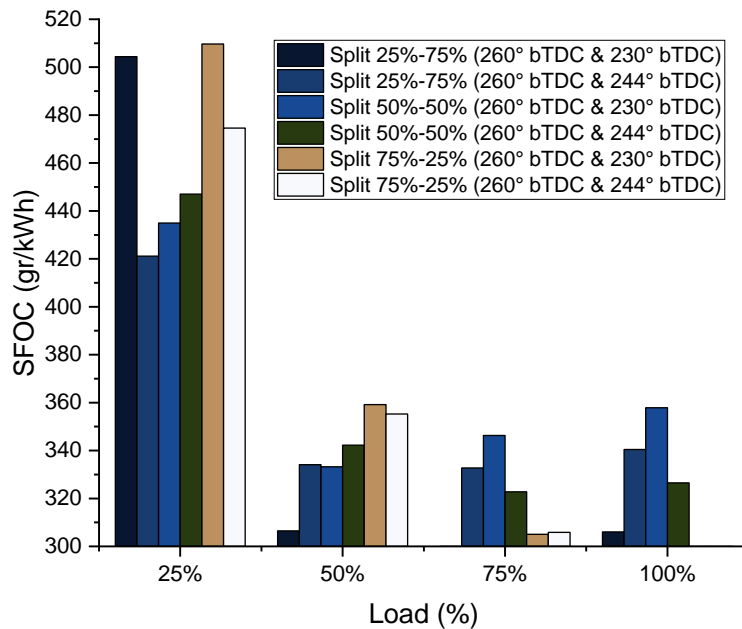
Gambar 4.8 Perbandingan *load* terhadap BMEP pada *gas split injection*

Pada Gambar 4.8 disajikan grafik perbandingan antara *load* dan BMEP, dapat diamati bahwa semakin dilakukan pembebanan *load* maka nilai BMEP akan semakin tinggi. Nilai BMEP terbesar pada *load* 25% dan 50% berturut-turut terjadi pada strategi *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 244°bTDC) dan *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 230°bTDC). Selanjutnya untuk *load* 75% dan 100% nilai terbesar torsi terjadi pada kombinasi *gas split injection* 75%:25% (260°bTDC dan 244°bTDC).

Dapat disimpulkan untuk nilai BMEP, pada setiap kombinasi *split injection* akan menghasilkan nilai BMEP yang berbeda. Dengan didominasi pada kombinasi *gas split injection* 50%:50% (260°bTDC dan 244°bTDC) yang merupakan kombinasi yang cukup optimum menghasilkan nilai BMEP yang tinggi dari pada kombinasi yang lain. Sehingga kombinasi tersebut dapat direkomendasikan menghasilkan nilai BMEP yang tinggi.

4.2.4 Perbandingan *Load* terhadap SFOC

Pengolahan data pada pembahasan ini merupakan data perbandingan dari pembebanan *load* dibandingkan dengan SFOC pada strategi *gas split injection*. Nilai SFOC merupakan konsumsi bahan bakar yang terjadi untuk setiap massa yang digunakan per satuan daya waktu. Operasional mesin dijalankan pada putaran 2000 RPM. Dengan alasan pada operasional mesin lebih cepat mendapatkan titik *steady state*. Setelah itu data tersebut disajikan dalam bentuk grafik antara *load* yang diberikan dibandingkan dengan SFOC.



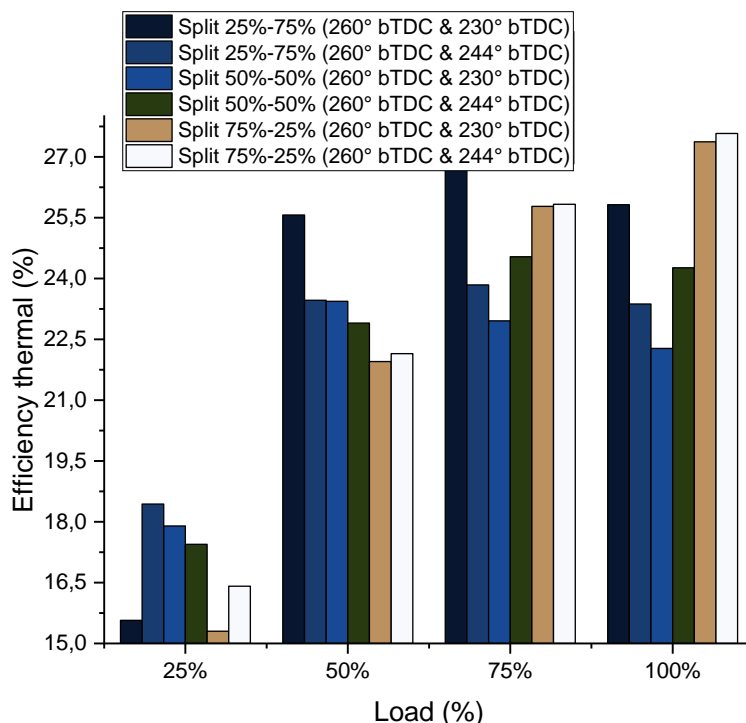
Gambar 4.9 Perbandingan *load* terhadap SFOC pada *gas split injection* °

Gambar 4.9 menunjukan grafik perbandingan antara *load* dan SFOC, nilai SFOC pada pengolahan data tersebut didapat pada setiap kombinasi variasi pada *gas split injection*. Setelah diamati nilai SFOC cenderung turun untuk pembebanan *load* yang semakin tinggi. Nilai SFOC yang terendah pada *load* 25% dan 50% berturut-turut terjadi pada kombinasi *split, gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 244°bTDC) = 421.15 gr/kWh dan *gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 230°bTDC) = 306 gr/kWh. Pada *load* 75% dan 100% terjadi pada kombinasi *split, gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 230°bTDC) = 296.41 gr/kWh dan *gas split injection* 75%:25% (260°bTDC dan 244°bTDC) = 286.22 gr/kWh.

Dari data pengolahan tersebut, maka didapat kombinasi yang optimum untuk nilai SFOC pada kombinasi *gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 244°bTDC) dan (260°bTDC dan 230°bTDC). Nilai tersebut dapat acuan untuk rekomendasi strategi tersebut untuk digunakan. Walaupun kombinasi yang lain juga memiliki keoptimuman pada parameter yang lainnya.

4.2.5 Perbandingan *Load* terhadap Efisiensi termal

Pembahasan pada Gambar 4.10 merupakan hasil olahan data dari efisiensi termal untuk strategi *gas split injection dual-fuel*. Data tersebut disajikan dalam bentuk grafik, yang berdasar pada perhitungan sesuai dengan dasar teori bab 2. Pengolahan data untuk nilai efisiensi termal dilakukan pada putaran konstan yaitu 2000 RPM dengan variasi *load* 25%, 50%, 75%, 100%. Dengan alasan pada operasional mesin lebih cepat mendapatkan titik *steady state*.



Gambar 4.10 Perbandingan *load* terhadap efisiensi termal pada *gas split injection*

Dari grafik pada Gambar 4.10 dapat diamati bahwa semakin diberikan pembebanan *load* maka akan semakin besar nilai efisiensi termal pada setiap kombinasi *split* yang diberikan. Pada *load* 25% dan 50% berturut-turut nilai efisiensi termal pada strategi *split injection* yaitu, *gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 244°bTDC) = 18.41 % dan *gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 230°bTDC) = 25.56 %. Selanjutnya untuk *load* 75% dan 100% berturut-turut terdapat pada kombinasi variasi *gas split injection* 25%:75% (260°bTDC dan 230°bTDC) = 26.69% dan *gas split injection* 75%:25% (260°bTDC dan 244°bTDC) = 27.57 gr/kWh

Pada nilai efisiensi termal didapatkan nilai yang berbeda pada setiap variasi *gas split injection*. Tetapi untuk nilai efisiensi termal memiliki kombinasi optimum pada *gas split injection* 25%:75%. Sehingga untuk variasi tersebut dapat dijadikan acuan untuk variasi *gas split injection* pada parameter efisiensi termal.

4.3 Efek *Split injection* Bahan Bakar pada Performa Mesin Dual

4.3.1 *Dual-fuel* dengan *Dual-fuel Split* pada ISR 25%:75%

Pada pengambilan data dengan ISR 25%:75% konfigurasi dilakukan pada Vemstune dengan membagi injeksi bahan bakar gas sebesar 25%&75% terhadap *single injection dual-fuel*. Masukan pengaturan dilakukan pada masing-masing *Electronic Control Unit* (ECU). Dipastikan pengaturan untuk ECU pada mode *split* disesuaikan dengan *dual-fuel single injection*.

Pengaturan *injector crank angle* untuk variasi pertama ECU 1 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 260°bTDC dan ECU 2 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 230°bTDC . Pada variasi kedua ECU 1 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 260°bTDC dan ECU 2 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 244°bTDC . Pengaturan tersebut dimaksudkan sebagai *delay* injeksi pada injeksi *natural gas*.

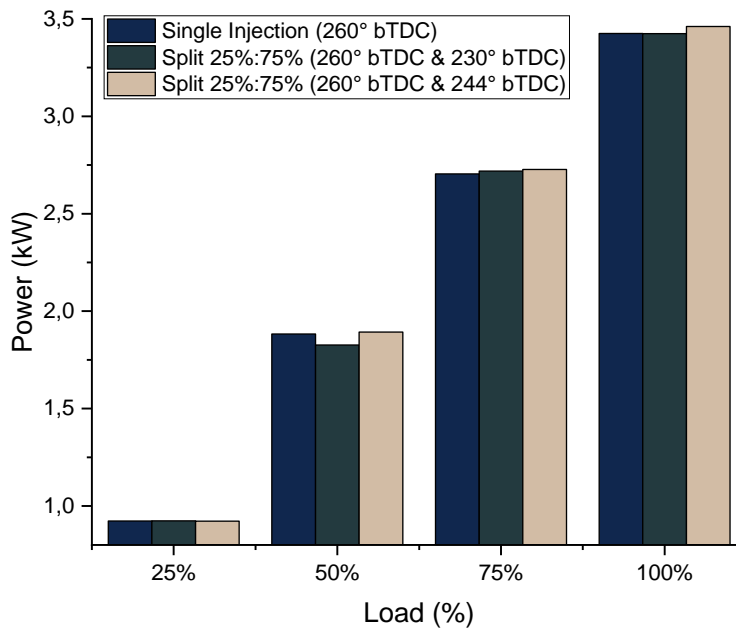
Tabel 4.4 Kombinasi *Dual-fuel* (260 °bTDC) dan *Gas split injection* (25%:75%)

<i>Load %</i>	Kombinasi <i>dual-fuel</i> (ms)	Kombinasi <i>split injection dual-fuel</i> (ms) Split 25%:75%	
		ECU 1	ECU 2
25%	8	0.5	5.5
50%	9.5	1	6.5
75%	10.5	1	7.5
100%	12	1.5	8.5

Seperti yang disajikan pada Tabel 4.4, variasi pengaturan pada Vemstune dilakukan sesuai kombinasi tersebut. Dimaksudkan agar terjadi strategi *split* pada operasional *dual-fuel* yang optimum. Kombinasi tersebut sudah diuji untuk beberapa kali percobaan dengan perbedaan data margin yang kecil.

Perbandingan *Load* terhadap Daya

Pengambilan data untuk mengamati pengaruh *gas split injection* terhadap daya sudah dilakukan. Dengan data *load* dibandingkan dengan daya menghasilkan grafik sebagai berikut. Data percobaan tersebut dilakukan pada mesin *dual-fuel* dengan 2000 RPM yang ditetapkan untuk setiap pengambilan *load*. Variasi konfigurasi yang digunakan yaitu *gas split injection* 25%:75% dengan masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.11 Perbandingan *load* terhadap daya pada split 25%:75%

Tabel 4.5 Prosentase perbedaan daya antara *single injection* dan *split injection*

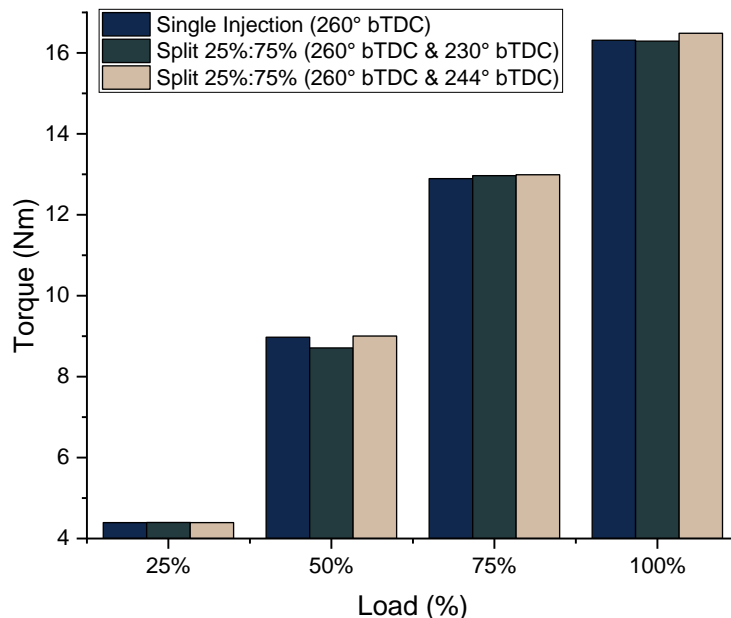
Load	Daya (kW)			Prosentase (%)	
	Single Injection 260° bTDC	Split 25%:75% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 25%:75% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
25%	0.92	0.92	0.92	0.07	-0.12
50%	1.88	1.83	1.89	-3.00	0.51
75%	2.70	2.72	2.73	0.54	0.85
100%	3.43	3.42	3.46	-0.04	1.04

Dari pengolahan data yang telah dilakukan sehingga akhirnya dihasilkan grafik pada Gambar 4.11 dapat diamati bahwa, strategi *gas split injection* pada *dual-fuel* dapat meningkatkan nilai daya. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.5, prosentase peningkatan didapat dengan nilai 0,1 % sampai 1 %. Pada peningkatan 0,1% didapat pada *load* 25% dan konfigurasi *split* 25%:75% *dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 0,9238 kW dan *dual-fuel* (260 °bTDC) 0,9232 kWh dan peningkatan 1% terjadi pada *load* 75% dan konfigurasi *split* 25%:75% *dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) =2.732 kW dan *dual-fuel* (260 °bTDC) 2.704 kWh. Berdasarkan peningkatan tersebut, strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan nilai daya.

Peningkatan daya yang terjadi pada strategi *gas split injection* dapat terjadi karena penginjeksian bertahap pada pencampuran bahan bakar-udara yang lebih merata dibandingkan dengan injeksi yang terjadi hanya satu kali pada sistem *dual-fuel*. Penginjeksian tersebut akan memberikan efek pembakaran yang lebih baik. Sehingga daya akan meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.

Perbandingan *Load* terhadap Torsi

Pada hasil percobaan dengan parameter *load* dibandingkan dengan torsi didapat hasil sebagai berikut. Dilakukan pengambilan data pada 2000 RPM yang ditetapkan. Variasi dilakukan untuk *gas split injection* 25%:75% dengan masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.12 Perbandingan *load* terhadap torsi pada split 25%:75%

Tabel 4.6 Prosentase perbedaan torsi antara *single injection* dan *split injection*

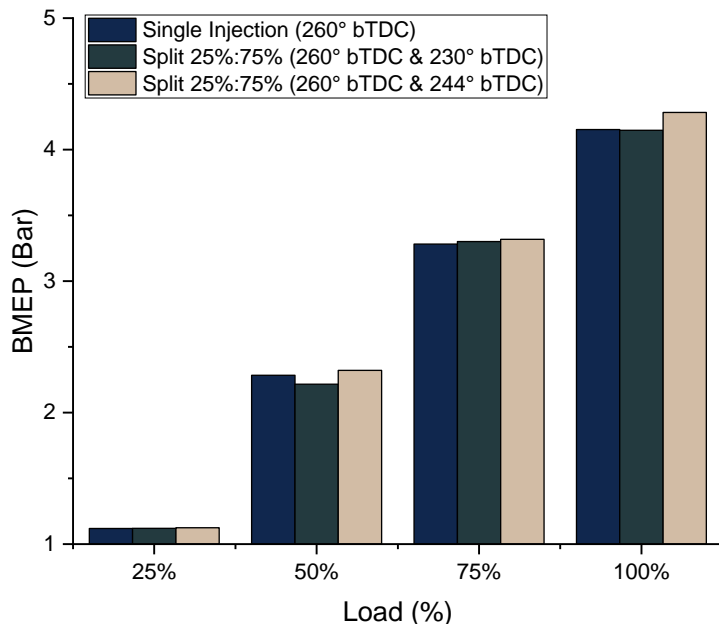
Load	Single Injection	Split 25%:75% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 25%:75% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	4.3949	4.3978	4.3919	0.07	-0.07
50%	8.9730	8.7082	9.0055	-2.95	0.36
75%	12.8917	12.9682	12.9888	0.59	0.75
100%	16.3140	16.2918	16.4840	-0.14	1.04

Telah diamat grafik pada Gambar 4.12, bahwa strategi *gas split injection* memiliki pengaruh terhadap peningkatan torsi mesin berdasarkan variasi konfigurasi yang telah disebutkan sebelumnya. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.6, prosentase peningkatan torsi didapat sebesar 0.1% sampai 0.8%. Pada peningkatan 0.1% didapat dengan *load* 25% dan konfigurasi *split* 25%:75% *dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 3.397 Nm dan *dual-fuel dual-fuel* (260 °bTDC) = 4.394 Nm. Pada prosentase tertinggi 0.8% didapat dengan *load* 75% dan konfigurasi *split* 25%:75% *dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 12.988 Nm dan *dual-fuel* (260 °bTDC) = 12.891 Nm. Sehingga untuk peningkatan torsi, strategi *gas split injection* dapat dikatakan bergasil meningkatkan nilai torsi.

Pada peningkatan torsi yang terjadi juga merupakan factor lain pada peningkatan kinerja mesin. Seperti halnya peningkatan daya, peningkatan torsi juga dipengaruhi hal yang sama, yaitu karena peninjeksian gas yang bertahap dan mengakibatkan pencampuran yang lebih baik dibandingkan injeksi gas yang hanya sekali pada sistem *dual-fuel*. Akhirnya strategi ini merupakan salah satu cara untuk meningkatkan torsi mesin.

Perbandingan Load terhadap BMEP

Telah didapat pengambilan data untuk parameter *load* dibandingkan dengan BMEP. Hasil grafik yang sudah dibuat didapat berdasarkan percobaan dengan putaran mesin 2000 RPM yang ditetapkan. Variasi *gas split injection* diberikan dengan rasio 25%:75% untuk masing-masing *load* dan pengaturan jarak injeksi diberikan 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.13 Perbandingan *load* terhadap BMEP pada split 25%:75%

Tabel 4.7 Prosentase perbedaan BMEP antara *single injection* dan *split injection*

Load	Single Injection	Split 25%:75% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 25%:75% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
	260° bTDC	230° bTDC	244° bTDC	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	1.1187	1.1194	1.1179	0.07	-0.07
50%	2.2840	2.2166	2.2923	-2.95	0.36
75%	3.2815	3.3010	3.3062	0.59	0.75
100%	4.1526	4.1470	4.1959	-0.14	1.04

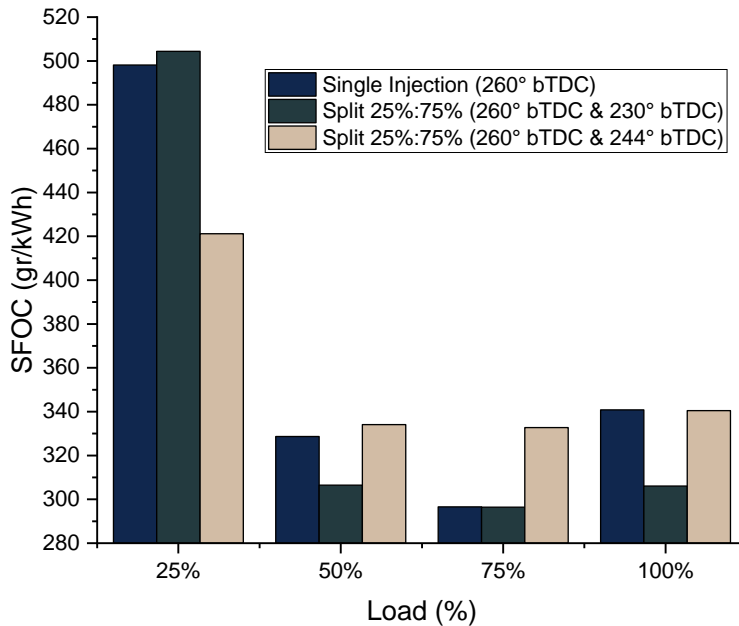
Dari grafik pada Gambar diatas dapat diamati, terdapat pengaruh strategi penggunaan strategi *split injection* yang dibandingkan dengan operasional *dual-fuel single injection*. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.7, prosentase perbedaan pada BMEP yang didapatkan untuk strategi *split injection* yaitu 0.1% sampai 1%. Didapat peningkatan yang paling rendah 0.1% pada BMEP untuk *load* 25% dengan konfigurasi *split 25%:75% dual-fuel* (260 °bTDC& 230°bTDC) = 1.119 Bar dan *dual-fuel* (260 °bTDC) = 1.118 Bar. Peningkatan yang paling tinggi sebesar 1% pada BMEP untuk *load* 100% dengan konfigurasi *split 25%:75% dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 4.195 Bar dan *dual-*

fuel (260°bTDC) = 4.152. Sehingga strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan BMEP pada mesin *dual-fuel*.

Pada peningkatan nilai BMEP yang dihasilkan akibat strategi *gas split injection* dengan peningkatan 0.1% sampai 1%, dapat disebabkan oleh beberapa hal. Factor karakteristik pembakaran merupakan hal yang perlu diperhatikan. Pembakaran yang bertahap dapat terjadi, sehingga lebih banyak panas yang terbakar pada silinder akibat dari *gas split injection* dengan pengaturan jarak injeksinya tersebut (Yousefi et al., 2018).

Perbandingan Load terhadap SFOC

Pada grafik dibawah ini didapat dari pengolahan data yang menghasilkan SFOC pada mesin *dual-fuel*. Grafik tersebut disusun dengan perbandingan pengaruh perubahan *load* dan SFOC. Sebelumnya pengambilan data dilakukan dengan menetapkan parameter tetap yaitu putaran mesin sebesar 2000 RPM dengan konfigurasi *gas split injection* 25%:75% pada masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.14 Perbandingan *load* terhadap SFOC pada split 25%:75%

Tabel 4.8 Prosentase perbedaan SFOC antara *single injection* dan *split injection*

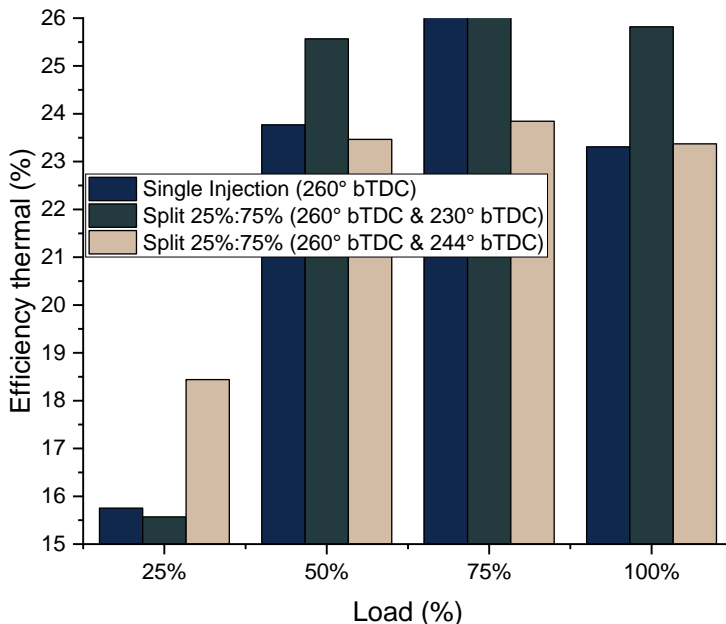
Load	Single Injection 260° bTDC	Split 25%:75% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 25%:75% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
	SFOC (gr/kWh)	SFOC (gr/kWh)	SFOC (gr/kWh)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	498.14	504.40	421.15	-1.26	15.46
50%	328.69	306.47	334.09	6.76	-1.64
75%	296.56	296.41	332.73	0.05	-12.20
100%	340.80	306.06	340.44	10.19	0.10

Pada Gambar 4.14 yang merupakan grafik perbandingan *load* dan SFOC dapat diamati bahwa dengan strategi *gas split injection*, penurunan nilai SFOC dapat terjadi. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.8, prosentase penurunan SFOC mulai dari 0.1% sampai 15.5%. Pada penurunan 0.1% terjadi pada *load* 75% dan konfigurasi *split* 25%:75% (260° bTDC & 230° bTDC) = 296.40 gr/kWh dan *dual-fuel* (260° bTDC) = 296.56 gr/kWh sedangkan untuk prosentase penurunan 15.5% terjadi pada *load* 25% *split* 25%:75% *dual-fuel* (260° bTDC & 244° bTDC) = 421.14 gr/kWh dan *dual-fuel* (260° bTDC) = 498.13 gr/kWh. Sehingga dengan data tersebut dapat dibuktikan bahwa strategi *gas split injection* dapat menurunkan konsumsi bahan bakar SFOC.

Penurunan nilai SFOC pada strategi *gas split injection* merupakan hal yang baik, karena akan semakin hemat konsumsi penggunaan bahan bakar pada mesin. Strategi *gas split injection* sesuai Gambar 4.14 dapat dijadikan acuan bahwa SFOC berpengaruh akibat strategi tersebut. Factor yang mempengaruhi fenomena tersebut antara lain yaitu karena pencampuran bahan bakar yang bertahap akan menjadikan campuran bahan bakar-udara menjadi lebih baik. Sehingga injeksi pertama bahan bakar akan memicu pada pencampuran bahan bakar yang kedua (X. Li et al., 2016).

Perbandingan *Load* terhadap efisiensi termal

Didapatkan data untuk pengambilan efisiensi termal berdasarkan pengaruh *load*. Pada pengambilan data penelitian ini dilakukan pengaturan pada mesin *dual-fuel* di 2000 RPM untuk masing-masing pengambilan *load*. Selanjutnya dilakukan pengaturan jarak penginjeksian dan variasi *split* sehingga didapat pengaturan *gas split injection* 25%:75% untuk masing-masing *load* dan pengaturan jarak injeksi diberikan 260° bTDC & 230° bTDC dan 260° bTDC & 244° bTDC.



Gambar 4.15 Perbandingan *load* terhadap efisiensi termal pada split 25%:75%

Tabel 4.9 Prosentase perbedaan efi termal antara *single injection* dan *split injection*

Load	Single Injection 260° bTDC	Split 25%:75% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 25%:75% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
		Efisiensi termal (%)	Efisiensi termal (%)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	15.75	15.57	18.44	-1.17	17.05
50%	23.77	25.57	23.46	7.56	-1.29
75%	26.63	26.70	23.84	0.24	-10.47
100%	23.31	25.82	23.37	10.77	0.26

Pengamatan pada grafik diatas dapat dilakukan pembahasan, bahwa pengaruh penggunaan strategi *gas split injection* pada mesin *dual-fuel* memiliki perbedaan dengan operasional *dual-fuel single injection* terhadap nilai efisiensi termal. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.9, rosentase kenaikan efisiensi termal akibat strategi *gas split injection* didapatkan sebesar 0.2% sampai 17%. Pada peningkatan 0.2% terjadi pada efisiensi termal dengan *load* 75% pada konfigurasi *split 25%:75% dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 26.69% dan *dual-fuel* (260 °bTDC) = 26.63%. Peningkatan 17% terbesar terjadi pada *load* 25% konfigurasi *split dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) =

18.43% dan *dual-fuel* (260°bTDC)= 15.75%. Sehingga strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan efisiensi termal pada mesin *dual-fuel*.

Peningkatan efisiensi termal pada strtagei *gas split injection* merupakan salah satu hal yang dituju pada penelian ini. Hal tersebut sudah dibuktikan dengan pengolahan data yang menghasilkan grafik. Pada peningkatan efisiensi termal hal yang terjadi yaitu efek dari pembakaran bertahap didalam silinder, sehingga fenomena tersebut dapat meningkatkan efisiensi termal pada mesin (Yousefi et al., 2018).

4.3.2 *Dual-fuel* dengan *Dual-fuel Split* pada ISR 50%:50%

Pada pengambilan data dengan ISR 50%:50% konfigurasi dilakukan pada Vemstune dengan membagi injeksi bahan bakar gas sebesar 50%:50% terhadap *single injection dual-fuel*. Masukan pengaturan dilakukan pada masing-masing *Electronic Control Unit* (ECU). Dipastikan pengaturan untuk ECU pada mode *split* disesuaikan dengan *dual-fuel single injection*.

Pengaturan *injector crank angle* untuk variasi pertama ECU 1 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 260°bTDC dan ECU 2 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 230°bTDC . Pada variasi kedua ECU 1 dengan RPM yang digunakan 0-2200 RPM diatur pada 260°bTDC dan ECU 2 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 244°bTDC . Pengaturan tersebut dimaksudkan sebagai *delay* injeksi pada injeksi *natural gas*.

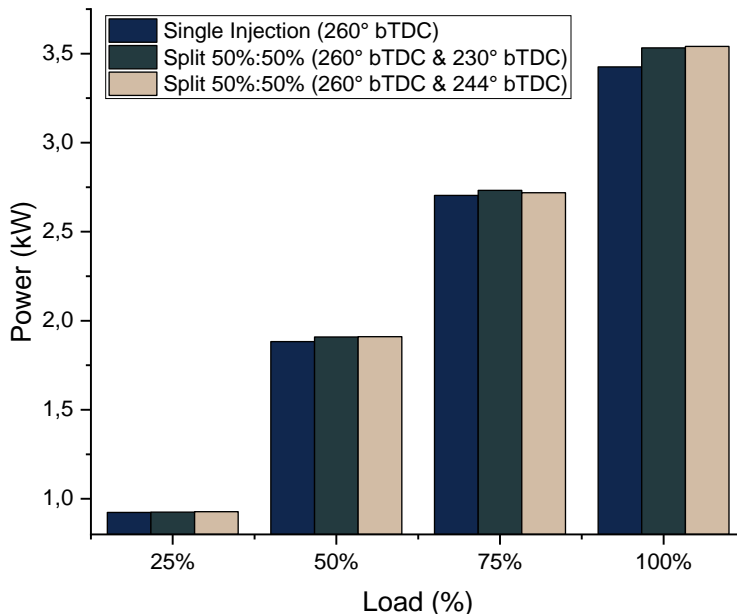
Tabel 4.10 Kombinasi *Dual-fuel* (260 °bTDC) dan *Gas split injection* (50%:50%)

<i>Load</i> %	Kombinasi <i>Dual-fuel</i> (ms)	Kombinasi <i>Split injection Dual-fuel</i> (ms)	
		ECU 1	ECU 2
25%	8	3	3
50%	9.5	4	4
75%	10.5	4.5	4.5
100%	12	5	5

Seperti yang disajikan pada Tabel 4.10, variasi pengaturan pada Vemstune dilakukan sesuai kombinasi tersebut. Dimaksudkan agar terjadi strategi *split* pada operasional *dual-fuel* yang optimum. Kombinasi tersebut sudah diuji untuk beberapa kali percobaan dengan perbedaan data margin yang kecil.

Perbandingan *Load* terhadap Daya

Pada hasil percobaan dengan parameter *load* dibandingkan dengan daya didapat hasil sebagai berikut. Dilakukan pengambilan data pada 2000 RPM yang ditetapkan. Variasi dilakukan untuk *gas split injection* 50%:50% dengan masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.16 Perbandingan *load* terhadap daya pada split 50%:50%

Tabel 4.11 Prosentase perbedaan daya antara *single injection* dan *split injection*

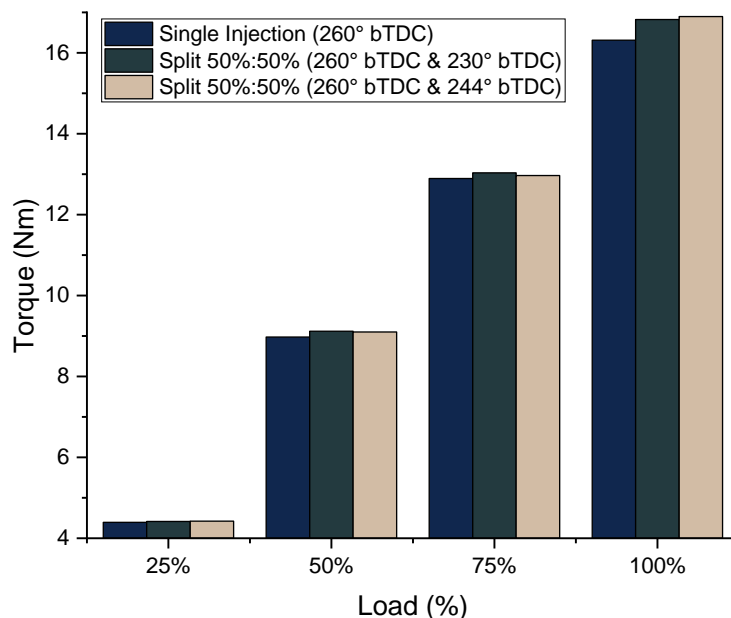
Load	Daya (kW)			Prosentase (%)	
	Single Injection 260° bTDC	Split 50%:50% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 50%:50% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
25%	0.92	0.93	0.93	0.23	0.46
50%	1.88	1.91	1.91	1.35	1.45
75%	2.70	2.73	2.72	1.05	0.54
100%	3.43	3.53	3.54	3.13	3.37

Dari grafik diatas dapat diamati, terdapat pengaruh strategi penggunaan strategi *split injection* yang dibandingkan dengan operasional *dual-fuel single injection*. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.11, prosentase perbedaan pada daya yang didapatkan untuk strategi *split injection* yaitu 0.2% sampai 3.4%. Didapat peningkatan yang paling rendah 0.2% pada daya untuk dummy load 25% dengan konfigurasi *split 50%:50% dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 0.925 kW dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 0.923 kW. Peningkatan yang paling tinggi sebesar 3.4% pada daya untuk *load 100%* dengan konfigurasi *split 50%:50% dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 3.532 kW dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 3.425 kW. Sehingga strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan daya pada mesin *dual-fuel*.

Peningkatan daya yang terjadi pada strategi *gas split injection* dapat terjadi karena penginjeksian bertahap pada pencampuran bahan bakar-udara yang lebih merata dibandingkan dengan injeksi yang terjadi hanya satu kali pada sistem *dual-fuel*. Penginjeksian tersebut akan memberikan efek pembakaran yang lebih baik. Sehingga daya akan meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16.

Perbandingan *Load* terhadap Torsi

Telah didapat pengambilan data untuk parameter *load* dibandingkan dengan torsi. Hasil grafik yang sudah dibuat didapat berdasarkan percobaan dengan putaran mesin 2000 RPM yang ditetapkan. Variasi *gas split injection* diberikan dengan rasio 50%:50% untuk masing-masing *load* dan pengaturan jarak injeksi diberikan 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.17 Perbandingan *load* terhadap torsi pada split 50%:50%

Tabel 4.12 Prosentase perbedaan torsi antara *single injection* dan *split injection*

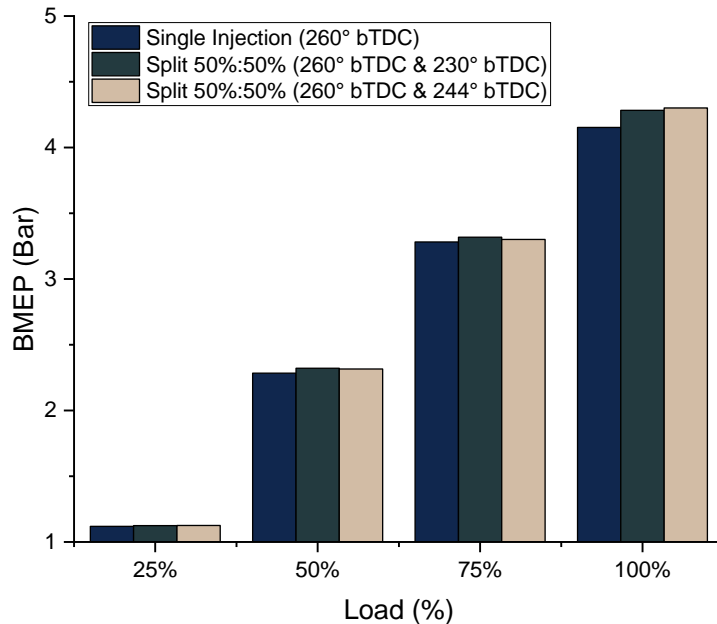
Load	Single Injection	Split 50%:50% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 50%:50% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
	Torsi (Nm)	Torsi (Nm)	Torsi (Nm)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	4.39	4.40	4.39	0.07	-0.07
50%	8.97	8.71	9.01	-2.95	0.36
75%	12.89	12.97	12.99	0.59	0.75
100%	16.31	16.29	16.48	-0.14	1.04

Pengamatan pada grafik diatas dapat dilakukan pembahasan, bahwa pengaruh penggunaan strategi *gas split injection* pada mesin *dual-fuel* memiliki perbedaan dengan operasional *dual-fuel single injection* terhadap nilai torsi. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.12, prosentase kenaikan torsi akibat strategi *gas split injection* didapatkan sebesar 0.5% sampai 3.6%. Pada peningkatan 0.5% terjadi pada torsi dengan *load* 25% pada konfigurasi *split* 50%:50% *dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 4.41 Nm dan *dual-fuel* (260 °bTDC) = 4.39 Nm. Peningkatan 3.6% terbesar terjadi pada *load* 100% konfigurasi *split dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 16.39 Nm dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 16.31 Nm. Sehingga strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan nilai torsi pada mesin *dual-fuel*.

Pada peningkatan torsi yang terjadi juga merupakan factor lain pada peningkatan kinerja mesin. Seperti halnya peningkatan daya, peningkatan torsi juga dipengaruhi hal yang sama, yaitu karena peninjeksian gas yang bertahap dan mengakibatkan pencampuran yang lebih baik dibandingkan injeksi gas yang hanya sekali pada sistem *dual-fuel*. Akhirnya strategi ini merupakan salah satu cara untuk meningkatkan torsi mesin.

Perbandingan Load terhadap BMEP

Pengambilan data untuk mengamati pengaruh *gas split injection* terhadap BMEP sudah dilakukan. Dengan data *load* dibandingkan dengan BMEP menghasilkan grafik sebagai berikut. Data percobaan tersebut dilakukan pada mesin *dual-fuel* dengan 2000 RPM yang ditetapkan untuk setiap pengambilan *load*. Variasi konfigurasi yang digunakan yaitu *gas split injection* 50%:50% dengan masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.18 Perbandingan *load* terhadap BMEP pada split 50%:50%

Tabel 4.13 Prosentase perbedaan BMEP antara *single injection* dan *split injection*

Load	Single Injection	Split 50%:50%	Split 50%:50%	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
	260° bTDC	(260° bTDC & 230° bTDC)	(260° bTDC & 244° bTDC)		
	BMEP (Bar)	BMEP (Bar)	BMEP (Bar)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	1.12	1.12	1.13	0.48	0.61
50%	2.28	2.32	2.32	1.61	1.40
75%	3.28	3.32	3.30	1.10	0.59
100%	4.15	4.28	4.30	3.13	3.58

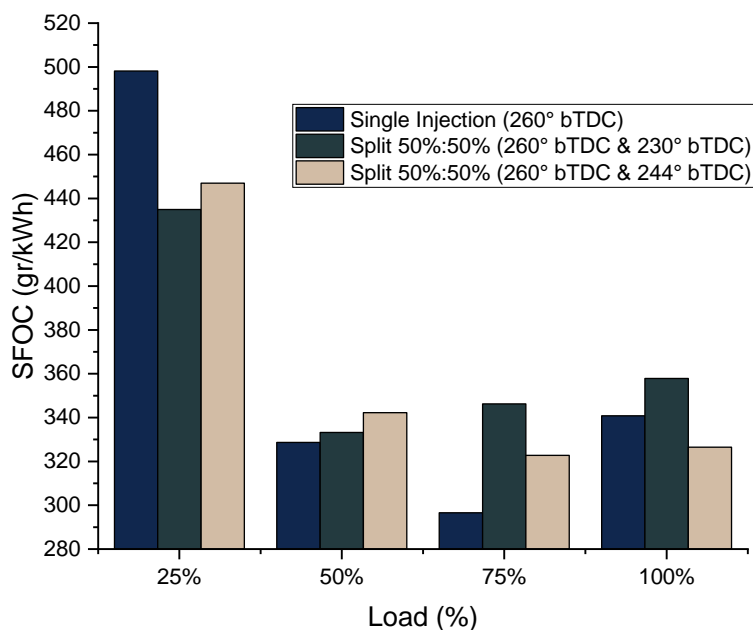
Telah diamat Gambar 4.18, bahwa strategi *gas split injection* memiliki pengaruh terhadap BMEP mesin berdasarkan variasi konfigurasi yang telah disebutkan sebelumnya. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.13, prosentase perbedaan BMEP didapat sebesar 0.5% sampai 3.6%. Pada peningkatan 0.5% didapat dengan *load* 25% dan konfigurasi *split* 50%:50% *dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 1.124 Bar dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 1.118 Bar. Pada prosentase tertinggi 3.6% didapat dengan *load* 100% dan konfigurasi *split* 50%:50% *dual-fuel* (260°bTDC & 230°bTDC) = 4.301 Bar dan

dual-fuel (260° bTDC) = 4.152 Bar. Sehingga untuk peningkatan BMEP, strategi *gas split injection* dapat dikatakan bergasil meningkatkan nilai BMEP.

Pada peningkatan nilai BMEP yang dihasilkan akibat strategi *gas split injection* dengan peningkatan 0.5% sampai 3.6%, dapat disebabkan oleh beberapa hal. Factor karakteristik pembakaran merupakan hal yang perlu diperhatikan. Pembakaran yang bertahap dapat terjadi, sehingga lebih banyak panas yang terbakar pada silinder akibat dari *gas split injection* dengan pengaturan jarak injeksinya tersebut (Yousefi et al., 2018).

Perbandingan Load terhadap SFOC

Didapatkan data untuk pengambilan konsumsi bahan bakar SFOC berdasarkan pengaruh *load*. Pada pengambilan data penelitian ini dilakukan pengaturan pada mesin *dual-fuel* di 2000 RPM untuk masing-masing pengambilan *load*. Selanjutnya dilakukan pengaturan jarak penginjeksian dan variasi *split* sehingga didapat pengaturan *gas split injection* 50%:50% untuk masing-masing *load* dan pengaturan jarak injeksi diberikan 260° bTDC & 230° bTDC dan 260° bTDC & 244° bTDC .



Gambar 4.19 Perbandingan *load* terhadap SFOC pada split 50%:50%

Tabel 4.14 Prosentase perbedaan SFOC antara *single injection* dan *split injection*

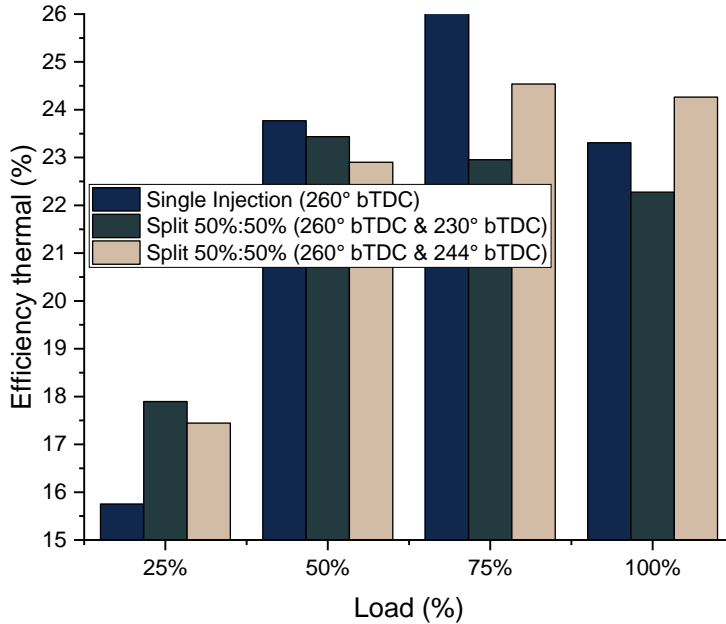
Load	Single Injection 260° bTDC	Split 50%:50% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 50%:50% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
		SFOC (gr/kWh)	SFOC (gr/kWh)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	498.14	434.96	447.00	12.68	10.27
50%	328.69	333.21	342.26	-1.38	-4.13
75%	296.56	346.26	322.79	-16.76	-8.84
100%	340.80	357.84	326.48	-5.00	4.20

Dari pengolahan data yang telah dilakukan sehingga akhirnya dihasilkan grafik pada Gambar 4.19 dapat diamati bahwa, strategi *gas split injection* pada *dual-fuel* dapat menurunkan konsumsi bahan bakar atau dengan kata lain dapat menurunkan nilai SFOC (gr/kWh). Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.14, prosentase penurunan didapat dengan nilai 4.2% sampai 12.7%. Pada penurunan SFOC 4.2% didapat pada *load 100%* dan konfigurasi *split 50%:50% dual-fuel (260°bTDC & 244°bTDC)* = 326.48 gr/kwh dan *dual-fuel (260 °bTDC)* 340.79 gr/kWh dan untuk penurunan 12.7% didapat pada beban 25% dan konfigurasi *split 50%:50% dual-fuel (260°bTDC & 230°bTDC)* = 434.98 gr/kwh dan *dual-fuel (260 °bTDC)* 498.13 gr/kWh. Berdasarkan penurunan tersebut, strategi *gas split injection* berhasil mengurangi konsumsi bahan bakar (SFOC).

Penurunan nilai SFOC pada strategi *gas split injection* merupakan hal yang baik, karena akan semakin hemat konsumsi penggunaan bahan bakar pada mesin. Strategi *gas split injection* sesuai Gambar 4.19 dapat dijadikan acuan bahwa SFOC berpengaruh akibat strategi tersebut. Factor yang mempengaruhi fenomena tersebut antara lain yaitu karena pencampuran bahan bakar yang bertahap akan menjadikan campuran bahan bakar-udara menjadi lebih baik. Sehingga injeksi pertama bahan bakar akan memicu pada pencampuran bahan bakar yang kedua (X. Li et al., 2016).

Perbandingan Load terhadap efisiensi termal

Pada grafik dibawah ini didapat dari pengolahan data yang menghasilkan efisiensi termal pada mesin *dual-fuel*. Grafik tersebut disusun dengan perbandingan pengaruh perubahan *load* dan efisiensi termal. Sebelumnya pengambilan data dilakukan dengan menetapkan parameter tetap yaitu putaran mesin sebesar 2000 RPM dengan konfigurasi *gas split injection 50%:50%* pada masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.20 Perbandingan *load* terhadap efisiensi termal pada split 50%:50%

Tabel 4.15 Prosentase perbedaan efi termal antara *single injection* & *split injection*

Load	Efisiensi termal (%)			Prosentase (%)	
	Single Injection 260° bTDC	Split 50%:50% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 50%:50% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
25%	15.75	17.90	17.45	13.60	10.75
50%	23.77	23.44	22.90	-1.40	-3.65
75%	26.63	22.96	24.54	-13.80	-7.86
100%	23.31	22.28	24.26	-4.43	4.10

Pada Gambar 4.20 yang merupakan grafik perbandingan *load* dan efisiensi termal dapat diamati bahwa dengan strategi *gas split injection*, peningkatan efisiensi termal dapat terjadi. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.15, prosentase peningkatan efisiensi termal mulai dari 4.1 % sampai 13.6%. Pada peningkatan 4.1 % terjadi pada *load* 100% dan konfigurasi *split* 50%:50% (260° bTDC & 244° bTDC) = 24.26% dan *dual-fuel* (260° bTDC) = 23.30 % sedangkan untuk prosentase peningkatan 13.6 % terjadi pada *load* 25% dan konfigurasi *split* 50%:50% *dual-fuel* (260° bTDC & 230° bTDC) = 17.89 % dan

dual-fuel (260°bTDC) = 15.75%. Sehingga dengan data tersebut dapat dibuktikan bahwa strategi *gas split injection* dapat meningkatkan efisiensi termal.

Peningkatan efisiensi termal pada strategi *gas split injection* merupakan salah satu hal yang dituju pada penelitian ini. Hal tersebut sudah dibuktikan dengan pengolahan data yang menghasilkan grafik. Pada peningkatan efisiensi termal hal yang terjadi yaitu efek dari pembakaran bertahap didalam silinder, sehingga fenomena tersebut dapat meningkatkan efisiensi termal pada mesin (Yousefi et al., 2018).

4.3.3 *Dual-fuel* dengan *Dual-fuel Split* pada *ISR 75%:25%*

Pada pengambilan data dengan *ISR 75%:25%* konfigurasi dilakukan pada Vemstone dengan membagi injeksi bahan bakar gas sebesar 75% & 25% terhadap *single injection dual-fuel*. Masukan pengaturan dilakukan pada masing-masing *Electronic Control Unit* (ECU). Dipastikan pengaturan untuk ECU pada mode *split* disesuaikan dengan *dual-fuel single injection*.

Pengaturan *injector crank angle* untuk variasi pertama ECU 1 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 260°bTDC dan ECU 2 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 230°bTDC . Pada variasi kedua ECU 1 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 260°bTDC dan ECU 2 dengan RPM yang digunakan 2000 RPM diatur pada 244°bTDC . Pengaturan tersebut dimaksudkan sebagai *delay* injeksi pada injeksi *natural gas*.

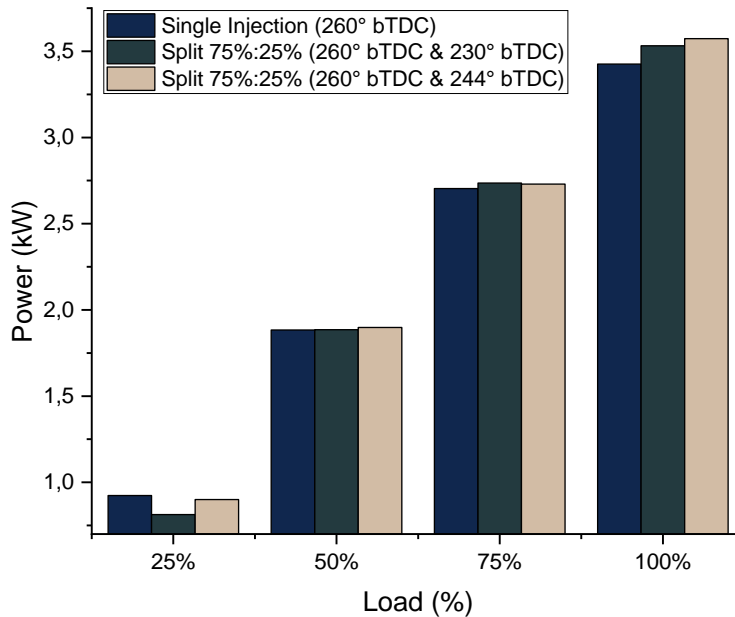
Tabel 4.16 Kombinasi *dual-fuel* (260°bTDC) dan *gas split injection* (75%:25%)

<i>Load %</i>	Kombinasi <i>dual-fuel</i> (ms)	Kombinasi <i>split injection dual-fuel</i> (ms) Split 75%:25%	
		ECU 1	ECU 2
25%	8	5.5	0.5
50%	9.5	6.5	1
75%	10.5	7.5	1
100%	12	8.5	1.5

Seperti yang disajikan pada Tabel 4.16, variasi pengaturan pada Vemstone dilakukan sesuai kombinasi tersebut. Dimaksudkan agar terjadi strategi *split* pada operasional *dual-fuel* yang optimum. Kombinasi tersebut sudah diuji untuk beberapa kali percobaan dengan perbedaan data margin yang kecil.

Perbandingan *Load* terhadap Daya

Pada hasil percobaan dengan parameter *load* dibandingkan dengan daya didapat hasil sebagai berikut. Dilakukan pengambilan data pada 2000 RPM yang ditetapkan. Variasi dilakukan untuk *gas split injection* 75%:25% dengan masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.21 Perbandingan *load* terhadap daya pada split 75%:25%

Tabel 4.17 Prosentase perbedaan daya antara *single injection* dan *split injection*

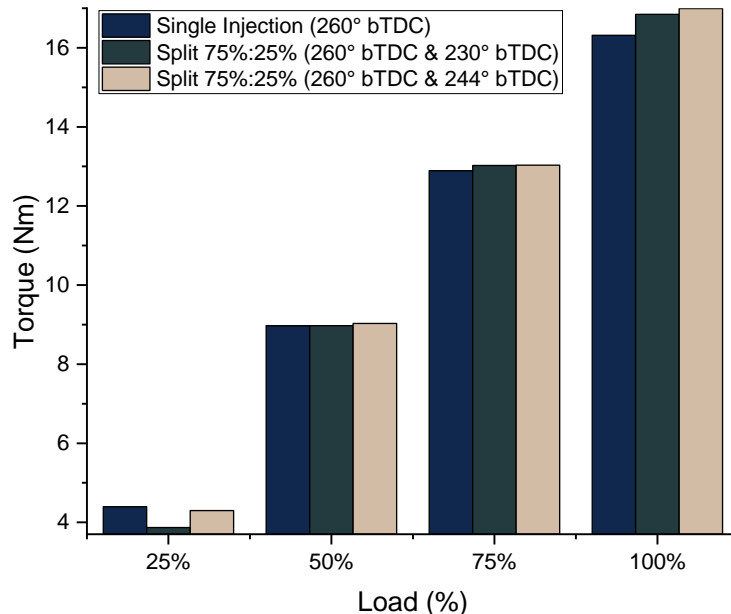
Load	Daya (kW)			Prosentase (%)	
	Single Injection 260° bTDC	Split 75%:25% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 75%:25% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
25%	0.92	0.81	0.90	-11.96	-2.47
50%	1.88	1.88	1.90	0.10	0.82
75%	2.70	2.74	2.73	1.18	0.95
100%	3.43	3.53	3.57	3.11	4.32

Dari pengolahan data yang telah dilakukan sehingga akhirnya dihasilkan grafik di Gambar 4.21 dapat diamati bahwa, strategi *gas split injection* pada *dual-fuel* dapat meningkatkan nilai daya. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.17, prosentase peningkatan didapat dengan nilai 0,1 % sampai 4.3%. Pada peningkatan 0,1% didapat pada *load 50%* dan konfigurasi *split 75%:25% dual-fuel (260°bTDC & 230°bTDC)* = 1.884 kW dan *dual-fuel (260°bTDC)* 1.883 kW dan peningkatan 4.3% terjadi pada *load 100%* dan konfigurasi *split 75%:25% dual-fuel (260°bTDC & 244°bTDC)* = 3.57 kW dan *dual-fuel (260°bTDC)*= 3.43 kWh. Berdasarkan peningkatan tersebut, strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan nilai daya.

Peningkatan daya yang terjadi pada strategi *gas split injection* dapat terjadi karena penginjeksian bertahap pada pencampuran bahan bakar-udara yang lebih merata dibandingkan dengan injeksi yang terjadi hanya satu kali pada sistem *dual-fuel*. Penginjeksian tersebut akan memberikan efek pembakaran yang lebih baik. Sehingga daya akan meningkat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21.

Perbandingan *Load* terhadap Torsi

Didapatkan data untuk pengambilan torsi berdasarkan pengaruh *load*. Pada pengambilan data penelitian ini dilakukan pengaturan pada mesin *dual-fuel* di 2000 RPM untuk masing-masing pengambilan *load*. Selanjutnya dilakukan pengaturan jarak penginjeksian dan variasi *split* sehingga didapat pengaturan *gas split injection 75%:25%* untuk masing-masing *load* dan pengaturan jarak injeksi diberikan 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.22 Perbandingan *load* terhadap torsi pada split 75%:25%

Tabel 4.18 Prosentase perbedaan torsi antara *single injection* dan *split injection*

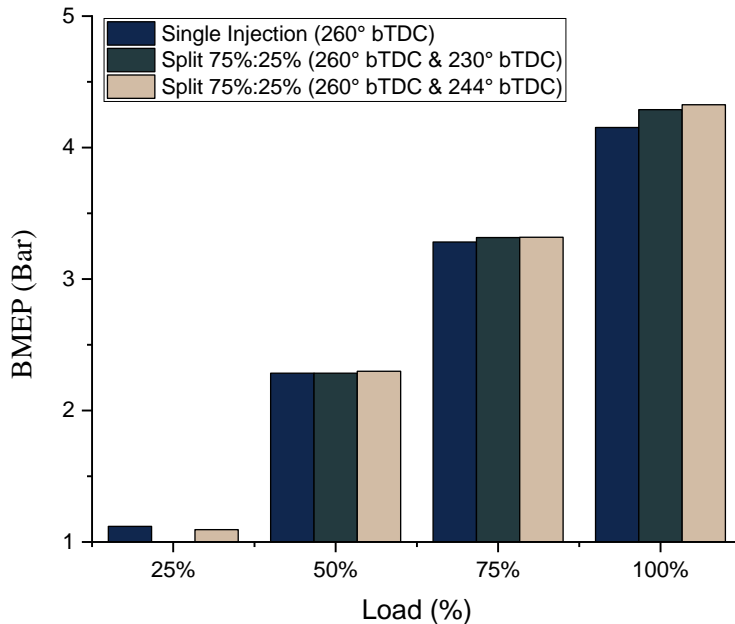
	Single Injection 260° bTDC	Split 75%:25% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 75%:25% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
Load	Torsi (Nm)			Prosentase (%)	
25%	4.39	3.87	4.30	-11.96	-2.17
50%	8.97	8.97	9.03	0.00	0.62
75%	12.89	13.02	13.03	1.03	1.10
100%	16.31	16.85	16.99	3.27	4.17

Telah diamat grafik pada Gambar 4.22, bahwa strategi *gas split injection* memiliki pengaruh terhadap peningkatan torsi mesin berdasarkan variasi konfigurasi yang telah disebutkan sebelumnya. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.8, prosentase peningkatan torsi didapat sebesar 0.4% sampai 4.2%. Pada peningkatan 0.4% didapat dengan *load 50%* dan konfigurasi *split 75%:25% dual-fuel (260°bTDC & 244°bTDC)* = 9.028 Nm dan *dual-fuel dual-fuel (260°bTDC)* = 8.97 Nm. Pada prosentase tertinggi 4.2 % didapat dengan *load 100%* dan konfigurasi *split 75%:25% dual-fuel (260°bTDC & 244°bTDC)* = 16.993 Nm dan *dual-fuel (260°bTDC)* = 16.314 Nm. Sehingga untuk peningkatan torsi, strategi *gas split injection* dapat dikatakan bergasil meningkatkan nilai torsi.

Pada peningkatan torsi yang terjadi juga merupakan factor lain pada peningkatan kinerja mesin. Seperti halnya peningkatan daya, peningkatan torsi juga dipengaruhi hal yang sama, yaitu karena peninjeksian gas yang bertahap dan mengakibatkan pencampuran yang lebih baik dibandingkan injeksi gas yang hanya sekali pada sistem *dual-fuel*. Akhirnya strategi ini merupakan salah satu cara untuk meningkatkan torsi mesin.

Perbandingan Load terhadap BMEP

Pengambilan data untuk mengamati pengaruh *gas split injection* terhadap BMEP sudah dilakukan. Dengan data *load* dibandingkan dengan BMEP menghasilkan grafik sebagai berikut. Data percobaan tersebut dilakukan pada mesin *dual-fuel* dengan 2000 RPM yang ditetapkan untuk setiap pengambilan *load*. Variasi konfigurasi yang digunakan yaitu *gas split injection 75%:25%* dengan masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.23 Perbandingan *load* terhadap BMEP pada split 75%:25%

Tabel 4.19 Prosentase perbedaan BMEP antara *single injection* dan *split injection*

Load	Single Injection 260° bTDC	Split 75%:25% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 75%:25% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
	BMEP (Bar)	BMEP (Bar)	BMEP (Bar)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	1.12	0.98	1.09	-11.96	-2.17
50%	2.28	2.28	2.30	0.00	0.62
75%	3.28	3.32	3.32	1.03	1.10
100%	4.15	4.29	4.33	3.27	4.17

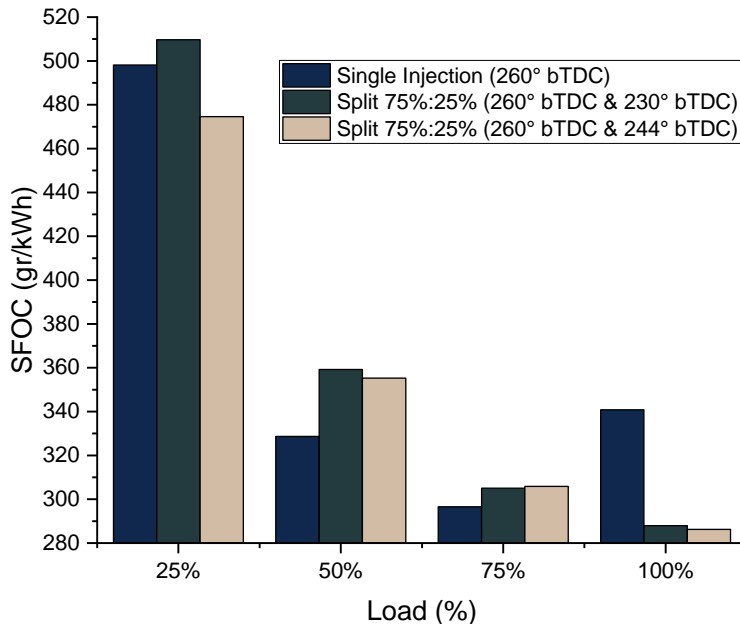
Dari grafik pada Gambar diatas dapat diamati, terdapat pengaruh strategi penggunaan strategi *split injection* yang dibandingkan dengan operasional *dual-fuel single injection*. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.19, prosentase perbedaan pada BMEP yang didapatkan untuk strategi *split injection* yaitu 0.6% sampai 4.2%. Didapat peningkatan yang paling rendah 0.6% pada BMEP untuk *load* 50% dengan konfigurasi *split* 75%:25% *dual-fuel* (260°bTDC& 244°bTDC) = 2.298 Bar dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 2.284 Bar. Peningkatan yang paling tinggi sebesar 4.2% pada BMEP untuk *load* 100% dengan

konfigurasi *split 75%:25% dual-fuel (260°bTDC & 244°bTDC)* = 4.325 Bar dan *dual-fuel (260°bTDC)* = 4.152. Sehingga strategi *gas split injection* berhasil meningkatkan BMEP pada mesin *dual-fuel*.

Pada peningkatan nilai BMEP yang dihasilkan akibat strategi *gas split injection* dengan peningkatan 0.6% sampai 4.2%, dapat disebabkan oleh beberapa hal. Factor karakteristik pembakaran merupakan hal yang perlu diperhatikan. Pembakaran yang bertahap dapat terjadi, sehingga lebih banyak panas yang terbakar pada silinder akibat dari *gas split injection* dengan pengaturan jarak injeksinya tersebut (Yousefi et al., 2018).

Perbandingan *Load* terhadap SFOC

Telah didapat pengambilan data untuk parameter *load* dibandingkan dengan SFOC. Hasil grafik yang sudah dibuat didapat berdasarkan percobaan dengan putaran mesin 2000 RPM yang ditetapkan. Variasi *gas split injection* diberikan dengan rasio 75%:25% untuk masing-masing *load* dan pengaturan jarak injeksi diberikan 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.24 Perbandingan *load* terhadap SFOC pada split 75%:25%

Tabel 4.20 Prosentase perbedaan SFOC antara *single injection* dan *split injection*

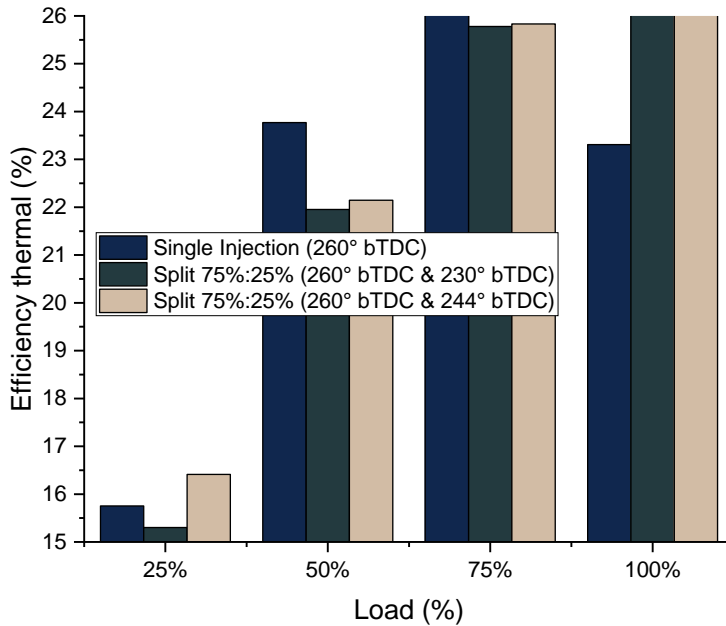
Load	SFOC (gr/kWh)			Prosentase (%)	
	Single Injection 260° bTDC	Split 75%:25% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 75%:25% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
25%	498.14	509.66	474.61	-2.31	4.72
50%	328.69	359.19	355.25	-9.28	-8.08
75%	296.56	305.01	305.87	-2.85	-3.14
100%	340.80	287.91	286.22	15.52	16.01

Dari pengolahan data yang telah dilakukan sehingga akhirnya dihasilkan grafik pada Gambar 4.24 dapat diamati bahwa, strategi *gas split injection* pada *dual-fuel* dapat menurunkan konsumsi bahan bakar atau dengan kata lain dapat menurunkan nilai SFOC (gr/kWh). Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.20, prosentase penurunan didapat dengan nilai 4.7% sampai 16%. Pada penurunan SFOC 4.7% didapat pada *load* 25% dan konfigurasi *split* 75%:25% *dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 476.61 gr/kWh dan *dual-fuel* (260°bTDC) 498.13 gr/kWh dan untuk penurunan 16% didapat pada beban 100% dan konfigurasi *split* 75%:25% *dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 286.223 gr/kWh dan *dual-fuel* (260°bTDC) 340.797 gr/kWh. Berdasarkan penurunan tersebut, strategi *gas split injection* berhasil mengurangi konsumsi bahan bakar (SFOC).

Penurunan nilai SFOC pada strategi *gas split injection* merupakan hal yang baik, karena akan semakin hemat konsumsi penggunaan bahan bakar pada mesin. Strategi *gas split injection* sesuai Gambar 4.24 dapat dijadikan acuan bahwa SFOC berpengaruh akibat strategi tersebut. Factor yang mempengaruhi fenomena tersebut antara lain yaitu karena pencampuran bahan bakar yang bertahap akan menjadikan campuran bahan bakar-udara menjadi lebih baik. Sehingga injeksi pertama bahan bakar akan memicu pada pencampuran bahan bakar yang kedua (X. Li et al., 2016).

Perbandingan Load terhadap efisiensi termal

Pada grafik dibawah ini didapat dari pengolahan data yang menghasilkan efisiensi termal pada mesin *dual-fuel*. Grafik tersebut disusun dengan perbandingan pengaruh perubahan *load* dan efisiensi termal. Sebelumnya pengambilan data dilakukan dengan menetapkan parameter tetap yaitu putaran mesin sebesar 2000 RPM dengan konfigurasi *gas split injection* 75%:25% pada masing-masing variasi pengaturan injeksi pertama dan kedua 260°bTDC & 230°bTDC dan 260°bTDC & 244°bTDC .



Gambar 4.25 Perbandingan *load* terhadap efisiensi termal pada split 75%:25%

Tabel 4.21 Prosentase perbedaan efi termal antara *single injection* & *split injection*

Load	Single Injection 260° bTDC	Split 75%:25% (260° bTDC & 230° bTDC)	Split 75%:25% (260° bTDC & 244° bTDC)	Split 260° bTDC & 230° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC	Split 260° bTDC & 244° bTDC terhadap Single Injection 260° bTDC
		SFOC (gr/kWH)	SFOC (gr/kWH)	Prosentase (%)	Prosentase (%)
25%	15.75	15.30	16.41	-2.87	4.18
50%	23.77	21.95	22.15	-7.65	-6.83
75%	26.63	25.78	25.83	-3.19	-3.00
100%	23.31	27.37	27.58	17.42	18.30

Pada Gambar 4.25 yang merupakan grafik perbandingan *load* dan efisiensi termal dapat diamati bahwa dengan strategi *gas split injection*, peningkatan efisiensi termal dapat terjadi. Seperti yang ditunjukkan Tabel 4.21, prosentase peningkatan efisiensi termal mulai dari 4.2 % sampai 18.3%. Pada peningkatan 4.2 % terjadi pada *load* 25% dan konfigurasi *split* 75%:25% (260°bTDC & 244°bTDC) = 16.412% dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 15.753 % sedangkan untuk prosentase peningkatan 18.3 % terjadi pada *load* 100% dan konfigurasi *split* 75%:25% *dual-fuel* (260°bTDC & 244°bTDC) = 27.576

% dan *dual-fuel* (260°bTDC) = 23.309%. Sehingga dengan data tersebut dapat dibuktikan bahwa strategi *gas split injection* dapat meningkatkan efisiensi termal.

Peningkatan efisiensi termal pada strategi *gas split injection* merupakan salah satu hal yang dituju pada penelien ini. Hal tersebut sudah dibuktikan dengan pengolahan data yang menghasilkan grafik. Pada peningkatan efisiensi termal hal yang terjadi yaitu efek dari pembakaran bertahap didalam silinder, sehingga fenomena tersebut dapat meningkatkan efisiensi termal pada mesin (Yousefi et al., 2018).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini yang berfokus kepada pengaruh *gas split injection* terhadap performa mesin *dual-fuel* telah dilakukan pengamatan dan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut ini:

1. Dapat mengetahui perbandingan *single injection* dan *split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* pada ISR.
 - Pada variasi gas *split injection* ISR 25%:75% jarak penginjeksian terbaik terjadi pada 260°bTDC & 244°bTDC . Dikarenakan pada jarak injeksi tersebut prosentase perbedaan terbesar terjadi pada semua parameter yang diuji antara *single injection* dan *split injection*. Prosentase perbedaan daya, torsi, BMEP terbesar terjadi pada *load 100%* yaitu masing-masing sebesar 1%; 1%; 1%. Pada parameter SFOC dan efisiensi termal nilai prosentase perbedaan terbesar terjadi pada *load 25%* yaitu masing-masing sebesar 15.5% dan 17%. Sedangkan pada jarak injeksi 260°bTDC & 230°bTDC nilai prosentase perbedaan yang lebih besar tidak terjadi jika dibandingkan dengan jarak injeksi 260°bTDC & 244°bTDC pada ISR 25%:75%.
 - Pada variasi gas *split injection* ISR 50%:50% jarak penginjeksian terbaik secara umum terjadi pada 260°bTDC & 244°bTDC . Dikarenakan pada jarak injeksi tersebut terdapat prosentase perbedaan yang besar pada parameter yang diuji secara umum antara *single injection* dan *split injection*. Prosentase perbedaan daya, torsi, BMEP terbesar terjadi pada *load 100%* yaitu masing-masing sebesar 3.4 %; 3.6%; 3.6%. Pada parameter SFOC dan efisiensi termal nilai prosentase perbedaan terbesar terjadi pada *load 25%* yaitu masing-masing sebesar 10.3%; 10.7%. Sedangkan pada jarak injeksi 260°bTDC & 230°bTDC hanya memiliki nilai prosentase terbesar pada parameter SFOC dan efisiensi termal yaitu masing-masing sebesar 12.7% dan 13.6% pada *load 25%*.
 - Pada variasi gas *split injection* ISR 75%:25% jarak penginjeksian terbaik terjadi pada 260°bTDC & 244°bTDC . Dikarenakan pada jarak injeksi tersebut prosentase perbedaan terbesar terjadi pada semua parameter yang diuji antara *single injection* dan *split injection*. Prosentase perbedaan daya, torsi, BMEP, SFOC dan efisiensi termal terbesar hanya terjadi pada *load 100%* yaitu masing-masing sebesar 4.3%; 4.2%; 4.2%; 16%; 18.3%. Sedangkan pada jarak injeksi 260°bTDC & 230°bTDC jika dibandingkan dengan jarak injeksi 260°bTDC & 244°bTDC pada ISR 75%:25% nilai prosentase perbedaan yang lebih besar tidak dapat diamati.
2. Dapat mengetahui perbandingan *single injection* dan *split injection* terhadap performa *dual-fuel engine* pada jarak waktu injeksi.
 - Pada jarak penginjeksian 260°bTDC & 230°bTDC variasi *split rasio* terbaik secara umum terjadi pada ISR 75%:25%. Dikarenakan pada *split rasio* tersebut

nilai prosentase perbedaan pada beberapa parameter yang diuji antara *single injection* dan *split injection* terdapat nilai yang cukup baik. Prosentase perbedaan daya, torsi, BMEP, SFOC dan efisiensi termal terbesar hanya terjadi pada *load 100%* yaitu masing-masing sebesar 3.1%; 3.3%; 3.3%; 15.5%; 17.4%. Sedangkan pada ISR 25%:75% dan ISR 50%:50% dengan jarak penginjeksian 260°bTDC & 230°bTDC tidak dapat ditemukan nilai prosentase perbedaan yang lebih besar jika dibandingkan dengan ISR 75%:25% pada masing-masing parameter yang sama.

- Pada jarak penginjeksian 260°bTDC & 244°bTDC variasi *split rasio* terbaik terjadi pada ISR 75%:25%. Dikarenakan pada *split rasio* tersebut prosentase perbedaan terbesar terjadi pada semua parameter yang diuji antara *single injection* dan *split injection*. Prosentase perbedaan daya, torsi, BMEP, SFOC dan efisiensi termal terbesar hanya terjadi pada *load 100%* yaitu masing-masing sebesar 4.3%; 4.2%; 4.2%; 16%; 18.3%. Sedangkan pada ISR 25%:75% dan ISR 50%:50% dengan jarak penginjeksian 260°bTDC & 244°bTDC tidak dapat ditemukan nilai prosentase perbedaan yang lebih besar jika dibandingkan dengan ISR 75%:25% pada masing-masing parameter yang sama.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya penulis menyarankan untuk menambahkan variasi pada putaran mesin di strategi *gas split injection* dan memperhatikan jumlah pengambilan data untuk masing-masing beban, agar tidak terjadi anomali pengambilan data. Saran untuk penelitian lanjutan direkomendasikan untuk injeksi gas dilakukan injeksi langsung pada ruang bakar melalui *cylinder head*, karena pada penelitian kali ini injeksi gas terjadi pada saluran *air intake*.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbarian, E., Naja, B., 2019. A novel fuel containing glycerol triacetate additive , biodiesel and diesel blends to improve *dual-fuelled* diesel engines performance and exhaust emissions 236, 666–676. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.142>
- Aksu, C., Kawahara, N., Tsuboi, K., Kondo, M., 2016. Extension of PREMIER combustion operation range using split micro pilot fuel injection in a dual fuel natural gas compression ignition engine: A performance-based and visual investigation. *Fuel* 185, 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.120>
- Bayraktar, H., 2008. An experimental study on the performance parameters of an experimental CI engine fueled with diesel-methanol-dodecanol blends. *Fuel* 87, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.021>
- Felayati, F.M., Semin, Zaman, M.B., 2019. Consideration of *split injection* strategy for marine diesel engine combustion process. <https://doi.org/10.1063/1.5095326>
- Gong, C., Liu, Z., Su, H., Chen, Y., Li, J., Liu, F., 2019. Effect of injection strategy on cold start firing , combustion and emissions of a LPG / methanol dual-fuel spark-ignition engine. *Energy* 178, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.145>
- Guo, H., Liko, B., Neill, W.S., 2018. ICEF2017-3584 OF A NATURAL GAS – DIESEL DUAL FUEL ENGINE AT A LOW LOAD CONDITION 1–10.
- Hiwase, S.D., Moorthy, S., Prasad, H., Dumpa, M., Metkar, R.M., 2013. Multidimensional modeling of direct injection diesel engine with split multiple stage fuel injections. *Procedia Eng.* 51, 670–675. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.095>
- Hoseini, S.S., Naja, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Azwadi, N., Sidik, C., Azmi, W.H., 2017. The effect of combustion management on diesel engine emissions fueled with biodiesel-diesel blends 73, 307–331. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.088>
- Huang, H., Lv, D., Zhu, J., Zhu, Z., Chen, Y., Pan, Y., Pan, M., 2019. Development of a new reduced diesel / natural gas mechanism for dual-fuel engine combustion and emission prediction. *Fuel* 236, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.161>
- Jain, A., Singh, A.P., Agarwal, A.K., 2017. Effect of Split Fuel Injection and EGR on NO_x and PM Emission Reduction in a Low Temperature Combustion (LTC) Mode Diesel Engine. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.050>
- Khan, M.I., Yasmin, T., Shakoor, A., 2015. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51, 785–797. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>
- Li, X., Gao, H., Zhao, L., Zhang, Z., He, X., Liu, F., 2016. Combustion and emission performance of a *split injection* diesel engine in a double swirl combustion system 114, 1135–1146. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.092>
- Li, X.R., Zhou, H.Q., Zhao, L.M., Su, L., Xu, H., Liu, F.S., 2016. Effect of *split injections* coupled with swirl on combustion performance in DI diesel engines. *Energy Convers. Manag.* 129, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.011>
- Lounici, M.S., Loubar, K., Tarabet, L., Balistrrou, M., Niculescu, D.C., Tazerout, M., 2014. Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions. *Energy* 64, 200–211.

- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.091>
- Ma, X., Liu, H., Li, Y., Wang, Z., Xu, H., Wang, J.-X., 2015. An Experimental Study on the Effects of *Split injection* in Stoichiometric Dual-Fuel Compression Ignition (SDCI) Combustion. <https://doi.org/10.1039/C39730000810>
- McTaggart-Cowan, G.P., Rogak, S.N., Munshi, S.R., Hill, P.G., Bushe, W.K., 2010. The influence of fuel composition on a heavy-duty, natural-gas direct-injection engine. *Fuel* 89, 752–759. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.007>
- Park, S., Kim, H.J., Shin, D.H., Lee, J.T., 2018. Effects of various *split injection* strategies on combustion and emissions characteristics in a single-cylinder diesel engine. *Appl. Therm. Eng.* 140, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.025>
- Ryu, K., 2013. Effects of pilot injection pressure on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel-CNG dual fuel. *Energy Convers. Manag.* 76, 506–516. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.085>
- Semin, Bakar, R.A., 2008. A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 1 4, 302–311.
- Semin, Hidayat, A.W., Zuhdi, A., 2013. Kajian eksperimental unjuk kerja dual fuel engine hasil modifikasi dari diesel engine 2, 2–7.
- Semin, Octaviani, N.S., Gusti, A.P., Zaman, M.B., 2016. Power Performance Characteristics Investigation of Gas Engine using New Injector.
- Semin, Satriawansyah, M.A., Cahyono, B., Octaviani, N.S., 2018. Analysis of Influence of Masks Flow on Intake Valve of Gas and Oil Fuel Engine Based Simulation 2, 225–230.
- Wang, Ziman, Ding, H., Ma, X., Xu, H., Wyszynski, M.L., 2016a. Ultra-high speed imaging study of the diesel spray close to the injector tip at the initial opening stage with *split injection*. *Appl. Energy* 163, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.155>
- Wang, Ziman, Li, Y., Wang, C., Xu, H., Wyszynski L., M., 2016b. Near-nozzle microscopic characterization of diesel spray under cold start conditions with *split injection* strategy. *Fuel* 181, 366–375. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.103>
- Wang, Zhongshu, Zhao, Z., Wang, D., Tan, M., Han, Y., Liu, Z., Dou, H., 2016. Impact of pilot diesel ignition mode on combustion and emissions characteristics of a diesel/natural gas dual fuel heavy-duty engine. *Fuel* 167, 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.077>
- Wei, L., Geng, P., 2016. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *Fuel Process. Technol.* 142, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.018>
- Yang, B., Zeng, K., 2018. Effects of natural gas injection timing and split pilot fuel injection strategy on the combustion performance and emissions in a dual-fuel engine fueled with diesel and natural gas. *Energy Convers. Manag.* 168, 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.091>
- Yousefi, A., Guo, H., Birouk, M., 2018. An experimental and numerical study on diesel injection split of a natural gas/diesel dual-fuel engine at a low engine load. *Fuel* 212, 332–346. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.053>
- Zheng, J., Wang, J., Zhao, Z., Wang, D., Huang, Z., 2019. Effect of equivalence ratio on

combustion and emissions of a dual-fuel natural gas engine ignited with diesel.
Appl. Therm. Eng. 146, 738–751.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.045>

Halaman ini sengaja dikosongkan

	RPM				
	1800	1900	2000	2100	2200
	Daya (kW)				
1000	0.6729	0.7735	0.9232	1.0247	1.3965
2000	1.3917	1.5699	1.8830	2.1282	2.8946
3000	2.0980	2.3566	2.7041	3.0344	3.3892
4000	2.7650	3.1071	3.4253	3.7559	4.3911
	Torsi (Nm)				
1000	3.5596	3.8795	4.3949	4.6554	6.0618
2000	7.3786	7.8778	8.9730	9.6687	12.5250
3000	11.0929	11.8501	12.8917	13.7858	14.7051
4000	14.6516	15.6158	16.3140	17.0876	19.0523
	Bmep (Bar)				
1000	0.91	0.99	1.12	1.19	1.54
2000	1.88	2.01	2.28	2.46	3.19
3000	2.82	3.02	3.28	3.51	3.74
4000	3.73	3.97	4.15	4.35	4.85
	SFOC (gr/kwh)				
1000	619.7088	538.4613	498.1399	633.5738	398.3258
2000	397.2079	379.8902	328.6875	402.0999	310.6640
3000	299.8666	314.9721	296.5627	328.5906	342.9805
4000	274.5880	302.5247	340.7978	321.7725	426.3455
	EFF thermal (%)				
1000	12.78952	14.7185	15.75339	12.54442	20.23664
2000	19.94821	20.8380	23.76965	19.73498	25.98659
3000	26.46632	25.1500	26.63046	24.14846	23.42496
4000	28.8295	26.1549	23.30941	24.67161	18.88966

bukaan gas (req fuel)	bukaan gas (req fuel)	mencari subs gas	DUAL FUEL (tekanan 3 bar) SPLUT 25-75																					
			Putaran Engine (rpm)		Beban (watt)	Torsi Beban (Nm)	Putaran Generator (rpm)	Alternator Tegangan (Volt)		Watt	Volume Bahan Bakar (m ³)	Waktu (Menit)	Waktu (Detik)	Waktu (Jam)	Densitas (kg/m ³)	Efisiens i Slip	Daya (Kw)	Torsi Generat or (Nm)	Daya mesin (kw)	BMEP (bar)	Waktu injeksi (s)	Flowrate Gas (l/m)		
kontrol	aktual	Arus (A)	Arus (A)	DEX				CNG	DEX														CNG	DEX
260bTDC	0.5	5.5	57.112	2000	2007	1000	6.464236	1478	210	4.1	861	0.00001	2.351	141.06	0.0392	830	0.9868	0.9238	4.3978	5.9719	1.2545	1.12	141.06	2
	1	6.5	59.292	2000	2004	2000	12.98999	1471	202	8.4	1696.8	0.00001	2.057	123.43	0.0343	830	0.9836	1.8266	8.7082	11.8635	2.4884	2.22	123.43	2.5
	1	7.5	49.911	2000	2003	3000	19.53812	1467	200	12.6	2520	0.00001	1.173	70.37	0.0195	830	0.9814	2.7188	12.9682	17.7065	3.7121	3.30	70.37	3
	1.5	8.5	51.110	2000	2008	4000	26.03308	1468	192	16.5	3168	0.00001	0.923	55.37	0.0154	830	0.9796	3.4241	16.2918	22.2847	4.6836	4.15	55.37	4
260bTDC	0.5	5.5	67.763	2000	2006	1000	6.4555	1480	210	4.1	861	0.00001	3.711	222.67	0.0619	830	0.9886	0.9221	4.3919	5.9528	1.2499	1.12	222.67	2
	1	6.5	58.816	2000	2008	2000	12.95477	1475	207	8.5	1759.5	0.00001	1.801	108.06	0.0300	830	0.9843	1.8927	9.0055	12.2597	2.5766	2.29	108.06	2.8
	1	7.5	47.404	2000	2006	3000	19.47175	1472	201	12.6	2532.6	0.00001	0.995	59.67	0.0166	830	0.9833	2.7271	12.9888	17.7008	3.7165	3.31	59.67	3.2
	1.5	8.5	44.621	2000	2006	4000	26.06836	1466	194	16.5	3201	0.00001	0.730	43.77	0.0122	830	0.9793	3.4610	16.4840	22.5558	4.7359	4.20	43.77	3.9

Flowrate Gas (m ³ /m)	Volume Gas (m ³)	Densitas (kg/m ³)	Massa Masuk Bahan Bakar (kg)	LHV (kJ/kg)		Energi (kJ)		Prosentase CNG (%)		FCR (kg/h)		SFC DF (gr/kwh)		Energi (kJ/h)		Energi e ff thermal
				DEX	CNG	DEX	CNG	DEX	CNG	Perntamin a DEX	CNG	DEX	CNG	DEX	CNG	
0.0020	0.0047	2.12	0.0083	0.0100	43.250	48.000	358.975	478	57.112	0.21182	0.2542	504.4020	9161.421	12199.68	21361.1	15.56947
0.0025	0.0051	2.12	0.0083	0.0109	43.250	48.000	358.975	523	59.292	0.24208	0.3177	306.4667	10469.98	15249.6	25719.58	25.56661
0.0030	0.0055	2.12	0.0083	0.0078	43.250	48.000	358.975	358	49.911	0.42461	0.3812	296.4050	18364.5	18299.52	36664.02	26.69516
0.0040	0.0037	2.12	0.0083	0.0075	43.250	48.000	359	375	51.110	0.53964	0.5083	306.0583	23339.53	24399.36	47738.89	25.82092
0.0020	0.0074	2.12	0.0083	0.0157	43.250	48.000	358.975	755	67.763	0.13419	0.2542	421.1451	5803.701	12199.68	18003.38	18.43909
0.0028	0.0050	2.12	0.0083	0.0107	43.250	48.000	358.975	513	58.816	0.27651	0.3558	334.0942	11959.19	17079.55	29088.74	23.46413
0.0032	0.0032	2.12	0.0083	0.0067	43.250	48.000	358.975	324	47.404	0.50075	0.4067	332.7324	21657.62	19519.49	41177.1	23.84069
0.0039	0.0028	2.12	0.0083	0.0060	43.250	48.000	359	289	44.621	0.68266	0.4956	340.4426	29525.02	23789.38	53314.39	23.37004

bukaan gas (req fuel)	bukaan gas (req fuel)	mencari subs gas	DUAL FUEL (tekanan 3 bar) SPLUT 50-50																					
			Putaran Engine (rpm)		Beban (watt)	Torsi Beban (Nm)	Putaran Generator (Rpm)	Alternator Tegangan (Volt)		Watt	Volume Bahan Bakar (m ³)	Waktu (Menit)	Waktu (Detik)	Waktu (Jam)	Densitas (Kg/m ³)	Efisiens i Slip	Daya (Kw)	Torsi Generat or (Nm)	Daya mesin (kw)	BMEP (bar)	Waktu injeksi (s)	Flowrate Gas (l/m)		
kontrol	aktual	Arus (A)	Arus (A)	DEX				CNG	DEX														CNG	DEX
260bTDC	3	3	65.541	2000	2002	1000	6.490584	1472	210	4.1	861	0.00001	3.358	201.48	0.0560	830	0.9853	0.9253	4.4158	6.0057	1.2584	1.12	201.48	2
	4	4	62.422	2000	2000	2000	12.98999	1471	209	8.5	1776.5	0.00001	1.955	117.31	0.0326	830	0.9856	1.9085	9.1172	12.3960	2.5949	2.32	117.31	3
	4.5	4.5	45.552	2000	2003	3000	19.53812	1467	201	12.6	2532.6	0.00001	0.923	55.39	0.0154	830	0.9814	2.7323	13.0331	17.7950	3.7307	3.32	55.39	3.2
	5	5	42.744	2000	2006	4000	26.06836	1466	198	16.5	3267	0.00001	0.659	39.54	0.0110	830	0.9793	3.5324	16.8239	23.0209	4.8335	4.28	39.54	4
260bTDC	3	3	63.746	2000	2004	1000	6.499415	1470	210	4.1	861	0.00001	3.104	186.26	0.0517	830	0.9829	0.9275	4.4218	6.0280	1.2644	1.13	186.26	2
	4	4	58.908	2000	2006	2000	12.96356	1474	209	8.5	1776.5	0.00001	1.746	104.73	0.0291	830	0.9846	1.9104	9.0987	12.3826	2.5999	2.32	104.73	2.9
	4.5	4.5	48.937	2000	2003	3000	19.53812	1467	200	12.6	2520	0.00001	1.058	63.45	0.0176	830	0.9819	2.7188	12.9682	17.7065	3.7121	3.30	63.45	3.2
	5	5	48.770	2000	2002	4000	26.05083	1467	199	16.5	3283.5	0.00001	0.800	48.02	0.0133	830	0.9819	3.5407	16.8973	23.0596	4.8320	4.30	48.02	4.2

Flowrate Gas (m ³ /m)	Volume Gas (m ³)	Densitas (kg/m ³)	Massa Masuk Bahan Bakar (kg)		LHV (kJ/kg)		Energi (kJ)		Prosentase CNG (%)	FCR (kg/h)		SFC DF (gr/kwh)		Energi (kJ/h)		Energi eff thermal (kJ/h)
			Peraminin a DEX	CNG	DEX	CNG	DEX	CNG		Peraminin a DEX	CNG	DEX	CNG	DEX	CNG	
0.0020	0.0067	2.12	0.0083	0.0142	43.250	48.000	358.975	683	65.541	0.14830	0.2542	434.9580	6414.086	12199.68	18613.77	17.89561
0.0030	0.0099	2.12	0.0083	0.0124	43.250	48.000	358.975	596	62.422	0.25471	0.3812	333.2126	11016.2	18299.52	29315.72	23.43707
0.0032	0.0036	2.12	0.0083	0.0063	43.250	48.000	358.975	300	45.552	0.53945	0.4067	346.2601	23331.11	19519.49	42850.59	22.95524
0.0040	0.0026	2.12	0.0083	0.0056	43.250	48.000	359	268	42.744	0.75569	0.5083	357.8374	32683.61	24399.36	57082.97	22.27721
0.0020	0.0062	2.12	0.0083	0.0131	43.250	48.000	358.975	631	63.746	0.16042	0.2542	446.9994	6938.205	12199.68	19137.88	17.4466
0.0029	0.0051	2.12	0.0083	0.0107	43.250	48.000	358.975	515	58.908	0.28531	0.3685	342.2568	12339.44	17689.54	30028.98	22.90231
0.0032	0.0034	2.12	0.0083	0.0072	43.250	48.000	358.975	344	48.337	0.47092	0.4067	322.7866	20367.38	19519.49	39886.86	24.5382
0.0042	0.0034	2.12	0.0083	0.0071	43.250	48.000	359	342	48.770	0.62224	0.5337	326.4821	26911.91	25619.33	52531.24	24.26468

Flowrate Gas (m ³ /m)	Volume Gas (m ³)	Densitas (kg/m ³)	Massa Masuk Bahan Bakar (kg)		LHV (kJ/kg)		Energi (kJ)		Prosentase CNG (%)	FCR (kg/h)		SFC DF (gr/kwh)		Energi (kJ/h)	Energi eff thermal (kJ/h)	
			Peraminin a DEX	CNG	DEX	CNG	DEX	CNG		Peraminin a DEX	CNG	DEX	CNG			DEX
0.0020	0.0067	2.12	0.0083	0.0142	43.250	48.000	358.975	683	65.541	0.14830	0.2542	434.9580	6414.086	12199.68	18613.77	17.89561
0.0030	0.0099	2.12	0.0083	0.0124	43.250	48.000	358.975	596	62.422	0.25471	0.3812	333.2126	11016.2	18299.52	29315.72	23.43707
0.0032	0.0036	2.12	0.0083	0.0063	43.250	48.000	358.975	300	45.552	0.53945	0.4067	346.2601	23331.11	19519.49	42850.59	22.95524
0.0040	0.0026	2.12	0.0083	0.0056	43.250	48.000	359	268	42.744	0.75569	0.5083	357.8374	32683.61	24399.36	57082.97	22.27721

Flowrate Gas (m ³ /m)	Volume Gas (m ³)	DUAL FUEL (tekanan 3 bar) SPURT 75-25																							
		Putaran Engine (rpm)		Beban (watt)	Torsi Beban (Nm)	Putaran Generator (Rpm)	Alternator		Volume Bahan Bakar (m ³)	Waktu (Detik)	Waktu (Menit)	Waktu (Jam)	Densitas (Kg/m ³)	Efisiensi Slip	Daya (Kw)	Torsi Generator (Nm)	Torsi mesin (Nm)	Daya mesin (kw)	BMEP (bar)	Waktu injeksi (s)	Flowrate Gas (l/m)				
		Kontrol	aktual				Tegangan (Volt)	Arus (A)																	
		rpm	%																						
260bTDC	5.5	0.5	63.797	2000	2007	1000	5.686988	1680	210	4.1	861	0.00001	3.111	186.67	0.0519	830	1.1217	0.8128	3.8690	4.6221	0.9710	2.5857	2.28	89.49	2.7
	6.5	1	53.282	2000	2007	2000	13.06103	1463	207	8.4	1738.8	0.00001	1.492	89.49	0.0249	830	0.9768	1.8848	8.9725	12.3089	17.8062	3.7405	3.32	76.67	3.5
	7.5	1	55.881	2000	2007	3000	19.52481	1468	201	12.6	2532.6	0.00001	1.278	76.67	0.0213	830	0.9801	2.7359	13.0242	17.8062	23.0493	4.8322	4.29	60.26	4.1
	8.5	1.5	53.836	2000	2003	4000	26.10421	1464	198	16.5	3267	0.00001	1.004	60.26	0.0167	830	0.9794	3.5319	16.8468	23.0493	4.8322	4.29	60.26	4.1	
260bTDC	5.5	0.5	64.856	2000	2001	1000	6.477383	1475	210	4	840	0.00001	3.103	186.18	0.0517	830	0.9878	0.9004	4.2993	5.8325	12.215	2.5858	2.30	93.78	2.8
	6.5	1	55.346	2000	2009	2000	12.95477	1475	210	8.4	1764	0.00001	1.563	93.78	0.0261	830	0.9838	1.8985	9.0285	12.2972	17.7772	3.7232	3.32	69.77	3.2
	7.5	1	51.310	2000	2001	3000	19.53812	1467	201	12.6	2532.6	0.00001	1.163	69.77	0.0194	830	0.9824	2.7296	13.0331	17.7772	23.2882	4.8969	4.33	58.08	4
	8.5	1.5	52.303	2000	2009	4000	26.0686	1466	200	16.5	3300	0.00001	0.968	58.08	0.0161	830	0.9778	3.5734	16.9938	23.2882	23.2882	4.8969	4.33	58.08	4

Flowrate Gas (m ³ /m)	Volume Gas (m ³)	Densitas (kg/m ³)	Massa Masuk Bahan Bakar (kg)		LHV (kJ/kg)		Energi (kJ)		Prosentase CNG (%)	FCR (kg/h)		SFC DF (gr/kwh)		Energi (kJ/h)	Energi eff thermal (kJ/h)	
			Peraminin a DEX	CNG	DEX	CNG	DEX	CNG		Peraminin a DEX	CNG	DEX	CNG			
0.0020	0.0062	2.12	0.0083	0.0138	43.250	48.000	358.975	662	64.856	0.16049	0.2669	474.6118	6941.186	12809.66	19750.85	16.41232
0.0028	0.0044	2.12	0.0083	0.0093	43.250	48.000	358.975	445	55.346	0.31862	0.3558	355.2543	13780.23	17079.55	30859.78	22.147
0.0032	0.0037	2.12	0.0083	0.0079	43.250	48.000	358.975	378	51.310	0.42826	0.4067	305.8741	18522.43	19519.49	38041.92	25.83107
0.0040	0.0039	2.12	0.0083	0.0082	43.250	48.000	359	394	52.303	0.51446	0.5083	286.2231	22250.52	24399.36	46649.88	27.57596

DUAL FUEL					
Parameter	Daya (kW)	Torsi (Nm)	Bmep (Bar)	SFC (gr/kwh)	Eff Thermal (%)
RPM	2000	2000	2000	2000	2000
Variasi	260° bTDC	260° bTDC	260° bTDC	260° bTDC	260° bTDC
1000	0.9232	4.3949	1.1187	498.1399	15.7534
2000	1.8830	8.9730	2.2840	328.6875	23.7697
3000	2.7041	12.8917	3.2815	296.5627	26.6305
4000	3.4253	16.3140	4.1526	340.7978	23.3094

presentase perbedaan	SPLIT		50%	50%						
	Daya (kW)		Torsi (Nm)		Bmep (Bar)		SFC (gr/kwh)		Eff Thermal (%)	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	0.2	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	12.7	10.3	13.6	10.7
	1.4	1.5	1.6	1.4	1.6	1.4	-1.4	-4.1	-1.4	-3.6
	1.0	0.5	1.1	0.6	1.1	0.6	-16.8	-8.8	-13.8	-7.9
	3.1	3.4	3.1	3.6	3.1	3.6	-5.0	4.2	-4.4	4.1
SPLIT	50%	50%								
Parameter	Daya (kW)		Torsi (Nm)		Bmep (Bar)		SFC (gr/kwh)		Eff Thermal (%)	
RPM	2000		2000		2000		2000		2000	
Variasi	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC
1000	0.9253	0.9275	4.4158	4.4218	1.1240	1.1255	434.9580	446.9994	17.8956	17.4466
2000	1.9085	1.9104	9.1172	9.0987	2.3207	2.3160	333.2126	342.2568	23.4371	22.9023
3000	2.7323	2.7188	13.0331	12.9682	3.3175	3.3010	346.2601	322.7866	22.9552	24.5382
4000	3.5324	3.5407	16.8239	16.8973	4.2824	4.3011	357.8374	326.4821	22.2772	24.2647

presentase perbedaan	SPLIT		25%	75%						
	Daya (kW)		Torsi (Nm)		Bmep (Bar)		SFC (gr/kwh)		Eff Thermal (%)	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	0.07	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-1.3	15.5	-1.2	17.0
	-3.0	0.5	-3.0	0.4	-3.0	0.4	6.8	-1.6	7.6	-1.3
	0.5	0.9	0.6	0.8	0.6	0.8	0.1	-12.2	0.2	-10.5
	0.0	1.0	-0.1	1.0	-0.1	1.0	10.2	0.1	10.8	0.3
SPLIT	25%	75%								
Parameter	Daya (kW)		Torsi (Nm)		Bmep (Bar)		SFC (gr/kwh)		Eff Thermal (%)	
RPM	2000		2000		2000		2000		2000	
Variasi	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC
1000	0.9238	0.9221	4.3978	4.3919	1.1194	1.1179	504.4020	421.1451	15.5695	18.4391
2000	1.8266	1.8927	8.7082	9.0055	2.2166	2.2923	306.4667	334.0942	25.5666	23.4641
3000	2.7188	2.7271	12.9682	12.9888	3.3010	3.3062	296.4050	332.7324	26.6952	23.8427
4000	3.4241	3.4610	16.2918	16.4840	4.1470	4.1959	306.0583	340.4426	25.8209	23.3700

presentase perbedaan	SPLIT		75%	25%						
	Daya (kW)		Torsi (Nm)		Bmep (Bar)		SFC (gr/kwh)		Eff Thermal (%)	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	-12.0	-2.5	-12.0	-2.2	-12.0	-2.2	-2.3	4.7	-2.9	4.2
	0.1	0.8	0.0	0.6	0.0	0.6	-9.3	-8.1	-7.6	-6.8
	1.2	0.9	1.0	1.1	1.0	1.1	-2.8	-3.1	-3.2	-3.0
	3.1	4.3	3.3	4.2	3.3	4.2	15.5	16.0	17.4	18.3
SPLIT	75%	25%								
Parameter	Daya (kW)		Torsi (Nm)		Bmep (Bar)		SFC (gr/kwh)		Eff Thermal (%)	
RPM	2000		2000		2000		2000		2000	
Variasi	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC	260° bTDC & 230° bTDC	260° bTDC & 244° bTDC
1000	0.8128	0.9004	3.8690	4.2993	0.9848	1.0944	509.6594	474.6118	15.3008	16.4123
2000	1.8848	1.8985	8.9725	9.0285	2.2839	2.2982	359.1885	355.2543	21.9518	22.1470
3000	2.7359	2.7296	13.0242	13.0331	3.3152	3.3175	305.0147	305.8741	25.7804	25.8311
4000	3.5319	3.5734	16.8468	16.9938	4.2883	4.3257	287.9132	286.2231	27.3702	27.5760

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan seorang anak terakhir dari dua orang bersaudara yang lahir pada tanggal 14 Desember 1995 dengan ibu bernama Juminah dan bapak bernama Mujiya. Pendidikan formal dimulai dari SDN Cibinong 04, SMPN 1 Cibinong, SMAN 1 Cibinong. Lulus SMA pada tahun 2014 dan melanjutkan pada lembaga pendidikan Politeknik Negeri Jakarta jurusan Teknik Mesin, prodi Teknik Konversi Energi. Lulus sebagai A.Md pada tahun 2017 kemudian melanjutkan studi formal untuk mendapatkan gelar Sarjana dengan program Lintas Jalur. Studi lanjut dari penulis didapatkan di lembaga pendidikan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Departemen Teknik Sistem Perkapalan dengan fokus dibidang *Marine Power Plant*. Selama kuliah di Departemen Teknik Sistem

Perkapalan juga pernah menjadi Asisten Lab untuk kegiatan praktikum mata kuliah bidang *Marine Power Plant (MPP)*. Juga ada beberapa kegiatan mandiri diluar kampus. Selanjutnya untuk menghubungi penulis dapat melalui yudhaprasetiyo14@gmail.com