



**SKRIPSI – ME184834**

**ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH *GAS SPLIT INJECTION* PADA MESIN BAHAN BAKAR GANDA TERHADAP EMISI GAS BUANG**

Istiqlal Sanatu Dzahab  
NRP. 04211745000010

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* PADA  
MESIN BAHAN BAKAR GANDA TERHADAP EMISI GAS BUANG**

Istiqlal Sanatu Dzahab  
NRP. 04211745000010

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

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



FINAL PROJECT - ME184834

***EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GAS SPLIT INJECTION EFFECT  
ON THE EXHAUST GAS EMISSIONS OF DUAL FUEL ENGINE***

Istiqlal Sanatu Dzahab  
NRP. 04211745000010

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

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

DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN

**Analisa Eksperimen Pengaruh *Gas Split Injection* pada Mesin Bahan Bakar Ganda Terhadap Emisi Gas Buang**

### SKRIPSI

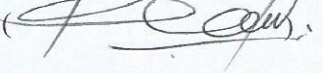
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi *Marine Power Plant* (MPP)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Istiqlal Sanatu Dzahab  
NRP. 04211745000010

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* Pada Mesin Bahan Bakar Ganda Terhadap Emisi Gas Buang**

### 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 :

Istiqlal Sanatu Dzahab  
NRP. 0421174500010

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# ANALISA EKSPERIMEN PENGARUH GAS *SPLIT INJECTION* PADA MESIN BAHAN BAKAR GANDA TERHADAP EMISI GAS BUANG

**Naman Mahasiswa** : Istiqlal Sanatu Dzahab  
**NRP** : 04211745000010  
**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

Mengoptimalkan kinerja mesin pada bahan bakar ganda (diesel dan CNG) telah banyak diteliti pada metode injeksi bahan bakar. Salah penelitian yang terbaru adalah *split injection*. *Split injection* merupakan metode injeksi bertahap pada bahan bakar yang memiliki keunggulan untuk hasil pembakaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi efek *split injection* pada mesin berbahan bakar ganda terhadap emisi gas buang yang dihasilkan. Penelitian ini melakukan *split injection* pada injeksi gas (CNG) dengan cara merubah metode injeksi gas dari *single injection* menjadi *split injection* dengan dua tahap injeksi. Waktu injeksi pertama yaitu  $260^{\circ}$  bTDC diikuti dengan variasi waktu injeksi kedua yaitu pada  $244^{\circ}$  dan  $230^{\circ}$  bTDC. Selain itu, pengujian dilakukan pada RPM tetap dengan beban berbeda dan *Injection Split Ratio* (ISR) yang berbeda yaitu 0,25;0,5;0,75 pada setiap variasi waktu injeksi. Dari hasil pengujian yang dilakukan di *workshop* terjadi efek yang bervariasi terhadap emisi yang dihasilkan, namun pada beberapa titik terjadi penurunan emisi gas buang. Pada ISR 0,25 emisi HC menurun sebesar 16% pada beban 25% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $244^{\circ}$  bTDC, emisi CO menurun sebesar 62% pada beban 25% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $244^{\circ}$  bTDC, dan emisi NOx sebesar 49% pada beban 100% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $230^{\circ}$  bTDC. Kemudian pada ISR 0,5 dapat menurunkan HC sebesar 13% pada beban 25% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $230^{\circ}$  bTDC, CO sebesar 64% pada beban 25% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $230^{\circ}$  bTDC, dan NOx sebesar 11% pada beban 100% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $244^{\circ}$  bTDC. Kemudian pada ISR 0,75 dapat menurunkan HC sebesar 15% pada beban 50% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $230^{\circ}$  bTDC, CO sebesar 45% pada beban 25% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $230^{\circ}$  bTDC dan NOx sebesar 29% pada beban 100% di variasi waktu injeksi  $260^{\circ}$  bTDC dan  $230^{\circ}$  bTDC.

Kata kunci : *Mesin Bahan Bakar Ganda, Gas Split Injection, Dwelling Time, ISR, Emisi Gas buang*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GAS SPLIT INJECTION EFFECT ON THE EXHAUST GAS EMISSIONS OF DUAL FUEL ENGINE

**Name** : Istiqlal Sanatu Dzahab  
**NRP** : 04211745000010  
**Departement** : Marine engineering ITS  
**Supervisor 1** : Prof. Semin, S.T., M.T., Ph.D., C.Eng.  
**Supervisor 2** : Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D

## ABSTRACT

Optimizing engine performance on dual fuel (diesel and CNG) has been studied in the fuel injection method. The latest research is split injection. Split injection is a stepwise injection method on fuel which has the advantage of combustion results. This study aims to identify the effect of split injection on a dual-fuel engine on exhaust emissions produced. This research conducted split injection on gas injection (CNG) by changing the gas injection method from single injection to split injection or multiple injection.. The first injection timing is 260 ° bTDC followed by a second injection timing variation at 244 ° and 230° bTDC. In addition, testing is carried out on fixed RPMs with different loads and different Injection Split Ratio (ISR), which is 0.25; 0.5; 0.75 for each variation of injection timing. In general, there are varied effects on the emissions produced, but at some point there is a decrease in exhaust emissions. At ISR 0.25, HC emissions decrease by 16% at a 25% load in variations of injection timing 260 ° bTDC and 244 ° bTDC, CO emissions decrease by 62% at 25% loads in variations of injection timing 260 ° bTDC and 244 ° bTDC, and NO<sub>x</sub> emissions of 49% at 100% loads in a variation of 260 ° bTDC injection timing and 230° bTDC. Then, at ISR 0.5, it can reduce HC by 13% at a 25% load in variations of injection timing 260 ° bTDC and 230 ° bTDC, CO by 64% at 25% loads in variations of injection timing 260 ° bTDC and 230 ° bTDC, and NO<sub>x</sub> of 11% at a 100% load in a variation of 260 ° bTDC injection timing and 244 ° bTDC. Moreover, at ISR 0.75, HC emissions decreased by 15% at a load of 50% in variations of injection timing 260 ° bTDC and 230 ° bTDC, CO by 45% at a 25% load in variations of injection timing of 260 ° bTDC and 230 ° bTDC and NO<sub>x</sub> of 29% at 100% load in variations of injection timing 260 ° bTDC and 230 ° bTDC.

*Key words : Dual Fuel Engine, Split Gas Injection, Dwelling time, ISR, Exhaust Gas Emissions*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji dan syukur dipanjatkan kehadirat ALLAH SWT karena atas rahmat dan karunia-NYA, sehingga penulis mampu menyelesaikan salah satu syarat wajib bagi mahasiswa untuk menyelesaikan pendidikan pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Skripsi ini berjudul : **“Analisa Eksperimen Pengaruh Gas Split Injection pada Mesin Bahan Bakar Ganda Terhadap Emisi Gas Buang”**

Skripsi ini adalah bagian dari Disertasi Frengki M felayati. Kiranya penulis tidak akan mampu menyelesaikan skripsi ini tanpa bantuan, saran, dukungan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak, Ibu serta keluarga yang telah memberi dukungan tiada henti berupa semangat, moral, materi, dan hal lainnya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
2. Bapak Ir. Hari Prastowo, M,Sc. selaku Dosen Wali penulis selama menjalani proses kuliah di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
3. Bapak Prof. Semin, ST., MT., Ph.D., C.Eng selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah membimbing penulis dan memotivasi untuk selesainya Skripsi.
4. Bapak Beny Cahyono ST., MT., Ph.D selaku Kepala Laboratorium Marine Power Plant dan dosen pembimbing 2 yang selalu memberikan nasehat sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi.
5. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
6. Mas frengki, mas dimas, yudha selaku tim yang membantu dan menyemangati dalam menyelesaikan skripsi.
7. Mahasiswa teknisi LAB. Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Teknik Mesin FTI-ITS dan bapak ibu LPPM-ITS yang telah membantu dalam pengujian emisi.
8. Alvin, Miftah, Ivan, Ttadjudin, LJ 2017 dan teman teman MPP yang telah membantu dan memberikan *support* selama pengerjaan skripsi
9. Bapak Muh. Nurafandi selaku Teknisi Laboratorium Marine Power Plant yang sudah sangat membantu dalam proses pengerjaan Skripsi.

Semoga Skripsi ini dapat berguna dan dapat memberi ilmu pengetahuan yang bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



# DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR GRAFIK</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	1
1.3 Batasan Masalah.....	1
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Mesin Diesel.....	3
2.2 Bahan Bakar Gas .....	3
2.3 Jenis Jenis Bahan Bakar Gas .....	4
2.3.1 LPG (Liquid Petroleum Gas) .....	4
2.3.2 LNG (Liquid Natural Gas) .....	4
2.3.3 CNG (Compressed Natural Gas).....	4
2.4 Mesin Bahan Bakar Ganda.....	6
2.5 Emisi Gas Buang .....	7
2.6 Injeksi Bahan Bakar pada Mesin Bahan Bakar Ganda.....	8
2.7 Strategi <i>Split Injection</i> .....	9
2.8 Efek <i>Split Injection</i> Bahan Bakar pada Mesin Bahan Bakar Ganda.....	9
2.9 Studi Pada Penelitian Sebelumnya .....	11
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>13</b>
3.1 <i>Engine Set Up</i> .....	15
3.2 Penyiapan Instrumen Pengukuran .....	20
3.3 Investigasi Emisi pada Mesin Bahan Bakar Ganda.....	24

3.4	Investigasi Efek <i>Gas Split Injection</i> pada Emisi Mesin Bahan Bakar Ganda .	25
3.5	Eksperimen Pengambilan Data	25
3.6	Analisan Dan Pembahasan	26
<b>BAB 4</b>	<b>ANALISA DAN PEMBAHASAN</b>	<b>27</b>
4.1	Hasil Uji Emisi pada Mesin Bahan Bakar Ganda	27
4.1.1	Emisi HC pada Mesin Bahan Bakar Ganda	27
4.1.2	Emisi CO pada Mesin Bahan Bakar Ganda	28
4.1.3	Emisi NO <sub>x</sub> pada Mesin Bahan Bakar Ganda	29
4.2	Emisi <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	29
4.2.1	Emisi HC <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	30
4.2.2	Emisi CO <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	31
4.2.3	Emisi NO <sub>x</sub> <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	32
4.3	Emisi <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0.5	32
4.3.1	Emisi HC <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5	33
4.3.2	Emisi CO <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5	34
4.3.3	Emisi NO <sub>x</sub> <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5	35
4.4	Emisi <i>Gas Split injection</i> pada ISR 0,75	35
4.4.1	Emisi HC <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75	36
4.4.2	Emisi CO <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75	37
4.4.3	Emisi NO <sub>x</sub> <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75	38
4.5	Analisa Perbandingan Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i>	38
4.5.1	Analisa Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	39
4.5.2	Analisa Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	40
4.5.3	Analisa Perbandingan NO <sub>x</sub> Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25	41
4.5.4	Analisa Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5	42
4.5.5	Analisa Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> Pada ISR 0,5	43
4.5.6	Analisa Perbandingan NO <sub>x</sub> Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5	45

4.5.7 Analisa Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75 .....	46
4.5.8 Analisa Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75 .....	47
4.5.9 Analisa Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75 .....	48
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>51</b>
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>57</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>69</b>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema dwell time dan ISR (Sindhu dkk., 2018) .....	10
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian .....	13
Gambar 3.2 Yanmar TF 85 MH .....	14
Gambar 3.3 Skema Pengujian .....	15
Gambar 3.4 <i>Intake Cleaner</i> .....	16
Gambar 3.5 <i>Injector Manifold</i> .....	16
Gambar 3.6 Pemasangan <i>Gas Injector Manifold</i> pada <i>Intake Cleaner</i> .....	17
Gambar 3.7 PLC .....	17
Gambar 3.8 Electric Control Unit .....	18
Gambar 3.9 Sensor RPM .....	18
Gambar 3.10 Beban <i>Heater</i> .....	19
Gambar 3.11 Tabung CNG .....	19
Gambar 3.12 Regulator Gas .....	20
Gambar 3.13 Flow Meter .....	20
Gambar 3.14 Pengaturan untuk Injeksi Gas ISR 0,25 .....	21
Gambar 3.15 Pengaturan untuk Injeksi Gas ISR 0,50 .....	22
Gambar 3.16 Pengaturan untuk Injeksi Gas ISR 0,75 .....	22
Gambar 3.17 Pengaturan input <i>Injection Timing</i> Gas (260;245) .....	23
Gambar 3.18 Pengaturan input <i>Injection Timing</i> Gas (260;230) .....	23
Gambar 3.19 <i>Exhaust Gas</i> .....	24
Gambar 3.20 Sensor <i>Gas Analyzer</i> .....	24
Gambar 3.21 <i>Gas Analyzer</i> Stargas 898 .....	25

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kandungan Gas Alam (Wei dkk, 2016) .....	5
Tabel 2.2 Perbandingan Emisi Buang Bahan Bakar (Jha, dkk., 2012).....	5
Tabel 3.1 Pengaturan <i>Pulse Width Gas Split Injection</i> .....	21
Tabel 3.2 Metodologi Penelitian (Emisi Gas Buang).....	25

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Grafik Emisi HC pada Mesin Bahan Bakar Ganda.....	27
Grafik 4.2 Grafik Emisi CO pada Mesin Bahan Bakar Ganda.....	28
Grafik 4.3 Grafik Emisi CO Pada Mesin Bahan Bakar Ganda .....	29
Grafik 4.4 Grafik Emisi HC <i>Gas Split Injection</i> ISR 0,25.....	30
Grafik 4.5 Grafik Emisi CO <i>Gas Split Injection</i> ISR 0,25.....	31
Grafik 4.6 Grafik Emisi NOx <i>Gas Split Injection</i> ISR 0,25 .....	32
Grafik 4.7 Grafik Emisi HC <i>Gas Split Injection</i> ISR 0,5.....	33
Grafik 4.8 Grafik Emisi CO <i>Gas Split Injection</i> ISR 0,5.....	34
Grafik 4.9 Grafik Emisi NOx <i>Gas Split Injection</i> ISR 0,5 .....	35
Grafik 4.10 Grafik Emisi HC <i>Gas Split Injection</i> 0,75 .....	36
Grafik 4.11 Grafik Emisi CO <i>Gas Split Injection</i> 0,75 .....	37
Grafik 4.12 Grafik Emisi NOx <i>Gas Split Injection</i> 0,75 .....	38
Grafik 4.13 Grafik Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25 .....	39
Grafik 4.14 Grafik Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25 .....	40
Grafik 4.15 Grafik Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,25 .....	42
Grafik 4.16 Grafik Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5 .....	43
Grafik 4.17 Grafik perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan <i>gas split injection</i> pada ISR 0,5 .....	44
Grafik 4.18 Grafik Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,5 .....	45
Grafik 4.19 Grafik Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75 .....	46
Grafik 4.20 Grafik Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> pada ISR 0,75 .....	47
Grafik 4.21 Grafik Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan <i>Gas Split Injection</i> .....	49

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Cadangan minyak bumi semakin lama semakin berkurang, sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan ini, seperti memodifikasi diesel menjadi berbahan bakar ganda (Wijaya, 2014). Mesin bahan bakar ganda adalah mesin standar diesel yang ditambahkan bahan bakar lain pada masukkan udaranya dan penyalaan bahan bakar dilakukan saat solar di semprotkan ke ruang bakar (Tamam, 2015). Secara sederhana, bahan bakar gas dapat dimasukkan dengan membuat lubang pada masukkan udara (*intake manifold*) mesin diesel (Oktovian, 2016).

Namun, permasalahan pada mesin berbahan bakar ganda adalah turunnya efisiensi ketika beban rendah. Hal ini dapat menyebabkan mesin menghasilkan emisi NO<sub>x</sub> (Lounici dkk, 2014). Oleh karena itu, penelitian terhadap mesin diesel perlu terus dilakukan terutama pada mesin berbahan bakar ganda. Beberapa metode telah dilakukan untuk mengurangi emisi agar memberikan hasil yang ramah lingkungan. *Split injection* adalah salah satu metode yang dapat digun untuk mengurangi masalah emisi terutama pada partikel HC, NO<sub>x</sub>, dan CO (Abdullah dkk, 2009).

Implementasi *split injection* dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi termal mesin berbahan bakar ganda ketika beban rendah (Guo dkk, 2017). *Split injection* merupakan injeksi bahan bakar bertahap pada waktu injeksi berbeda dengan jumlah yang setara dengan total jumlah bahan bakar saat injeksi tunggal (Park dkk, 2018). Pengaturan injeksi bahan bakar memiliki dampak yang signifikan terhadap *air/fuel mixture* (Sylvain, 2008). Di sisi lain, komposisi gas alam merupakan bahan bakar yang dominan pada mesin berbahan bakar ganda sehingga juga membutuhkan perhatian khusus untuk menurunkan emisi gas buang yang dihasilkan.

Oleh sebab itu, penelitian ini melakukan investigasi pengaruh dari *split injection* pada bahan bakar gas alam. Investigasi dilakukan dengan merubah waktu penginjeksian bahan bakar diesel dengan variasi jarak waktu injeksi gas pertama dengan gas kedua dan variasi ISR. Penelitian ini mengidentifikasi emisi gas buang pada mesin berbahan bakar ganda yang sudah dimodifikasi seperti diatas.

### 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dibahas dalam penelitian yaitu:

1. Bagaimana pengaruh gas split injection pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang dengan ISR yang berbeda?
2. Bagaimana pengaruh gas split injection pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang dengan jarak waktu injeksi yang berbeda?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat agar lingkup penelitian ini lebih fokus, yaitu:

1. Penelitian dilakukan dengan menggunakan mesin modifikasi *Dual Fuel Diesel Engine Yanmar TF 85 MH Direct Engine Single Cylinder*
2. Penelitian ini berfokus pada analisa emisi gas buang mesin.

3. Mesin bahan bakar ganda yang digunakan berbahan bakar Pertamina Solar Dex – CNG
4. Dalam penelitian ini parameter emisi yang di uji adalah HC, CO, dan NO<sub>x</sub>

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh gas split injection pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang dengan ISR yang berbeda.
2. Mengetahui pengaruh gas split injection pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang dengan jarak waktu injeksi yang berbeda.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diperoleh pada penelitian ini adalah hasil analisa terhadap pengaruh penggunaan sistem *split injection* terhadap emisi gas buang pada mesin bahan bakar ganda. Sehingga diharapkan dapat menurunkan emisi gas buang serta menjadi studi untuk mengetahui efektivitas mesin bahan bakar ganda khususnya pada emisi gas buang.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Mesin Diesel**

Mesin diesel termasuk jenis kelompok motor pembakaran dalam (*internal combustion engines*), dimana proses pembakarannya didalam ruang bakarnya sendiri. Ruang bakar yang dimaksud adalah ruangan yang dibatasi atau dibentuk oleh *cylinder head*, *cylinder liner*, dan *piston* pada saat TMA. Motor diesel ini menggunkan bahan bakar cair yang dimasukkan ke dalam ruang pembakaran silinder motor dengan diinjeksikan menggunakan pompa injeksi. Bahan bakar masuk ke dalam silinder atau ruang pembakaran harus dalam bentuk yang lebih halus, oleh karena itu digunakan pengabut (*nozzle*) (Ehsan, 2009).

Saat terjadi langkah hisap (*intake*), yang dimasukkan kedalam silinder adalah udara murni ( $O_2$ ). Pergerakan katup intake diatur oleh *crankshaft* dan *camshaft*nya. Kemudian diteruskan dengan langkah kompresi, yaitu udara murni yang masuk saat langkah hisap dimampatkan hingga menghasilkan panas yang cukup untuk menyalakan bahan bakar yang diinjeksikan ke dalam ruang pembakaran motor. Oleh karena itu, motor diesel sering disebut juga motor penyalaan kompresi (*compression ignition engines*) (Ehsan, 2009).

Solar diinjeksikan dari *nozzle* dengan tekanan tinggi sesaat sebelum akhir langkah kompresi. Solar yang diinjeksikan dibakar oleh panas kompresi sehingga terjadi pembakaran yang menaikkan temperatur dan tekanan secara mendadak serta mendorong piston turun kebawah dari TMA ke TMB. Pada langkah selanjutnya yaitu langkah buang, katup buang sudah dibuka, gas pembakaran dibuang ke udara oleh dorongan *piston*. Agar pembuangan gas pembakaran terlaksana sempurna, klep buang dibuang sebelum TMA dan ditutup sesudah TMA (Ehsan, 2009).

Tekanan udara masuk pada mesin diesel merupakan parameter yang mempengaruhi kinerja dari komponen mesin diesel (Hoseini dkk, 2017). Udara pada saluran masuk tersebut bisa memiliki tekanan yang rendah maupun tinggi, yang selanjutnya merubah kinerja dari mesin tersebut. Dengan pengaturan tekana udara yang masuk menuju ruang bakar, hal tersebut dapat berpengaruh juga pada aliran bahan bakar yang digunakan.

#### **2.2 Bahan Bakar Gas**

Semakin meningkatnya kendaraan bermotor menyebabkan semakin meningkatnya jumlah polutan. Polutan ini yang nantinya berdampak pada kesehatan manusia, pencemaran lingkungan dan bisa juga merusak *ozon*. Polutan ini disebabkan dari gas buang keluaran knalpot, tangki bensin dan karburator yang menghasilkan gas beracun yang antara lain adalah CO, HC dan NO<sub>x</sub> (yuswono, 1997). Saat ini kita terlalu bergantung pada bahan bakar minyak yang saat ini mulai menipis ketersediaannya (Hartanto, 2010). Salah satu solusi dari ketergantungan tersebut adalah dengan menambah gas alam sebagai alternatif.

## 2.3 Jenis Jenis Bahan Bakar Gas

### 2.3.1 LPG (Liquid Petroleum Gas)

LPG adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas dapat berubah menjadi cair. Komponen yang mendominasi LPG didominasi propane ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ). LPG juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya Etana ( $C_2H_6$ ) dan pentana ( $C_5H_{12}$ ). Dalam kondisi atmosfer LPG berbentuk gas. Volume LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu LPG dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Uap LPG lebih berat dari udara: butan beratnya sekitar dua kali berat udara dan propan sekitar satu setengah kali berat udara. Sehingga, uap dapat mengalir didekat permukaan tanah dan turun hingga ke tingkat yang paling rendah dari lingkungan dan dapat terbakar pada jarak tertentu dari sumber kebocoran.

### 2.3.2 LNG (Liquid Natural Gas)

LNG adalah gas alam yang dicairkan, yang dimana komposisi kimia terbanyaknya adalah Methana, Ethana, Propana, Butana, Pentana dan Nitrogen. LNG adalah gas alam yang telah diproses untuk menghilangkan ketidakmurnian dan hidrokarbon dan kemudian dikondensasi menjadi cairan pada tekanan atmosfer dengan di dinginkan pada suhu sekitar  $-160^\circ$ . LNG memiliki isi sekitar 1/640 dari gas alam pada suhu dan tekanan tertentu. Kepadatan energi yang dihasilkan LNG sebanding dengan bahan bakar petrol dan diesel yang menghasilkan polusi yang lebih sedikit. LNG berasal dari gas alam yang merupakan campuran dari beberapa gas yang berbeda sehingga tidak memiliki nilai panas yang spesifik. Nilai panasnya tergantung pada sumber gas yang digun dan proses yang digun untuk mencairkan bentuk gasnya. Nilai panas tertinggi yang dihasilkan oleh LNG berkisar 24MJ/L pada suhu  $-164^\circ C$  dan nilai terndahnya adalah 21ML/L.

### 2.3.3 CNG (Compressed Natural Gas)

CNG adalah alternatif bahan bakar selain bensin atau solar. Bahan bakar ini dianggap lebih “bersih” bila dibandingkan dengan dua bahan bakar minyak karena emisi gas buangnya yang ramah lingkungan. CNG dibuat dengan melakukan kompresi metana ( $CH_4$ ) yang diekstrak dari gas alam. CNG biasanya disimpan dan didistribusikan dalam bejana tekan pada tekanan 200-248bar yang biasanya berbentuk silinder. Secara ekonomis penggunaan CNG mengeluarkan biaya yang lebih murah dibandingkan dengan bahan bakar cair (bensin dan solar). Sebagian besar unsur kimianya terdiri dari metana ( $CH_4$ ) dan sisanya berupa metana, propana, butana, pentana, dan carbon monoksida. Komposisi dan karakteristik dari gas sangat bervariasi dari satu sumber dengan sumber lainnya, dimana hal ini mempengaruhi kondisi stoikiometrinya. CNG memiliki beberapa kekurangan, yakni fasenya dalam temperatur ruangan sehingga menyulitkan dalam hal penyimpanan dan mobilitas. Selain itu, natural gas memiliki energi persatuan volume (*energy density*) yang lebih kecil dibandingkan solar, metanol, bensin, atau bahan bakar hidrokarbon cair lainnya. Gas CNG merupakan gas alam yang mengalami kompresi agar dapat digunakan sebagai bahan bakar pada kendaraan.

CNG merupakan bahan bakar yang telah lama digunakan pada mesin yang bergerak, antara lain dikembangkan mesin pada alat transportasi (semin dkk, 2008). CNG muncul sebagai bahan bakar alternatif yang menjanjikan karena karakteristik pembakarannya yang bersih dan jumlah kadar emisi yang rendah pada gas buang (Bhandari K dkk, 2005). Selain itu, harga operasional gas bumi jauh lebih rendah daripada diesel dan juga memiliki nilai konsumsi yang relatif sedikit (semin dkk, 2009). Bahan bakar CNG adalah bahan bakar yang berasal dari gas bumi dengan unsur utama gas metana yang dimampatkan, dipertahankan dan disimpan di dalam sebuah bejana tekan yang dirancang khusus (S.Zaini dkk, 2013). Selain metana CNG juga terdapat unsur lain pembentuk CNG yaitu propana, butana, iso-butana dan beberapa zat yang lain dalam jumlah kecil. Kandungan dari gas alam ditunjukkan pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Kandungan Gas Alam (Wei dkk, 2016)

<i><b>Komponen</b></i>	<i><b>Typical Analysis (Vol %)</b></i>	<i><b>Range (Vol %)</b></i>
<i>Metana</i>	94.9	87-96
<i>Etana</i>	2.5	1.8-5.1
<i>Propana</i>	0.2	0.1-1.5
<i>Isobutana</i>	0.03	0.01-0.3
<i>n-Butana</i>	0.03	0.01-0.3
<i>Isopentana</i>	0.01	Trace to 0.14
<i>n-Pentana</i>	0.01	Trace to 0.14
<i>Hexana</i>	0.01	Trace to 0.06
<i>Nitrogen</i>	1.6	1.3-5.6
<i>Carbondioxida</i>	0.7	0.1-1.0
<i>Oxygen</i>	0.02	0.01-0.1
<i>Hydrogen</i>	Trace	Trace to 0.02

Saat ini CNG telah banyak digunakan untuk bahan bakar alternatif sebagai pengganti bahan bakar minyak yang mulai berkurang dan mahal akibat mulai langkanya bahan bakar minyak (Farzaneh-Gord dkk , 2011). Gas alam bisa dibilang sebih bersih dari pada bahan bakar minyak bisa dilihat pada Tabel 2.2 bagaimana kandungan emisi pada setiap bahan bakar.

Tabel 2.2 Perbandingan Emisi Buang Bahan Bakar (Jha, dkk., 2012)

<i><b>Bahan bakar</b></i>	<i><b>CO (g/km)</b></i>	<i><b>HC (g/km)</b></i>	<i><b>NOx (g/km)</b></i>
<i>Bensin</i>	0.256	0.065	0.09
<i>CNG</i>	0.12	0.042	0.07
<i>LPG</i>	0.234	0.039	0.11

Aspek keamanan yang dimiliki CNG lebih unggul dari pada bahan bakar lain. Ada beberapa faktor yang menyebabkan kenapa CNG bisa di bilang lebih aman. Faktor yang pertama adalah CNG memiliki *specific gravity* yang lebih kecil dibanding udara yaitu 0,587, sehingga ketika tabung CNG bocor maka gasnya akan mudah terlepas ke udara. Faktor kedua yaitu *self ignition temperature* CNG 540 °C yang berarti lebih tinggi di banding bensin yang memiliki 227-500 °C dan diesel (solar) yang memiliki 257°C yang menyebabkan gas CNG jika bocor tidak mudah meledak. Tabung CNG di disain dengan material khusus yang membuat CNG lebih aman daripada bensin dan solar (Road, 2012).

Untuk melakukan pembakaran pada mesin diesel bahan bakar harus memiliki jumlah *cetane number* yang cukup. *Cetane number* ini yang nantinya akan membantu bahan bakar agar dapat terbakar dengan sendirinya pada saat titik mati atas (TMA). CNG adalah bahan bakar yang memiliki *cetane number* yang rendah dan titik temperature terbakarnya gas alam juga tinggi dibandingkan bahan bakar minyak lainnya. Sehingga gas alam sulit diterapkan pada mesin diesel, oleh karena itu gas alam harus didampingi dengan bahan bakar diesel agar dapat terbakar. Dari beberapa faktor diatas penerapan mesin berbahan bakar ganda mulai diterapkan. (Wei dkk, 2016).

## 2.4 Mesin Bahan Bakar Ganda

Permasalahan yang dihadapi dunia saat ini adalah masalah lingkungan, khususnya pencemaran udara karena penggunaan bahan bakar serta krisis bahan bakar minyak (minyak bumi). Solusi agar dapat keluar dari permasalahan tersebut dibutuhkan suatu inovasi tertentu, di antaranya mencari bahan bakar alternative sebagai substitusi bahan bakar mineral tersebut. Salah satu bahan bakar alternatif yang berpotensi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah bahan bakar gas, di antaranya adalah CNG (Ikhsan, 2016). Tetapi CNG harus digabung dengan bahan bakar lain agar dapat terjadi pembakaran yaitu dengan mengaplikasikan mesin bahan bakar ganda.

Mesin bahan bakar ganda adalah mesin standar diesel yang ditambahkan bahan bakar lain pada masukkan udaranya dan penyalaan bahan bakar dilakukan saat solar di semprotkan ke ruang bakar (Tamam, 2013). Beberapa penelitian mengenai konversi mesin diesel berbahan bakar minyak solar menjadi mesin berbahan bakar ganda (solar dan gas) telah dilakukan, baik dalam simulasi komputasional maupun dalam eksperimental (Semin dkk, 2009). Prinsip kerja mesin berbahan bakar ganda adalah kombinasi dari cara kerja mesin otto dengan mesin diesel. Yang di mana mesin otto mencampurkan bahan bakar dengan udara diruang bakar setelah itu dikompresi dan dinyal oleh busi (*spark plug*), jika mesin diesel pembakaran terjadi saat dikompresi sehingga tekan dan temperatur menjadi tinggi Kemudian bahan bakar diinjeksikan (Heywood JB, 1998). Pencampuran antara bahan bakar gas dan udara yang lebih baik, dapat meningkatkan pembakaran di mesin, kemudian bahan bakar CNG terbakar sepenuhnya, sehingga dapat meningkatkan efisiensi mesin (Semin, 2014).

Bahan bakar alternatif yang banyak diaplikasikan dalam modifikasi *dual fuel diesel engine* adalah bahan bakar gas, dimana gas (CNG) tersebut dicampurkan dengan udara segar di *intake manifold* (atau disuntikkan ke dalam silinder) dan dimasukkan ke dalam silinder dan dinyalakan oleh sejumlah kecil bahan bakar diesel ketika piston mendekati akhir langkah kompresi (TMA kompresi). Partikel-partikel bahan bakar halus



bercampur dengan udara untuk membentuk campuran yang mudah terbakar yang kemudian menyatu karena suhu tinggi. Ledakan yang menghasilkan pembakaran dari kompresi tersebut kemudian ikut membakar gas secara langsung karena sudah bercampur dengan udara dan solar. (Ehsan, 2009)

Sistem bahan bakar ganda ini lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan sistem bahan bakar tunggal (solar). Sistem bahan bakar ganda ini juga dinilai jauh lebih ekonomis. Sistem berbahan bakar ganda memiliki hasil pembakaran yang jauh lebih bersih (Ehsan, 2009). Potensi pemanfaatan gas alam sebagai pengganti bahan bakar minyak seperti solar, sangat besar jika diterapkan di Indonesia. Hal ini terkait dengan sumber gas di Indonesia masih relatif banyak dan belum dimanfaatkan secara maksimal (Cornell, 2008). Dari segi harga, CNG jauh lebih murah dibandingkan dengan bahan bakar gas lain karena tidak melalui proses pencairan dan lainnya (Clarke, 2012). Oleh karena itu, penerapan sistem berbahan bakar ganda diharapkan mampu menghemat pengeluaran konsumsi bahan bakar serta mengurangi emisi gas buang yang dihasilkan oleh mesin dengan sistem berbahan bakar tunggal (Wijaya, 2014). Dengan demikian, mesin bahan bakar ganda menggunakan bahan bakar alternatif seperti gas alam dengan ketersediaan yang memadai perlu terus dikembangkan. Gas alam sebagai bahan bakar menghasilkan lebih sedikit emisi NO<sub>x</sub> dan PM daripada diesel (Oktaviani dkk, 2018).

Sistem bahan bakar ganda yang telah di modifikasi sedemikian rupa juga memiliki keuntungan dan kerugian. Beberapa keuntungan menggunakan system bahan bakar ganda yaitu bahan bakar gas yang digunakan sangat mudah berhomogen saat langkah kompresi sehingga dapat menguntungkan dari segi emisi gas buang. Kemudian memiliki efisiensi yang tinggi akibat tingginya ratio kompresi. Sedangkan kerugian dari bahan bakar ganda adalah kemungkinan terjadi *knocking* atau ketukan saat bahan bakar *pilot fuel* mulai di injeksikan dan efisiensi pembakaran menurun pada saat beban rendah (Arif, 2015).

## 2.5 Emisi Gas Buang

Emisi gas buang adalah sisa hasil pembakaran bahan bakar di dalam mesin pembakaran dalam, mesin pembakaran luar, mesin jet yang dikeluarkan melalui sistem pembuangan mesin. Sisa hasil pembakaran berupa air (H<sub>2</sub>O), gas CO atau disebut juga karbon monooksida yang beracun, CO<sub>2</sub> atau disebut juga karbon dioksida yang merupakan gas rumah kaca, NO<sub>x</sub> senyawa nitrogen oksida, HC berupa senyawa hidrat arang sebagai akibat ketidak sempurnaan proses pembakaran serta partikel lepas.

### - Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon (HC) merupakan unsur senyawa bahan bakar bensin, HC yang ada pada gas buang adalah dari senyawa bahan bakar yang tidak terbakar habis dalam proses pembakaran motor, HC diukur dalam satuan ppm (*part permillion*) (Robert, 1993). Sebab utama timbulnya HC, karena sekitar dinding-dinding ruang bakar bertemperatur rendah, dimana temperatur itu tidak mampu melakukan pembakaran. Adanya *overlapping* katup (kedua katup bersama-sama terbuka) sehingga merupakan gas pembilas/pembersih. Menyebabkan bau tidak enak atau odor dalam gas buang pada mesin diesel. (Setiawan, 2010).

- **Karbon monoksida (CO)**

Karbon monoksida (CO) merupakan senyawa gas beracun yang terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna dalam proses kerja motor, gas CO merupakan gas yang relatif tidak stabil dan cenderung bereaksi dengan unsur lain, CO dapat diubah dengan mudah menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dengan bantuan sedikit oksigen dan panas, CO diukur dalam satuan % per volume atau dalam ppm tetapi dalam industri otomotif sesuai dengan alat ukur yang digunakan sering diukur dalam satuan % per volume (Spuller, 1987).

Kadar CO yang besar diakibatkan oleh perbandingan campuran antara bahan bakar dan udara tidak sesuai, dimana kandungan bahan bakar terlalu banyak, tetapi disini walaupun kandungan bahan bakar ter Kemudian banyak tetapi masih dapat terbakar sehingga menghasilkan emisi CO yang besar, CO besar dapat disebabkan oleh kesalahan dalam penyetulan karburator sehingga homogenitas campuran menjadi jelek, filter udara yang kotor juga akan mengurangi jumlah udara yang masuk kedalam silinder.

Karbon monoksida (CO), adalah gas yang tak berwarna, tak berbau, dan tak berasa. Terdiri dari satu atom karbon yang secara kovalen berikatan dengan satu atom oksigen. Dalam ikatan ini, terdapat dua ikatan kovalen dan satu ikatan kovalen koordinasi antara atom karbon dan oksigen. Karbon monoksida dihasilkan dari pembakaran tak sempurna dari senyawa karbon, sering terjadi pada mesin pembakaran dalam. Karbon monoksida terbentuk apabila terdapat kekurangan oksigen dalam proses pembakaran (Setiawan, 2010).

- **Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>)**

NO<sub>x</sub> adalah unsur dari nitrgen oksida (NO) dan nitrogen oksida (NO<sub>2</sub>). Tetapi dalam dunia otomotif sering dinyatakan dalam NO<sub>x</sub> saja. NO<sub>x</sub> juga merupakan senyawa gas beracun yang ditimbulkan dari proses pembakaran yang tidak sempurna serta juga diakibatkan oleh suhu pembakaran diruang bakar yang cukup tinggi (Weller, 1989).

## 2.6 Injeksi Bahan Bakar pada Mesin Bahan Bakar Ganda

Penggunaan gas alam di mesin diesel berkembang dari 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 gas alam dalam silinder. Menurut jalur gas alam ke dalam silinder dan sumber pengapian, ada tiga metode utama untuk menginjeksikan gas alam kedalam mesin diesel (Wei dkk, 2016).

Cara pertama yaitu *dual fuel*. Dalam mode ini, gas alam dilepaskan atau disuntikkan ke intake dengan bermacam-macam bentuk turbulansi untuk mencampur secara seragam dengan udara dan kemudian diinjeksikan 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 gas alam langsung disuntikkan dan tercampur. Di beberapa titik selama ini interval antara dua suntikan atau di awal injeksi gas alam, bahan bakar diesel menyala otomatis, menyediakan sumber pengapian ke dalam ruang bakar sehingga memulai pembakaran gas alam. Pengapian kompresi dibantu permukaan panas. Dalam mode ini, gas alam disuntikkan langsung ke silinder dekat

dengan permukaan panas di ujung kompresi. Permukaan panas umumnya merupakan steker cahaya dengan kisaran suhu 1200 - 1400 Kelvin.

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 dkk, 2009). Pada proses pembakaran yang terjadi di ruang bakar, campuran bahan bakar dengan udara yang akan membentuk karakteristik pembakaran yang ada. Penginjeksian bahan bakar juga menentukan tekanan dan kapasitas bahan bakar yang akan dibakar. Pengaturan injeksi yang tepat akan 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 akan disuplai.

Pembakaran yang terjadi pada mesin berbahan bakar ganda akan mengalami permasalahan jika CNG yang diinjeksikan tidak terbakar sempurna pada ruang bakar di silinder (Huang dkk, 2009). Gas metana akan mengalami peningkatan pada hasil pembakaran yang tidak sempurna, sehingga didapat emisi gas metana yang akan menyebabkan gas rumah kaca. Jika terjadi emisi gas yang dihasilkan oleh tidak terbakar sepenuhnya hidrokarbon pada mesin pembakaran dalam. Maka teknologi mesin pembakaran dalam selanjutnya akan diteliti agar terjadi penurunan emisi gas yang dapat merusak kehidupan manusia.

## 2.7 Strategi *Split Injection*

Mesin bahan bakar ganda memiliki kekurangan efisiensi pembakaran menurun pada saat beban rendah untuk memperbaiki hal tersebut adalah dengan cara menambah massa aliran dari injeksi udara dan membagi injeksi bahan bakar dengan *split injection*. *Split injection* adalah salah satu penelitian tersebut, *split injection* sendiri adalah dengan membagi injeksi menjadi dua atau lebih banyak bagian (XiangRong LI, dkk. 2016).

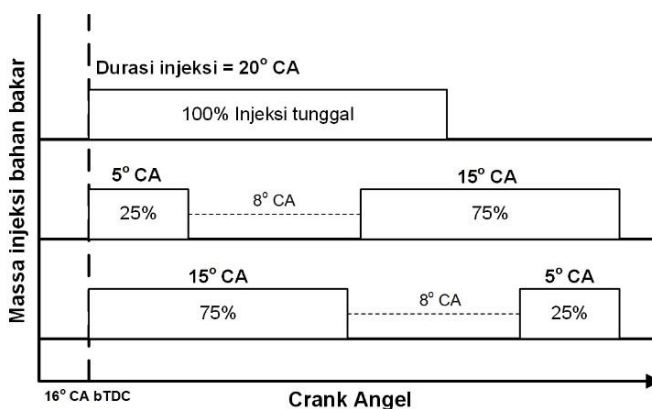
Strategi *split injection* atau disebut juga *multiple injection* merupakan suatu metode injeksi bahan bakar yang fleksibel dimana pada strategi ini terdapat lebih dari satu injeksi bahan bakar dengan waktu injeksi yang berbeda antara satu dengan yang lainnya. Strategi ini memiliki emisi yang lebih rendah bila dibandingkan dengan injeksi tunggal (Wang, Z dkk. 2016). Selain itu strategi ini juga dapat meningkatkan campuran udara/bahan bakar, mengurangi kebisingan, emisi dan BSFC (XiangRong LI, dkk. 2016).

Untuk melakukan pembagian pada *split injection* adalah dengan cara memberikan waktu pada injeksi pertama dengan injeksi yang kedua (*interval delay*). Durasi waktu injeksi *split* pertama sangat memengaruhi waktu injeksi *split* kedua. Hal tersebut perlu diperhatikan karena injeksi pertama yang memvariasikan injeksi kedua. Selain itu jumlah injeksi juga memberikan pengaruh besar pada semprotan karena interaksinya akan berubah secara signifikan (Wang, Z dkk. 2016).

## 2.8 Efek *Split Injection* Bahan Bakar pada Mesin Bahan Bakar Ganda

Pada penelitian *split injection* telah banyak dilakukan *split injection* memiliki banyak dampak positif untuk mengurangi emisi gas buang. Dari penelitian yang sudah ada terdapat variasi jarak waktu injeksi dan pembagian ratio injeksi. Jarak waktu injeksi pertama dan kedua (*dwel time*) merupakan hal yang penting dalam strategi *split injection*. *Dwel time* berkaitan dengan karakteristik injeksi dan kinerja pembakaran (Wang, Z dkk. 2016). Waktu *dwel time* yang pendek menghasilkan pembakaran antara

injeksi *split* pertama dan kedua meningkat sehingga suhu di tengah injeksi kedua menjadi lebih tinggi (Wang dkk, 2016) (Yousefi dkk, 2018). Hasil penelitian (Yousefi dkk, 2018) mengenai efek *split injection* bahan bakar pilot pada mesin diesel DF (gas alam-solar) di bawah beban rendah menunjukkan bahwa semakin pendek *dwell time* menyebabkan meningkatnya tekanan puncak di dalam silinder, *heat release rate* (HRR) dan emisi NOx. Sebaliknya semakin panjang *dwell time* menyebabkan penurunan tekanan di dalam silinder, penundaan pengapian (*ignition delay*) yang lebih lama dan penurunan emisi NOx. Hasil penelitian yang dilakukan oleh (Semin dkk, 2019) juga berpendapat sama peningkatan performa dapat terjadi karena jarak injeksi yang terjadi antara injeksi awal dan injeksi yang kedua karena jarak tersebut mempengaruhi pencampuran udara pada pembakaran.



Gambar 2.1 Skema dwell time dan ISR (Sindhu dkk., 2018)

*Injection split ratio* (ISR) juga berpengaruh dalam strategi ini. ISR merupakan perbandingan massa injeksi pertama terhadap total injeksi masing-masing injektor (Ma dkk, 2015). Formula ISR dapat dilihat pada rumus di bawah ini, dimana PW1 merupakan injeksi bahan bakar pertama dan PW2 injeksi bahan bakar ke dua. Efek variasi ISR dapat dilihat dalam penelitian (Yu dkk., 2017) yang melakukan analisa numerik mengenai efek dua tahap interval injeksi dan proporsi injeksi pertama pada karakteristik pembakaran dan emisi mesin diesel. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa dengan peningkatan interval injeksi dua tahap emisi NOx dan jelaga menurun.

$$ISR = \frac{PW1}{PW1 + PW2}$$

Strategi *split injection* dapat memberikan performa yang baik dan emisi gas buang yang rendah. Karena *split injection* dapat meningkatkan campuran bahan bakar gas/ solar pada mesin diesel berbahan bakar ganda lebih baik (XiangRong LI, dkk. 2016). Optimalisasi timing *split injection* juga dapat menghasilkan pengurangan pada kenaikan tekanan dengan tidak memberikan efek kerugian yang signifikan pada efisiensi termal hal ini dapat ditunjukkan pada tingkat emisi dan jelaga yang masih dalam batas ramah

lingkungan (Ma dkk, 2015). Hal ini menunjukkan bahwa strategi *split injection* sangat baik jika diaplikasikan pada mesin berbahan bakar ganda.

## **2.9 Studi Pada Penelitian Sebelumnya**

Mesin bahan bakar ganda adalah teknologi yang sedang banyak diteliti untuk penggunaan yang lebih efisien. Salah satu yang sedang diteliti adalah cara untuk mengurangi emisi. *Split injection* adalah strategi yang efisien untuk mengurangi emisi dan meningkatkan performa.

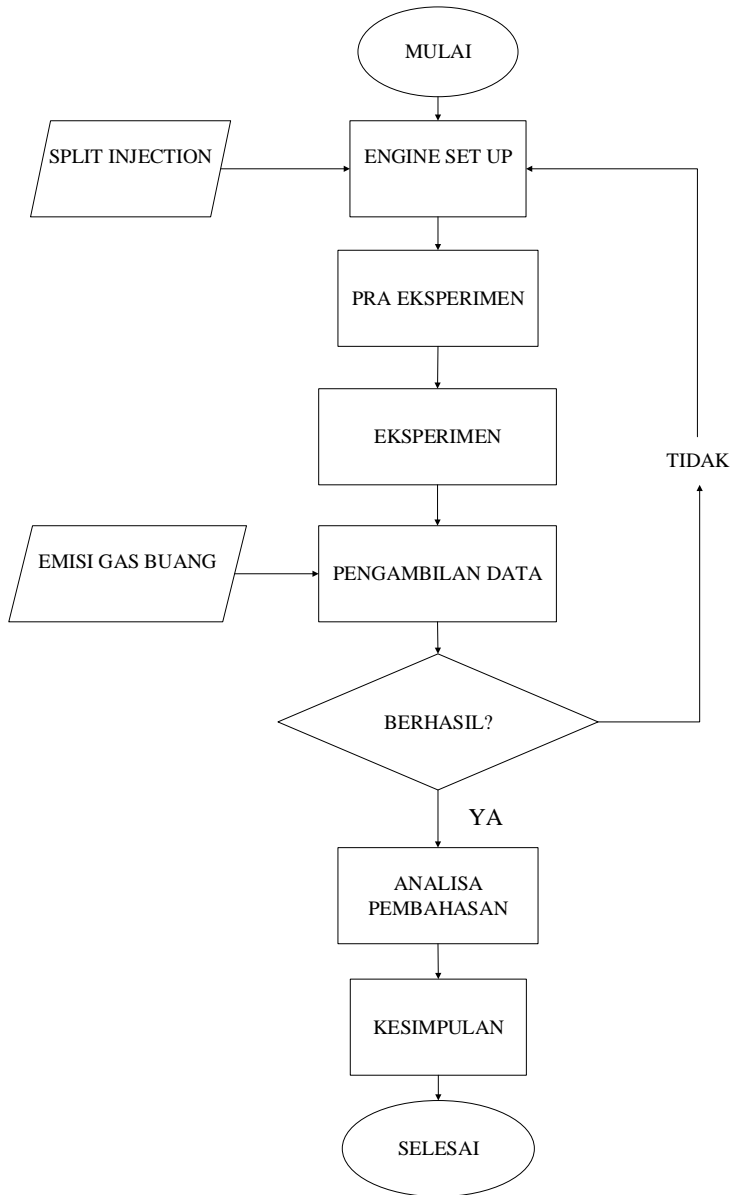
Pada penelitian yang dilakukan oleh Donghui Qi dkk (2011) telah melakukan beberapa strategi untuk mengurangi emisi. Penelitian dilakukan dengan melakukan penambahan EGR dan melakukan perubahan variasi di *injection timing* pada mesin berbahan bakar ganda dengan *split injection*. Penelitian tersebut menghasilkan dengan menambah kadar EGR maka akan mengurangi NOx akan tetapi menambah PM dan hasil yang sama juga didapatkan saat melakukan perubahan *injection timing*.

Selain itu beberapa peneliti juga telah melakukan studi yang berbeda. Studi yang dilakukan oleh Guo dkk (2017) dengan memvariasikan ratio injeksi memberikan hasil pada pengurangan emisi HC. Kemudian pengujian dilanjutkan oleh Wu dkk (2017) yang merubah bentuk ruang pada piston dengan menggunakan variasi ratio yang sama menghasilkan hasil yang sama dengan meningkatnya NOx.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

### BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan. Dengan beberapa batasan masalah yang sudah dijelaskan sebelumnya. Tahap tahap dari penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

Pada eksperimen ini terfokus pada pengaruh gas split injection pada emisi gas buang. Berikut data mesin dan pada Gambar 3.2 yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 3.2 Yanmar TF 85 MH

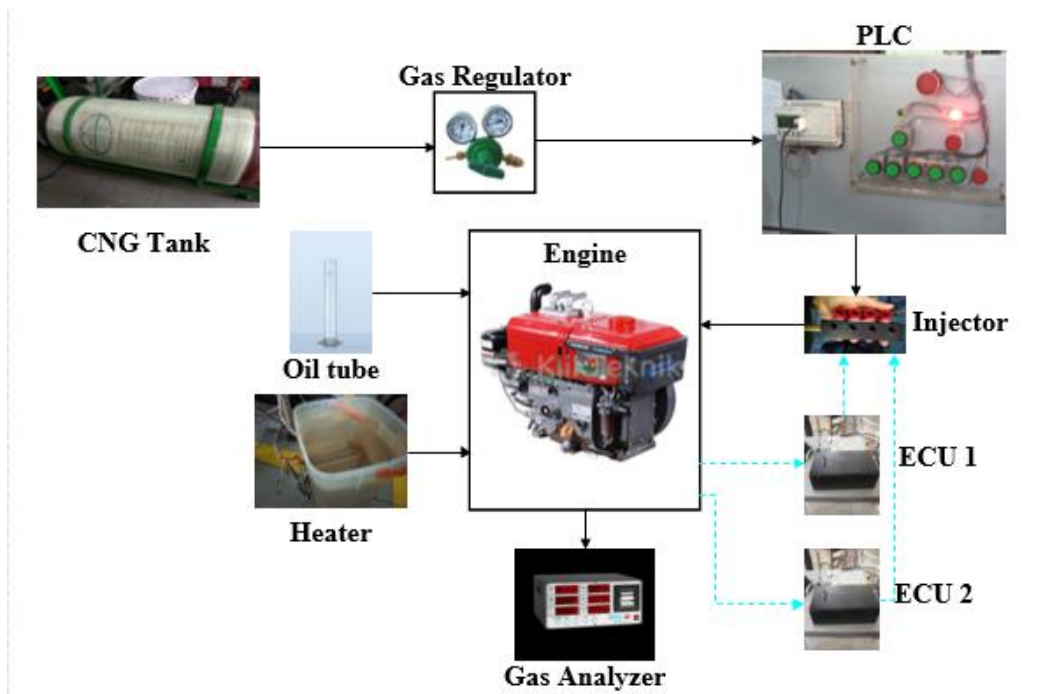
Engine (four stroke cycle)	: Yanmar TF 85 MH
Number of cylinders	: 1
Bore x Stroke	: 85 mm X 87 mm
Displacement	: 493 cc
Compression Ratio	: 18:1
Max. Engine speed at full load	: 2200 RPM
Continous Power Output	: 7.5 kW
Specific Fuel Consumption	: 229.31 gr/kWh

Pada penelitian ini ditempuh dalam beberapa tahap untuk mendapatkan hasil penelitian yang diinginkan. Dalam bagian metodologi ini telah dikategorikan sesuai dengan materi yang dilakukan sehingga penelitian ini dapat dikerjakan dengan efisien. Penjelasan secara detail dari tahapan metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Engine Set-up
2. Pra eksperimen
3. Eksperimen Pengambilan Data
4. Analisa Dan Pembahasan
5. Pembuatan Paper



### 3.1 Engine Set Up



Gambar 3.3 Skema Pengujian

*Engine set-up* adalah melakukan modifikasi pada engine sehingga dapat dilakukan pengujian seperti yang diinginkan. *Engine set up* yang dilakukan dengan mengubah mesin diesel konvensional menjadi mesin diesel berbahan bakar ganda. Setelah itu memodifikasi kembali mesin sehingga dapat melakukan *gas split injection*, hal tersebut dilakukan dengan cara menambah *injector* gas yang telah dimodifikasi agar bisa melakukan *gas split injection*. Pada Gambar 3.3 merupakan *engine set up* yang digunakan dalam eksperimen. Berikut tahap tahap yang harus dilakukan:

1. Pengaturan mesin bisa beroperasi pada kondisi operasional diesel konvensional atau operasional mesin bahan bakar ganda.
2. Pembuatan jalur input gas yang berada pada saluran *intake* udara masuk seperti pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 *Intake Cleaner*

3. Pemasangan *gas injector manifold* (Gambar 3.4) dipasang sedekat mungkin dengan saluran *intake* udara masuk menuju ruang bakar seperti pada Gambar 3.5.

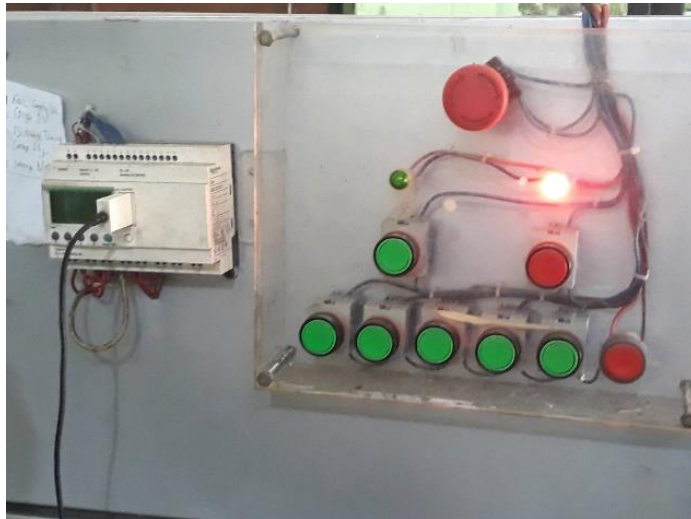


Gambar 3.5 *Injector Manifold*



Gambar 3.6 Pemasangan *Gas Injector Manifold* pada *Intake Cleaner*

4. Penggunaan PLC (Programable Logic control) dibutuhkan untuk pengaturan beban dan *safety control* seperti Gambar 3.7.



Gambar 3.7 PLC

5. Untuk mengontrol *gas injector manifold* dilakukan dengan 2 *Electronic Control Unit (ECU)* pada Gambar 3.8. Agar dapat dilakukan *gas split injection* untuk injeksi gas kedalam saluran *intake* udara masuk.



Gambar 3.8 Electric Control Unit

6. Pemsangan sensor Gambar 3.9 untuk ECU pada mesin. Untuk memberi informasi tentang putaran mesin.



Gambar 3.9 Sensor RPM

7. Mesin dikopel dengan generator untuk menghasilkan daya listrik yang digunakan untuk pembebanan pada *heater* Gambar 3.10 dengan beban 25% sampai beban 100%.



Gambar 3.10 Beban *Heater*

8. Penyiapan tabung CNG pada Gambar 3.11 untuk disambungkan ke PLC untuk menyimpan bahan bakar gas.



Gambar 3.11 Tabung CNG

9. Pemasangan regulator Gambar 3.12 pada tabung untuk mengatur tekanan gas yang keluar dari tabung menuju mesin. Karena tekanan didalam tabung pada saat penuh yaitu 200 bar. Guna regulator adalah mengurangi tekanan tersebut menjadi 3 bar.



Gambar 3.12 Regulator Gas

10. Kemudian pemasangan *flow meter* (Gambar 3.13) untuk mengatur aliran yang masuk pada mesin



Gambar 3.13 Flow Meter

### 3.2 Penyiapan Instrumen Pengukuran

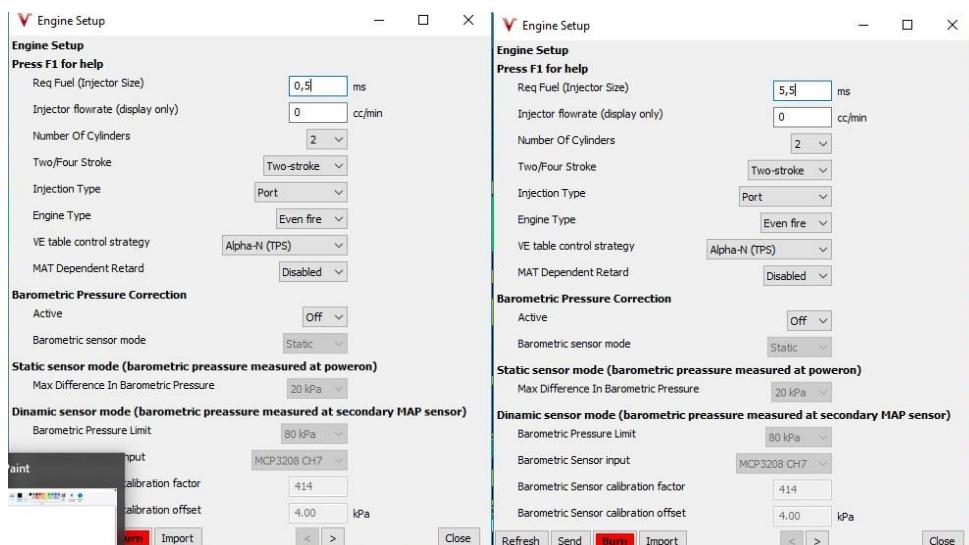
Pada tahap ini dijelaskan cara pengambilan data *gas split injection*. Untuk melakukan *split injection* pengaturan injeksi dilakukan dengan aplikasi Vemstone. Pada

aplikasi ini dapat mengatur durasi injeksi gas dan dapat juga mengatur *injection timing* dari injeksi gas. Sehingga masukan gas dapat diatur secara optimal. Pada penelitian ini input injeksi awal masuknya gas pada  $260^\circ$  bTDC diikuti oleh variasi jarak injeksi kedua yaitu  $244^\circ$  dan  $230^\circ$  bTDC yang diatur dalam aplikasi vemstune. Kemudian memvariasikan injeksi gas sehingga dapat menyamakan persentase energi gas yang digunakan pada setiap titik percobaan. Berikut adalah proses pengaturan pada aplikasi Vemstune.

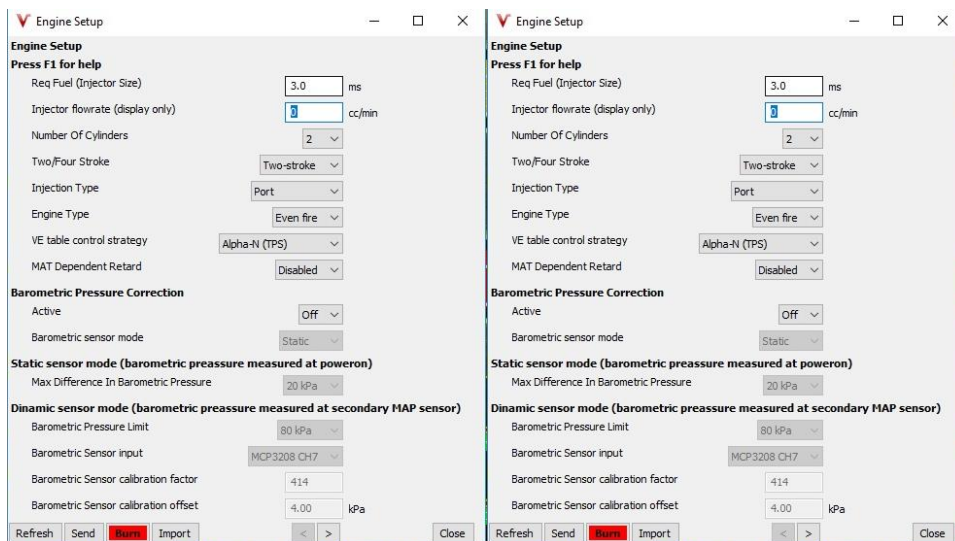
Tabel 3.1 Pengaturan *Pulse Width Gas Split Injection*

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

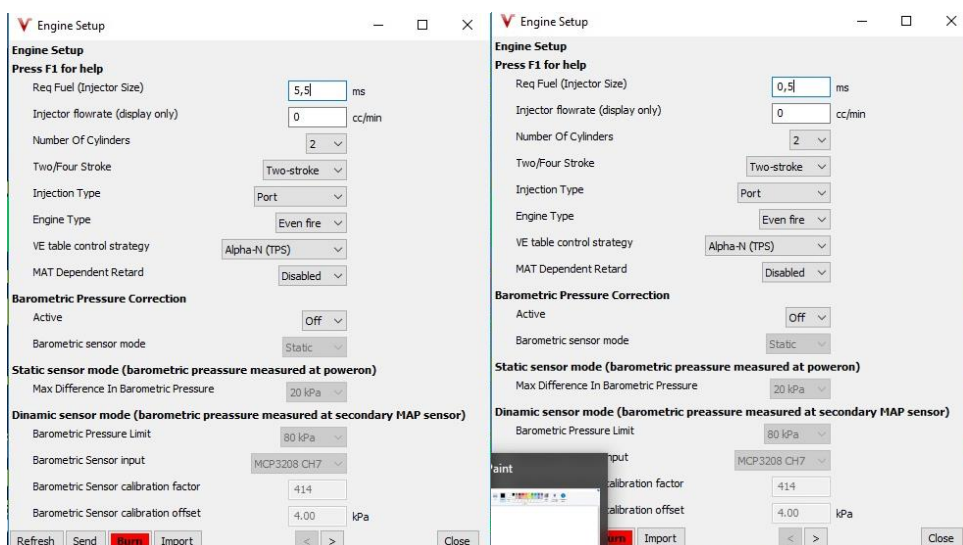
1. Pengaturan gas *split injection* dilakukan dengan cara membagi *pulse width*. *Pulse width* adalah pengaturan injeksi lamanya injector pada *manifold* terbuka sehingga banyaknya gas yang masuk bias diatur. Pada Tabel 3.1 ini dijelaskan bagaimana pembagian *pulse width* pada ECU. Contoh pengaturan pada aplikasi vemstune dijel pada Gambar 3.14 sampai 3.16



Gambar 3.14 Pengaturan untuk Injeksi Gas ISR 0,25



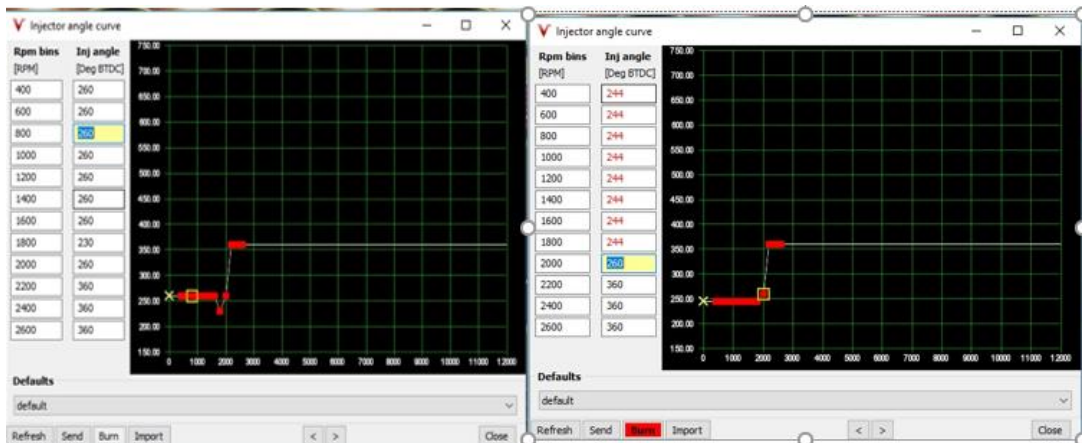
Gambar 3.15 Pengaturan untuk Injeksi Gas ISR 0,50



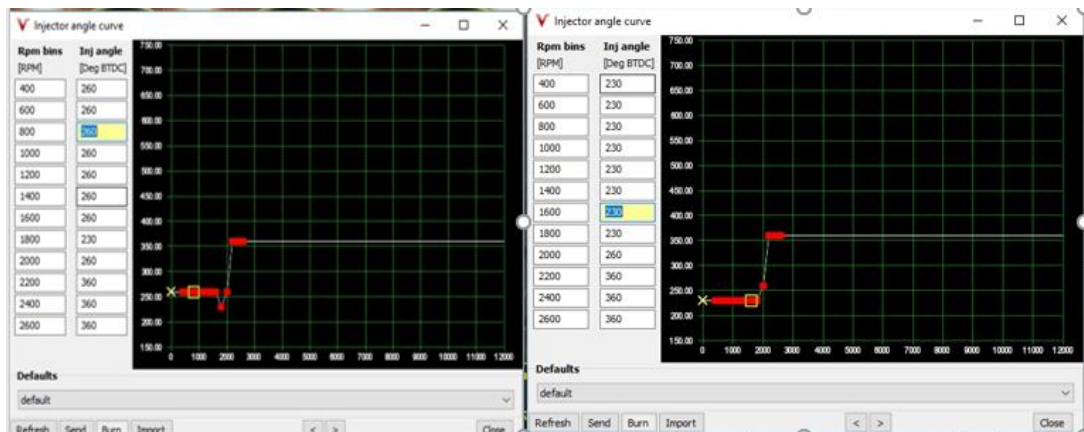
Gambar 3.16 Pengaturan untuk Injeksi Gas ISR 0,75

2. Kemudian pada Gambar 3.17 sampai Gambar 3.18 dibawah ini jelaskan pengantuan input *injection timing* gas dan pemberian jarak injeksi pertama dan kedua pada *gas split injection*. Untuk melakukan *gas split injection* waktu injeksi gas harus diatur agar dapat memberikan jarak injeksi pertama dan injeksi kedua hal ini diatur dengan injeksi pertama diinput timing  $260^{\circ}$ bTDC setelah itu diikuti oleh waktu injeksi gas yang kedua dengan  $245^{\circ}$ bTDC dan  $230^{\circ}$ CA bTDC.





Gambar 3.17 Pengaturan input *Injection Timing* Gas (260;244)



Gambar 3.18 Pengaturan input *Injection Timing* Gas (260;230)

3. Kemudian untuk menyiapkan untuk pengujian emisi pada *exhaust* diberi tambahan pipa untuk memudahkan teknisi mengukur emisi seperti Gambar 3.19.



Gambar 3.19 *Exhaust Gas*

4. Pemasangan sensor *gas analyser* Gambar 3.20 untuk pembacaan kadar emisi gas buang pada mesin.



Gambar 3.20 *Sensor Gas Analyzer*

### **3.3 Investigasi Emisi pada Mesin Bahan Bakar Ganda**

Pada penelitian ini adalah menginvestigasi emisi gas buang yang dikeluarkan oleh mesin berbahan bakar ganda. Setelah mendapatkan hasil dari pengujian emisi gas buang dari mesin berbahan bakar ganda selanjutnya dibahas untuk mendapatkan data awal sebagai pembanding dari *gas split injection*.

### 3.4 Investigasi Efek *Gas Split Injection* pada Emisi Mesin Bahan Bakar Ganda

Pada tahap ini setelah mendapatkan hasil emisi dari mesin berbahan bakar ganda dan setelah melakukan percobaan *gas split injection* yang telah dijelaskan pada tahapan sebelumnya emisi gas buang dibandingkan. Setelah membandingkan keduanya kemudian dilakukan pembahasan pada bab berikutnya.

### 3.5 Eksperimen Pengambilan Data

Hasil yang akan diperoleh merupakan data setelah melakukan eksperimen analisa terhadap emisi gas buang pada mesin berbahan bakar ganda. Yang divariasi jarak penginjeksian gas pertama dengan gas kedua di rpm 2000 yang diatur dengan waktu injeksi *gas split injection* pada 260°bTDC diikuti dengan injeksi selanjutnya 244° dan 230°bTDC dan dilakukan pada setiap ISR dari 0,25 sampai 0,75. Lebih jelasnya bisa dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Metodologi Penelitian (Emisi Gas Buang).

Fuel Split	RPM	Beban (%)	ISR	Injeksi gas pertama (CA bTDC)	Injeksi gas kedua (CA bTDC)
CNG	2000	25	0,25	260 °	244 °
		50	0,5		230 °
		75	0,75		
		100			

Untuk pengambilan data emisi dilakukan dengan menggunakan *gas analyzer* Gambar 3.21 untuk mendapatkan nilai emisi yang dihasilkan. Pada penelitian ini eksperimen dilakukan pada tiap variasi yang telah disebutkan diatas setelah diperoleh nilai emisi maka data tersebut dibandingkan pada tahapan berikutnya.



Gambar 3.21 *Gas Analyzer* Stargas 898

### **3.6 Analisa Dan Pembahasan**

Pada penelitian ini analisa data yang dilakukan adalah pada emisi gas buang mesin diesel *Dual Fuel* Yanmar TF 85 MH *Direct Engine* berbahan bakar solar DEX - CNG dengan penambahan dengan pengaturan *gas split injection*.

## BAB 4

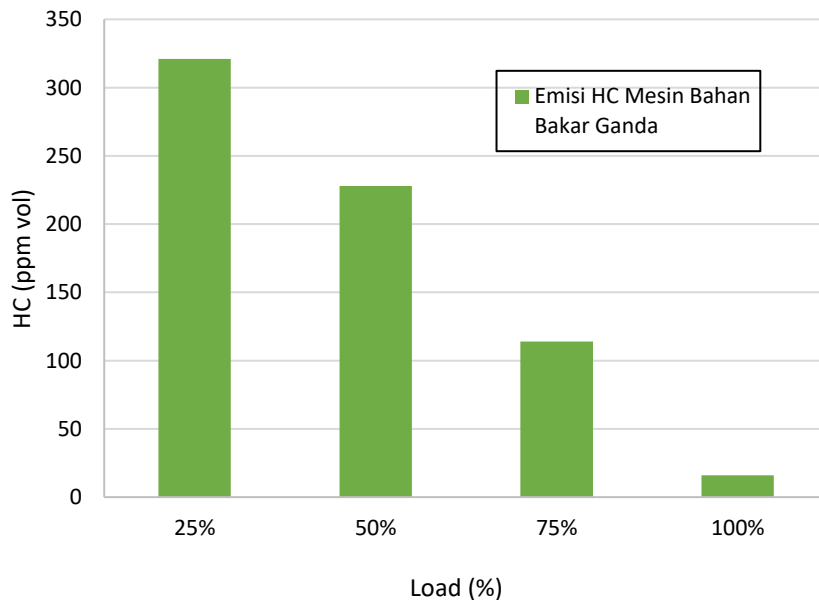
### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan tentang hasil pengujian emisi gas buang dari *gas split injection*. Pada eksperimen ini membandingkan antara hasil emisi gas buang dari mesin bahan bakar ganda *single injection*, *gas split injection* (260;244), dan *gas split injection* (260;230). Kemudian masing-masing dilakukan variasi ISR yang berbeda yaitu 0,25;0,5;0,75. Adapun pokok pembahasan ini adalah emisi gas buang yaitu HC, CO, dan NOx.

#### 4.1 Hasil Uji Emisi pada Mesin Bahan Bakar Ganda

Pada tahap ini dijelaskan emisi yang terjadi setelah mesin diesel konvensional diubah menjadi mesin bahan bakar ganda. Pada tahap berikutnya dibandingkan dengan hasil dari *gas split injection*. Hasil dari pengujian emisi dijelaskan dalam Grafik 4.1; 4.2 dan 4.3

##### 4.1.1 Emisi HC pada Mesin Bahan Bakar Ganda

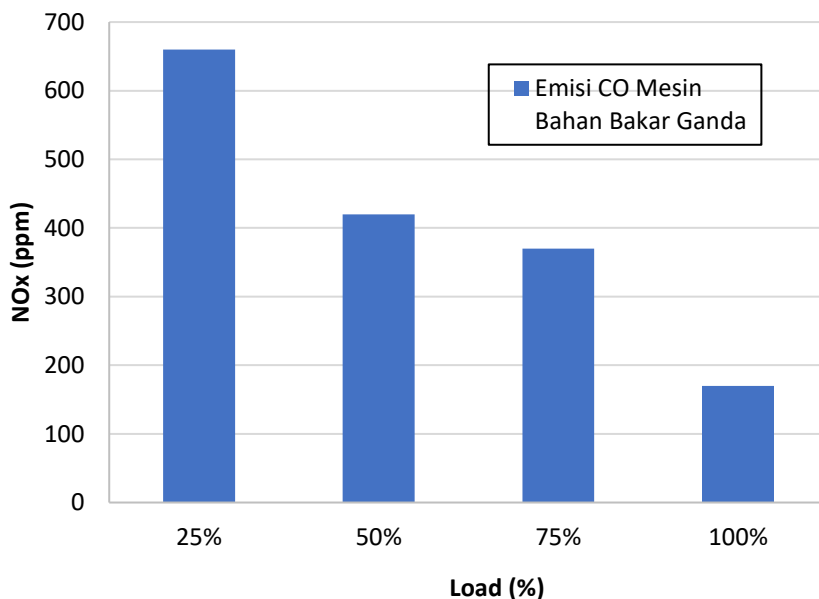


Grafik 4.1 Grafik Emisi HC pada Mesin Bahan Bakar Ganda

Grafik diatas menunjukkan bahwa semakin bertambahnya beban pada mesin bahan bakar ganda maka emisi HC menjadi berkurang. Pada beban 25% memiliki nilai HC 321 ppm. Sedangkan, pada beban 50% Watt memiliki nilai emisi HC 228 ppm. Emisi HC pada beban 75% Watt dengan nilai 114 ppm. Sedangkan pada beban 100% Watt memiliki nilai kadar HC 16 ppm.

HC yang terbentuk hasil emisi dari bahan bakar yang tidak terbakar, dimana apabila terdapat bahan bakar yang tidak terbakar maka pembakaran tersebut merupakan hasil dari pembakaran yang tidak sempurna. Pembakaran sempurna menghasilkan performa mesin yang baik sehingga HC tidak terbentuk. Hal ini membuktikan bahwa semakin bertambahnya beban maka pembakaran yang terjadi semakin sempurna sehingga partikel HC ikut terbakar dan tidak cenderung keluar ke udara bebas.

#### 4.1.2 Emisi CO pada Mesin Bahan Bakar Ganda

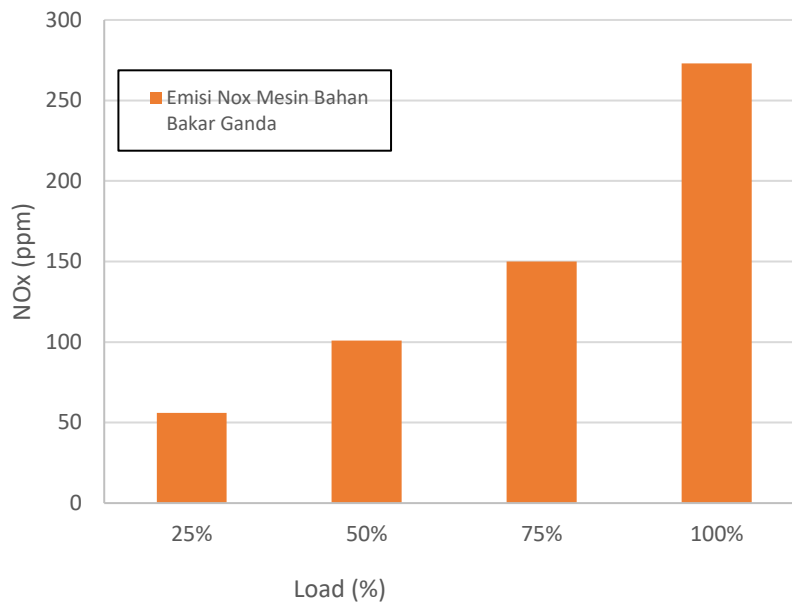


Grafik 4.2 Grafik Emisi CO pada Mesin Bahan Bakar Ganda

Grafik diatas adalah hasil pengujian emisi kadar CO pada mesin bahan bakar ganda. Dari grafik dapat dilihat *trendline* dari emisi CO yang semakin menurun. Dilihat dari nilai awal 660 ppm pada beban 25% . Kemudian pada emisi CO bernilai 420 ppm pada beban 50%. Kemudian kadar CO dengan nilai 370 ppm pada beban 75%. Pada beban 100% CO menjadi 170 ppm.

Emisi CO yang terbentuk adalah akibat pembakaran yang kurang sempurna sehingga CO tidak terbakar dan tidak berubah menjadi CO<sub>2</sub>. Pada pembakaran sempurna memiliki pembakaran yang baik sehingga CO tidak terbentuk dan lebih cenderung berubah menjadi CO<sub>2</sub>. Dari Grafik bisa disimpulkan bahwa pembakaran yang terjadi akibat penambahan beban akan semakin sempurna. Hal ini menyebabkan partikel CO cenderung menurun pada mesin bahan bakar ganda akibat penambahan beban.

### 4.1.3 Emisi NOx pada Mesin Bahan Bakar Ganda



Grafik 4.3 Grafik Emisi CO Pada Mesin Bahan Bakar Ganda

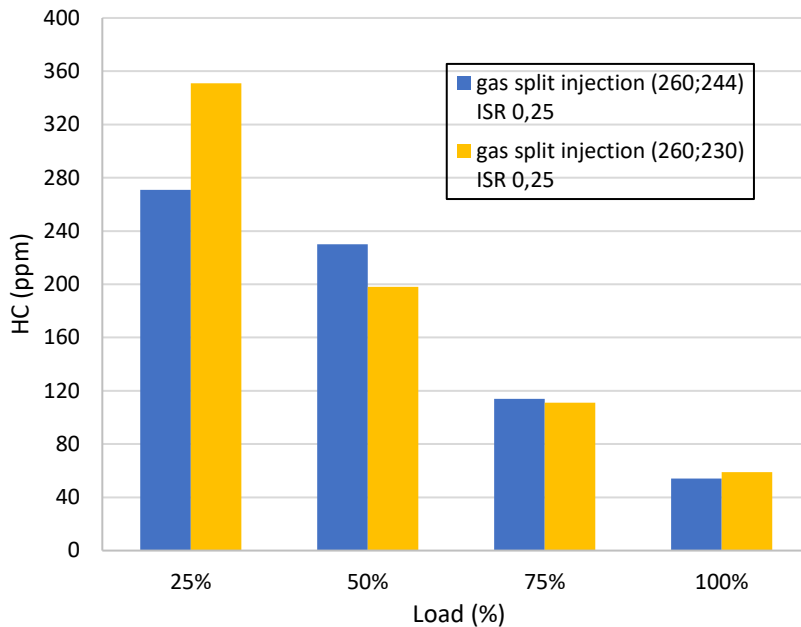
Grafik diatas adalah hasil pengujian kadar emisi pada NOx mesin bahan bakar ganda. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa *trendline* semakin bertambahnya beban maka semakin naik kadar emisi NOx yang terjadi. Pada saat beban 25% kadar emisi NOx bernilai 56 ppm. Pada beban 50% nilai NOx naik menjadi 101 ppm. Setelah itu pada beban 75% kadar NOx menjadi 150 ppm. Kemudian pada beban 100% menjadi 273 ppm.

NOx yang terjadi akibat adanya kenaikan suhu saat terjadinya pembakaran pada ruang bakar. Sehingga hal ini berpengaruh terhadap naiknya efisiensi termal pada mesin. Kenaikan suhu ini mengakibatkan kenaikan pada partikel NOx. Hal ini menunjukkan bahwa yang terjadi pada mesin bahan bakar ganda yang ditunjukkan oleh Grafik 4.3 bahwa semakin bertambahnya beban maka semakin panas suhu pembakaran pada ruang bakar mesin bahan bakar ganda sehingga terbentuklah NOx sebagai emisi gas buang.

## 4.2 Emisi Gas Split Injection pada ISR 0,25

Pada tahap ini membahas tentang emisi gas buang pada *gas split injection* yang telah didapat. Dari nilai kadar emisi gas buang yang didapat tersebut, setelahnya dibandingkan dengan hasil emisi gas buang mesin bahan bakar ganda *single injection*. Data yang dibahas berikut adalah *gas split injection* (260;244) dengan *gas split injection* (260;230) pada ISR 0,25.

#### 4.2.1 Emisi HC *Gas Split Injection* pada ISR 0,25



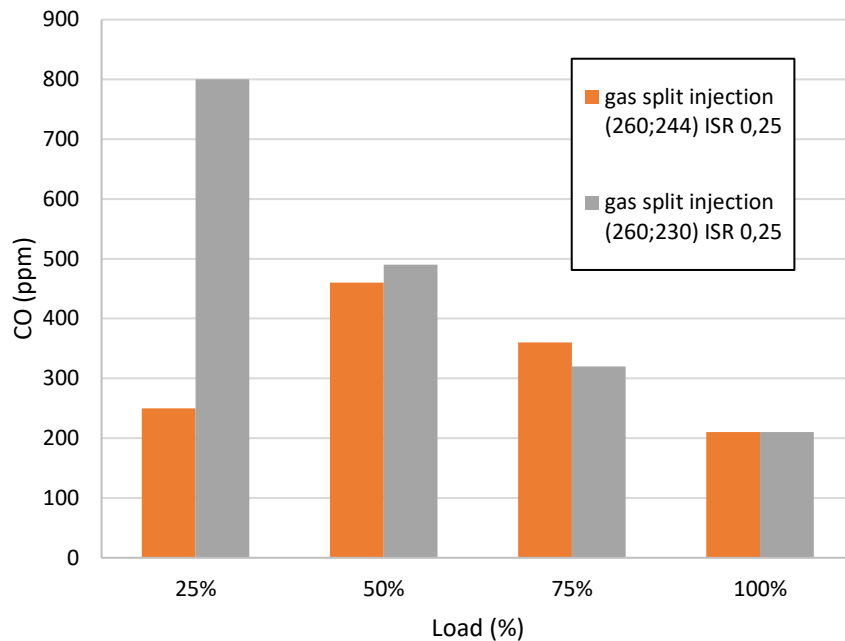
Grafik 4.4 Grafik Emisi HC *Gas Split Injection* ISR 0,25

Grafik diatas menjelaskan hasil dari eksperimen *gas split injection* pada emisi gas buang pada ISR 0,25. Hasil diatas menunjukkan *trendline* bahwa semakin tinggi beban m semakin sedikit kadar HC yang didapat. Pada grafik diatas menunjukkan perbedaan HC pada tiap variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) pada beban 25% sampai 100% secara berturut-turut menunjukkan kadar HC yang bernilai 271 ppm, 230 ppm, 114 ppm, 54 ppm. Kemudian pada variasi *gas split injection* (260;230) kadungan HC yang keluar sebagai emisi secara berturut-turut dari beban 25% hingga 100% memiliki nilai 351 ppm, 198 ppm, 111 ppm, dan 59 ppm.

Dari penjabaran nilai diatas bisa dilihat bahwa terdapat perbedaan kadar HC anantara *split injection* (260;244) dengan *gas split injection* (260;230). Grafik diatas menunjukkan bahwa perbedaan terbesar dengan presentasi perbedaan hingga 23% terjadi pada beban 25% dengan variasi *gas split injection* (260;244) yang memiliki kadar HC lebih sedikit. Sedangkan perbedaan terkecil dengan presentase perbedaan sebesar 3% terjadai pada beban menengah yaitu beban 75%. Hal ini menunjukkan bahwa pada ISR 0,25 dengan variasi *gas split injection* (260;244) memiliki hasil pembakaran yang lebih baik sehingga partikel HC dapat ikut terbakar sehingga dapat mengurangi kadar HC secara signifikan.



#### 4.2.2 Emisi CO *Gas Split Injection* pada ISR 0,25

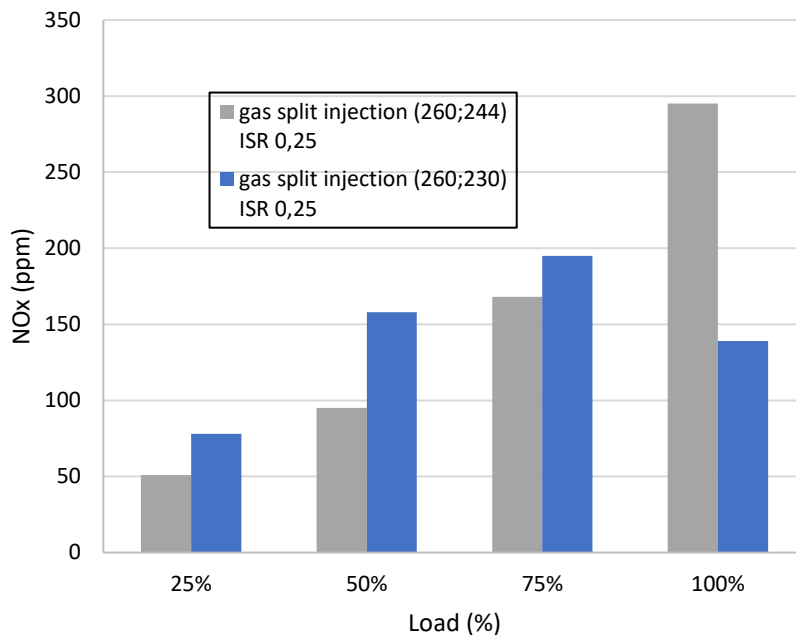


Grafik 4.5 Grafik Emisi CO *Gas Split Injection* ISR 0,25

Grafik diatas menunjukkan hasil dari eksperimen *gas split injection* pada emisi gas buang pada ISR 0,25. Partikel yang dibahas pada grafik diatas adalah partikel CO disebutkan dalam satuan (ppm). Grafik diatas menunjukkan *trendline* semakin bertambahnya beban maka semakin menurun kadar CO pada hasil pembakaran. Pada grafik diatas menunjukkan perbedaan antara kedua variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) memiliki kandungan CO secara berturut turut dari beban 25% sampai beban 100% memiliki nilai 250 ppm, 460 ppm, 360ppm, 210 ppm. Kemudian pada variasi *gas split injection* (260;230) memiliki kandungan CO secara berturut-turut memiliki mulai dai beban 25% hingga beban 100% adalah 800 ppm, 490 ppm, 320 ppm, 210 ppm.

Pada hasil diatas menunjukkan perbedaan terbesar adalah pada variasi *gas split injection* (260;244) yang terjadi pada beban rendah yaitu 25% dengan presentase perbedaan sebesar 69%. Sedangkan presentase terkecil ditunjukkan pada beban 100% dengan hasil kadar CO yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa pada ISR 0,25 pembakaran yang terbaik adalah pada titik tersebut dengan variasi *gas split injection* (260;244) pada sehingga emisi CO lebih sedikit.

### 4.2.3 Emisi NOx Gas Split Injection pada ISR 0,25



Grafik 4.6 Grafik Emisi NOx Gas Split Injection ISR 0,25

Pada Grafik 4.6 ditunjukkan hasil pengujian emisi dari gas split injection pada ISR 0,25. Pada grafik diatas situnjukkan trendline bahwa semakin besar beban maka semakin banyak kadar NOx dalam satuan (ppm) yang terbentuk. Pada grafik diatas memiliki nilai yang berubah ubah tiap variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) dari beban 25% hingga beban 100% memiliki nilai secara berturut-turut yaitu 51 ppm, 95ppm, 168 ppm, 295 ppm. Pada variasi *gas split injection* (260;230) memiliki hasil nilai dari beban 25% hingga 100% memiliki nilai 78 ppm, 158 ppm, 195 ppm, 139 ppm.

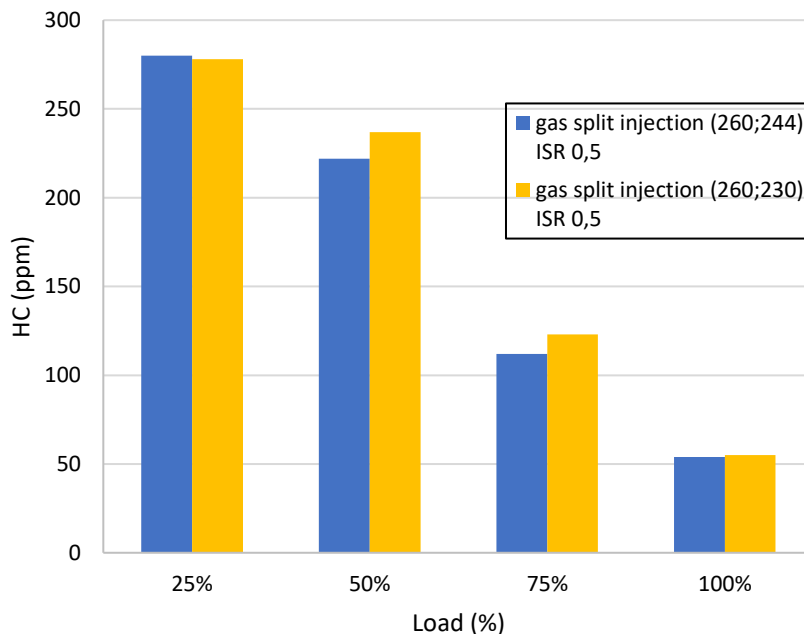
Pada grafik diatas ditunjukkan bahwa pada beban 25% sampai beban 75% variasi *gas split injection* (260;244) Menunjukkan kadar emisi lebih baik namun pada beban 100% terjadi kebalikannya yaitu pada variasi *gas split injection* (260;230) kadar NOx jauh lebih kecil hingga dapat menurunkan NOx sebesar 53 %. Jika dilihat dari persentase tersebut menyatakan bahwa pada beban 100% variasi *gas split injection* (260;230) dapat menurunkan emisi NOx lebih baik dari pada variasi *gas split injection* (260;244). Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pembakaran yang lebih baik ketika jarak dwelling time semakin jauh. Sehingga diruang bakar tidak terjadi kenaikan suhu yang menyebabkan terbentuknya partikel NOx.

### 4.3 Emisi Gas Split Injection pada ISR 0.5

Pada tahap ini membahas tentang emisi gas buang pada *gas split injection* yang telah didapat. Dari nilai kadar emisi gas buang yang didapat tersebut, setelahnya dibandingkan dengan hasil emisi gas buang mesin bahan bakar ganda *single injection*.

Data yang dibahas berikut adalah *gas split injection* (260;244) dengan *gas split injection* (260;230) pada ISR 0,5

#### 4.3.1 Emisi HC *Gas Split Injection* pada ISR 0,5

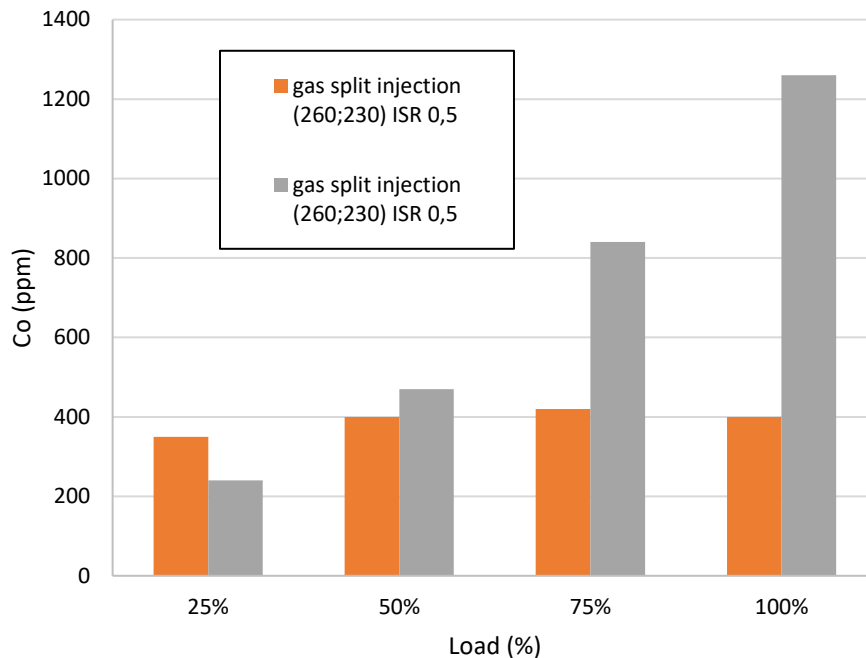


Grafik 4.7 Grafik Emisi HC *Gas Split Injection* ISR 0,5

Grafik diatas adalah grafik dari hasil eksperimen pada *gas split injection* terhadap emisi gas buang HC yang disebutkan dalam satuan (ppm). Dari grafik diatas dapat dilihat *trendline* dari kadar emisi HC yang semakin bertambahnya beban maka kadar partikel HC semakin berkurang. Pada eksperimen dengan ISR 0,5 ini setiap variasi memiliki nilai yang berbeda. Pada variasi *gas split injection* (260;244) secara berturut-turut dari beban 25% hingga beban 100% memiliki nilai sebesar 280 ppm, 222 ppm, 112 ppm, 54 ppm. Berbeda dengan variasi *gas split injection* (260;230) yang memiliki nilai dari beban 25% hingga 100% memiliki hasil 278 pp, 237 ppm, 123 ppm, 55 ppm.

Dari penjabaran nilai diatas didapat hasil perbedaan terbesar adalah pada beban menengah yaitu 50% dengan variasi *gas split injection* (260;244) memiliki persentase perbedaan sebesar 6%. Sedangkan perbedaan terkecil adalah pada beban 100% dengan variasi *gas split injection* (260;230) memiliki persentase perbedaan sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa pada ISR 0,5 kadar HC yang memiliki perbedaan tertinggi adalah pada variasi *gas split injection* (260;244). Ini dikarenakan partikel HC pada variasi *gas split injection* (260;244) ikut terbakar sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna dari pada *gas split injection* (260;230).

### 4.3.2 Emisi CO Gas Split Injection pada ISR 0,5

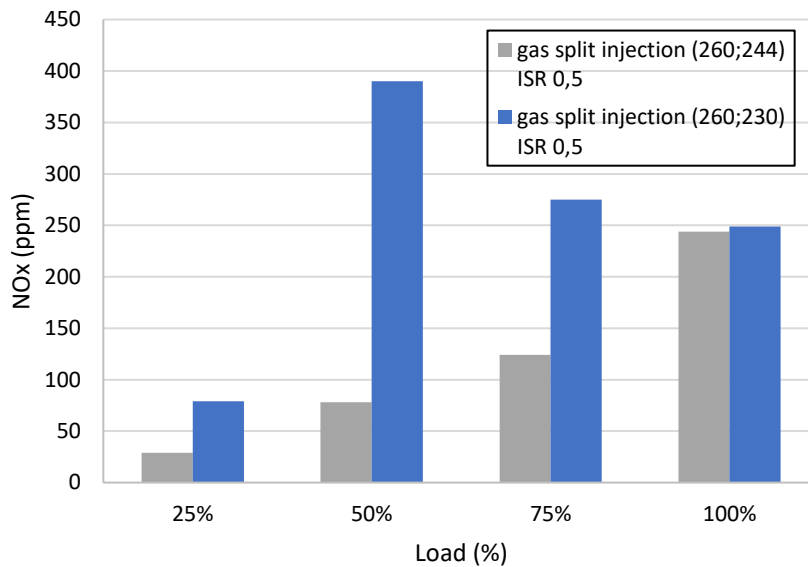


Grafik 4.8 Grafik Emisi CO Gas Split Injection ISR 0,5

Grafik diatas didapat dari pengujian emisi gas buang partikel CO dalam satuan (ppm) pada *gas split injection* dengan ISR 0,5. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada ISR 0,5 pada variasi *gas split injection* (260;244) kadar CO cenderung konstan dengan nilai dari beban 25% hingga beban 100% secara berturut-turut adalah 350 ppm, 400 ppm, 420 ppm, 400 ppm. Namun, pada variasi *gas split injection* (260;230) pembakaran yang terjadi semakin tidak sempurna pada setiap kenaikan beban dengan nilai dari beban 25% hingga beban 100% secara berturut-turut bernilai 240 ppm, 470 ppm, 870 ppm, dan 1260 ppm.

Hal ini dapat dilihat dari kenaikan partikel CO yang didapat semakin tinggi pada setiap kenaikan beban. Hal ini menandakan bahwa pada ISR 0,5 partikel CO tidak berubah menjadi CO<sub>2</sub> sehingga kadar partikel CO semakin naik pada setiap kenaikan beban. Darisini bisa dilihat bahwa variasi terbaik pada ISR 0,5 adalah pada variasi *gas split injection* (260;244) karena tidak memberikan kenaikan partikel CO sehingga dapat diartikan pembakaran lebih sempurna dari pada *gas split injection* (260;230).

### 4.3.3 Emisi NOx Gas Split Injection pada ISR 0,5



Grafik 4.9 Grafik Emisi NOx Gas Split Injection ISR 0,5

Grafik 4.9 adalah grafik NOx dalam satuan (ppm) mesin bahan bakar ganda setelah dilakukan modifikasi *gas split injection*. Pada grafik diatas ditunjukkan bahwa trendline bahwa semakin besar beban maka semakin besar kadar nilai NOx yang didapat. Grafik diatas menunjukkan perbedaan nilai tiap variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) dari beban 25% hingga 100% memiliki nilai secara berturut turut yaitu 29 ppm, 78 ppm, 124 ppm, dan 244 ppm. Kemudian pada variasi *gas split injection* (260;230) memiliki nilai berturut turut dari beba 25% hingga 100% adalah 79 ppm, 390 ppm, 275 ppm, 249 ppm.

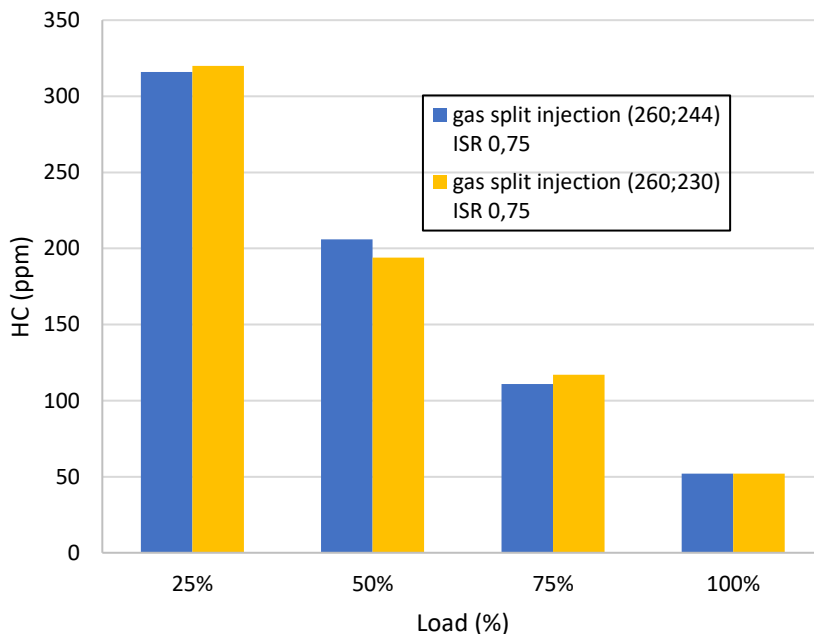
Pada variasi *gas split injection* (260;230) mendapatkan hasil yang fluktuatif. Dapat dilihat dari grafik pada saat bebna 50% terjadi kenaikan kadar NOx yang sangat tinggi hingga 390 ppm kemudian pelan pelan turun seiring bertambahnya beban. Hal ini bias diakibatkan oleh pada beban tersebut terjadi pembakaran yang tidak sempurna sehingga suhu diruang bakar menjadi panas dan akhirnya terbentuk partikel NOx. Pada variasi *gas split injection* (260;244) terlihat *trendline* yang sama seperti sebelumnya semakin bertambahnya beban maka semakin banyak NOx yang terbentuk. Dapat disimpulkan pada ISR 0,5 variasi paling optimum adalah pada *gas split injection* (260;244).

### 4.4 Emisi Gas Split injection pada ISR 0,75

Pada tahap ini membahas tentang emisi gas buang pada *gas split injection* yang telah didapat. Dari nilai kadar emisi gas buang yang didapat tersebut, setelahnya dibandingkan dengan hasil emisi gas buang mesin bahan bakar ganda *single injection*.

Data yang dibahas berikut adalah *gas split injection* (260;244) dengan *gas split injection* (260;230) pada ISR 0,75.

#### 4.4.1 Emisi HC *Gas Split Injection* pada ISR 0,75

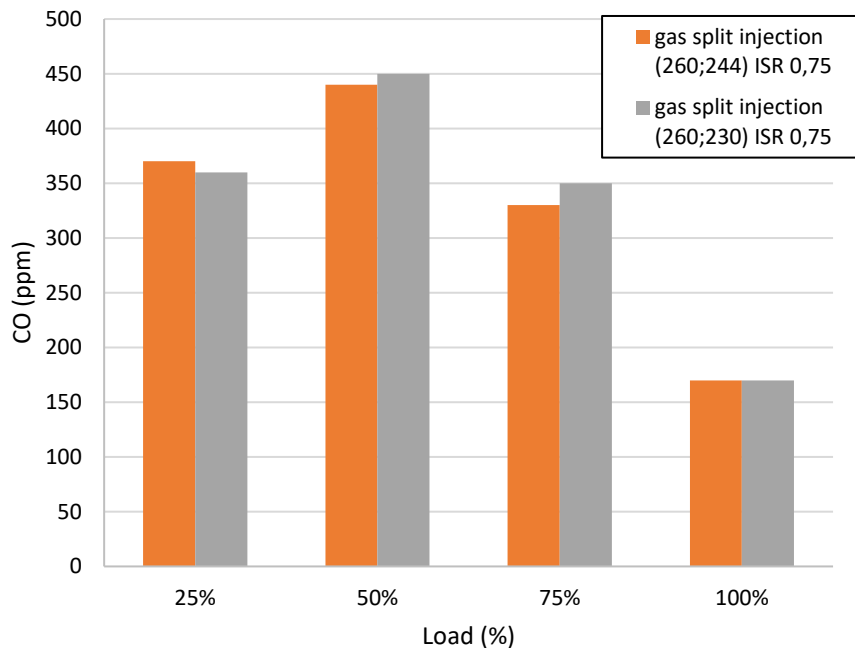


Grafik 4.10 Grafik Emisi HC *Gas Split Injection* 0,75

Grafik diatas adalah grafik dari partikel HC pada *gas split injection* di ISR 0,75. Dari grafik diatas dapat dilihat pada setiap kenaikan beban maka partikel HC semakin menurun. Penurunan ini terjadi pada tiap variasi pada variasi *gas split injection* (260;244) memiliki nilai secara berturut-turut dari beban 25% hingga 100% adalah 316 ppm, 206 ppm, 111 ppm, dan 52 ppm. Kemudian pada variasi *gas split injection* (260;230) dari beban 25% hingga 100% secara berturut-turut memiliki nilai 320 ppm, 194 ppm, 117 ppm, dan 52 ppm.

Pada ISR 0,75 ini variasi yang memiliki perbedaan persentase terbesar terhadap variasi lain adalah *gas split injection* (260;230) dengan jumlah persentase 6% pada beban 50%. Sedangkan pada beban 100% adalah persentase perbedaan terkecil karena hasil partikel HC yang didapat sama. pada ISR 0,75 ini partikel HC yang memiliki perbedaan terbesar adalah pada variasi *gas split injection* (260;244) di beban 50% hal ini menandakan bahwa pada variasi ini partikel HC cenderung ikut terbakar sehingga pada variasi ini bias dipastikan memiliki pembakaran yang lebih sempurna.

#### 4.4.2 Emisi CO Gas Split Injection pada ISR 0,75

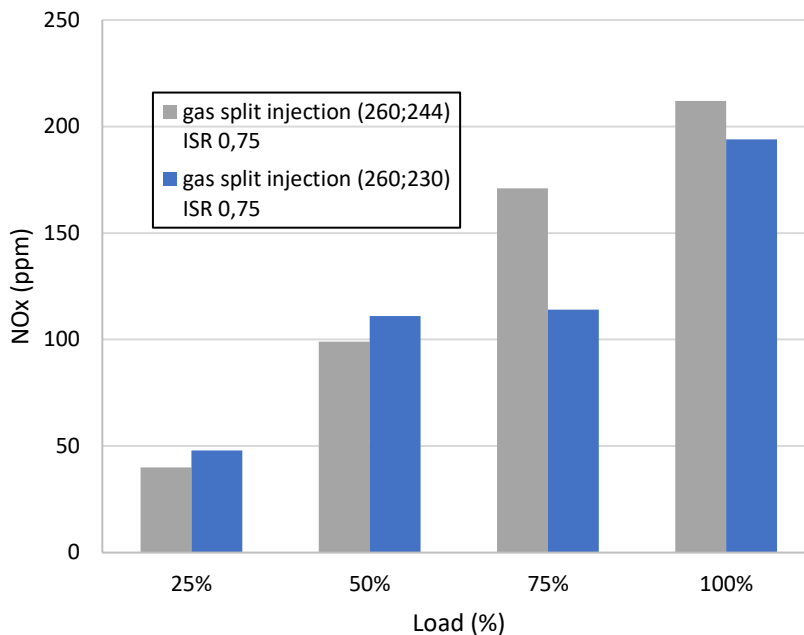


Grafik 4.11 Grafik Emisi CO Gas Split Injection 0,75

Grafik ini adalah grafik dari hasil eksperimen emisi gas buang pada *gas split injection* pada partikel CO dalam satuan (ppm). Pada grafik dapat dilihat bahwa hasil pengujian kadar CO memiliki *trendline* yang sama yaitu lebih cenderung menurun pada setiap penambahan beban. Pada grafik setiap variasi memiliki nilai yang berbeda. Dari variasi *gas split injection* (260;244) pada beban 25% hingga beban 100% memiliki nilai secara berturut-turut adalah 370 ppm, 440 ppm, 330 ppm dan 170 ppm. Sedangkan variasi *gas split injection* (260;230) memiliki nilai dari beban 25% hingga beban 100% memiliki nilai secara berturut-turut adalah 360ppm,450 ppm, 350 ppm dan 170 ppm.

Dari grafik diatas dapat dianalisa persentase perbedaan terbsesar adalah pada beban 75% dengan variasi *gas split injection* (260;244) memiliki perbedaan penurunan sebesar 6%. Sedangkan persentase perbedaan terkecil adalah pada beban 100% karena memiliki kadar CO yang sama. Pada ISR 0,75 ini kadar CO *gas split injection* (260;244) memiliki persentase penurunan terbesar hal ini menandakan bahwa karakteristik pembakaran yang sempurna sehingga partikel CO cenderung lebih rendah.

#### 4.4.3 Emisi NOx Gas Split Injection pada ISR 0,75



Grafik 4.12 Grafik Emisi NOx Gas Split Injection 0,75

Pada grafik diatas menunjukkan hasil eksperimen dari *gas split injection* pada emisi gas buang grafik diatas menunjukkan bahwa sama seperti sebelumnya semakin besar beban maka semakin besar NOx yang didapat. Nilai NOx dalam (ppm) memiliki nilai yang berbeda dalam tiap variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) dari beban 25% hingga beban 100% secara berturut turut memiliki nilai sebesar 40 ppm, 99 ppm, 171 ppm, dan 212 ppm. Kemudian pada variasi *gas split injection* (260;230) memiliki nilai secara berturut turut dari beban 25% hingga 100% memiliki nilai 48 ppm, 111 ppm, 114 ppm, dan 194 ppm.

Pada variasi *gas split injection* (260;244) pada beban rendah 25% sampai beban 50% memiliki hasil kadar NOx yang lebih kecil dari pada variasi *gas split injection* (260;230). Namun, pada beban tinggi 75% sampai 100% terjadi sebaliknya kandungan emisi NOx lebih rendah. Dapat dilihat penurunan paling besar adalah pada beban 75% yaitu variasi *gas split injection* (260;230) yang memiliki kadar NOx lebih kecil dengan persentase 33% terhadap variasi *dual fuel gas split injection* (260;244). Ini menandakan bahwa NOx pada *gas split injection* (260;244) di beban 75% lebih kecil akibat suhu pembakaran yang terjadi lebih kecil sehingga tidak terbentuk partikel NOx.

#### 4.5 Analisa Perbandingan Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection

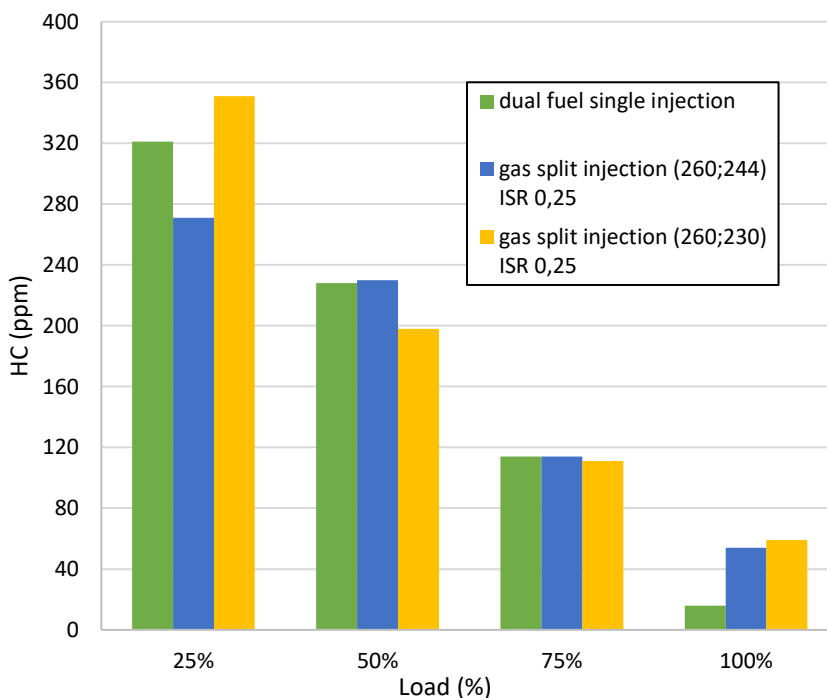
Pada tahap ini diberikan data perbandingan antara hasil emisi dari mesin bahan bakar ganda *single injection* dengan hasil pengujian emisi dari mesin bahan bakar ganda *gas split injection*. Pada penelitian ini *gas split injection* divariasikan pada jarak



penginjeksian gas pada injeksi gas pertama dan injeksi gas yang kedua sehingga menjadi *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230) kemudian variasi tersebut dilakukan pada setiap ISR. Setelah mendapatkan data dibandingkan antara *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Pada tahap ini juga dilihat apakah *gas split injection* dapat mengurangi emisi gas buang.

#### 4.5.1 Analisa Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,25

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi HC pada tiap variasi pada ISR 0,25. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.



Grafik 4.13 Grafik Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,25

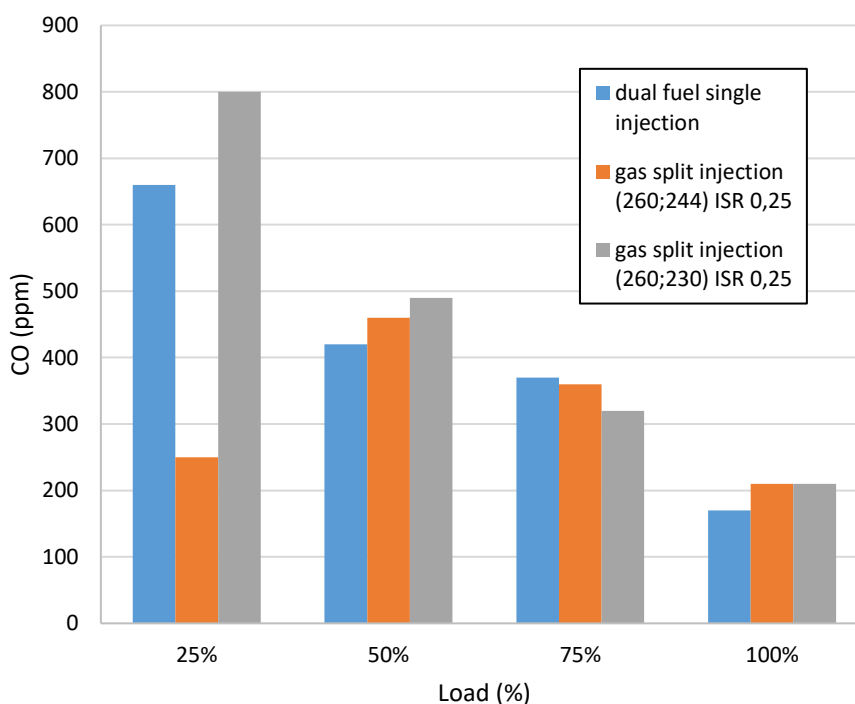
Grafik diatas menunjukkan data pengujian emisi pada tiap jarak waktu injeksi. Dari grafik diatas menunjukkan bahwa terjadi kenaikan dan penurunan emisi di tiap variasi. Pada data diatas dapat dilihat bahwa emisi HC ketika divariasikan *split injection* cenderung menurun pada beban rendah pada beban tinggi mengalami kenaikan. Dari data data emisi yang disebutkan dapat diambil titik penurunan paling signifikan dari tiap variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) pada beban 25% dari *single injection* yang memiliki nilai emisi 321 ppm dapat diturunkan menjadi 271 ppm dengan persentase

sebesar 16%. Pada *gas split injection* (260;230) pada beban 50% dari *single injection* yang memiliki nilai 228 ppm menjadi 198 ppm dengan persentase 13%.

Ini membuktikan bahwa teori dari penelitian (Yousefi dkk, 2018) bahwa penambahan waktu *dwelling time* dapat memberikan pengurangan kandungan emisi HC. Sehingga karakteristik pembakaran menjadi lebih baik yang diakibatkan oleh pencampuran udara dan bahan bakar gas yang baik. Dari hal tersebut mengakibatkan pembakaran menjadi sempurna sehingga kandungan HC ikut terbakar dan tidak keluar menjadi emisi gas buang. Namun, pada beban tinggi ISR 0,25 tidak berpengaruh untuk menurunkan HC. Karena pada beban tersebut terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Sehingga  $C_xH_x$  pembentuk bahan bakar tidak terbakar dengan sempurna sehingga menyisakan emisi HC.

#### 4.5.2 Analisa Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,25

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi CO pada tiap variasi pada ISR 0,25. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.



Grafik 4.14 Grafik Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,25

Grafik diatas adalah hasil pengujian CO pada tiap jarak waktu injeksi kedua. Pada grafik 4.14 dapat dilihat bahwa pengaruh *split injection* paling signifikan terjadi

pada beban rendah. Pada beban tinggi dapat dilihat di grafik diatas menunjukkan ketika di variasikan *gas split injection* lebih cenderung naik. Dari hasil data berikut dapat diambil kesimpulan bahwa adanya penurunan emisi paling signifikan pada titik tertentu pada tiap variasi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) di beban rendah 25% yang awalnya di *single injection* memiliki nilai 660 ppm dapat diturunkan menjadi 250 ppm dengan persentase 62%. Pada *gas split injection* (260;244) di beban 75% dari *single injection* yang memiliki nilai 360 ppm dapat diturunkan 320 ppm dengan persentase sebesar 14%.

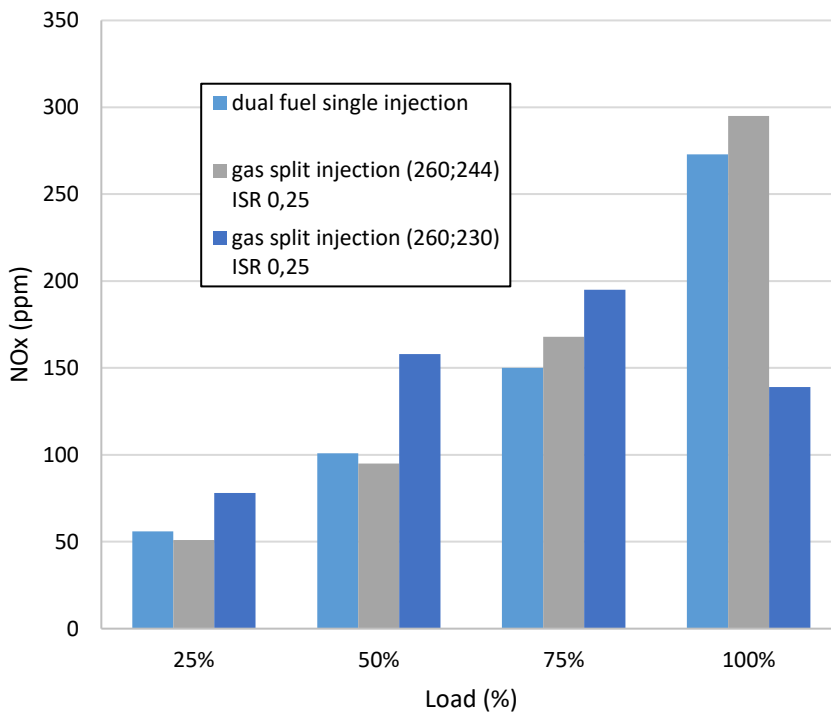
Pada pembahasan diatas dapat disimpulkan bahwa *gas split injection* memiliki penyebaran bahan bakar gas yang lebih baik daripada *single injection*. Sehingga membuat pembakaran menjadi lebih sempurna. Hal ini menandakan bahwa pada *gas split injection* terjadi pembakaran lebih baik sehingga partikel CO cenderung berubah menjadi CO<sub>2</sub> dibanding pada *single injection*. Namun, pada beban tinggi partikel CO juga tidak dapat diturunkan karena pada beban tinggi semakin bertambahnya jarak waktu injeksi maka semakin buruk karakteristik pembakaran. Hal ini menandakan bahwa suhu semakin meningkat sehingga CO menjadi turun

#### **4.5.3 Analisa Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,25**

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi NOx pada tiap variasi pada ISR 0,25. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.

Di Grafik 4.15 menunjukkan hasil eksperimen pengujian emisi pada *gas split injection* dengan variasi jarak waktu injeksi. Pada grafik dapat dilihat bahwa *gas split injection* berpengaruh besar pada beban tinggi. Akan tetapi pada beban rendah efek dari *gas split injection* cenderung menjadikan emisi NOx meningkat. Dari hasil data berikut dapat ditarik kesimpulan bahwa terjadi penurunan yang signifikan pada titik tertentu di tiap variasi jarak waktu injeksi. Pada variasi *gas split injection* (260;244) di beban 25% terjadi penurunan sebesar 9% yang awalnya *single injection* 56 ppm menjadi 51 ppm. Sedangkan penurunan pada variasi *gas split injection* (260;230) di beban tinggi 100% dari *single injection* memiliki kadar NOx memiliki nilai sebesar 273 ppm dapat turun menjadi 139 ppm dengan persentase 49%.

Hal ini menunjukkan bahwa semakin jauh jarak waktu injeksi kedua maka tekanan pada silinder menjadi turun sehingga temperature pembakaran tidak setinggi pada *single injection*. Sehingga kadar NOx turun karena suhu dalam ruang bakar menjadi turun hal ini sesuai dengan teori dari (Yousefi dkk., 2018). Namun, pada beban rendah dari 25% sampai 75% memiliki temperature pembakaran yang lebih tinggi ketika di variasi *gas split injection*.



Grafik 4.15 Grafik Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan *Gas Split Injection* pada ISR 0,25

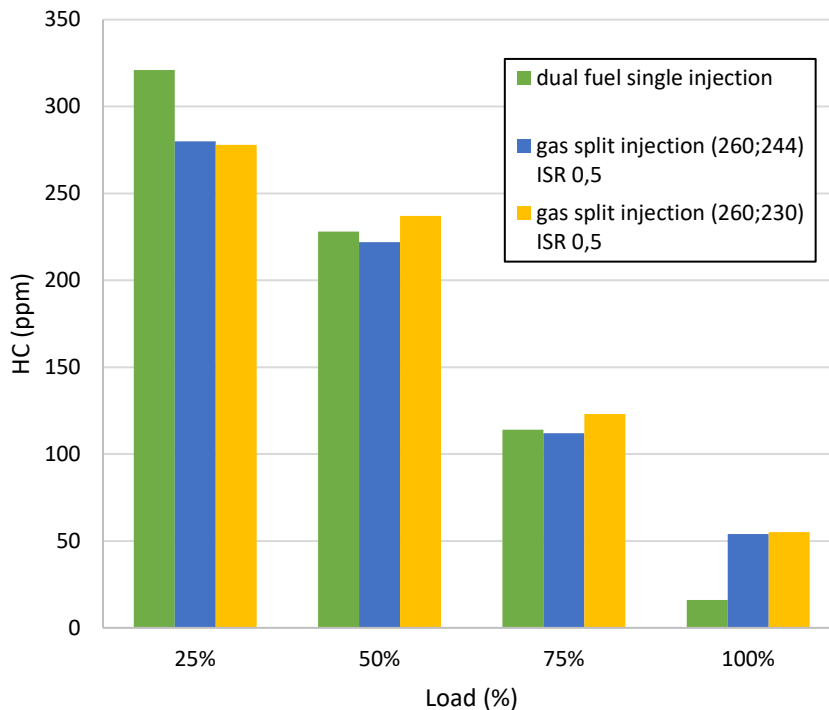
#### 4.5.4 Analisa Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan *Gas Split Injection* pada ISR 0,5

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi HC pada tiap variasi pada ISR 0,5. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.

Grafik dibawah menunjukkan data emisi pada tiap variasi *gas split injection*. Split injection divariasikan pada jarak waktu injeksinya. Dari grafik 4.16 dapat dilihat bahwa *gas split injection* pada emisi HC terjadi penurunan di beban rendah. Pada beban tinggi emisi HC yang sudah divariasikan menjadi *gas split injection* dengan jarak waktu yang berbeda cenderung naik. Dari data grafik dapat diambil titik yang menurunkan HC paling signifikan pada tiap variasi jarak waktu injeksi. Pada *gas split injection* (260;244) penurunan signifikan di beban 25% sebesar 13% yang awalnya *single injection* dengan nilai 321 ppm menjadi 280 ppm. Sedangkan pada *gas split injection* (260;230) Penurunan paling signifikan terjadi di beban 25% dengan nilai persentase 13% yang awalnya 321 ppm menjadi 278 ppm.

Penurunan nilai HC ini menunjukkan bahwa semakin jauh jarak waktu injeksi pada beban rendah maka semakin baik karakteristik pembakaran pada mesin. Sehingga pencampuran udara dengan gas pada pembakaran mengakibatkan pembakaran yang

semakin sempurna pada kenaikan jarak injeksi. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya HC pada 25% di Grafik 4.16.



Grafik 4.16 Grafik Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan *Gas Split Injection* pada ISR 0,5

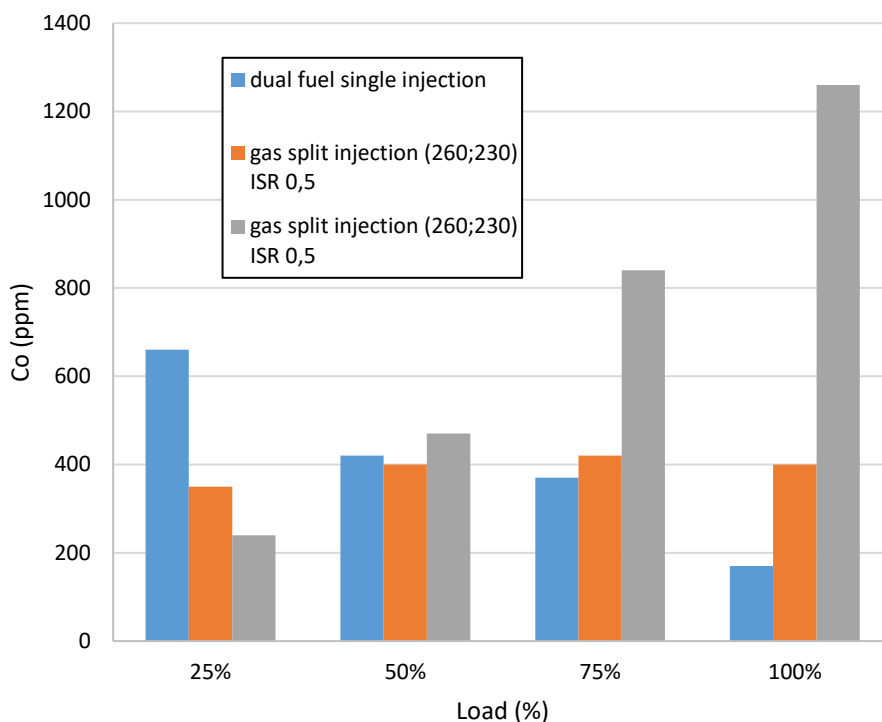
Tetapi variasi *gas split injection* pada beban tinggi tidak berpengaruh. Karena pada beban tinggi nilai HC cenderung tidak ikut terbakar. Sehingga pada variasi *gas split injection* pada beban tinggi membuat HC semakin meningkat. Hal ini diakibatkan oleh pembakaran yang tidak sempurna. Pembakaran ini berpengaruh pada emisi HC yang semakin meningkat ditunjukkan pada Grafik 4.16.

#### 4.5.5 Analisa Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan *Gas Split Injection* Pada ISR 0,5

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi CO pada tiap variasi pada ISR 0,5. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik dibawah.

Hasil dari eksperimen pengujian CO dengan variasi jarak waktu injeksi kedua pada *gas split injection*. Pada Grafik 4.17 menunjukkan bahwa adanya penurunan saat divariasi jarak waktu injeksi kadar nilai CO di beban rendah rendah. Namun ketika beban tinggi dapat dilihat pada grafik dibawah emisi CO ketika divariasikan gas split injection cenderung naik. Dari data grafik 4.17 dapat dilihat bahwa ada titik tertentu yang memiliki nilai penurunan paling signifikan pada tiap variasi jarak waktu injeksi. Pada

variasi *gas split injection* (260;244) di beban 25% memiliki persentase penurunan sebesar 47% yang awalnya *single injection* 660 ppm diturunkan menjadi 320 ppm. Sedangkan pada *gas split injection* (260;244) Nilai penurunan dari *single injection*, *split* ke *gas split injection* (260;230) secara berturut turut memiliki nilai sebesar 660 ppm, menjadi 240 ppm dengan nilai persentase 64%.

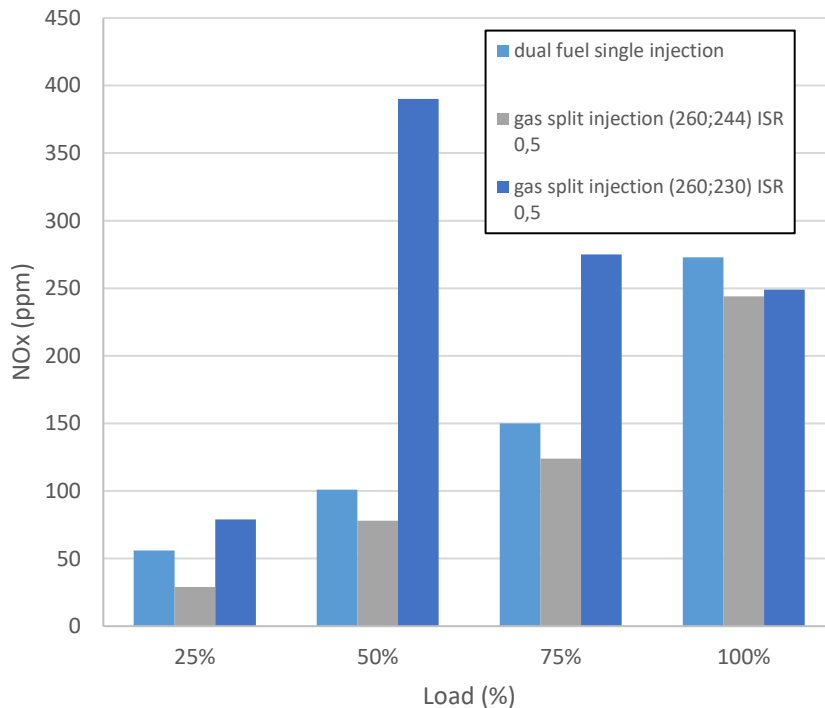


Grafik 4.17 Grafik perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan *gas split injection* pada ISR 0,5

Penurunan nilai CO ini diakibatkan oleh pembakaran yang sempurna. Pembakaran sempurna ini diakibatkan oleh semakin jauhnya jarak penginjeksian bahan bakar gas pertama dan kedua maka semakin baik persebaran pembakaran pada mesin. Sehingga pada beban rendah pada *gas split injection* suhu pada ruang bakar meningkat sehingga CO menurun. Hal ini ditunjukkan pada Grafik 4.17 yang menunjukkan pada beban rendah partikel CO menjadi turun saat semakin bertambahnya jarak injeksi pertama dan kedua. Namun, pada beban tinggi partikel CO pada variasi semakin jauhnya jarak waktu injeksi kedua kadar CO semakin tinggi hal ini menunjukkan bahwa pembakaran yang terjadi tidak sebagus saat beban rendah yang menyebabkan partikel CO semakin jauh jarak waktu injeksi kedua maka semakin tinggi kadar CO.

#### 4.5.6 Analisa Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,5

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi NOx pada tiap variasi pada ISR 0,5. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection (260;244)* *gas split injection (260;230)*. Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik dibawah.



Grafik 4.18 Grafik Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,5

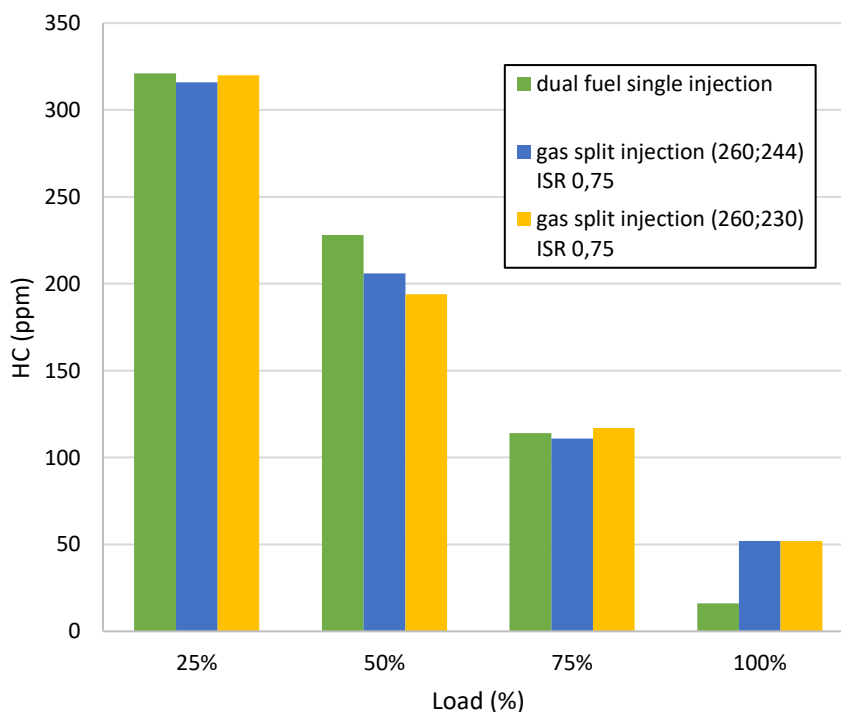
Pada grafik diatas menunjukkan hasil pengujian emisi *gas split injection* pada tiap variasi jarak waktu injeksi. Dapat dilihat pada grafik diatas terjadi penurunan ketika telah divariasikan menjadi *gas split injection* pada beban tinggi. Pada beban rendah saat variasi *gas split injection (260;244)* terjadi penurunan akan tetapi saat *gas split injection (260;230)* mengalami kenaikan yang signifikan. Dari grafik diatas pada tiap variasi memiliki titik paling optimum dalam menurunkan emisi NOx. Pada beban tinggi penurunan yang disebabkan oleh *gas split injection (260;244)* adalah sebesar 11% yang awalnya 273 ppm menjadi 244 ppm. Sedangkan pada *gas split injection (260;244)* di beban 100% yang awalnya 273 ppm dapat diturunkan menjadi 249 ppm dengan persentase 9%.

Hal ini menunjukkan bahwa pada beban tinggi terjadi penurunan suhu pembakaran pada *gas split injection*. Dari hal tersebut tekanan pada ruang bakar menjadi turun sehingga menyebabkan menurunnya emisi NOx. Hal ini ditunjukkan pada grafik diatas

pada beban 100% bahwa semakin jauh jarak injeksi bahan bakar maka semakin turun kadar NOx. Namun, pada beban rendah dari 25% hingga 75% memiliki kadar NOx yang fluktuatif pada *gas split injection* (260;244) kadar NOx turun. Kemudian pada variasi *gas split injection* (260;230) naik kembali melebihi kadar NOx dari *single injection*. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat beban rendah suhu pembakaran tidak stabil sehingga NOx menjadi naik seperti yang ditunjukkan pada grafik 4.18.

#### 4.5.7 Analisa Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,75

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi HC pada tiap variasi pada ISR 0,75. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu, dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.



Grafik 4.19 Grafik Perbandingan HC Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,75

Pada grafik ditunjukkan hasil eksperimen HC pada ISR 0,75 dengan variasi jarak waktu injeksi. Pada grafik diatas dapat dilihat terjadi penurunan pada gas split injection di beban rendah. Akan tetapi pada grafik dapat dilihat bahwa ketika telah divariasikan gas split injection HC cenderung naik. Dari grafik 4.19 dapat ditarik kesimpulan bahwa setiap variasi memiliki titik yang optimum dalam menurunkan emisi HC. Pada variasi *gas split injection* (260;244) di beban 50% yang awalnya 228 ppm dapat diturunkan menjadi

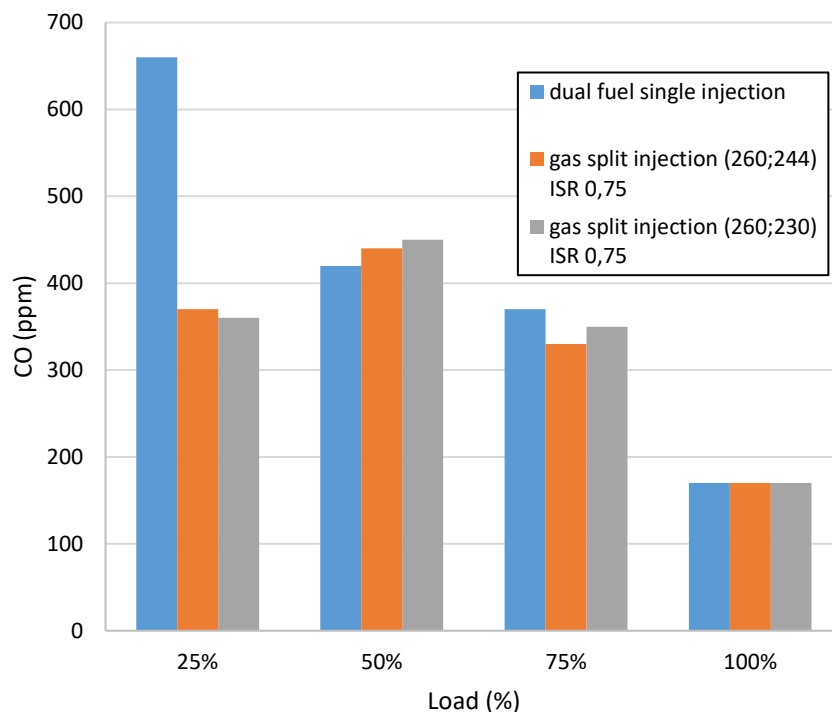


206 ppm dengan persentase sebesar 10% terhadap *single injection*. Sedangkan pada variasi *dual fuel gas split injection* (260;230) beban rendah 50% Penurunan paling signifikan terjadi pada dengan nilai persentase 15% yang awalnya 228 ppm turun menjadi 194 ppm.

Hal ini menunjukkan bahwa pada tiap penambahan jarak *dwelling time* pada beban 50% karakteristik pembakaran semakin sempurna. Sempurnanya pembakaran ini dikarenakan pada penambahan jarak injeksi menyebabkan persebaran bahan bakar gas semakin baik dan pencampuran udara semakin baik juga. Sehingga emisi gas buang HC semakin turun hal ini bias dilihat pada grafik 4.19. Namun, pada beban tinggi partikel HC lebih cenderung naik akibat karakteristik pembakar pada tiap penambahan jarak waktu injeksi semakin buruk. Sehingga pembagian *gas split injection* tidak mencampurkan udara dan bahan bakar gas. Sehingga partikel  $C_xH_x$  tidak terbakar dengan sempurna dan menghasilkan HC.

#### 4.5.8 Analisa Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,75

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi CO pada tiap variasi pada ISR 0,75. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.



Grafik 4.20 Grafik Perbandingan CO Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,75

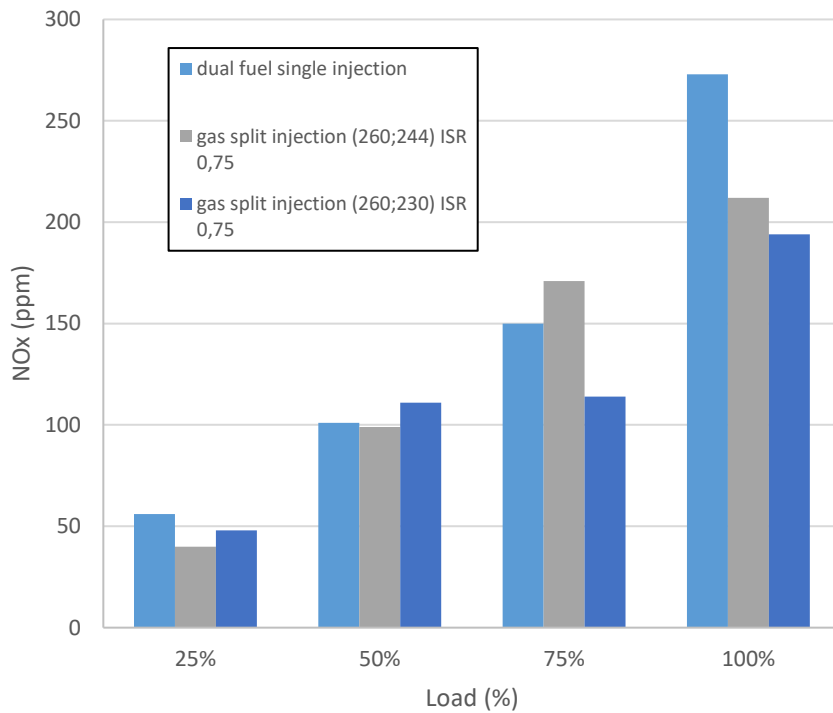
Grafik diatas adalah grafik perbandingan pada gas split injection pada tiap variasi jarak waktu injeksi kedua. Pada Grafik dapat dilihat bahwa terjadi penurunan pada kadar emisi CO pada beban rendah setelah dilakukan *gas split injection*. Namun pada beban tinggi emisi CO yang telah dilakukan *gas split injection* cenderung naik. Sehingga dari data grafik diatas dapat dilihat bahwa tiap variasi jarak waktu injeksi memiliki titik optimum tersendiri. Pada variasi gas *split injection* (260;244) titik optimum terjadi di beban 25% dengan persentase 44% dengan nilai emisi CO yang awalnya 660 ppm menjadi 370 ppm. sedangkan pada variasi *gas split injection* (260;230) pada beban rendah 25% memiliki nilai persentase 45% dengan Nilai penurunan dari *single injection* ke *gas split injection* (260;230) secara berturut turut sebesar 660 ppm ke 260 ppm.

Dari penjelasan diatas menunjukkan pada saat beban rendah pembakaran yang terjadi pada *gas split injection* semakin baik. Pembakaran yang terjadi pada setiap penambahan jarak injeksi semakin sempurna sehingga persebaran bahan gas menyebabkan pencampuran udara dan gas jadi lebih baik. Pada grafik juga ditunjukkan bahwa semakin jauh jarak injeksi pertama dan kedua menyebabkan penurunan kadar CO. Namun, pada beban tinggi gas split injection tidak berpengaruh pada pengurangan kadar emisi CO hal ini menunjukkan bahwa pada beban tinggi penambahan jarak waktu injeksi maka suhu pada ruang bakar menjadi lebih rendah dari dual fuel sehingga partikel CO menjadi lebih tinggi.

#### **4.5.9 Analisa Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan Gas Split Injection pada ISR 0,75**

Pada pembahasan ini membahas perbandingan emisi NOx pada tiap variasi pada ISR 0,75. Parameter perbandingannya yaitu *single injection*, *gas split injection* (260;244) dan *gas split injection* (260;230). Setelah itu dibahas hasil emisi tersebut dalam grafik berikut.

Dari hasil pengujian emisi NOx pada *gas split injection* dengan variasi jarak waktu injeksi didapat grafik seperti pada grafik 4.21. Pada grafik diatas dapat dilihat adanya penurunan kada NOx pada beban tinggi setelah dilakukan *gas split injection* dan divariasikan jarak waktu injeksinya. Akan tetapi pada grafik 4.21 dapat dilihat bahwa pada beban rendah setelah dilakukan *gas split injection* cenderung mengalami kenaikan. Dari data grafik dapat ditarik kesimpulan bahwa tiap variasi jarak waktu injeksi pada *gas split injection* memiliki titik yang optimum untuk menurunkan NOx. Pada variasi *gas split injection* (260;244) dapat menurunkan emisi sebesar 22% yang awalnya *single injection* bernilai 273 ppm menjadi 212 ppm di beban 100%. Pada variasi *gas split injection* (260;230) pada beban tinggi 100% memiliki persentase 29% terhadap *single injection* dengan nilai emisi yang awalnya *single injection* memiliki kadar NOx sebesar 273 ppm, lalu kadar NOx menjadi 194 ppm.



Grafik 4.21 Grafik Perbandingan NOx Bahan Bakar Ganda dengan *Gas Split Injection* pada ISR 0,75

Hal ini menunjukkan bahwa semakin jauh *dwelling time* maka tekanan pada silinder menjadi turun sehingga mengakibatkan turunnya temperature pembakaran yang menghasilkan menurunnya kadar NOx hal ini sesuai dengan teori dari (Yousefi dkk, 2018). Turunnya NOx ditunjukkan pada grafik 4.21 pada beban 100% yang menunjukkan bahwa semakin bertambahnya jarak injeksi maka semakin berkurangnya emisi NOx. Namun, pada beban rendah emisi NOx tidak dapat diturunkan secara signifikan. Ini diakibatkan oleh persebaran bahan bakar gas pada *gas split injection* pada beban rendah menyebabkan kenaikan suhu dan tekanan pada ruang bakar. Hal ini ditunjukkan pada Grafik 4.21 yang menunjukkan kenaikan NOx pada saat beban rendah.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan terkait analisa eksperimen pengaruh gas *split injection* pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang penulis dapat menarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Pengaruh gas *split injection* pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang dengan ISR yang berbeda
  - a. Pada ISR 0,25 didapat penurunan emisi paling signifikan adalah pada variasi gas *split injection* (260;244) dengan penurunan HC sebesar 16%, CO sebesar 62% dan NO<sub>x</sub> sebesar 9% pada beban rendah. Namun, penurunan emisi NO<sub>x</sub> paling signifikan pada gas *split injection* (260;230) sebesar 49% pada beban tinggi.
  - b. Pada ISR 0,5 didapat penurunan emisi paling signifikan adalah pada variasi variasi gas *split injection* (260;230) dengan penurunan HC sebesar 13% dan CO sebesar 64% akan tetapi NO<sub>x</sub> mengalami kenaikan sebesar 41% di beban rendah. Namun, penurunan emisi NO<sub>x</sub> paling signifikan terjadi pada variasi variasi gas *split injection* (260;244) sebesar 11% dibeban tinggi.
  - c. Pada ISR 0,75 didapat penurunan emisi paling signifikan pada variasi gas *split injection* (260;230) dengan penurunan HC sebesar 15%, CO sebesar 49% dan NO<sub>x</sub> sebesar 14% dibeban rendah. Namun, penurunan emisi NO<sub>x</sub> paling signifikan juga pada gas *split injection* (260;230) sebesar 29% pada beban tinggi. Sedangkan pada gas *split injection* (260;244) tidak terlalu signifikan.
2. Pengaruh gas *split injection* pada mesin bahan bakar ganda terhadap emisi gas buang dengan jarak waktu injeksi yang berbeda
  - a. Pada variasi gas *split injection* (260;244) penurunan emisi paling signifikan adalah pada ISR 0,25 dengan penurunan emisi HC sebesar 16%, CO sebesar 62% dan NO<sub>x</sub> sebesar 9% pada beban rendah. Namun, penurunan NO<sub>x</sub> paling signifikan adalah pada ISR 0,5 sebesar 48% pada beban rendah. Sedangkan pada ISR 0,75 tidak terlalu signifikan.
  - b. Pada variasi gas *split injection* (260;230) penurunan emisi paling signifikan adalah pada ISR 0,5 dengan penurunan HC sebesar 13%, CO sebesar 64% akan tetapi NO<sub>x</sub> naik sebesar 41% pada beban rendah. Namun, penuruna NO<sub>x</sub> paling signifikan adalah pada ISR 0,25 pada beban tinggi. Sedangkan pada ISR 0,75 tidak terlalu signifikan.

#### **5.2 Saran**

Pada penelitian ini penulis memberikan saran untuk dilakukannya penelitian tentang studi eksperimen gas *split injection* pada proses pembakarannya untuk melihat bagaimana sebenarnya karakteristik pembakaran dari gas *split injection*. Atau penambahan variasi pada gas *split injection* untuk mencari kondisi paling optimal dari *dual fuel engine*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, nik rosli. Wyszynski, M L. Mamat, rizalman. Xu, Hongmin. 2009. *Effect of Injection Pressure with Split Injection in a V6 Diesel Engine. School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, UK*
- Arif., Sudarmanta. 2015. KARAKTERISASI PERFORMA MESIN DIESEL DUAL FUEL SOLAR-CNG TIPE LPG DENGAN PENGATURAN START OF INJECTION DAN DURASI INJEKSI. ITS. Surabaya.
- Aminuddin, Achmad. 2014. Uji Performa Mesin Sinjai Berbahan Bakar Bi-Fuel (Premium-Compressed Natural Gas) dengan Pengaturan Durasi Injeksi dan Air Fuel Ratio, Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Clayton B. Cornell. 2008. "Natural Gas Cars: CNG Fuel Almost Free in Some Parts of the Country".
- Clarke, DeBruyn. 2012. Vehicle Conversion to Natural Gas or Biogas. OMAFRA Factsheet. Canada
- Donghui Qi dkk , 2011, Effect of EGR and injection timing on combustion and emission characteristics of split injection strategy DI-diesel engine fueled with biodiesel, Chang'an University, Xi'an 710064, China
- Ehsan Md, Bhuiyan. 2009. Dual fuel performance of small diesel for application with less frequent load variations. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering (IJMME). Volume 9 (10), pp 30-39
- Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M. & Rahbari, H. R., 2011. *Studying Effect of Storage Types on Performance of CNG Filling Stations*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Volume 3, pp. 334-340.
- 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.
- Guo, H., Liko, B. and Neill, W. S. Effect of Diesel Injection Split on Combustion and Emissions Performance of a Natural Gas–Diesel Dual Fuel Engine at a Low Load Condition. ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2017, pp. V001T03A008-V001T03A008
- Heywood J.B., 1998, Internal Combustion Engine Fundamental, New York: McGraw - Hill Book Co.
- Hartanto, A., 2010. Kajian Kebij Konversi Dari BBM Ke BBG Untuk Kendaraan Di Propinsi Jawa Barat. Laporan Akhir Program Insentif Peneliti dan Perakayasa LIPI .
- 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.
- 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.
- Ikhsan, R.A. 2014. "Rancang Bangun Sistem Otomasi Diesel Dual Fuel (DDF) Dengan Kontrol Programmable Logic Control (PLC)". Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS, Surabaya.

- Jha, M., Singh, A., Tyagi, R. & Verma, M., 2012. Comparative Study of Exhaust Emission of Commonly Used Fuel in an Internal Combustion Engine. *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology*, Desember, Volume 2, pp. 52-56.
- Lounici, M. Said. Loubar, Khaled. Tarabet, Lyes. Balistrrou, Mourad. Niculescu, D. Catalin. and Tazerout, Mohand. (2014). Towards Improvement of Natural Gas-Diesel Dual Fuel Mode: An Experimental Investigation on Performance and Exhaust Emissions, *Energi*, 64, 200-211.
- 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. *SAE Tech. Pap. Ser. 1*.
- Oktovian, Ananda pudi. 2016. *pengaruh penggunaan dual fuel terhadap kinerja mesin dan emisi gas buang pada motor diesel*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS, Surabaya.
- N. S. Octaviani, Semin, M. B. Zaman, and B. Sudarmanta, 2018. "The implementation of CNG as an alternative fuel for marine diesel engine," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 9, pp. 25-33,
- Park, S. dkk. (2018) 'Effects of various split injection strategies on combustion and emissions characteristics in a single-cylinder diesel engine', *Applied Thermal Engineering*. Elsevier, 140(September 2017), pp. 422–431. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.025.
- Petter A Weller. 1989. *Fachkunde Fahrzeugtechnik*, Holland+Johenshands Germany. p 107 – 173
- Road, B., 2012. Performance and Exhaust Gas Emissions Analysis of Direct Injection Cng-Diesel Dual Fuel Engine. *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 4, 833–846.
- Robert, 1993. *Automotive Band Book*, VDI Verlag Germany. p 108 -184
- Semin, Cahyono B. Amiadji. Bakar R.A. 2014. *Air-fuel mixing and fuel flow velocity modeling of multi holes injektor nozzel on CNG marine engine*. *Procedia Earth and Planetary Science* 14. 101-109.
- Semin, Felayati, F.M., Zaman, M.B., 2019. Consideration of split injection strategy for marine diesel engine combustion process. <https://doi.org/10.1063/1.5095326>
- Semin, R.A.B., 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, Idris A., Bakar R.A., 2009, Effect of port injection CNG engine using injection nozzel multi holes on air-fuel mixing in combustion chamber, *European Journal of Scientific Research*, Vol 34 (1), 16-24.
- Semin, Idris A, and R. A. Bakar, 2009. An overview of compressed natural gas as an alternative fuel and Malaysian scenario, *European journal of scientific research*, vol. 34, pp. 6-15,
- Setiawan Yustinus. 2010. *Analisa Perbandingan Emisi Gas Pada Mesin Diesel Menggun Bahan Bakar Solar dan CNG Bebas Pada Simulasi*. Fakultas Teknologi Kelautan ITS. Surabaya.
- SINDHU, R., RAO, G. A. P. & MURTHY, K. M. 2018. Effective reduction of NOx emissions from diesel engine using split injections. *Alexandria engineering journal*, 57, 1379-1392



- Sylvain, Mendez . Benoist, Thirouard. 2008 .*Using multiple injection strategies in diesel combustion: potential to improve emissions, noise and fuel economy trade-off in low CR engines*. SAE Technical Paper 2008-01-1329
- S.Zaini, dkk., 2013. Analisis Ekonomis Penggunaan PLTG CNG (Compressed Natural Gas) Di Jakabaring Dalam Memenuhi Energi Listrik Waktu Beban Puncak Di Kota Palembang. Seminar Nasional Added Value of Energy Resources (AVoer ), pp. 173-178.
- Tamam, Zuhri. 2015. *Karakterisasi Unjuk Kerja Mesin Diesel Generator Set Sistem Dual Fuel Solar dan Syngas Batubara*, Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Wang, Z dkk 2016 “Near-nozzle microscopic characterization of diesel spray under cold start conditions with split injection strategy “. *Fuel* 181 (2016) 366–375
- Warsita, Aris. 2012, Pengaruh Injection Timing dan Prosentase Campuran Minyak Diesel dengan Bahan Bakar Biodiesel terhadap Karakteristik Mesin dan Emisi Gas Buang, *TRAKSI*, 12, 1-15.
- Wei L. 2016. A Review on Natural Gas / Diesel Dual Fuel Combustion, Emissions and Performance. *Fuel Processing*. Volume 142, pp. 264-278.
- Wijaya, P. D. and Ariana, I. M. 2014 ‘Rancang Bangun Sistem Penginjeksian Gas Pada Modifikasi Dual Fuel Diesel Engine’, pp. 1–6.
- Wu, Z., Rutland, C. J. and Han, Z. Numerical optimization of natural gas and diesel dual-fuel combustion for a heavy-duty engine operated at a medium load. *International Journal of Engine Research*, 2017, p. 1468087417729255
- XiangRong Li, dkk. 2016 “Effect of split injections coupled with swirl on combustion performance in DI diesel engines” *Energy Conversion and Management* 129 (2016) 180–188
- 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.
- YU, H., LIANG, X., WANG, Y. & ZHANG, H. 2017. Numerical investigation on combustion and emission of a diesel engine using two-stage injection strategy. *Energy Procedia*, 105, 1344-1349.
- Yuswono, L. C., 1997. Bahan Bakar Gas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pada Kendaraan Bermotor. *Cakrawala Pendidikan*, November. pp. 139-149.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN

Hasil pengujian emisi HC dan CO di Departemen Teknik Mesin FTI-ITS

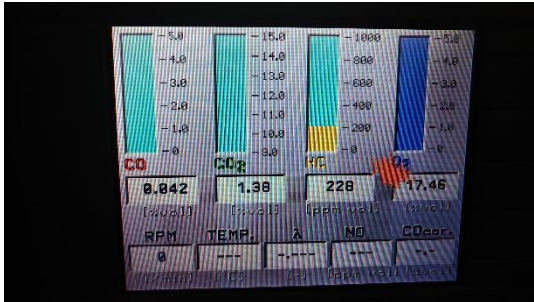
no	variasi	beban	HC (ppm)	CO (%)	CO(ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	x
1	dual fuel single injection	25%	321	0,066	660	1,19	17,81	56
2		50%	228	0,042	420	1,38	17,46	101
3		75%	114	0,037	370	1,31	17,74	150
4		100%	16	0,017	170	0,54	18,34	273
ISR 0,25								
5	gas split injection (260;244) ISR 0,25	25%	271	0,025	250	1,46	17,48	51
6		50%	230	0,046	460	1,77	16,93	95
7		75%	114	0,036	360	1,44	17,59	168
8		100%	54	0,021	210	1,1	18,38	295
9	gas split injection (260;230) ISR 0,25	25%	351	0,08	800	1,28	17,78	78
10		50%	198	0,049	490	1,24	17,92	158
11		75%	111	0,032	320	1,27	18,04	195
12		100%	59	0,021	210	1,13	18,37	139
ISR 0,5								
13	gas split injection (260;244) ISR 0,5	25%	280	0,035	350	1,56	17,23	29
14		50%	222	0,04	400	1,83	16,74	78
15		75%	112	0,042	420	1,54	17,29	124
16		100%	54	0,04	400	1,15	18,19	244
17	gas split injection (260;230) ISR 0,5	25%	278	0,024	240	1,63	17,16	79
18		50%	237	0,047	470	2,17	15,96	390
19		75%	123	0,084	840	1,91	16,7	275
20		100%	55	0,126	1260	1,26	17,94	249
ISR 0,75								
21	gas split injection (260;244) ISR 0,75	25%	316	0,037	370	1,39	17,49	40
22		50%	206	0,044	440	1,4	17,57	99
23		75%	111	0,033	330	1,22	18,04	171
24		100%	52	0,017	170	0,92	18,66	212
25	gas split injection (260;230) ISR 0,75	25%	320	0,036	360	1,36	17,61	48
26		50%	194	0,045	450	1,38	17,65	111
27		75%	117	0,035	350	1,35	17,82	114
28		100%	52	0,017	170	0,95	18,58	194

a. *dual fuel single injection. 260*

- beban 25%



- beban 50%



- beban 75%



- beban 100%

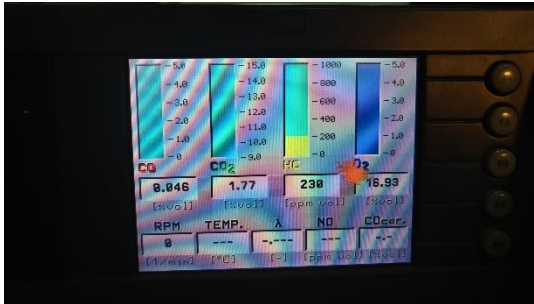


b. *dual fuel gas split injection* (260;244) ISR 0,25

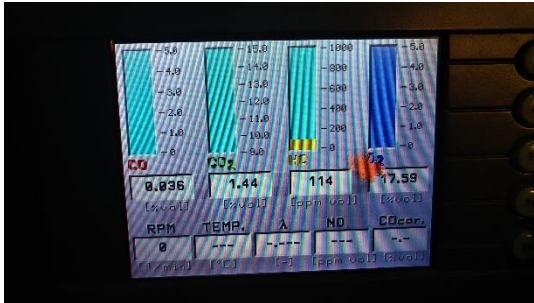
- beban 25%



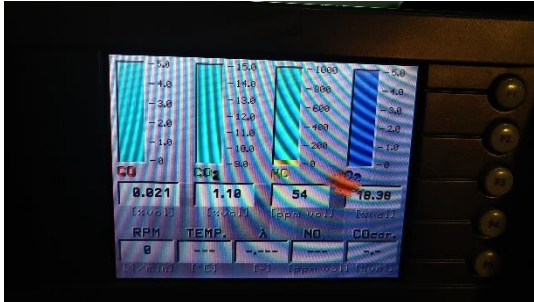
- beban 50%



- beban 75%



- beban 100%



c. *dual fuel gas split injection (260;230) ISR 0,25*

- beban 25%



- beban 50%



- beban 75%



- beban 100%

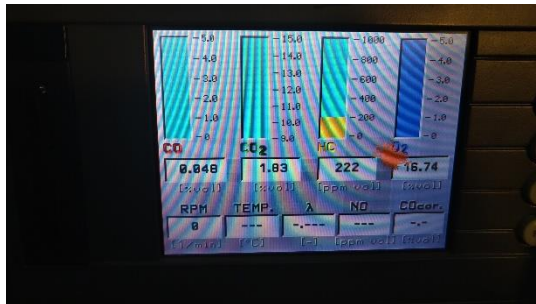


d. *dual fuel gas split injection (260;244) ISR 0,5*

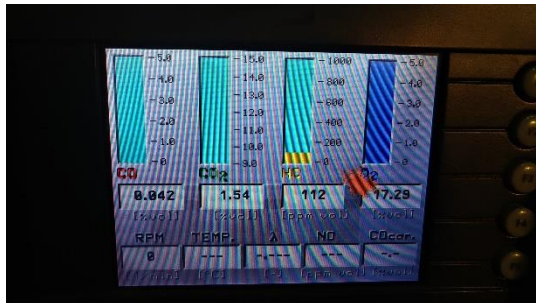
- beban 25%



- beban 50%



- beban 75%

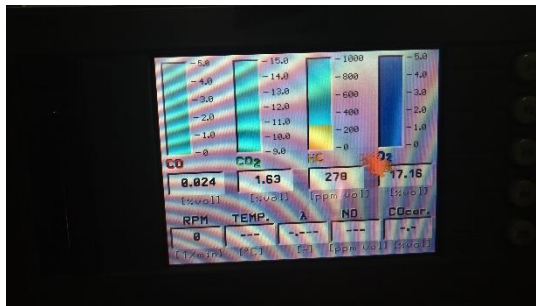


- beban 100%

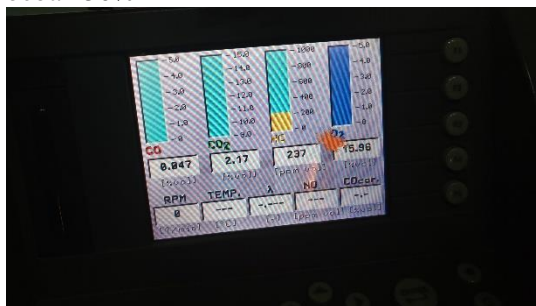


e. *dual fuel gas split injection (260;230) ISR 0,5*

- beban 25%



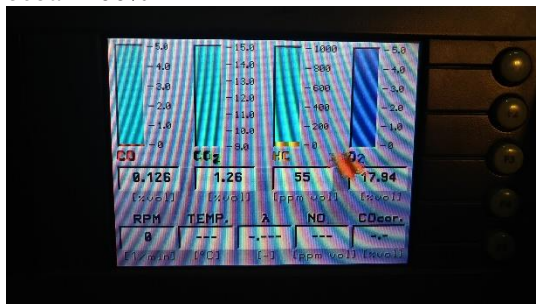
- beban 50%



- beban 75%



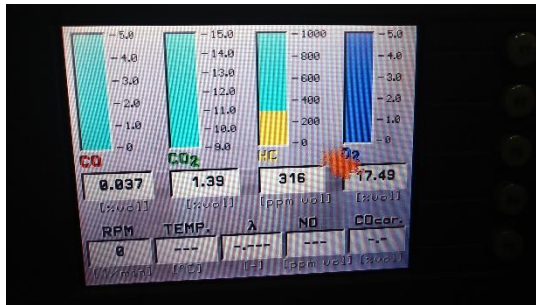
- beban 100%



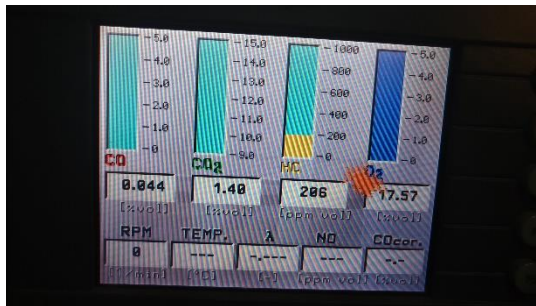


f.dual fuel gas split injection (260;244) ISR 0,75

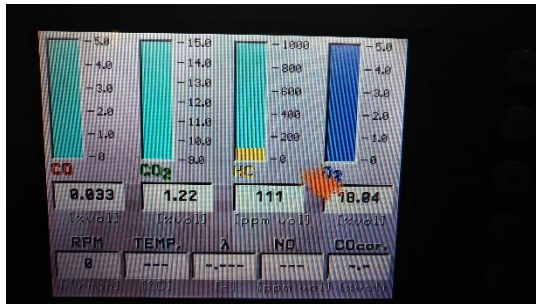
- beban 25%



- beban 50%



- beban 75%

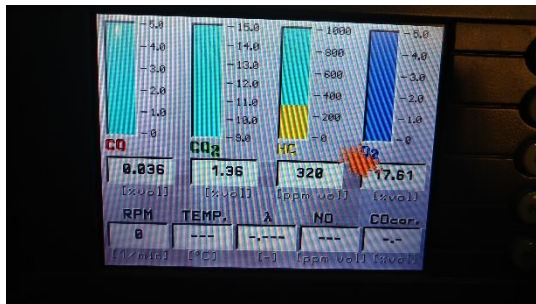


- beban 100%



g. *dual fuel gas split injection (260;230) ISR 0,75*

- beban 25%



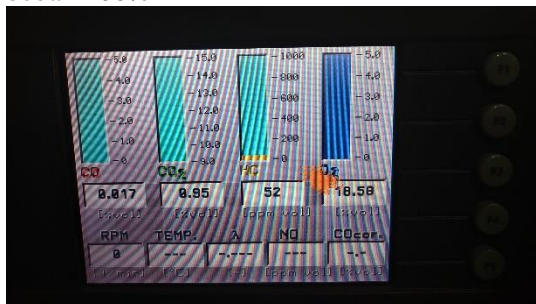
- beban 50%



- beban 75%



- beban 100%



No.	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil		Satuan	Metode Pengujian
1	Dual fuel single injection (260) beban 25%	kandungan O2	19,3	19,6	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	56	55	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,9	0,8	%	
2	Dual fuel single injection (260) beban 50%	kandungan O2	19,2	19,2	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	101	101	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,1	1	%	
3	Dual fuel single injection (260) beban 75%	kandungan O2	18,8	18,8	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	150	150	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,2	1,2	%	
4	Dual fuel single injection (260) beban 100%	kandungan O2	18,7	18,7	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	273	273	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,3	1,3	%	
5	Gas split injection (260;230) ISR 0,5 beban 25%	kandungan O2	19,8	19,7	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	79	80	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,7	0,7	%	
6	Gas split injection (260;230) ISR 0,5 beban 50%	kandungan O2	18,9	18,7	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	390	395	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,2	1,3	%	
7	Gas split injection (260;230) ISR 0,5 beban 75%	kandungan O2	18,8	18,8	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	275	275	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,2	1,2	%	
8	Gas split injection (260;230) ISR 0,5 beban 100%	kandungan O2	19	19	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	249	249	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,1	1,1	%	
9	Gas split injection (260;244) ISR 0,5 beban 25%	kandungan O2	20	19,9	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	29	30	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,6	0,6	%	

10	Gas split injection (260;244) ISR 0,5 beban 50%	kandungan O2	19,2	19,1	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	78	79	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1	1,1	%	
11	Gas split injection (260;244) ISR 0,5 beban 75%	kandungan O2	18,9	18,9	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	124	124	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,2	1,2	%	
12	Gas split injection (260;244) ISR 0,5 beban 100%	kandungan O2	18,8	18,7	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	244	265	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,2	1,3	%	
13	Gas split injection (260;230) ISR 0,25 beban 25%	kandungan O2	19,9	19,9	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	78	78	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,6	0,6	%	
14	Gas split injection (260;230) ISR 0,25 beban 50%	kandungan O2	19,7	19,8	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	158	158	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,7	0,7	%	
15	Gas split injection (260;230) ISR 0,25 beban 75%	kandungan O2	19,4	19,5	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	203	195	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,9	0,8	%	
16	Gas split injection (260;230) ISR 0,25 beban 100%	kandungan O2	19,9	20,1	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	139	136	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,6	0,5	%	
17	Gas split injection (260;244) ISR 0,25 beban 25%	kandungan O2	19,7	19,6	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	51	51	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,7	0,8	%	
18	Gas split injection (260;244) ISR 0,25 beban 50%	kandungan O2	19,4	19,6	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	95	93	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,9	0,8	%	

19	Gas split injection (260;244) ISR 0,25 beban 75%	kandungan O2	19,1	19,2	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	168	260	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,1	1	%	
20	Gas split injection (260;244) ISR 0,25 beban 100%	kandungan O2	18,8	18,8	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	295	295	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1,2	1,2	%	
21	Gas split injection (260;230) ISR 0,75 beban 25%	kandungan O2	20	20	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	48	48	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,6	0,6	%	
22	Gas split injection (260;230) ISR 0,75 beban 50%	kandungan O2	19,3	19,5	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	111	103	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,9	0,8	%	
23	Gas split injection (260;230) ISR 0,75 beban 75%	kandungan O2	19,5	19,5	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	144	144	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,8	0,8	%	
24	Gas split injection (260;230) ISR 0,75 beban 100%	kandungan O2	19,2	19,2	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	194	194	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	1	1	%	
25	Gas split injection (260;244) ISR 0,75 beban 25%	kandungan O2	20	20	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	40	40	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,6	0,6	%	
26	Gas split injection (260;244) ISR 0,75 beban 50%	kandungan O2	19,6	19,6	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	104	99	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,8	0,8	%	
27	Gas split injection (260;244) ISR 0,75 beban 75%	kandungan O2	19,4	19,6	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	172	171	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	0	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,9	0,8	%	
28	Gas split injection (260;244) ISR 0,75 beban 100%	kandungan O2	19,7	19,2	%	IK/LEL-ITS/ECOM
		kandungan NO	212	271	ppm	
		Kandungan SO2	0	0	ppm	
		Kandungan H2	170	0	ppm	
		Kandungan CO2	0,7	1	%	

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara yang lahir pada tanggal 2 Agustus 1995 di Surabaya, Provinsi Jawa Timur. Pendidikan formal yang pernah ditempuh meliputi SDN Pucang 1 Sidoarjo, SMPN 1 Sidoarjo dan SMAN 3 Sidoarjo. Setelah itu pada tahun 2014 penulis meneruskan pendidikan pada tingkat perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan mengambil bidang studi Manufaktur. Kemudian penulis melanjutkan studi sarjana di Departemen Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya di bidang *Marine Power Plant*

(MPP). Selama kuliah penulis juga pernah menjadi Asisten Lab untuk kegiatan praktikum mata kuliah bidang *Marine Power Plant (MPP)*. Di kegiatan eksternal Departemen penulis pernah mengikuti BEM ITS Berani sebagai Staff PSDM, BEM ITS Wahana Juang sebagai dirjen pengawalan dan penulis juga aktif di tim mobil Ethanol BASUDEWO sebagai anggota divisi sponsorship. Penulis juga mengikuti berbagai pelatihan yang ada di ITS antara lain : Pelatihan Karya Tulis Ilmiah (PKTI), LKMM TD, LKMM TM. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi lebih luas lagi dapat menghubungi E-mail: [istiqlalsanatu77@gmail.com](mailto:istiqlalsanatu77@gmail.com)