



DISERTASI - TM143501

**KARAKTERISTIK DAN OPTIMASI PERFORMANSI
MESIN SI-PFI SATU SILINDER BERBAHAN BAKAR
BIOETANOL E50-E100 DENGAN PENGONTROLAN
TERPADU PADA PARAMETER DESAIN - OPERASI
DAN PEMBAKARAN**

MARTHEN PALOBORAN
02111460010002

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Ph. D
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

**PROGRAM DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



DISERTASI - TM143501

**KARAKTERISTIK DAN OPTIMASI PERFORMANSI
MESIN SI-PFI SATU SILINDER BERBAHAN BAKAR
BIOETANOL E50-E100 DENGAN PENGONTROLAN
TERPADU PADA PARAMETER DESAIN - OPERASI
DAN PEMBAKARAN**

MARTHEN PALOBORAN
02111460010002

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Ph. D
Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

PROGRAM DOKTOR
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar
Doktor (Dr.)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Marthen Paloboran
Nrp. 02111460010002

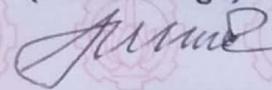
Tanggal Ujian : 06-08-2018

Periode Wisuda : Genap 2017/2018

Disetujui oleh:

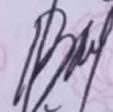
1. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.
NIP: 19510605 197803 1 002

(Pembimbing I)



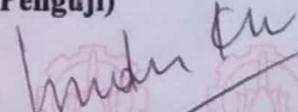
2. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.
NIP: 19730116 199702 1 001

(Pen.bimbing II)



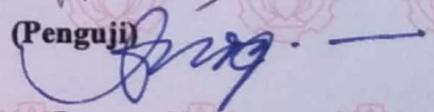
3. Dr.Eng. Ir. Iman K. Reksowardojo, M.Eng.
NIP: 19560930 198702 1 001

(Penguji)



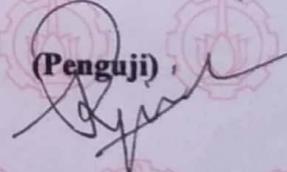
4. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME.
NIP: 19531219 198103 1 001

(Penguji)



5. Arif Wahyudi, ST., MT., Ph.D.
NIP: 19730322 200112 1 001

(Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri,

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT.
NIP: 19690507 199512 1 001

KARAKTERISTIK DAN OPTIMASI PERFORMANSI MESIN SI-PFI SATU SILINDER BERBAHAN BAKAR BIOETANOL E50–E100 DENGAN PENGONTROLAN TERPADU PADA PARAMETER DESAIN – OPERASI DAN PEMBAKARAN

Nama Mahasiswa : Marthen Paloboran
NRP : 02111460010002
Pembimbing I : Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Ph. D
Pembimbing II : Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

ABSTRAK

Penggunaan bioetanol dengan persentase sampai dengan 20% dalam gasolin pada mesin percik sistem injeksi tidak memerlukan perubahan dan penyesuaian settingan mesin untuk mendapatkan hasil pembakaran yang lebih baik. Hal ini dikarenakan pada komposisi tersebut, bioetanol akan bersifat sebagai pengungkit angka oktan sehingga proses pembakaran tuntas dapat dicapai. Dalam kondisi tersebut mesin dapat bekerja dengan baik dan terhindar dari detonasi atau ketukan yang dapat merusak komponen mesin dan mengurangi efisiensi energi sehingga daya mesin meningkat dan emisi pembakaran menurun. Sementara itu, pada konsentrasi bioetanol 20 – 40% dalam gasoline diperlukan penyesuaian pengaturan parameter mesin berupa menaikkan perbandingan kompresi mesin atau memajukan pengapian bahan bakar. Hal ini disebabkan angka oktan bahan bakar campurann akan semakin meningkat dengan bertambahnya persentase bioetanol dalam gasolin. Sedangkan penyesuaian secara terpadu pada parameter desain, operasional dan pembakaran mesin harus dilakukan jika menggunakan bahan bakar E50 – E100 untuk menghasilkan performansi mesin yang tinggi dan emisi yang rendah. Hal ini diperlukan untuk mengurangi perbedaan mencolok antara karakteristik gasolin dan bioetanol lebih dari 50% yang dapat menyebabkan ketidakstabilan pembakaran dan berdampak pada penurunan tekanan silinder, peningkatan kerugian panas dan emisi pembakaran terutama pada kecepatan mesin yang tinggi. Hasil pengujian menunjukkan waktu pengapian bahan bakar semakin meningkat seiring meningkatnya persentase bioetanol dalam bahan bakar, yaitu 16, 20 dan 24° TMA untuk bahan bakar E50, E70 dan E85. Sedangkan jika menggunakan bahan bakar bioetanol murni waktu pengapian bahan bakar cenderung stabil di angka 20° sebelum titik mati atas. Hasil pengujian juga memperlihatkan bahwa torsi E100 lebih superior dibandingkan dengan E50, E70 dan E85 meskipun untuk mencapai torsi maksimalnya diperlukan injeksi bahan bakar E100 sebesar 42.53% lebih besar dibanding E50, 39.05% dibandingkan E70 dan 32.54% lebih besar dibandingkan E85. Hasil optimasi dengan menggunakan metode respon permukaan dan program nonlinear menunjukkan *trend* bahwa torsi, efisiensi termal dan konsumsi bahan bakar spesifik meningkat serta emisi CO dan HC menurun jika persentase bioetanol meningkat dalam campuran. Hasil RSM juga menunjukkan bahwa nilai prediksi optimasi Torsi diperoleh pada kondisi; waktu pengapian bahan bakar, perbandingan kompresi dan putaran mesin secara berturut-turut yaitu; 24° BTDC, 13:1, dan 7300 – 8000 RPM untuk seluruh jenis bahan bakar.

Kata kunci: Gasolin, bioetanol konsentrasi tinggi, optimasi, waktu pengapian

CHARACTERISTICS AND OPTIMIZATION OF ENGINE PERFORMANCE OF SI-PFI SINGLE CYLINDER WITH GASOLINE-BIOETHANOL OF E50 – E100 FUELLED BY INTEGRATED CONTROLLING IN DESIGN–OPERATION AND COMBUSTIONS PARAMETERS

Name of Student : Marthen Paloboran
NRP : 02111460010002
Promotor : Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M. Sc., Ph. D
Co-Promotor : Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T.

ABSTRACS

The usage of gasoline and bioethanol blend up to 20% in percentage for spark ignition of port fuel injection engine does not need any adjustment on the machine for better combustion process result. It is caused by the fuel that would act as an octane booster so the detonation of the engine could be avoided then the energy efficiency increases and hydrocarbon emissions decreases. Meanwhile, bioethanol of 25-40% in gasoline requires the adjustment for increasing of the compression ratio of engine or advancing of ignition timing of fuel to accommodate an increase of the octane rating. An integrated system for controlling the design, operation and combustions parameters of the engine is required when the engine runs with E50–E100 fuel. Application of this method is required to minimize contradictory properties both of those fuels which are caused by the instability of the combustion. The case could be decreasing the power and increasing loss of energy and hydrocarbon emission particularly on the high speed of the engine. The work showing the ignition timing was increase along with the increase of bioethanol percentage in the fuel blended, those were 16, 20 and 24° BTDC for E50, E70 and E85 respectively. Meanwhile, the ignition timing tends to be stable on 20° BTDC when the engine runs with pure bioethanol. The study also revealed that the brake torque of pure bioethanol is higher than those with the gasoline-bioethanol blend. Nevertheless, the injection volumes of E100 is higher than those of gasoline-bioethanol blend. The work noted that the injection volumes of E100 were 42.53% higher than E50 and 39.05% higher than E70 as well as 32.54% higher than E85 respectively. Moreover, by using RSM methods and nonlinear programming, it was found the trend of increasing of brake torque, brake thermal efficiency, and BSFC as well as decreasing of CO and HC emissions when the percentage of bioethanol in the blend is increased. The RSM results also shows that the predicted torque optimization values are obtained under conditions; ignition timing, compression ratio and speed of engine on 24° BTDC, 13: 1, and 7300 - 8000 RPM for all types of fuel respectively.

Keywords: Gasoline, high concentration of bioethanol, optimization, ignition timing

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Hipotesa	4
1.3 Rumusan Masalah.....	4
1.4 Keterbaruan Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Tujuan Penelitian	5
1.7 Target dan Kontribusi Penelitian	6
1.8 Kerangka Ilmiah dan Peta Jalan Penelitian.....	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Bahan Bakar Bioethanol	7
2.2 Sifat-Sifat Utama Bahan Bakar dalam Pembakaran	8
2.2.1 Rasio Udara dan Bahan Bakar	8
2.2.2 Rasio Kompresi dan Angka Oktan.....	12
2.2.3 Tekanan Penguapan dan Volatilitas	20
2.2.4 Nilai Kalor Bahan Bakar dan Durasi Injeksi	22
2.2.5 Panas Laten Penguapan.....	23
2.2.6 Kecepatan Perambatan Api Laminar	24
2.3 Karakteristik Pembakaran Mesin Spark Ignition.....	29
2.3.1 Penundaan Penyalaan.....	29
2.3.2 Durasi Pembakaran	32
2.3.3 Tekanan Efektif Rata-Rata.....	33
2.3.4 Pelapasan Panas	34

2.4 Geometri Silinder Mesin Spark Ignition	35
2.5 Karakteristik Emisi Mesin Spark Ignition.....	37
2.5.1 Emisi Karbon.....	37
2.5.2 Emisi Karbonil.....	39
2.6 Sistem Injeksi dan Mekanisme Pencampuran Bahan Bakar Pada Mesin Spark Ignition	43
2.6.1 Port Fuel Injeksi	44
2.6.2 Injektor	47
2.6.3 Pembentukan Campuran.....	49
2.6.4 Mekanisme Katub Mesin Spark Ignition.....	50
2.6.5 Mekanisme CVI dan OVI Pada Mesin Spark Ignition..	51
2.7 Metode Permukaan Respon	53
2.7.1 Central Composite Design.....	54
2.7.2 Box-Behnken Design.....	55
BAB III BAHAN-PERALATAN DAN METODE PENGUJIAN	57
3.1 Bahan Bakar.....	57
3.1.1 Bahan Bakar Gasolin.....	57
3.1.2 Bahan Bakar Bioethanol.....	57
3.2 Peralatan Pengujian	57
3.2.1 Mesin Port Fuel Injeksi Satu Silinder.....	57
3.2.2 Komposisi Bahan Bakar dan Propertiesnya	58
3.2.3 Exhaust Gas Analyzer	59
3.2.4 Waterbrake Dynamometer.....	59
3.2.5 Electronic Control Unit	59
3.2.6 Peralatan Bantu.....	60
3.3 Rangkaian Peralatan Percobaan	62
3.3.1 Diagram Rangkaian Peralatan Pengujian	62
3.3.2 Desain Eksperimen	62
3.4 Prosedur dan Tahapan Pengujian	63
3.4.1 Prosedur Menentukan Rancangan Penelitian	64
3.4.2 Prosedur Optimasi Respon	66
3.5 Jadwal Penelitian.....	68

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	69
4.1 Data Pengamatan E100.....	69
4.2 Analisis Pendugaan Model Regresi Respon E100	70
4.2.1 Analisis Pendugaan Model Regresi Torsi-E100.....	70
4.2.2 Analisis Pendugaan Model Regresi BSFC-E100	75
4.2.3 Analisis Pendugaan Model Regresi BTE-E100.....	80
4.2.4 Analisis Pendugaan Model Regresi CO-E100.....	84
4.2.5 Analisis Pendugaan Model Regresi HC-E100.....	89
4.3 Plot Permukaan-Kontur dan Optimasi Lokal Respon	94
4.3.1 Plot Permukaan dan Kontur Respon.....	94
4.3.2 Optimasi Lokal Model Persamaan Regresi Respon ...	95
4.4 Transformasi Variabel Faktor.....	100
4.5 Optimasi Single Respon Torsi dengan 4 <i>Constraint</i>	101
4.6 Uji Konfirmasi Dengan <i>One Sample-T</i>	102
4.7 Pembahasan Hasil Pengujian dan Optimasi	108
4.7.1 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon Torsi	108
4.7.2 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon BSFC ...	117
4.7.3 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon BTE	121
4.7.4 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon CO	125
4.7.5 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon HC	129
4.8 Persamaan Optimasi Respon Pengujian	132
4.9 Bahan Bakar Gasolin-Bioethanol dan Emisi Aldehida	134
4.10 Aplikasi dan Pengembangan Hasil Penelitian	139
BAB V PENUTUP	140
5.1 Kesimpulan.....	140
5.2 Saran-Saran.....	143
DAFTAR PUSTAKA	145
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

No	Nama	Hal
1-1	Kerangka ilmiah dan peta jalan penelitian	6
2-1	Pengaruh variasi λ terhadap BMEP dan BP	10
2-2	Pengaruh variasi λ terhadap BSFC dan CO	10
2-3	Total konsumsi bahan bakar dan BSFC vs daya	11
2-4	Pengaruh variasi λ terhadap emisi HC dan NO _x	12
2-5	Grafik perbandingan kompresi dan angka oktan	15
2-6	Grafik RON campuran gasolin dan bioethanol	17
2-7	Pengaruh CR vs daya pada variasi konsentrasi dan rpm	18
2-8	Pengaruh perbandingan kompresi terhadap emisi CO	18
2-9	Pengaruh perbandingan kompresi terhadap HC	19
2-10	Pengaruh CR terhadap tekanan silinder dan SFC	20
2-11	Nilai RvP terhadap konsentrasi alkohol	21
2-12	Durasi injeksi E100 pada perbandingan kompresi 11	23
2-13	Kecepatan pembakaran laminar beberapa jenis bahan bakar pada berbagai nilai lambda	25
2-14	Kecepatan pembakaran laminar bioethanol oleh beberapa peneliti pada temperatur dan lambda yang berbeda	25
2-15	Api laminar ethanol, iso-octane dan E10	26
2-16	Pengaruh waktu penyalaan terhadap tekanan puncak silinder	26
2-17	Efek IT terhadap torsi dan daya efektif mesin	27
2-18	Efek CR, konsentrasi dan RPM terhadap pengapian	28
2-19	Efek kecepatan mesin terhadap daya dan BMEP	28
2-20	Proses pembakaran pada mesin Spark Ignition	29
2-21	Durasi pembakaran pada mesin SI	32
2-22	Tekanan silinder pada 100 variasi siklus berurutan	34
2-23	Proses pelepasan panas pada mesin SI terhadap interval CA	35
2-24	Geometri ruang bakar	36
2-25	Emisi gas mesin spark ignition terhadap nilai λ	38
2-26	Proses pembentukan emisi acetaldehyde dan turunannya	42
2-27	Perkembangan sistem injeksi bahan bakar	45
2-28	Injektor pada sistem PFI tipe LH buatan Bosch	47

No	Nama	Hal
2-29	Diagram valve timing	51
2-30	Rancangan percobaan Central Composite Design	55
2-31	Desain eksperimen <i>Box-Behnken</i> , $k=3$	56
3-1	Model Motor dan Silinder Honda CB150R	57
3-2	Potongan silinder mesin pengujian	58
3-3	Gas analyzer	59
3-4	Waterbreak dynamometer	59
3-5	ECU programble dan display monitor	60
3-6	ECU standar mesin	60
3-7	Peralatan bantu blower dan gelas ukut	61
3-8	Peralatan bantu stopwatch dan roller	61
3-9	Peralatan bantu pengambilan formadelhyde (probe dan reagent)	61
3-10	Diagram rangkaian peralatan uji	62
3-11	Skema dan desain eksperimen	62
3-12	Diagram alir prosedur desain penelitian dan optimasi	63
3-13	Diagram alir prosedur pengujian dan pengambilan data	64
3-14	Contoh input sintak dan solusi persamaan optimasi dengan perangkat <i>LINGO</i>	68
4-1	Grafik AFC untuk model respon Torsi	73
4-2	Uji keidentikan residual respon Torsi	74
4-3	Grafik distribusi normal residual dari respon Torsi	74
4-4	Grafik ACF residual untuk model respon BSFC-E100	78
4-5	Uji keidentikan residual respon BSFC-E100	78
4-6	Grafik distribusi normal residual dari respon BSFC	79
4-7	Grafik ACF residual untuk model respon BTE	83
4-8	Grafik ACF residual untuk model respon BTE	83
4-9	Grafik ACF residual untuk model respon BTE	84
4-10	Grafik ACF residual untuk model respon emisi CO	88
4-11	Uji keidentikan residual respon emisi CO	88
4-12	Grafik distribusi normal residual dari respon <i>emisi CO</i>	89
4-13	Grafik ACF residual untuk model respon emisi HC	92
4-14	Uji keidentikan residual respon <i>emisi HC</i>	93
4-15	Grafik distribusi normal residual dari respon <i>emisi HC</i>	93
4-16	Plot permukaan dan kontur optimasi Torsi vs IT; RPM	95

No	Nama	Hal
4-17	Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs IT; CR	95
4-18	Blox plot <i>one sample-t</i> respon Torsi	103
4-19	Blox plot <i>one sample-t</i> respon BSFC	104
4-20	Blox plot <i>one sample-t</i> respon BTE	105
4-21	Blox plot <i>one sample-t</i> respon CO	106
4-22	Blox plot <i>one sample-t</i> respon HC	107
4-23	Grafik Torsi-E100 vs CR; IT; RPM hasil optimasi dan mapping	108
4-24	Torsi E100 vs Pengapian (a), dan durasi injeksi vs RPM (b)	111
4-25	Grafik Torsi vs RPM E100, E85, E70 dan E50 pada kondisi MBT	112
4-26	Plot permukaan dan kontur Torsi E100 vs CR; RPM	116
4-27	Grafik BSFC vs IT; RPM bahan bakar E50 – E100	117
4-28	Grafik BSFC-E100 vs CR; IT; RPM hasil optimasi dan mapping	118
4-29	Plot permukaan dan kontur respon BSFC vs CR; RPM	119
4-30	Grafik BTE E50-E100 vs CR; IT; RPM hasil mapping	122
4-31	Grafik BTE vs CR; IT; RPM E100 hasil mapping dan optimasi	123
4-32	Plot permukaan dan kontur BTE vs CR; RPM E100	124
4-33	Grafik emisi CO vs RPM hasil mapping MBT	126
4-34	Grafik emisi CO-E100 vs RPM; CR; IT hasil optimasi dan mapping	127
4-35	Plot permukaan dan kontur CO E100 vs CR; RPM	128
4-36	Grafik emisi HC E100 – E50 vs CR; IT; RPM hasil mapping MBT	130
4-37	Grafik emisi HC E100 vs RPM; CR; IT hasil mapping dan optimasi	130
4-38	Plot permukaan dan kontur emisi HC E100 vs CR; RPM	131
4-39	Gas acetaldehida (a) dan etilen (b) E0, E3 dan E10	138
4-40	Aplikasi penelitian dan pengembangan ECU kendaraan	139

DAFTAR TABEL

No	Nama	Hal
2.1	Perbandingan sifat dan karakteristik gasolin dan campuran gasolin-bioetanol	13
2.2	Karakteristik umum azeotropika bioetanol dalam hidrokarbon	22
2.3	Hasil Pengujian durasi pembakaran E100 dan H100	33
2.4	Standar emisi kendaraan Uni Eropa	39
2.5	Emisi karbon dan karbonil dari kendaraan EURO 4 dan 5	40
2.6	Kelebihan dan kekurangan sistem DI dibandingkan sistem PFI	46
2.7	Kelebihan dan kekurangan mekanisme injeksi OVI dan CVI	53
2.8	Jumlah runs order desain eksperimen CCD	55
2.9	Perbedaan desain CCD dan Box-Behnken dengan k=3	56
3.1	Spesifikasi Mesin Kondisi Standar dan Modifikasi	58
3.2	Level, variabel kode dan variabel alami dari variabel faktor penelitian	65
3.3	Rancangan Percobaan <i>Box Behnken</i>	65
3.4	Jadwal dan rencana penelitian	68
4.1	Hasil Pengamatan dan Perhitungan Percobaan Untuk Respon E100	69
4.2	Nilai pendugaan koefisien regresi untuk torsi E100	70
4.3	Analisis variansi torsi E100	70
4.4	Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BSFC-E100	75
4.5	Analisis Variansi untuk BSFC-E100	75
4.6	Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BTE-E100	80
4.7	Analisis Variansi untuk BTE-E100	80
4.8	Nilai pendugaan koefisien regresi untuk Emisi CO-E100	85
4.9	Analisis Variansi untuk Emisi CO-E100	85
4.10	Nilai pendugaan koefisien regresi untuk Emisi HC-E100	89
4.11	Analisis Variansi untuk Emisi HC-E100	90
4.12	Model persamaan optimasi respon Torsi	96
4.13	Solusi persamaan optimasi respon Torsi	96

No	Nama	Hal
4.14	Model persamaan optimasi respon BSFC	97
4.15	Solusi persamaan optimasi respon BSFC	97
4.16	Solusi persamaan optimasi respon BSFC	97
4.17	Solusi persamaan optimasi respon BTE	98
4.18	Model persamaan optimai respon CO	98
4.19	Solusi persamaan optimasi respon CO	98
4.20	Model persamaan optimasi respon HC	99
4.21	Solusi persamaan optimasi respon HC	99
4.22	Kombinasi koding variabel faktor dan nilai optimasi lokal respon E100	99
4.23	Kombinasi variabel faktor sebenarnya dan nilai optimasi lokal respon E100	100
4.24	Input model persamaan optimasi multi respon E100	101
4.25	Hasil optimasi multi respon E100	102
4.26	Nilai variabel respon pada kondisi optimasi <i>single</i> respon Torsi	102
4.27	Kombinasi variabel proses dan hasil uji konfirmasi respon	103
4.28	Uji <i>One Sample-T</i> respon Torsi	103
4.29	Uji <i>One Sample-T</i> respon BSFC	104
4.30	Uji <i>One Sample-T</i> respon BTE	105
4.31	Uji <i>One Sample-T</i> respon CO	106
4.32	Uji <i>One Sample-T</i> respon HC	107
4.33	Optimasi Lokal BTE E100, E85, E75 dan E50	125
4.34	Optimasi Lokal CO E85, E75 dan E50	129
4.35	Optimasi Lokal emisi HC E100, E85, E75 dan E50	132
4.36	Perbandingan efek E0 dan E20 terhadap kesehatan dan lingkungan	135
4.37	Kondisi dan hasil pengujian mesin SI-PFI untuk emisi formadelhida	137
5.1	Nilai optimasi lokal vaariabel respon E100-E50	141
5.2	Nilai variabel BSFC, BTE, CO dan HC pada kondisi optimasi Torsi	142

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Akronim	Pengertian
λ	Lambda, perbandingan bahan bakar-udara aktual dan stoikiometri
γ	Gama, Perbandingan Kompresi
ϕ	Fi, Perbandingan bahan bakar-udara stoikiometri dan aktual
η_{th}	Effisiensi Termal
ABDC	After Bottom Dead Centre
Act	Aktual
AFR	Air Fuel Ratio (perbandingan udara-bahan bakar)
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Standard Testing and Material
ATDC	After Top Dead Centre
BBDC	Before Bottom Dead Centre
BMEP	Brake Mean Effective Pressure (tekanan efektif rata-rata)
BP	Brake Power
BSFC	Brake Spesific Fuel Consumption
BT	Brake Torque
BTDC	Before Top Dead Centre (sebelum titik mati atas)
BTE	Brake Thermal Efficiency
CA	Crank Angle
CCD	Centre Compsite Design
CFR	Combustion Fuel Research
CI	Compression Ignition
CO	Karbon Monoksida
CO ₂	Karbon dioksida
CoV	Cycle of Variation
CR	Compression Ratio
CVI	Close Valve Intake
DEN	Dewan Energi Nasional

Akronim	Pengertian
DI	Direct Injection
DOE	Design of Experiment
DOHC	Double Over Head Cam
E100	Bahan bakar bioetanol murni
E50	Campuran gasolin 50% dan bioetanol 50%
E70	Campuran gasolin 30% dan bioetanol 70%
E85	Campuran gasolin 15% dan bioetanol 85%
EBT	Energi Baru dan Terbarukan
ECU	Electronic Control Unit
EFI	Electronic Fuel Injection
FOT	Fully Open Throttle
GDI	Gasoline Direct Injection
GHG	Green House Gas (gas rumah kaca)
HC	Hidrokarbon
HoV	Heat of Vaporization (panas penguapan)
KEN	Komisi Energi Nasional
Kg	Kilogram
KL	Kilo liter
kPa	Kilo Pascal
KS	Kolmogorov Smirnov
LINGO	Non Linear Generalized Optimazer
LPG	Liquid Petroleum Gas
MBT	Maximum Brake Torque
MJ	Mega Joule
MPI	Multi Port Injection
NEDC	New European Driving Cycle
NO _x	Nitrogen Oksida
OVI	Open Valve Intake
PFI	Port Fuel Injection
PPM	Part per Million
RON	Research Octane Number

Akronim	Pengertian
RPM	Revolution per Minute
RSM	Response Surface Methodology
RvP	Reid Vapour Pressure (tekanan penguapan)
SI	Spark Ignition
SMD	Santer Mean Diameter
SPI	Single Port Injection
Stoich	Stoikiometri
SUDC	standard urban driving cycle
TDC	Top Dead Centre
TMA	Titik mati atas
ubHC	Unburnt hydrocarbon
VOC	Volatatile Organic Compound
WLTC	World harmonized Light-duty vehicle Test Cycle
WOT	Wide Open Throttle
κ	Perbandingan Kapasitas Jenis, jumlah variabel faktor

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global yang mengakibatkan naiknya temperatur bumi dan permukaan air laut menjadi isu utama dunia beberapa dekade terakhir ini. Emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil menjadi salah satu penyebab terjadinya masalah tersebut. Sektor transportasi merupakan penyumbang terbesar gas rumah kaca (GHG) yang memproduksi 73% gas CO₂ dari 600 juta kendaraan yang beroperasi setiap hari, dan sisanya dari sektor industri dan rumah tangga. Angka tersebut didukung oleh data bahwa lebih dari separuh konsumsi minyak fosil dihabiskan pada sektor transportasi. Sebagai gambaran pada tahun 2012 dari 70.9 juta KL konsumsi bahan bakar minyak di Indonesia, 45.9 juta KL atau hampir 65% dihabiskan pada sektor transportasi. Angka ini akan terus bertambah, dengan perkiraan pada tahun 2050 penggunaan bahan bakar akan meningkat 4 kali lipat seiring pertambahan jumlah kendaraan yang mencapai 2,5 milyar (Sergio, 2014; Balat, 2008; DEN, 2014). Kebutuhan bahan bakar fosil yang terus meningkat tidak sebanding dengan ketersediaannya yang terus menurun, baik dalam bentuk cadangan potensial maupun terbukti. Data dari Komisi Energi Nasional (KEN, 2014), cadangan minyak fosil dunia akan memenuhi kebutuhan energi dunia kurang dari 80 tahun. Sementara untuk kawasan ASEAN dan Indonesia ketersediaan energi fosil hanya bertahan kurang lebih 20 dan 12 tahun.

Gambaran di atas menjadi perhatian untuk segera beralih ke energi baru terbarukan (EBT) dan ramah lingkungan. Bioetanol merupakan bahan bakar potensial untuk diaplikasikan pada mesin kendaraan bermotor didasarkan pada karakteristik dan sifatnya. Kandungan oksigen bioetanol yang mencapai 35% dapat menghasilkan pembakaran sempurna sehingga menurunkan emisi CO dan HC (Setiawan, 2012; Turkoz, 2014). Dengan kelebihan oksigen pada bioetanol tersebut AFR stoikiometri bioetanol menjadi lebih kecil dari gasolin (~9 vs ~14). Oksigen yang besar pada bioetanol juga berdampak pada kecepatan api laminar yang meningkat sehingga perambatan nyala api bioetanol lebih singkat dari gasolin

(~39 vs ~33 cm/s). Sementara itu, panas laten penguapan bioetanol yang tinggi dari gasolin (~920 vs 400 kJ/kg) akan memberi efek dingin pada campuran udara dan bahan bakar sehingga meningkatkan efisiensi volumetris serta menurunkan temperatur silinder dan emisi NO_x. Pada saat yang sama, HoV bioetanol yang tinggi berdampak pada kebutuhan energi yang lebih besar untuk menaikkan tekanan uapnya. Dengan kedua karakteristik inilah maka *ignition timing* bioetanol lebih maju (*advance*) dari gasolin.

Memajukan *ignition timing* bioetanol akan menghasilkan *ignition delay* yang lebih panjang sehingga dapat dimanfaatkan oleh bioetanol untuk menyerap sebagian panas dalam silinder untuk menaikkan tekanan penguapan dan volatilitasnya. Oleh karena *flame flammability speed* bioetanol lebih singkat maka memajukan pengapian diharapkan tekanan puncak campuran dapat dicapai sebelum terjadinya ledakan oleh pembakaran yang didahului oleh perambatan nyala. Angka oktan bioetanol yang lebih besar dari gasolin (~88 vs 110) sangat diperlukan pada mesin pembakaran dalam selain meminimalkan detonasi akibat terjadinya pembakaran awal karena *self ignition* oleh tekanan kompresi yang tinggi, perbandingan kompresi yang tinggi juga akan meningkatkan efisiensi energi sehingga kerja yang dihasilkan menjadi lebih besar.

Akan tetapi dalam aplikasinya ditemukan sejumlah kekurangan bioetanol diantaranya kandungan energi yang rendah dibanding gasolin (~26.9 vs ~44 MJ/kg). Dengan kondisi tersebut diperlukan volume injeksi yang lebih besar dari gasolin pada daya yang sama. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menambah volume injeksi atau memperbesar lubang semprotan bahan bakar (Balki, 2014; Yoon, 2012; Paloboran, 2017).

Karakteristik bahan bakar dari gugus *etil-alkohol* yang mempunyai panas laten penguapan yang tinggi menyebabkan tekanan penguapannya menjadi rendah (R_vP) dibandingkan dengan gasolin (15.7-17 vs 55.7-103.4). Dengan demikian diperlukan panas yang lebih tinggi untuk menaikkan tekanan uapnya agar mudah teratomisasi dan terbakar. Dengan kondisi inilah mesin yang berbahan bakar bioetanol sulit dihidupkan pada suhu rendah (*cold start*). Hal tersebut dapat diatasi dengan menaikkan temperatur bahan bakar menggunakan pemanas (*heater*)

sebelum proses injeksi. Akan tetapi penelitian yang dilakukan oleh Prayoga (2017) dengan memasang elemen pemanas pada injektor cukup efektif mengatasi masalah *cold start*. Cara lain yang dapat dilakukan untuk mengatasi *cold start* adalah menggunakan dua tangki bahan bakar dimana tangki pertama untuk gasolin digunakan pada saat start awal sebelum beralih menggunakan bioetanol pada tangki kedua (Jeuland, 2004).

Solubilitas bioetanol terhadap air yang tinggi dapat menyebabkan bahan bakar mudah teroksidasi dan membentuk senyawa *oksida terhidrasi* $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (karat). Senyawa tersebut akan merusak komponen mesin yang terbuat dari logam dan sistem aliran bahan bakar yang terbuat dari karet. Oleh sebab itu dibutuhkan pengembangan material tahan karat untuk komponen mesin yang berbahan bakar bioetanol. Selain itu keberadaan air dalam bioetanol dapat menurunkan nilai kalor bahan bakar (Turkoz, 2014; Chelik MB, 2007).

Aplikasi bioetanol sebagai campuran dengan gasolin pada konsentrasi rendah ($\leq 20\%$) tidak membutuhkan perubahan *mayor* pada parameter operasional dan konstruksi mesin (Balat, 2008; Yao YC, 2013). Berbeda jika konsentrasi bioetanol lebih dari 50%, pengaturan pada satu atau dua parameter memperlihatkan ketidak konsistenan pada kinerja dan emisi mesin sehingga sulit mencapai titik optimumnya sebagaimana yang dilakukan pada level 25–40% (Paloboran, 2016). Berdasarkan kondisi tersebut dan mencermati karakteristik bahan bakar, melahirkan sebuah hipotesis bahwa kondisi optimum pembakaran campuran gasolin dan bioetanol $\geq 50\%$ akan diperoleh jika dilakukan pengaturan terpadu pada parameter desain (perbandingan kompresi), operasi (putaran mesin) dan pembakaran (pengapian) mesin SI-PFI satu silinder masing-masing pada kondisi optimumnya.

Hal inilah yang mendasari dan melatar belakangi dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui karakteristik dan optimasi performansi mesin SI-PFI satu silinder berbahan bakar E50–E100 dengan pengaturan terpadu pada parameter desain, operasi dan pembakaran.

1.2 Hipotesa

Dengan diskripsi permasalahan yang disampaikan di latar belakang atas, menghasilkan sebuah hipotesis bahwa, *“Pengaturan terpadu pada parameter desain, operasi dan pembakaran untuk bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol E50 – E100 akan berdampak pada peningkatan daya, penurunan konsumsi bahan bakar dan emisi mesin SI-PFI Satu Silinder”*

1.3 Rumusan Masalah

Hal yang memotivasi dilakukannya penelitian ini adalah menyelesaikan sebuah permasalahan tentang; *“Bagaimana meningkatkan performansi dan menurunkan emisi gas pembakaran mesin SI-PFI satu silinder berbahan bakar bioetanol E50-E100”*.

1.4 Keterbaruan Penelitian

Penelitian tentang penggunaan campuran bahan bakar gasolin-bioetanol sudah banyak dilakukan khususnya untuk konsentrasi bioetanol sampai 25%. Hal ini dimungkinkan karena pada konsentrasi tersebut bioetanol akan bersifat sebagai aditif pengungkit angka oktan bahan bakar gasolin. Zat aditif tersebut diperlukan untuk mengurangi terjadinya *knocking* pada proses pembakaran tanpa merubah konstruksi mesin. Hal ini menjadi salah satu alasan banyak negara di dunia bahkan sebagian besar negara Asia Tenggara telah mewajibkan penggunaan bioetanol 20 -25% dalam campuran bahan bakar gasolin untuk menjadi bahan bakar utama kendaraan di negara-negara tersebut.

Sementara itu penelitian tentang penggunaan bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol lebih dari 50% yang ada selama ini, dilakukan secara parsial pada parameter desain, pembakaran dan operasional mesin yang menyesuaikan dengan perubahan konsentrasi campuran bahan bakar. Oleh sebab itu penerapan *Metode Pengontrolan Terpadu pada Parameter Desain, Operasi dan Pembakaran Mesin SI-PFI Satu Silinder* akan menghasilkan karakteristik performansi dan emisi pembakaran mesin yang lebih baik dari metode sebelumnya, khususnya untuk penggunaan bahan bakar bioetanol konsentrasi lebih dari 50%. Hal ini dapat terjadi karena bahan bakar akan dikondisikan pada keadaan terbaiknya pada setiap

perbandingan kompresi, pengapian dan putaran mesin, dimana daya mesin dijadikan sebagai tolok ukur utama.

1.5 Batasan Masalah

Permasalahan penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut ini:

1. Mesin yang akan digunakan mesin SI-PFI, satu silinder, 4 katub.
2. Parameter mesin yang dimaksud adalah:
 - Parameter desain adalah perbandingan kompresi (12, 12.5, 13)
 - Parameter operasional adalah putaran mesin (2000-8000 RPM)
 - Parameter pembakaran adalah volume injeksi, yaitu 125% - 200% (interval 25%) dan derajat pengapian bahan bakar, yaitu 12 – 28 (interval 4° BTDC)
3. Bahan bakar gasolin yang digunakan adalah Pertamina RON 92 (Lampiran 1).
4. Bioetanol yang digunakan memiliki spesifikasi sesuai Lampiran 2.
5. Komposisi campuran bahan bakar gasolin-bioetanol adalah 0:100 (E100), 15:85 (E85), 30:70 (E70) dan 50:50 (E50) basis volume
6. Mapping volume injeksi dan derajat pengapian bahan bakar didasarkan metode *maximum brake torque* (MBT)
7. Pengaturan putaran mesin menggunakan *waterbreak dynamometer* pada kondisi *Fully Open Throttle (FOT)*
8. Variabel bebas (faktor) pada penelitian ini adalah perbandingan kompresi, derajat pengapian bahan bakar dan putaran mesin
9. Variabel terikat (respon) pada penelitian adalah Torsi (T), efisiensi thermal (BTE), konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), emisi karbon monoksida (CO) dan emisi hidrokarbon (HC)

1.6 Tujuan Penelitian

Pemanfaatan bioetanol sebagai bahan bakar pengganti gasolin pada kendaraan bermotor diharapkan dapat menurunkan produksi emisi karbon dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang semakin menipis. Selain itu tujuan khusus dari penelitian ini adalah:

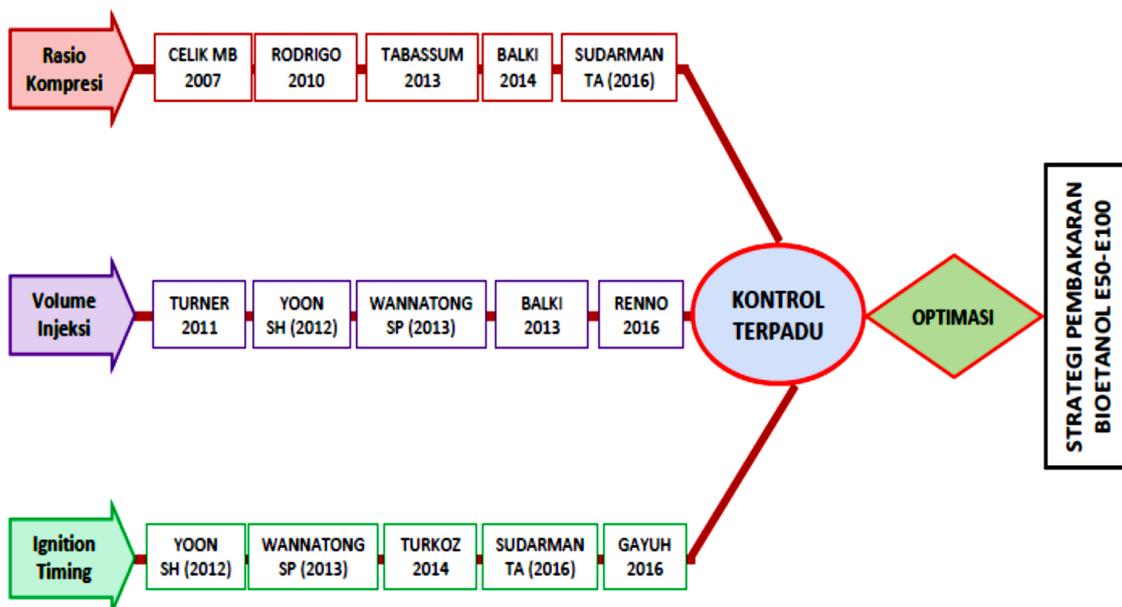
1. Mengetahui karakteristik performansi mesin SI-PFI satu silinder berbahan bakar E50, E70, E85 dan E100 dengan pengaturan terpadu pada parameter desain, operasional dan pembakaran mesin.
2. Mengetahui signifikansi pengaruh variabel proses (*independent variable*) terhadap variabel respon (*dependent variable*) dan kondisi optimasinya untuk bahan bakar E50, E70, E85 dan E100 pada mesin SI-PFI satu silinder dengan pengaturan terpadu pada parameter desain, operasional dan pembakaran.

1.7 Target dan Kontribusi Penelitian

Target dan kontribusi yang dari penelitian ini adalah:

1. Penggunaan bahan bakar bioetanol konsentrasi tinggi sebagai pengganti bahan bakar fosil pada kendaraan bermotor yang ada saat ini secara luas tanpa merubah konstruksi mesin
2. Strategi pembakaran campuran bahan bakar gasolin dan bioetanol konsentrasi tinggi pada mesin SI-PFI satu silinder untuk menghasilkan kinerja yang tinggi dan emisi pembakaran yang rendah dengan perubahan pada ECU motor

1.8 Kerangka Ilmiah dan Peta Jalan Penelitian



Gambar 1-1: Kerangka ilmiah dan peta jalan penelitian

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan disajikan kajian pustaka dan teori dasar yang mendasari seluruh proses pengujian dari penelitian ini. Sumber rujukan yang dipaparkan pada bab ini disadur dari berbagai sumber bacaan baik dalam bentuk buku teks, jurnal, prosiding maupun yang diunduh dari media daring yang terkait erat dengan masalah yang dibahas dalam penelitian.

Diskripsi yang disajikan baik dalam bentuk pernyataan atau persamaan lebih dititik beratkan pada sifat-sifat utama bioetanol murni yang paling berpengaruh dalam pembakaran dan dikonfirmasi dengan berbagai referensi sebagai sumber rujukan untuk mendukung pengujian yang dilakukan. Selain itu pengaruh perubahan beberapa parameter operasional mesin akan diuraikan melalui pendekatan yang lebih komprehensif dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

2.1 Bahan Bakar Bioetanol

Bioetanol adalah senyawa etil alkohol dengan rumus kimia C_2H_5OH merupakan cairan yang diperoleh dari proses fermentasi dan destilasi bahan pangan yang mengandung karbohidrat, yaitu; jagung, umbi-umbian, sorgum, gandum dan sebagainya. Karakteristik dan sifat fisik bioetanol adalah tidak berwarna, mudah menguap dan mudah terbakar, oleh sebab itu cairan ini banyak digunakan dalam produk-produk farmasi atau obat-obatan, campuran minuman keras maupun sebagai bahan bakar kendaraan.

Bioetanol dan bahan bakar alkohol lainnya (metanol, butanol dsb) adalah jenis bahan bakar yang paling potensial dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan, khususnya pada mesin gasolin dengan penyalaan percik (*spark ignition*). Hal ini dikarenakan bioetanol mempunyai sifat fisik dan karakteristik pembakaran yang hampir sama dengan gasolin. Bioetanol dan metanol selain dapat dihasilkan dari tanaman yang mengandung sari pati, bahan bakar jenis ini juga dapat diproduksi dari molases (bergula) seperti gula, nira; dari gas alam, gasifikasi batu bara serta dari bahan berselulosa seperti, kayu, jerami, batang

tanaman, biomassa, bahkan sampah yang mudah terbakar melalui sebuah metode oksidasi parsial. Dengan metode ini pula bioetanol dapat diproduksi dari sumber *biofuel* lainnya seperti beras, dedak dan serbuk gergaji (Balat dkk, 2008; Balki dan Sayin, 2014). Beberapa sifat bioetanol yang kurang menguntungkan pada mesin gasolin diantaranya, nilai kalor yang rendah, tekanan penguapan yang rendah, serta mudah bercampur dengan air sehingga lebih bersifat korosif. Perbandingan sifat-sifat gasolin dan bioetanol dan campurannya dalam berbagai konsentrasi disebutkan pada Tabel 2.1

2.2 Sifat-Sifat Utama Bahan Bakar dalam pembakaran

Pada bagian dibahas beberapa sifat fisik dan kimia bahan bakar yang berperan dalam proses pembakaran; perbandingan udara dan bahan bakar (AFR), tekanan penguapan, angka oktan, nilai kalor, panas laten penguapan, perbandingan oksigen dan karbon, laminar flame speed dan lain-lain. Dengan memperhatikan karakteristik dari setiap sifat bahan bakar bioetanol mulai dari sistem aliran bahan bakar, injeksi ke ruang bakar sampai proses pembakaran, akan menghasilkan performansi mesin yang tinggi dan emisi pembakaran yang rendah.

2.2.1 Perbandingan Udara-Bahan Bakar (AFR)

Perbandingan udara bahan bakar didefinisikan sebagai jumlah massa udara yang dibutuhkan untuk pembakaran setiap satu satuan massa bahan bakar. Kondisi ideal campuran udara dan bahan bakar biasa dinyatakan dengan kondisi stoikiometri. Pada kondisi tersebut jumlah udara yang masuk ke ruang bakar sesuai dengan yang dibutuhkan untuk membakar seluruh bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar.

Senyawa oksigen (O_2) yang terdapat dalam bioetanol sebesar 35% menyebabkan kebutuhan udara pembakaran bioetanol lebih rendah dibandingkan gasolin (AFR stoikiometri 8.93 vs 14.73). Dengan demikian semakin tinggi konsentrasi bioetanol dalam campuran gasolin, maka suplai udara pembakaran yang dibutuhkan semakin menurun. Kondisi stoikiometri diperlukan untuk menghasilkan pembakaran sempurna sehingga daya dan efisiensi thermal akan meningkat serta emisi CO dan HC menurun.

Kondisi campuran stoikiometri digambarkan pula melalui perbandingan relatif air–fuel atau lambda (λ), yaitu perbandingan bahan bakar dan udara aktual (F/A_{act}) dengan perbandingan bahan bakar dan udara stoikiometri (F/A_{stoich}). Campuran stoikiometri diperoleh jika $\lambda = 1$, sedangkan jika $\lambda < 1$ disebut campuran kaya (kental, gemuk) dan jika $\lambda > 1$ adalah campuran kurus (encer, miskin). Secara garis besar campuran encer dan kental tidak dikehendaki dalam proses pembakaran. Akan tetapi pada kondisi-kondisi tertentu campuran kaya atau miskin bisa diaplikasikan dengan pertimbangan efisiensi keseluruhan yang akan dicapai oleh pengoperasian mesin. Nilai lambda diperoleh dari hasil pengukuran dengan menggunakan lambda meter atau dihitung dengan menggunakan persamaan (Schifter, 2013);

$$\lambda = \frac{[\text{CO}_2] + \left[\frac{\text{CO}}{2}\right] + [\text{O}_2] + \left[\frac{\text{NO}}{2}\right] + \left(\left(\frac{\text{H}_{CV}}{4} \times \frac{3,5}{3,5 + \left[\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}\right]} \right) - \frac{\text{O}_{CV}}{2} \right) \times ([\text{CO}_2] + [\text{CO}])}{\left(1 + \frac{\text{H}_{CV}}{4} - \frac{\text{O}_{CV}}{2} \right) \times ([\text{CO}_2] + [\text{CO}]) + (\text{C}_{faktor} \times [\text{HC}])} \quad (2-1)$$

dengan:

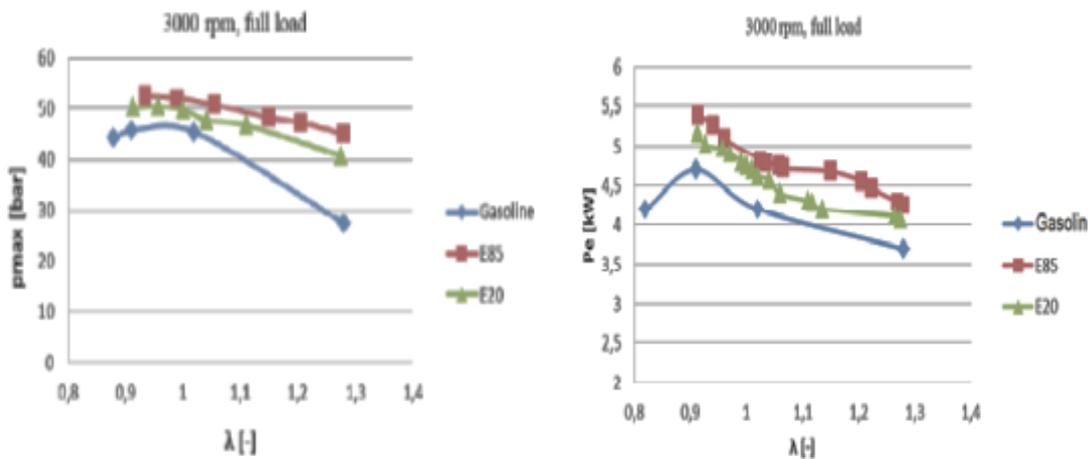
H_{CV} = perbandingan hidrogen dan karbon dalam bahan bakar

O_{CV} = perbandingan oksigen dan karbon dalam bahan bakar

C_{faktor} = jumlah atom karbon dalam senyawa hidrokarbon

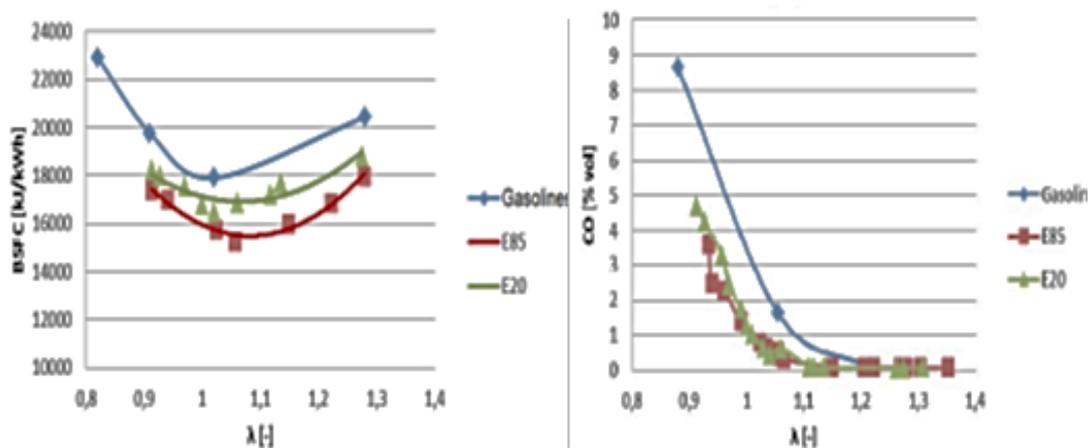
Beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik kinerja dan emisi mesin melalui perubahan nilai lambda, seperti pada penelitian Radu (2014). Penelitian tersebut dilakukan pada mesin karburator satu silinder dengan kondisi putaran konstan 3000 rpm, perbandingan kompresi mesin 8.5/1, bahan bakar gasolin (E0), E20 dan E85 pada variasi lambda 0.8–1.4. Hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar (2.1–2.2).

Semakin tinggi konsentrasi bioetanol akan menghasilkan tekanan silinder dan daya efektif mesin yang semakin besar. Hal ini dipicu oleh *heat of vaporization* dan kandungan oksigen bioetanol yang lebih tinggi dibandingkan dengan gasolin. Kondisi optimum ketiga jenis bahan bakar diperoleh pada nilai lambda yang sama yaitu, $\lambda = 0.90$, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar (2.1).



Gambar 2.1 : Pengaruh variasi λ terhadap BMEP dan BP (Radu dkk, 2014)

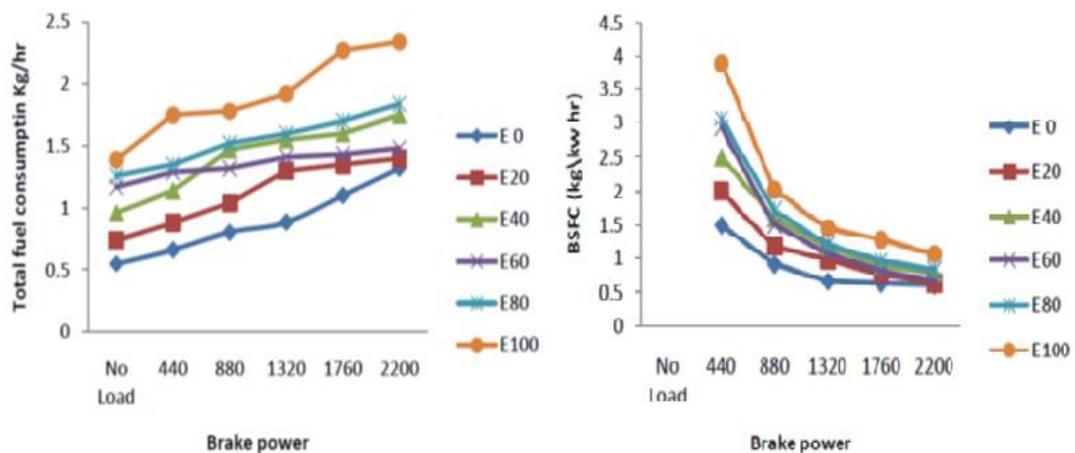
Sementara itu, nilai tekanan dan daya efektif akan semakin menurun jika campuran semakin miskin pada semua jenis bahan bakar. Kondisi ini dipengaruhi oleh massa bahan bakar dalam campuran yang semakin berkurang sehingga berdampak pada penurunan daya dan tekanan mesin. Pada kondisi itu pula, emisi CO dan HC akan semakin menurun (Gambar 2.2b dan Gambar 2.4a).



Gambar 2.2 : Pengaruh variasi λ terhadap BSFC dan CO (Radu, 2014)

Pada situasi yang lain dari Gambar (2.2a) menunjukkan adanya pergeseran nilai lambda menuju kondisi campuran miskin untuk mencapai harga BSFC minimum jika persentase bioetanol dalam gasolin meningkat. Indikasi tersebut ditunjukkan dengan nilai BSFC, sebesar; 2800, 2700 dan 2500 kg/kW-h pada nilai lambda 1.0, 1.05 dan 1.1 masing-masing untuk bahan bakar gasolin (E0), E20 dan E85.

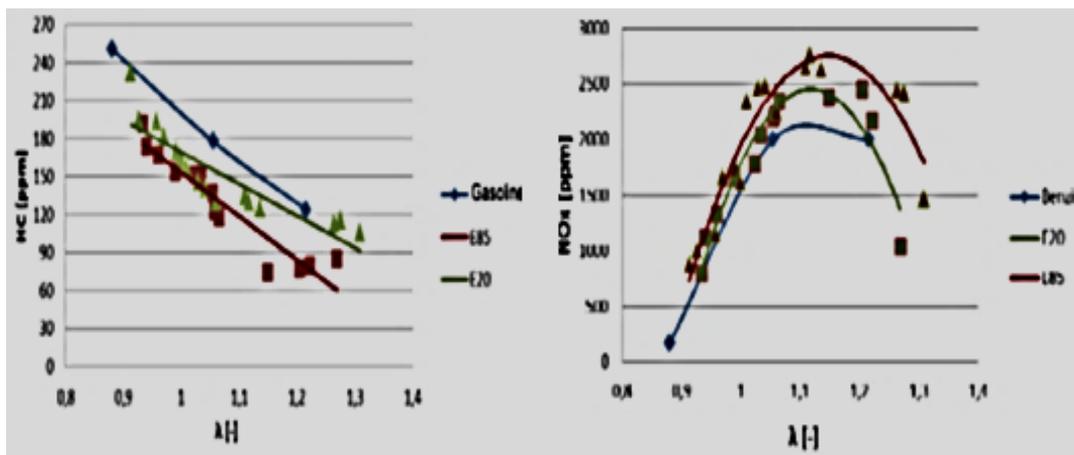
Bahan bakar bioetanol dalam pengaplikasiannya dikenal dalam dua jenis, yaitu *hydrate bioethanol* dan *unhydrate bioethanol*. *Hydrate* bioetanol adalah jenis bioetanol basah dengan kandungan air maksimum 5% basis massa. Sementara itu, *anhydrate* bioetanol adalah bioetanol kering yang kemurniannya bisa mencapai 99,9% dan kadar air maksimal 0,5% basis massa. Kandungan air dalam kedua jenis bahan bakar tersebut akan mempengaruhi nilai kalor dan konsumsi bahan bakar, dimana nilai kalor *hydrate* bioetanol lebih rendah dari *unhydrate* bioetanol sehingga konsumsinya jauh lebih besar. Hal tersebut diperlihatkan oleh penelitian Schifter (2013), tentang laju konsumsi massa campuran bahan bakar gasolin pada 40% *hydrate* dan *unhydrate* bioetanol dengan perubahan nilai lambda 0.90–1.10. Pada penelitian itu diperoleh laju konsumsi bahan bakar minimum diperoleh pada nilai lambda 1.10 untuk setiap kenaikan persentase *hydrate* maupun *unhydrate* bioetanol. Kandungan air dalam bahan bakar campuran gasolin-ethanol akan memperlambat proses pembakaran akan tetapi kuantitas energi yang dihasilkan setiap siklus tetap konstan sehingga panas yang dilepaskan akan sama dengan kerja yang dihasilkan.



Gambar 2.3 : Total konsumsi bahan bakar dan BSFC vs daya (Tabassum, 2012)

Nilai kalor bioetanol kurang lebih hanya sebesar 66% dari bahan bakar gasolin. Kondisi tersebut menyebabkan konsumsi bahan bakar bioetanol lebih besar dibandingkan dengan gasolin. Oleh sebab itu, semakin tinggi konsentrasi bioetanol, maka laju massa bahan bakar dan konsumsi bahan bakar spesifiknya akan semakin meningkat untuk menghasilkan daya yang sama, demikian pula sebaliknya sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar (2.3a dan 2.3b). Sementara itu

perubahan nilai lambda terhadap BSFC pada penelitian Radu (2014) menunjukkan kecenderungan bahwa semakin tinggi konsentrasi bioetanol akan menghasilkan nilai BSFC yang semakin rendah (Gambar 2.2a). Hal ini dikarenakan kandungan oksigen dalam bioetanol semakin tinggi dengan bertambahnya persentase bioetanol sehingga campuran bahan bakar dan udara relatif dalam kondisi miskin dan menghasilkan konsumsi bahan bakar spesifiknya yang rendah.



Gambar 2.4 : Pengaruh variasi λ terhadap emisi HC dan NOx (Radu, 2014)

Pengaruh perubahan nilai lambda terhadap emisi NOx pada penelitian yang sama ditunjukkan pada Gambar (2.4b). Emisi NOx akan semakin meningkat jika nilai lambda menuju kondisi stoikiometri dan setelah itu akan semakin menurun jika nilai lambda dinaikkan. Semakin tinggi konsentrasi bioetanol akan menghasilkan emisi NOx yang semakin besar pula. Hal ini ditimbulkan oleh komposisi oksigen dalam bioetanol yang semakin besar dengan naiknya konsentrasi bioetanol. Dengan penelitian Radu tersebut diketahui NOx tertinggi diperoleh pada lambda 1.1 untuk E0, E20 dan E85.

2.2.2 Perbandingan Kompresi dan Angka Oktan

Perbandingan kompresi adalah salah satu variabel penting dalam menentukan kinerja mesin Otto. Perbandingan kompresi yang tinggi akan menyebabkan kepadatan campuran dan turbulensi campuran dalam ruang bakar meningkat sehingga akan meningkatkan tekanan silinder diikuti oleh naiknya temperatur silinder dan mempercepat laju pembakaran.

Tabel 2-1: Perbandingan sifat dan karakteristik gasolin dan campuran gasolin-bioetanol dalam berbagai konsentrasi

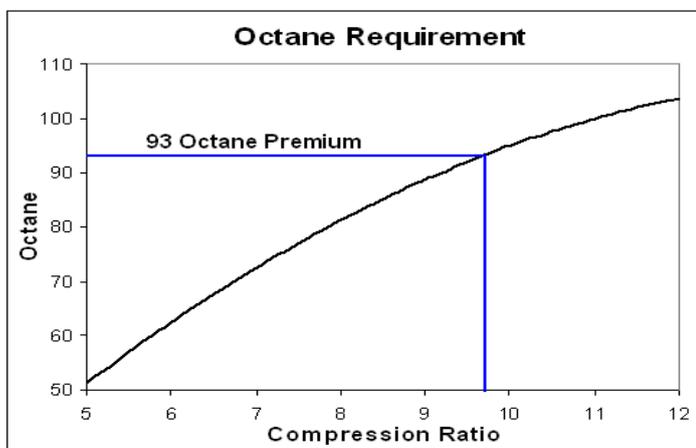
Properties	Unit	E0	E3	E5	E6	E10	E15	E20	E22	E25	E30	E40	E50	E60	70	75	E85	E100	Ref
Rumus Kimia	-	C ₅₋₁₂																C ₅ H ₁₂	
Berat Molekul	kg/ kmol	114,15																46,07	24,42, 43
Fraksi - C	% mass	86,3-88,62	88,55	61,1-84,8		83,01-83,3	82,37	81,12	76,7							60,4	57-57,4	52,2	43,47, 48,13
Fraksi - O	% mass	0	1,1	1,8	2,2	3,40-3,9	5,6	7,36	9,7							26,5	29,5-30	34,7	10,43, 47,48
Fraksi - H	% mass	12,6	11,2	8,5-13,4		13,3			13,6							13,1	13,1	13	43,47, 48
H/C	ratio atom	1,795-2,247			1,918	1,978	1,954	1,962										3	24,48, 13
O/C	ratio atom	0			0,028	0,054	0,081	0,102										0,5	48,13
SG	-	0,7 - 0,78																0,794	
Densitas (15°C)	kg m ⁻³	750 - 765	745	737,9-759,1		745,0-760,8	758,6, 776	759,7, 764,5	740	761,3-775	768,2	771,8-780,6	751-775,7	789,5-779,9	783,9	772,8	778,3-789,5	785-809,9	24,42, 43,47, 62,13, 68, 168
AFR Stoichiometrik	w/w	14,2 - 15,1							13,1/1								10	8,97 - 9	24,43, 47
Viskositas Kinematik	mm ² s ⁻¹	0,5 - 0,84															1,42(47)	1,2-1,57	47
RVP (37,8°C)	kPa	55,2-103,4	56,4-62,6	58,5-59,3	50,88	48,9-65,9	49,85 - 58,8	46,4-58,3		56,1	45,1-56,8	45-63	43,1-51,4	38,9-57,4	34,4		28,3-82,7	15,7-17	10,42, 43,47, 48,13, 68,128
RON	-	88-100	93-96,9	94,5-96,9	92,8	93-98,9	92,4-98,5	93-100,7		100-100,5	102,4	90,9	101,2-103,2	92,7		102	105-107,8	108,61-110	10,24,42,43,48, 62,47,13,68
MON	-	80-92	86,3	84,2-86,8	84	83,8-85,7	82,8	83,4	80	86,4			88,1			88	89	89,7-92	10,24,48,62,13, 68
Cetane Number	-	8																5-20	
Entalphy Formasi																			
(a) Liquid	kJ mol ⁻¹	-259,2																	-224,1
(b) Gas	kJ mol ⁻¹	-277																	-234,6
HHV	MJ kg ⁻¹	42,54-47,3	42,848	40,55-42,72		39,79-41,94	40,08-41,61	8,98-39,5		38,2	36,32-37,8	33,34-36,2	33,34	26,74		30,85	29,2-29,43	29,7	42,48,62,13
Low Heating Value	MJ kg ⁻¹	44			41,4			39,47	39,3	40,83			33,72		31,42?		29,1	26,9	24,43,47,48, 68
LHV at Stoikio	MJ kg ⁻¹	2,77																2,7	
Heat Laten of Vaporation	kJ kg ⁻¹	305-400							439,5									840-920	24,43
Panas Spesifik																			
(a) Liquid	kJ/kg K	2,4																1,7	
(b) Uap	kJ/kg K	2,5																1,93	
Titik Beku	°C	-40																-114	24
Titik Didih	°C	27-225																78	24

Properties	Unit	E0	E3	E5	E6	E10	E15	E20	E22	E25	E30	E40	E50	E60	70	75	E85	E100	Ref
Titik Nyala	°C	-45 to -13																12-20	
Auto Ignition	°C	257							40									425	24,43
Vapor FlamLimits	% Vol.	0,6-8																3,5-15	
Laminar flame speed at 100kPa 325K	cm/s	~33																-39	43
Destilasi (°C)																			
(a) Titik didih awal	%	45; 38,8	39,3	36,5	42,6	37,8-47,1	37,9-43,2	36,7-40,5			37,2-39,5	39,6	328,3					78	42,48, 13
(b) 10	%	54; 68,5	51,8	49,7	61,3	50,8-65,1	51,7-62,7	51,3-62,4		58,1	52,1-57,2	53,4-57,2	57,8	60,2	65,6		70,5-73,9	78	42,48,13, 128
(c) 50	%	96; 109,6	92,6	88	111,4	69,9-98,3	72,6-87,6	70,3-79,2		71,7	71-74,6	72,5-73,1	74,7	76,4	76,5		77,2-78	78	42,48,13, 128
(d) 90	%	168; 161,5	168,7	167,7	161,2	126-166,4	156,2-165,3	124,5; 165,2			115,9-159,3	78,4-152,7	78,3	78,2	78,1		78-78,7	79	42,48, 13,128
(e) Titik didih akhir	%	207; 206,3	210,9	202,5	206,1	162,9-208,4	198,1-203,6	162,4-203,6		177,9	162,7-205,1	159,6-204,1	157,4	154,6	151,1		79,9-138,5	79	42,48, 13
Kelarutan dalam air (solubility)	%	0																100	
oxygenate		0			6	10,7	15,1	19,8											13,48
oxigen	% wt	0				3,9	5,6	7,36											13,48
Composition	% Vol																		
(a) Olefins		4,2		0,9	5,5	6,1-10,5	5,1	4,7		8,6			5,7						13,48,68
(b) aromatics		26,5		33,7	24,9	24,6-30,3	24,1	24,7		26,4			19,5						13,48,68
(c) Parafins		11,4			11,4	10,7	10,9	9,5											13,48
(d) Isoparaffins		52,6			46,3	41,4	38,6	35,6											13,48
(e) Nephtenes		4,7			5,3	5,6	5,3	5,1											13,48

Dengan demikian efisiensi pembakaran dan tekanan efektif rata-rata (BMEP) akan meningkat serta konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) akan menurun. Hubungan yang menyatakan efisiensi pembakaran dan perbandingan kompresi dituliskan dengan persamaan:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma^{k-1}} \quad \dots \dots \dots (2 - 2)$$

dimana γ adalah perbandingan kompresi dan k adalah perbandingan kapasitas panas jenis. Dengan demikian dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa efisiensi akan semakin meningkat jika perbandingan kompresi semakin besar.



Gambar 2.5 : Grafik perbandingan kompresi dan angka oktan (Setiawan, 2012)

Mesin dengan perbandingan kompresi tinggi dengan sendirinya membutuhkan jenis bahan bakar yang tahan terhadap tekanan yang lebih tinggi seiring naiknya nilai perbandingan kompresi. Hal itu diperlukan agar titik nyala bahan bakar dapat dicapai bersamaan percikan nyala api dari busi. Ketidaksesuaian antara perbandingan kompresi mesin dan angka oktan bahan bakar akan menjadi salah satu penyebab *knocking* yang menimbulkan getaran dan suara berisik pada mesin yang jika dibiarkan akan merusak komponen-komponen mesin. Fenomena *knocking* akibat angka oktan bahan bakar yang rendah terjadi saat piston bergerak ke titik mati atas (TMA) untuk melakukan langkah kompresi, dan dalam proses tersebut terjadi pembakaran awal (*pre-ignition*) pada bahan bakar yang mendahului percikan api oleh busi. Hal ini akan menghasilkan ledakan besar dalam ruang bakar dan menimbulkan pukulan keras pada kepala piston.

Fenomena *knocking* juga dapat ditimbulkan oleh adanya titik panas dari jelaga karbon yang menempel dalam ruang bakar yang banyak terjadi pada daerah dekat katub buang sisa gas pembakaran dan menjadi bara api sehingga bahan bakar akan terbakar dengan sendirinya sebelum timbul bunga api dari busi. Pada sebuah pembakaran normal api akan menyebar ke seluruh bagian ruang bakar dimana busi sebagai sumber api. Akan tetapi jika pada proses tersebut masih ada sebagian campuran gas dan bahan bakar yang tidak terbakar (*end charge*), maka gas tersebut akan didesak oleh gas yang sudah terbakar sehingga terjadi kenaikan tekanan dan temperatur dan membuat campuran gas yang tidak terbakar menjadi hampir terbakar. *Knocking* yang timbul pada proses tersebut terjadi jika campuran gas yang hampir terbakar tadi pada akhirnya terbakar dengan sendirinya. *Knocking* juga dapat ditimbulkan oleh pemakaian busi yang kurang baik. Akibatnya terjadi pembakaran spontan dari nyala api busi saat menerima tekanan dan temperatur yang tinggi di ruang bakar. Jika terjadi *knocking* akan dihasilkan fluktuasi tekanan yang sangat besar dan cepat pada akhir proses pembakaran yang akan menyebabkan daya mesin menjadi menurun.

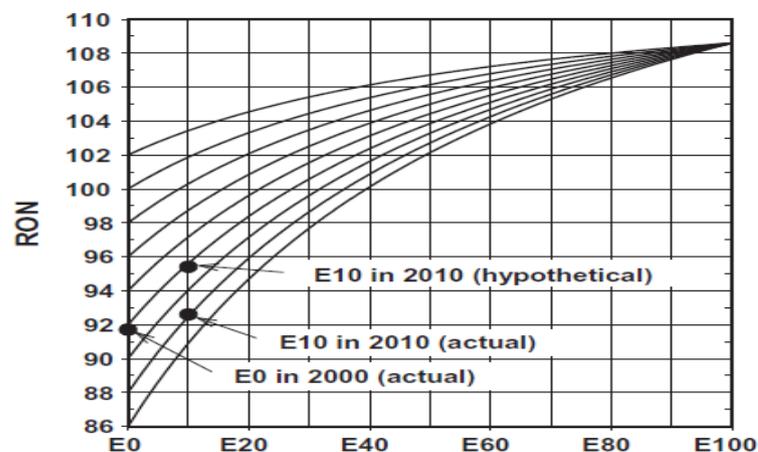
Dengan demikian dari beberapa rangkaian fenomena proses terjadinya knocking dalam ruang bakar sebagaimana disebutkan di atas, dapat disimpulkan bahwa knocking dihasilkan karena adanya pembakaran parsial dalam ruang bakar yang ditimbulkan oleh sumber api lain selain busi. Kedua pembakaran tersebut menghasilkan perambatan nyala api yang berlawanan arah dan akan saling bertumbukan pada akhir proses pembakaran. Tabrakan tersebut akan menghasilkan gelombang tekanan yang sangat besar yang menyebabkan getaran pada mesin. Pada kenyataannya gelombang tekanan tersebut akan menghantam kepala piston, jika dibiarkan dalam jangka panjang akan merusak piston dan komponen mesin lainnya.

Nilai oktan sebuah jenis bahan bakar yang umum digunakan secara internasional diidentifikasi dengan sebuah bilangan *Research Octane Number* (RON). Nilai oktan bahan bakar menyatakan jumlah *iso-oktana* dan *n-heptana* dalam jumlah bagian tertentu bahan bakar gasolin. Untuk mengetahuinya bahan bakar dimasukkan dalam mesin uji *Combustion Fuel Research* dengan perbandingan kompresi yang dapat diatur. Hasil pengujian bahan bakar tersebut kemudian dibandingkan dengan campuran standar *iso-oktana* dan *n-heptana*.

Dengan demikian bahan bakar gasolin dengan RON 90 menyatakan campuran bahan bakar tersebut terdiri dari 90% *iso-oktana* dan 10% *n-heptana*.

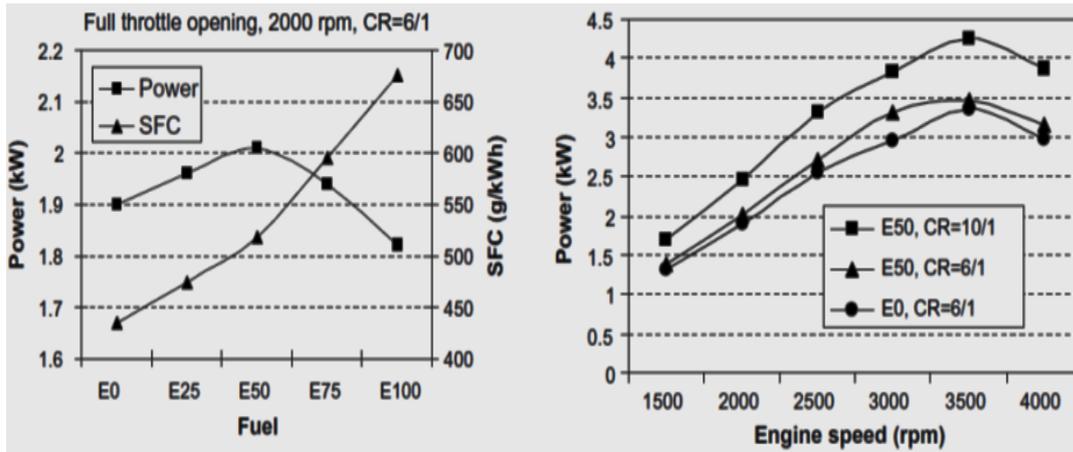
Sementara itu hubungan antara angka oktan campuran bahan bakar gasolin-bioetanol dan perbandingan kompresi diperlihatkan pada Gambar (2.5). Setiap kenaikan lima angka oktan bahan bakar mampu meningkatkan satu nilai perbandingan kompresi (Setiawan, 2012). Mesin Otto yang menggunakan bahan bakar gasolin dengan angka oktan 88–100 dan didesain dengan perbandingan kompresi 9–10. Angka oktan yang rendah pada gasolin dapat ditingkatkan dengan penambahan senyawa additive sebagai *octane booster* antara lain tetra ethyl lead (TEL), methyl tert-butyl ether (MTBE), akan tetapi emisi gas buangnya beracun dan meningkatkan polusi udara. Oleh sebab itu penambahan bioetanol 5-20%, selain dapat meningkatkan angka oktan gasolin, emisi gas buang yang dihasilkan juga lebih rendah dan menurunkan emisi *net carbondioxide* di udara (Jeuland, 2004; Tibaquira, 2017).

Pemakaian bioetanol sebagai bahan bakar campuran bersama gasolin mempunyai rentang angka oktan yang cukup lebar sampai konsentrasi 20% dan mengurucut pada angka RON \approx 109 jika digunakan bioetanol murni sebagai bahan bakar (Gambar 2.6). Sejumlah penelitian telah membuktikan menaikkan perbandingan kompresi dapat meningkatkan performa mesin gasolin, seperti yang dilakukan oleh Chelik (2007) pada mesin karburator satu silinder, dengan kondisi stoikiometri, variasi perbandingan kompresi 6/1 – 10/1.

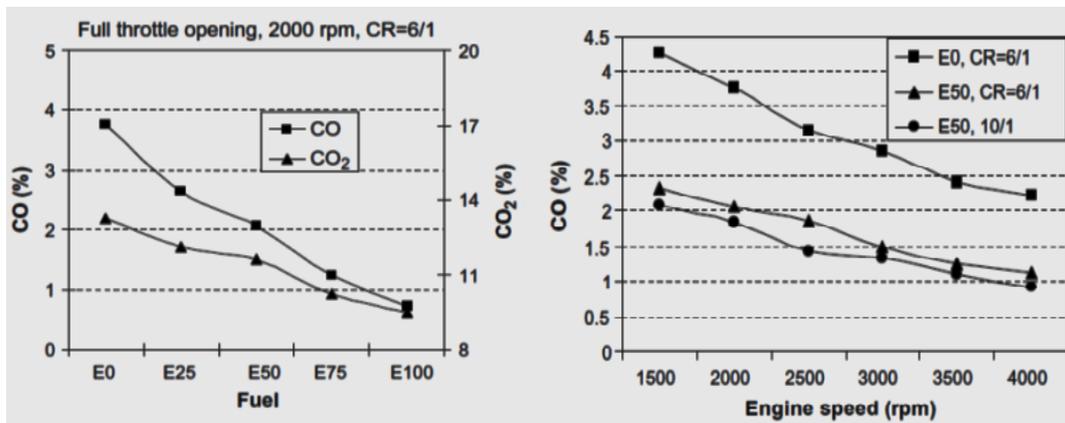


Gambar 2.6 : Grafik RON campuran gasolin dan bioetanol (Anderson, 2012)

Pada Gambar (2.7a) terlihat bahwa daya maksimum dengan kondisi perbandingan kompresi 6/1 hanya bisa dicapai pada E50, sementara pada konsentrasi bioetanol yang sama daya meningkat sebesar 25% dengan menaikkan perbandingan kompresi menjadi 10/1. Dibandingkan dengan E0, kenaikan daya pada E50 hanya meningkat sebesar 5% pada perbandingan kompresi yang sama. Hasil ini didukung oleh penelitian Rodrigo (2010) dan Sudarmanta (2015).



Gambar 2.7 : Pengaruh CR terhadap daya pada variasi konsentrasi dan RPM (Chelik, 2007)

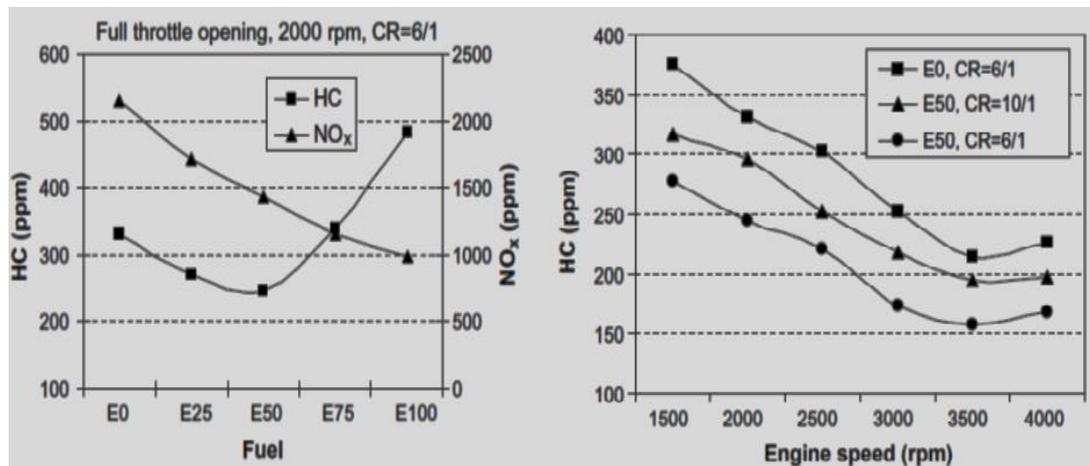


Gambar 2.8: Pengaruh perbandingan kompresi terhadap emisi CO (Chelik, 2007)

Pada perbandingan kompresi dan putaran yang sama emisi CO menurun secara konsisten dengan naiknya persentase bioetanol. Kecenderungan tersebut dapat berlanjut dengan menaikkan perbandingan kompresi, dimana emisi CO pada E50 dapat diturunkan sebesar 14,3% secara konsisten dengan bertambahnya putaran mesin. Pada Gambar (2.9a) emisi HC cenderung meningkat pada

konsentrasi bioetanol lebih dari 50% pada rpm konstan dan perbandingan kompresi 6/1. Hal ini disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya; perbandingan kompresi terlalu kecil dimana tekanan silinder tidak mampu memampatkan campuran secara homogen sehingga sebagian senyawa hidrokarbon tidak terbakar.

Kondisi lainnya disebabkan oleh ignition timing yang terlalu dekat ke TDC seiring dengan kenaikan bioetanol sehingga temperatur pembakaran menurun dan terjadi kegagalan pembakaran (*misfiring*). Kondisi tersebut dapat dibuktikan melalui Gambar (2.9b), dimana menaikkan CR pada rpm dan konsentrasi yang sama dapat meningkatkan emisi HC sebesar 20%.

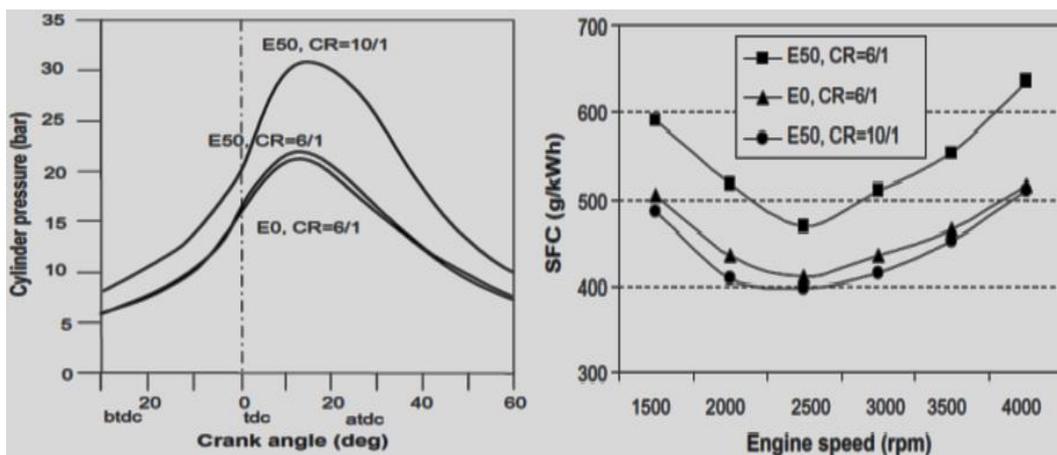


Gambar 2.9 : Pengaruh perbandingan kompresi terhadap HC (Chelik, 2007)

Penurunan emisi HC yang terus berlanjut seiring naiknya rpm, disebabkan heat of vaporization dan homogenitas campuran lebih baik pada putaran yang semakin tinggi. Hasil ini diperkuat oleh penelitian Balki (2014) dimana emisi HC dan CO meningkat setelah perbandingan kompresi 9.5 sebab volume ruang bakar mengecil sementara pengapian terlambat sehingga sebagian campuran tidak terbakar. Hasil yang sama diperoleh pada penelitian Balki (2014), dengan variasi perbandingan kompresi 8–9.5. *Unburnt hydrocarbon* (ubHC) untuk semua jenis bahan bakar menurun pada perbandingan kompresi 8–8.5 dan kembali meningkat seiring meningkatnya perbandingan kompresi mesin.

Emisi HC akan menurun seiring meningkatnya putaran mesin disebabkan kandungan oksigen dan panas laten penguapan bioetanol yang tinggi sehingga temperatur pembakaran akan meningkat. Peningkatan nilai SFC seiring naiknya

persentase bioetanol terjadi karena nilai kalor menurun. Hal tersebut dapat diatasi dengan menaikkan perbandingan kompresi, sebagaimana terlihat pada Gambar (2.10b), dimana terjadi penurunan SFC sebesar 25% dengan menaikkan perbandingan kompresi dari 6 ke 10. Kenaikan emisi NO_x utamanya disebabkan oleh kenaikan temperatur silinder seiring naiknya putaran atau beban mesin. Selain itu, kenaikan temperatur silinder dipicu oleh kelebihan udara pembakaran dalam campuran, dimana kondisi ini terjadi pada campuran miskin ($\lambda > 1$). Penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar secara signifikan dapat menurunkan emisi NO_x. *Heat latent of vaporization* bioetanol yang tinggi dapat memberi “efek dingin” pada campuran yang berdampak pada penurunan temperatur *exhaust*. Oleh sebab itu, penurunan emisi NO_x semakin signifikan jika konsentrasi bioetanol semakin meningkat dalam campuran (Gambar 2.9a).

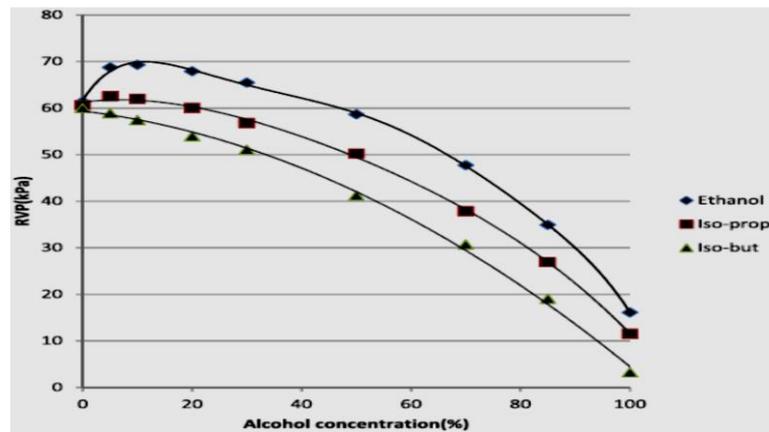


Gambar 2.10: Pengaruh CR terhadap tekanan silinder dan SFC (Chelik, 2007)

2.2.3 Tekanan Penguapan dan Volatilitas

Tekanan penguapan Reid (RvP) bioetanol adalah 17 kPa jauh lebih kecil dibandingkan tekanan uap gasolin yaitu 55.7–103.4 kPa pada temperatur 37°C. Dengan kondisi seperti ini dibutuhkan temperatur yang lebih tinggi untuk menaikkan tekanan uap bioetanol sehingga dapat teratomisasi dengan baik. Tekanan uap bioetanol yang rendah berkorelasi dengan panas laten penguapannya (*latent heat of vaporization*) yang tinggi sehingga mesin sulit dihidupkan pada kondisi dingin. Penambahan gasolin ke dalam bioetanol tidak berkorelasi linear dengan kenaikan tekanan uap bahan bakar campuran.

Tekanan uap maksimum dari bahan bakar campuran gasolin-bioetanol diperoleh pada persentase bioetanol 5–10% (Chen, 2011; Masum, 2015). Akan tetapi nilai volatilitas bahan bakar yang terlalu tinggi juga tidak terlalu baik, selain menyebabkan bahan bakar mudah menguap juga akan menghasilkan emisi penguapan HC yang lazim disebut sebagai *volatile organic compound* yang juga menimbulkan efek yang kurang baik terhadap lingkungan (Setiawan, 2012).



Gambar 2.11 : Nilai RvP terhadap konsentrasi alkohol (Masum dkk, 2015)

Bioetanol sebagai senyawa murni mempunyai titik didih tunggal yaitu 78°C–79°C dan sangat reaktif terhadap bahan bakar hidrokarbon (gasolin). Dengan interval titik didih yang terlalu sempit dan daya kelarutan bioetanol dalam bahan bakar gasolin yang rendah, menyebabkan pencampuran kedua bahan bakar tersebut berpotensi menimbulkan efek *azeotropika* walaupun pada konsentrasi bioetanol yang rendah. *Azeotropika* didefinisikan sebagai campuran dua atau lebih cairan yang membentuk titik didih yang lebih rendah dari titik didih komponen penyusunnya. Selain itu, pada temperatur tertentu tekanan uapnya berbeda satu dengan yang lainnya sehingga berpotensi mengalami pemisahan. Pengaruh *azeotropika* pada campuran bioetanol dan bahan bakar hidrokarbon bergantung pada jenis senyawa hidrokarbon dan persentase bioetanol dalam campuran (Jeuland, 2004; Srinivisan, 2010).

Mengatasi start dingin pada bahan bakar bioetanol dilakukan dengan menaikkan temperatur bahan bakar sebelum diinjeksikan ke silinder dengan alat *pre-heating*. Selain itu penggunaan dua tangki bahan bakar menjadi salah satu

pilihan mengatasi kendala tersebut, dimana *start* awal menggunakan gasolin untuk memanaskan mesin, setelah itu beralih ke tangki bioetanol.

Tabel 2.2: Karakteristik umum azeotropika bioetanol dalam hidrokarbon

<i>Molecule</i>	<i>Pure boiling point</i>	<i>Azeotrope boiling point (°C) with bioethanol</i>	<i>Composition of the azeotrope (% wt bioethanol)</i>
n – pentane	36	34	5
n – hexane	69	59	21
benzene	80	68	32
cyclohexane	81	65	29.2
toluene	111	77	68
n – octane	126	77	88

Sumber: Jeuland, 2004

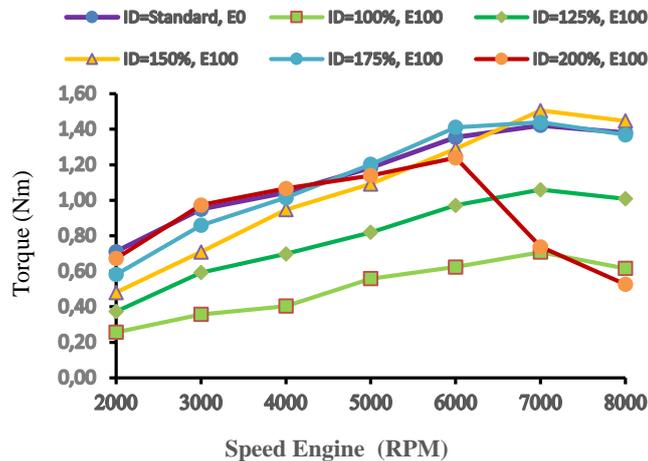
2.2.4 Nilai Kalor Bahan Bakar dan Durasi Injeksi

Nilai kalor adalah salah satu sifat utama bahan bakar yang menunjukkan besarnya potensial energi yang dapat dihasilkan dari pembakaran bahan bakar tersebut. Semakin besar nilai kalor bahan bakar, maka semakin besar pula kandungan energinya. Ukuran nilai kalor bahan bakar didiskripsikan melalui jumlah unsur karbon (C), hidrogen (H) dan oksigen (O) yang terdapat dalam bahan bakar. Secara garis besar kandungan karbon yang tinggi dalam bahan bakar mengindikasikan tingginya nilai kalor bahan bakar tersebut. Itulah sebabnya nilai kalor sebagian besar bahan bakar hidrokarbon lebih tinggi dibandingkan bahan bakar alternatif lainnya, seperti bioetanol, metanol, butanol, LPG dan lain-lain.

Nilai kalor bioetanol hanya sebesar 2/3 dari nilai kalor gasolin, sehingga daya yang dihasilkan pun akan lebih kecil. Nilai kalor bioetanol yang kecil selain karena unsur karbon dalam bahan bakar tersebut rendah, juga dipengaruhi oleh kandungan air dalam bioetanol, karena daya kelarutan bioetanol dalam air tinggi sehingga mudah mengikat senyawa hidrogen dioksida. Nilai kalor bioetanol yang rendah terkompensasi dengan angka oktan yang tinggi, sehingga perbandingan kompresi dapat ditingkatkan untuk mendapatkan daya dan torsi mesin yang lebih tinggi (Srinivisan CA dan Saranavanan CG, 2010).

Nilai kalor bioetanol yang kecil dibandingkan dengan gasolin membutuhkan volume injeksi 1.5–1.8 lebih besar dari gasolin untuk mendapatkan daya yang sama dengan bahan bakar gasolin (Chelik, 2007). Oleh sebab itu

konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) bahan bakar bioetanol akan semakin meningkat dengan naiknya konsentrasi bioetanol. Akan tetapi konsumsi bahan bakar spesifik dapat diturunkan dengan menaikkan perbandingan kompresi sebagaimana dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2.12 : Durasi injeksi E100 pada perbandingan kompresi 11 (Dharmawan dkk, 2016)

Besarnya kuantitas bioetanol yang diperlukan untuk mendapatkan daya yang sama jika menggunakan bahan bakar gasolin bergantung konsentrasi bioetanol dalam gasolin. Pengujian yang dilakukan oleh Dharmawan (2016) dan Paloboran (2017) menggambarkan bahwa, dibutuhkan injeksi bahan bakar bioetanol sebesar 150–200% agar dihasilkan torsi maksimum untuk pemakaian bahan bakar bioetanol murni (Gambar 2.12). Pada kondisi tersebut, kinerja mesin akan semakin meningkat dan emisi menurun. Hal yang sama telah dilakukan oleh Turkoz (2014) dengan memperbesar lubang orifice dari 1.1 dan 1.8 menjadi 1.3 dan 2.0. Pada penelitian ini akan dilakukan mapping durasi injeksi untuk E50, E70 dan E85 yang menghasilkan torsi maksimal, selain E100 yang telah diteliti oleh Dharmawan.

2.2.5 Panas Laten Penguapan (*Latent Heat of Vaporization*)

Temperatur dan tekanan yang tinggi dalam ruang bakar sangat dibutuhkan pada sebuah proses pembakaran agar dihasilkan daya mesin yang tinggi. Akan tetapi kenaikan temperatur dan tekanan yang berlebihan dapat menimbulkan efek yang kurang baik pada konstruksi mesin dan memicu pembentukan emisi NO_x. Hal

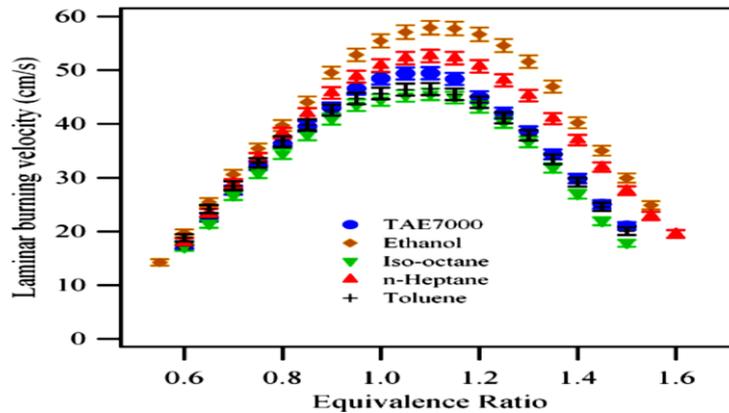
ini disebabkan penambahan senyawa *oxygenate* ke dalam gasolin akan meningkatkan proses pembakaran sehingga temperatur silinder akan meningkat pula yang memicu peningkatan emisi NO_x. Kondisi ini biasanya mudah terjadi pada pemakaian bioetanol dengan persentase kurang dari 20% dalam gasolin, terutama pada putaran mesin yang tinggi.

Tidak demikian halnya pada konsentrasi bioetanol > 25%, emisi NO_x cenderung menurun pada beban dan putaran mesin yang tinggi. Kenaikan temperatur silinder yang terjadi dapat diserap oleh panas laten penguapan bioetanol yang tinggi, sehingga temperatur silinder turun dengan semakin meningkatnya konsentrasi bioetanol. Kecepatan perambatan api laminar bioetanol yang tinggi akan memperpendek durasi pembakaran sehingga pembakaran cenderung stabil. Dengan pengaturan derajat pengapian bahan bakar yang tepat, maka panas laten penguapan serta durasi pembakaran bioetanol yang singkat dapat dimaksimalkan dengan menunda penyalaan. Dengan demikian *ignition delay* dapat diperpanjang untuk memaksimalkan efek dingin yang ditimbulkan oleh *heat of vapourization* bioetanol. Selanjutnya turunnya temperatur silinder selain mengendalikan terbentuknya emisi NO_x, juga akan meningkatkan densitas campuran sehingga efisiensi volumetris, daya dan torsi mesin akan meningkat. Efek panas laten penguapan bioetanol terhadap penurunan emisi khususnya NO_x terlihat pada percobaan yang dilakukan Radu dan Chelik dengan bahan bakar E100.

2.2.6 Kecepatan Perambatan Api Laminar

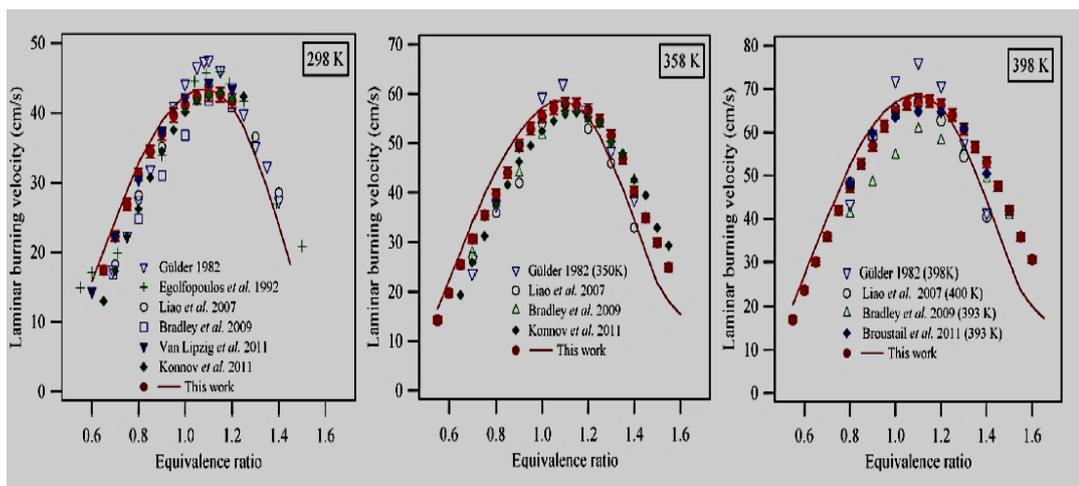
Perambatan api yang cepat dalam sebuah proses pembakaran adalah salah satu parameter yang sangat diperlukan untuk menjamin proses pembakaran lebih stabil dan mengurangi kerugian panas pada mesin. Hal ini mengingat proses pembakaran yang terjadi dalam silinder berlangsung sangat cepat dan singkat, sehingga diharapkan dengan perambatan api yang cepat, campuran udara dan bahan bakar dapat terbakar secara keseluruhan. Sebaliknya, jika proses perambatan api berlangsung lambat, akan ada sebagian bahan bakar yang tidak terbakar dan menyebabkan kerugian energi, yaitu kehilangan panas dan pembentukan emisi gas buang. Kecepatan perambatan api laminar bioetanol yang lebih tinggi dari gasolin mengakibatkan durasi pembakaran bioetanol lebih singkat dari gasolin sehingga

akan mengurangi kehilangan panas pada dinding selinder serta menurunkan variasi siklus (Yuan Zhuang, 2012)



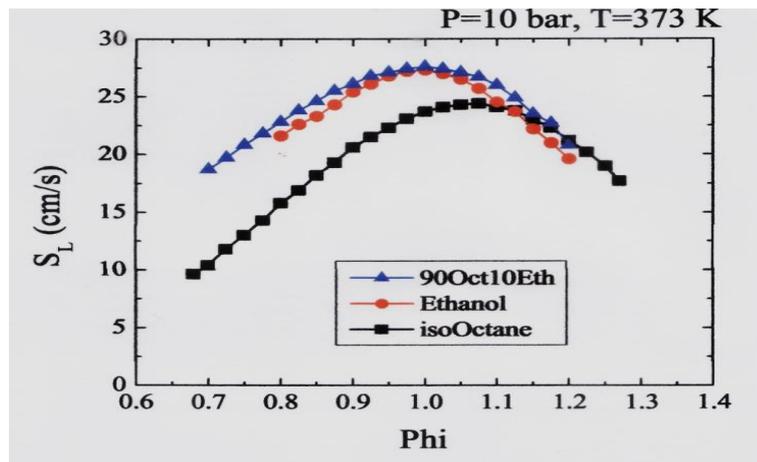
Gambar 2.13 : Kecepatan pembakaran laminar beberapa jenis bahan bakar pada berbagai nilai lambda (Dirrenberger, 2014)

Kandungan oksigen yang besar pada bioetanol terbukti dapat mempercepat proses pembakaran sehingga kualitas pembakaran yang dihasilkan lebih baik. Nilai kecepatan perambatan api laminar bioetanol yang lebih tinggi dari gasolin adalah indikator bahwa proses pembakaran bioetanol lebih singkat dibandingkan dengan gasolin. Perbandingan durasi pembakaran gasolin, bioetanol, *iso-octane*, *n-heptane* dan *toluene* dijelaskan oleh pengujian Dirrenberger pada temperatur 358K dan tekanan 10 bar (Gambar 2.13).



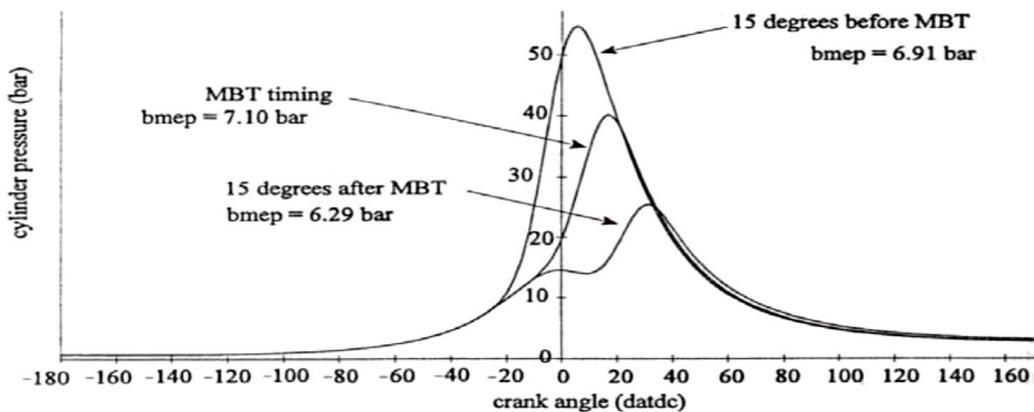
Gambar 2.14 : Kecepatan pembakaran laminar bioetanol (Dirrenberger, 2014)

Pada Gambar (2.13) terlihat bahwa kecepatan pembakaran laminar bioetanol lebih tinggi dibandingkan gasolin dan yang terendah adalah iso-octane. Perbedaan itu terlihat jelas pada nilai $\phi = 0.9 - 1.3$ dan puncaknya diperoleh pada nilai $\phi = 1,1$. Pola yang sama diperlihatkan oleh beberapa peneliti yang mengukur kecepatan pembakaran laminar bioetanol pada temperatur yang berbeda (Gbr 2.14).



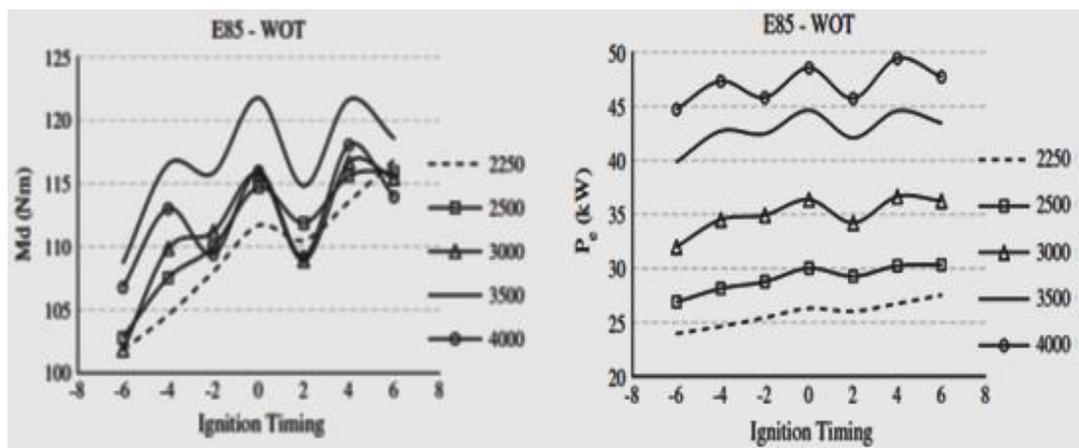
Gambar 2.15: Api laminar ethanol, iso-octane dan E10 (Joo, 2011)

Derajat kecepatan laminar pembakaran bioetanol adalah merupakan fungsi equivalen ratio dan tekanan. Semakin tinggi tekanan pembakaran, makin singkat laminar flame speed bahan bakar. Penelitian yang dilakukan oleh Abebe (2013) menunjukkan bahwa, laminar flame speed ethanol terbesar pada nilai $\phi = 1.1-1.2$ atau campuran kaya. Kecenderungan tersebut sama dengan yang diperoleh oleh peneliti lainnya. (Gambar 2.13 dan 2.14).



Gambar 2.16: Pengaruh derajat pengapian terhadap tekanan puncak silinder (Phuangwongtrakul, 2013)

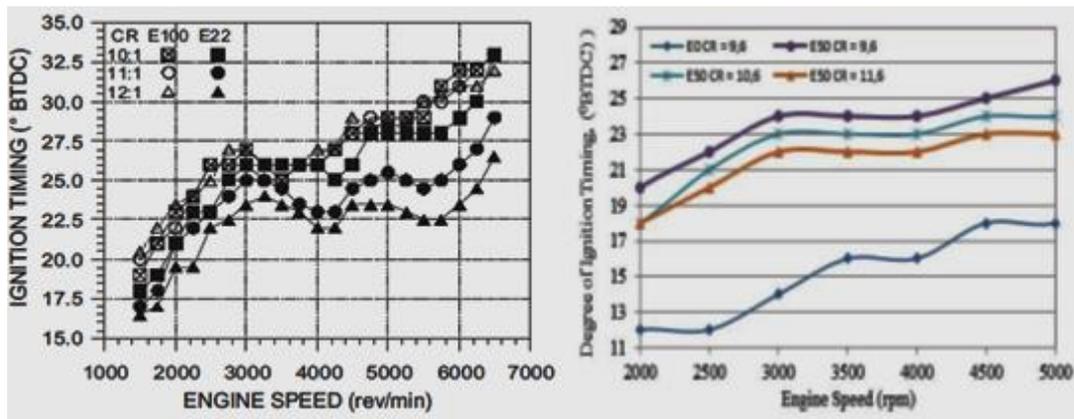
Sementara itu penelitian yang dilakukan oleh Joo (2011) untuk bahan bakar bioetanol murni (E100), *90Oct-10Eth* dan *iso-octane*, dalam Gambar 2.15 menunjukkan bahwa kecepatan pembakaran campuran gasolin dan bioetanol 10% (E10) mempunyai kecepatan pembakaran laminar yang relatif hampir sama dengan bioetanol murni pada kondisi stoikiometri. Pada campuran kaya atau miskin, campuran bioetanol 10% dan 90% *iso-octane* mempunyai kecepatan laminar yang lebih tinggi di dibandingkan bioetanol dan *iso-octane*.



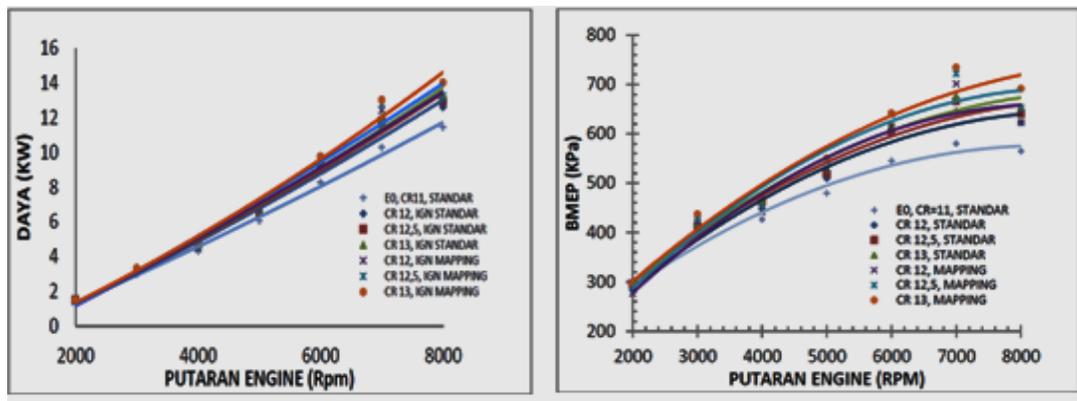
Gambar 2.17 : Efek IT terhadap torsi dan daya efektif mesin (Turkoz, 2014)

Dengan gambaran durasi pembakaran di atas, maka derajat pengapian bahan bakar harus disesuaikan dengan kecepatan api laminarnya agar bahan bakar tersebut terbakar secara tuntas pada akhir proses pembakaran. Pengaturan derajat pengapian umumnya dilakukan melalui metode minimum advance for maximum brake torque (MBT). Metode ini dilakukan untuk menentukan derajat pengapian bahan bakar berdasarkan torsi maksimum yang dihasilkan pada putaran mesin tertentu. Dengan metode ini, tekanan efektif rata-rata (BMEP) dan daya mesin menjadi lebih besar (Gambar 2.16).

Nilai kalor bioetanol yang kecil dibandingkan dengan gasolin membutuhkan volume injeksi 1.5–1.8 lebih besar dari gasolin untuk mendapatkan daya yang sama dengan bahan bakar gasolin (Chelik, 2007). Oleh sebab itu konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) bahan bakar bioetanol akan semakin meningkat dengan naiknya konsentrasi bioetanol. Akan tetapi konsumsi bahan bakar spesifik dapat diturunkan dengan menaikkan perbandingan kompresi sebagaimana dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2.18: Mapping *ignition timing* MBT (Rodrigo, 2010; Sudarmanta, 2015)



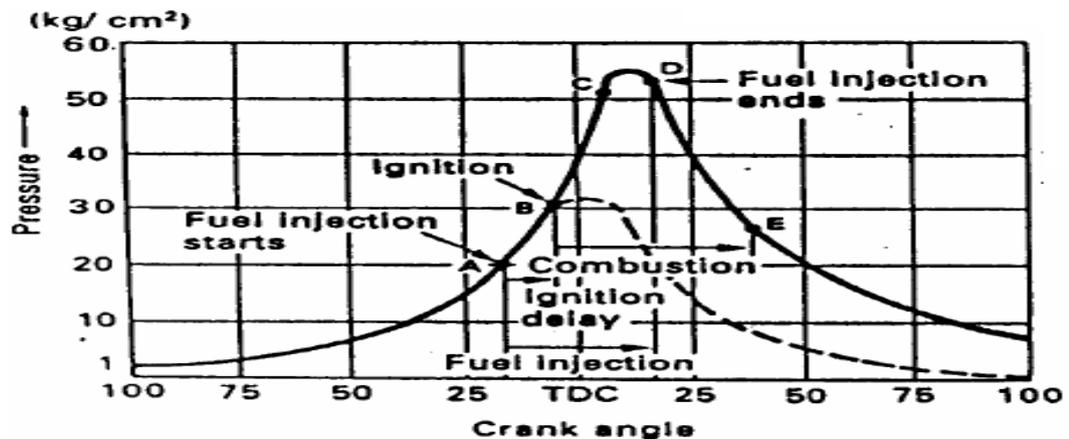
Gambar 2.19: Efek putaran mesin terhadap daya dan BMEP (Pamuji, 2016)

Hasil penelitian yang menggunakan bahan bakar bioetanol dengan metode MBT dilakukan pula oleh Rodrigo (2010), Sudarmanta dan Pamuji (2016). Pada penelitian Rodrigo terlihat derajat pengapian semakin meningkat seiring bertambahnya putaran mesin, persentase bioetanol dan perbandingan kompresi (Gambar 2.18). Hasil yang sama juga diperoleh oleh Phuangwogtrakul (2013), meskipun kondisi pengujian pada putaran mesin dan bukaan *throttle* yang konstan.

Hal yang berbeda dilakukan oleh Pamuji pada bahan bakar bioetanol murni (E100) dengan mengkombinasikan dua metode sebelumnya. Derajat pengapian dinaikkan sebesar 4°CA sebanyak 5 titik sampai 28° sebelum TMA, kemudian dilakukan mapping MBT pada setiap putaran mesin. Metode ini menghasilkan daya dan tekanan mesin yang lebih baik dan konsisten sampai mencapai putaran maksimum (Gambar 2.19). Metode ini pula yang akan dilakukan pada penelitian ini, dengan bahan bakar gasolin-bioetanol E50, E70 dan E85.

2.3 Karakteristik Pembakaran Mesin Spark Ignition

Karakteristik pembakaran motor Otto sering didiskripsikan melalui; penundaan penyalaan (*ignition delay*), durasi pembakaran (*combustion duration*), laju pelepasan massa dan kalor (*mass and heat release flowrate*), posisi tekanan maksimum (MEP) dan variasi siklus (*VoC*). Perubahan dan posisi parameter-parameter tersebut akan menunjukkan dan mempengaruhi kinerja mesin dan emisi gas buang yang dihasilkan pada sebuah proses pembakaran (Setiawan, 2012).



Gambar 2.20 : Proses pembakaran pada mesin *spark ignition*

2.3.1 Penundaan penyalaan (*ignition delay*)

Proses pembakaran pada mesin *spark ignition* terjadi dalam empat tahapan (Gambar 2.20), yaitu; (1) tahap penundaan pengapian (*ignition lag stage*), (2) tahap perambatan api (*flame propagation stage*), (3) pembakaran langsung (*direct combustion stage*), dan (4) tahap setelah pembakaran (*after burning stage*). Penundaan pengapian terjadi saat bahan bakar mulai diinjeksikan dari titik (A) sampai mengalami pencampuran dengan udara di titik (B). Pada proses ini bahan bakar mengalami proses atomisasi melalui proses injeksi sehingga akan membentuk campuran yang homogen. Tahapan berikutnya, campuran udara dan bahan bakar yang telah berada pada fase uap, dibakar melalui percikan bunga api dari busi di titik (B). Selanjutnya akan terjadi pembakaran lokal di beberapa lokasi dan nyala api mengalami perambatan secara cepat. Proses ini ditandai dengan naiknya tekanan dan temperatur silinder secara mendadak melebihi tekanan kompresi hingga mencapai titik (C).

Proses selanjutnya adalah pembakaran langsung dari titik (C) ke titik (D), dimana titik (D) adalah akhir dari injeksi bahan bakar. Perubahan tekanan yang terjadi pada proses ini relatif kecil disebabkan massa bahan bakar yang terbakar semakin mengecil sampai akhir proses. Proses pembakaran langsung terus berlanjut sampai memasuki proses akhir pembakaran dari titik (D) ke titik (E). Pada proses ini, pembakaran terjadi pada sisa-sisa bahan bakar yang belum terbakar pada proses sebelumnya, sehingga bahan bakar terbakar seluruhnya.

Dengan gambaran di atas, waktu injeksi dan derajat pengapian bahan bakar memegang peranan yang sangat penting untuk meningkatkan performa mesin. Menentukan *timing* yang tepat pada kedua parameter, terutama untuk derajat pengapian (*ignition timing*) didasarkan pada karakteristik bahan bakar yang digunakan. Menunda atau memajukan derajat pengapian selain dipengaruhi oleh kondisi operasional mesin, diantaranya putaran mesin juga sangat ditentukan *heat of vaporization* bahan bakar. Bioetanol dengan panas laten penguapam yang lebih tinggi dari gasolin menyebabkan derajat pengapiannya dilakukan lebih awal sebelum titik mati atas (BTDC)

Dampak yang ditimbulkan oleh derajat pengapian yang tidak tepat akan menurunkan kinerja mesin. Derajat pengapian yang terlalu maju menyebabkan peningkatan tekanan silinder sangat cepat sebelum akhir langkah kompresi. Olehnya itu akan terjadi kerugian daya selama proses langkah kompresi. Sementara itu, pengapian busi yang terlalu mundur (*delay*) akan menghasilkan tekanan yang rendah dan memperlambat terjadinya proses ekspansi. Hal ini menyebabkan proses konversi energi panas menjadi kerja berguna rendah. Secara teoritis, derajat pengapian yang tepat terjadi sesaat sebelum piston mencapai titik mati atas, atau saat piston mulai melakukan langkah ekspansi. Pada kondisi tersebut, bahan bakar telah mencapai tekanan puncaknya sehingga tekanan yang dihasilkan sebagai kerja pada langkah ekspansi jauh lebih tinggi.

Selain sifat bahan bakar, derajat pengapian juga dipengaruhi oleh kondisi operasional mesin, diantaranya:

1. Putaran mesin; dengan naiknya putaran mesin maka proses pembakaran akan meningkat sehingga *ignition timing* harus diperlambat (mundur)

2. AFR; semakin kaya campuran bahan bakar dan udara maka laju pembakaran akan meningkat sehingga ignition timing dimundurkan sebelum TDC
3. Beban; semakin besar beban mesin diperlukan suplai udara dan bahan bakar yang semakin besar dan membutuhkan proses pembakaran yang cepat, sehingga sebaiknya ignition timing dimajukan. Efek ignition timing terhadap kinerja dan emisi mesin telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti dan sebahagian telah disebutkan pada sub-bab 2.2.6.

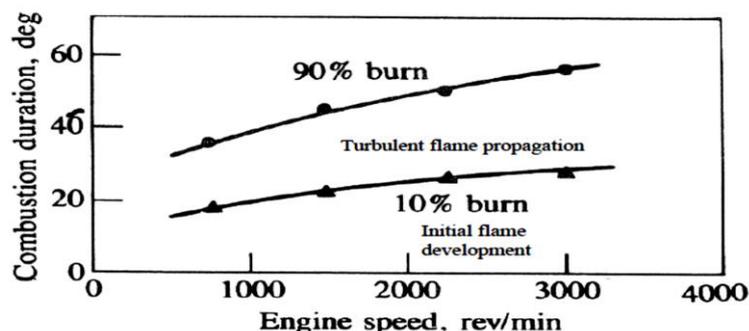
Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, bahwa untuk pemakaian bahan bakar bioetanol, semakin tinggi konsentrasi bioetanol memerlukan ignition timing yang semakin *advance*. Hal ini selain disebabkan oleh panas laten penguapannya semakin besar, propagasi pembakaran bioetanol juga lebih singkat dari gasolin. Dengan kondisi tersebut, *laminar flame speed*-nya lebih cepat dan durasi pembakarannya yang lebih pendek, sehingga dari rangkaian sifat itulah derajat pengapian bioetanol lebih *advance* daripada gasolin. Memajukan derajat pengapian pada penggunaan bahan bakar bioetanol memberi keuntungan yang signifikan pada peningkatan kinerja mesin. Hal ini disebabkan, dengan derajat pengapian yang dimajukan, maka *ignition delay* pembakaran akan semakin panjang. Dengan kondisi tersebut, maka *heat of vaporization* bioetanol yang tinggi akan berdampak pada peningkatan densitas campuran akibat efek dingin yang ditimbulkannya. Dengan *ignition delay* yang panjang, homogenitas campuran udara dan bahan bakar akan lebih baik dibandingkan *ignition delay* yang singkat. Dengan demikian akan dihasilkan efisiensi volumetris, daya dan torsi yang meningkat serta emisi NO_x, CO dan HC menurun.

Santana dkk (2014) telah melakukan penelitian untuk mengukur *ignition delay* pada bahan bakar diesel S25 dan diesel reference pada tekanan yang berbeda-beda. Hasilnya menunjukkan bahwa derajat *ignition delay* untuk diesel S25 dan *diesel reference* masing-masing sebesar 200–225ms dan 150–175ms pada tekanan 12 bar. Sementara pada tekanan 8 bar, *ignition delay* diesel S25 adalah 600ms sedangkan diesel reference adalah 700ms. Dengan hasil tersebut terlihat bahwa derajat *ignition delay* diesel reference lebih tinggi dari diesel S25. Hal ini dipengaruhi oleh angka cetane diesel reference yang lebih tinggi dari pada diesel S25. Demikian halnya untuk bahan bakar bioetanol, derajat *ignition delay*

dipengaruhi oleh angka oktan bahan bakar. Semakin tinggi angka oktan bahan bakar, derajat *ignition delay*-nya makin besar. Pada penelitian yang sama ditemukan derajat *ignition delay* E5 adalah 500–575ms dan biodiesel sebesar 900–1225ms.

2.3.2 Durasi Pembakaran

Durasi pembakaran didefinisikan sebagai lamanya proses pembakaran dalam silinder yang dimulai saat pengapian bunga api dari busi (spark ignition) sampai berakhirnya pembakaran, yang dinyatakan dengan posisi sudut engkol. Sama halnya dengan *ignition delay*, durasi pembakaran yang terjadi sulit diukur secara pasti karena prosesnya berlangsung sangat cepat. Pendekatan yang sering digunakan untuk menggambarkan dua kejadian tersebut adalah pada persentase bahan bakar yang terbakar. Pada *ignition delay* persentase bahan bakar yang dianggap telah terbakar mencapai 5–10%, sedangkan akhir dari sebuah proses pembakaran jika bahan bakar telah terbakar sebanyak 85–90% (Rodrigo, 2010).



Gambar 2.21: Durasi pembakaran pada mesin SI (Rodrigo dan Jose, 2010)

Durasi pembakaran akan semakin singkat dengan bertambahnya beban mesin, karena pada beban mesin yang tinggi suplai bahan bakar menjadi lebih besar (lebih kaya) sehingga perambatan nyala cenderung akan berlangsung lebih cepat. Demikian halnya jika putaran mesin meningkat, maka akan terjadi penurunan durasi pembakaran karena meningkatnya perambatan nyala.

Penelitian yang dilakukan oleh Antonio dan Macado (2012), membandingkan durasi pembakaran antara E100 (*anhyrous bioethanol*) dan H100 (*hydrous bioethanol*). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa durasi pembakaran E100 lebih singkat dibanding H100 (Tabel 2.3). Hal ini dipengaruhi oleh angka oktan *anhydrous bioethanol* lebih tinggi dari *hydrous bioethanol*.

Tabel 2.3: Hasil Pengujian durasi pembakaran E100 dan H100

Fuel	E100	H100
Spark Timing (1)	-31,7°	-33,0°
10% MFB (2)	-5,4°	-7,9°
90% MFB (3)	21,8°	23,8°
Combustion Duration (3) – (2)	27,2°	31,7°

Sumber: Antonio dan Macado, 2012

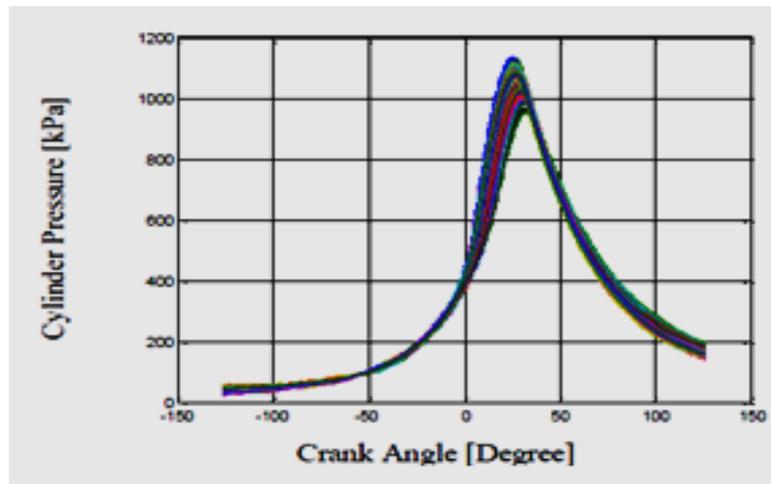
2.3.3 Tekanan Efektif Rata-Rata (MEP)

Perubahan tekanan yang terjadi dalam silinder pada saat proses pembakaran akan mempengaruhi daya dan emisi mesin yang dihasilkan. Besarnya perubahan tekanan disebabkan oleh pelepasan panas saat proses pembakaran yang disertai proses ekspansi dan kompresi oleh langkah piston dalam silinder. Perubahan tekanan setiap siklus diupayakan seminimal mungkin, baik pada mesin SI maupun CI. Variasi siklus yang rendah akan menghasilkan kinerja mesin yang tinggi dan emisi yang rendah.

Dengan demikian faktor variasi siklus sangat diperhitungkan dalam menentukan ignition timing pada mesin SI. Perubahan ignition timing yang terlalu maju ataupun mundur akan berdampak pada penyimpangan perubahan tekanan yang mencolok dari satu siklus ke siklus berikutnya dan akan mempengaruhi tenaga dan emisi yang dihasilkan mesin.

Terjadinya perubahan tekanan dalam silinder selama proses pembakaran, umumnya disebabkan oleh; variasi campuran antara campuran fresh dan gas residu pada setiap siklus, ignition timing, variasi gerakan campuran dalam silinder setiap siklus, variasi jumlah udara dan bahan bakar yang masuk silinder setiap siklus. Variasi siklus (CoV) yang diperkenankan dalam mesin spark ignition tidak boleh lebih dari 10%. Variasi siklus yang lebih besar selain menurunkan performa mesin, juga akan menyebabkan kerusakan pada komponen silinder mesin. Besaran koefisien variasi siklus dihitung dengan persamaan:

$$CoV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{imep} \dots\dots\dots (2-3)$$



Gambar 2.22: Tekanan silinder pada 100 variasi siklus berurutan

dengan:

σ_{IMEP} = deviasi atau penyimpangan tekanan efektif indikatif rata-rata

imep = tekanan efektif indikatif rata-rata

2.3.4 Pelepasan Panas (*Heat Release*)

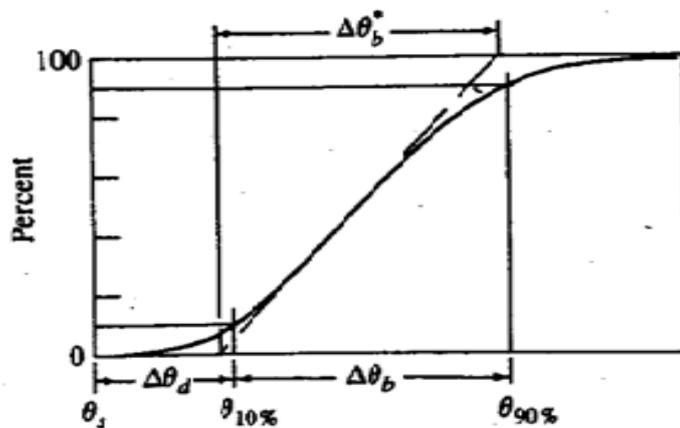
Proses pelepasan panas akan diikuti oleh naiknya tekanan silinder pada sebuah proses pembakaran. Besarnya kenaikan tekanan dalam silinder sebanding dengan besarnya fraksi massa bahan bakar yang telah terbakar dan kuantitas energi panas yang dilepaskan. Oleh sebab itu proses pelepasan panas yang terjadi dalam silinder melalui beberapa tahapan, yaitu;

1. Sudut pengembangan api ($\Delta\theta_d$); adalah besarnya interval sudut engkol (crank angle) antara pemantikan bunga api pada busi dengan waktu yang dibutuhkan saat sebagian kecil fraksi massa bahan bakar telah terbakar untuk melepaskan energi kimia bahan bakar. Besarnya fraksi massa yang terbakar pada proses ini biasanya 10%, meskipun beberapa peneliti mengidentifikasi pada besaran yang lain, yaitu sebesar 1 – 5%.
2. Sudut Pembakaran Cepat ($\Delta\theta_b$); adalah besarnya interval sudut engkol yang dibutuhkan untuk membakar hampir seluruh bahan bakar. Hal ini biasa didefinisikan sebagai interval antara tahap akhir proses pengembangan api (fraksi massa yang terbakar 10%) dengan tahap akhir proses perambatan nyata (fraksi massa yang terbakar 90%)

3. Sudut Pembakaran Menyeluruh ($\Delta\theta_o$); adalah interval sudut engkol yang merupakan penjumlahan total sudut pembakaran cepat dan sudut pengembangan api ($\Delta\theta_o = \Delta\theta_b + \Delta\theta_d$)

Persamaan hukum termodinamika pertama pada volume kontrol dalam silinder dapat digunakan untuk menghitung besarnya energi yang dilepaskan selama proses pembakaran, yaitu:

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)P \frac{dV}{d\theta} + \left(\frac{1}{\gamma-1}\right)V \frac{dP}{d\theta} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$



Gambar 2.23: Proses pelepasan panas pada mesin SI terhadap interval CA

Data-data pada Gambar (2.23) dan besarnya pelepasan energi pada persamaan (2-3) dan (2-4) hanya dapat diamati dan analisis jika *piezo electric sensor* (pressure transducer) dipasang ke dalam ruang bakar. Bahkan dengan alat tersebut sejumlah parameter pembakaran dapat diukur dan dihitung, diantaranya; tekanan indikatif rata-rata (IMEP), torsi, efisiensi indikatif: laju pembakaran, temperatur global silinder (bulk temperature), *ignition delay*, durasi pembakaran, laju pelepasan kalor dan tingkat stabilitas pembakaran di ruang bakar.

2.4 Geometri Silinder Mesin Spark Ignition

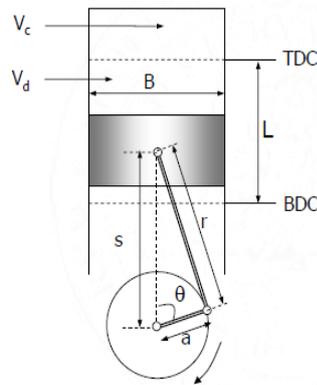
Salah satu geometri ruang bakar yang paling diperhitungkan dalam desain motor bakar adalah perbandingan kompresi, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$r_c = \frac{V_c + V_d}{V_c} \quad \dots\dots (2-5)$$

dengan:

V_c = volume sisa (cm^3)

V_d = volume perpindahan (cm^3)



Gambar 2.24: Geometri ruang bakar

Volume sisa terdiri dari head gasket space, deck height space dan combustion chamber, oleh sebab itu merubah perbandingan kompresi dilakukan dengan menambah atau mengurangi tiga bagian tersebut. Volume sisa pada saat piston berada pada TDC adalah ($s = a + r$), sehingga panjang batang penghubung dan radius engkol pada setiap perubahan sudut engkol dapat dihitung dengan persamaan:

$$s(\theta) = a \cos\theta + \left(r^2 - a^2 \sin^2\theta\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

dan volume silinder pada setiap perubahan yang sama adalah:

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4} [r + a - s(\theta)] \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

sehingga volume perpindahan maksimal adalah:

$$V_d = \frac{\pi B^2}{4} L \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

Secara praktis, ada beberapa cara yang dilakukan untuk memperbesar perbandingan kompresi, diantaranya; mengubah geometri piston dengan menambahkan tonjolan (*dome*) di atasnya, memapras kepala silinder (*cylinder head*) sehingga jaraknya lebih dekat dengan piston dan menggunakan *packing* (gasket) yang lebih tipis. Pilihan-pilihan yang diambil senantiasa mempertimbangkan kondisi teknis mesin.

2.5 Karakteristik Emisi Mesin Spark Ignition

2.5.1 Emisi Karbon (Regulated Emission)

Karakteristik emisi pada motor Otto selalu diindikasikan oleh persentase beberapa bahan partikulat yang terdapat dalam gas buang, yaitu karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC) dan mono-nitrogen oksida (NO_x) yang biasa dikenal sebagai emisi yang telah diatur (*regulated emission*)

1. Karbon Monoksida

Karbon monoksida mempunyai sifat fisik tak beraroma dan tak berwarna akan tetapi sangat beracun. Pembentukan gas ini terjadi akibat kurangnya suplai oksigen untuk membakar senyawa karbon, atau campuran dalam kondisi kaya. Oleh sebab itu penumpukan karbon yang tidak terbakar dalam mesin akan memicu terjadinya self ignition dan menimbulkan detonasi dan kerusakan mesin.

Persentase gas CO dalam mesin 4 tak untuk sistem karburator adalah 1,5–3,5%, sistem EFI adalah 0,5–1,5% dan sistem EFI dengan katalis adalah 0,0–0,02%. Selain kondisi campuran kaya, penyebab lain emisi CO berlebihan antara lain; (a) setelan putaran idle tidak sesuai spesifikasi mesin, atau terlalu rendah, (b) tekanan bahan bakar terlalu tinggi, (c) kebocoran pada injektor, dan (d) gangguan pada sistem ECU.

2. Hidrokarbon

Emisi gas HC mempunyai aroma seperti gasolin dan menimbulkan iritasi dan perih di mata. Selain itu gas hidrokarbon dapat juga menyebabkan gangguan paru-paru dan pernapasan jika terhirup. Emisi ini terbentuk karena pengapian yang tidak tepat serta geometri ruang bakar yang efek turbulensinya sukar membentuk campuran homogen. Selain itu rendahnya tekanan kompresi, penyetelan katub yang tidak tepat serta keausan ring piston menjadi penyebab lain tingginya emisi hidrokarbon. Pada pengoperasian normal mesin SI 4 tak, partikel emisi HC dalam gas buang adalah 200–400 ppm untuk mesin karburator, 50–200 untuk sistem EFI dan 0–50 untuk mesin sistem EFI dengan katalis.

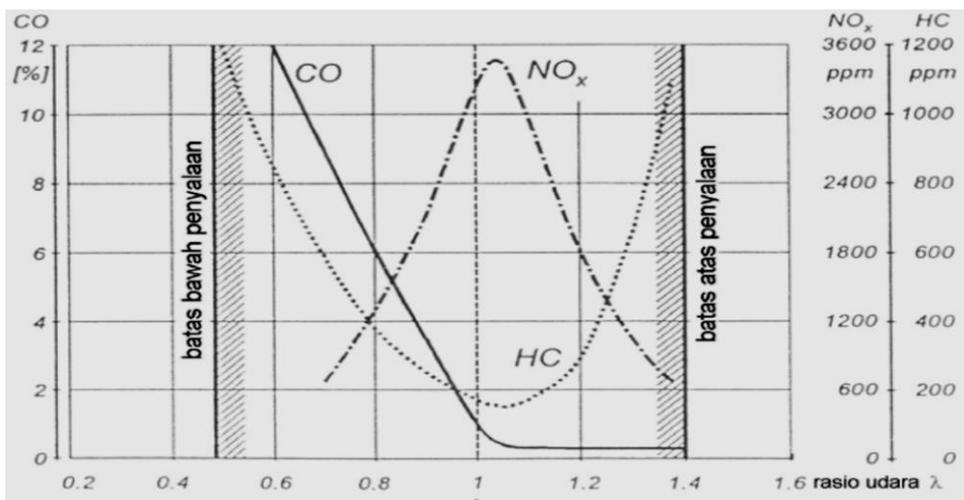
3. Nitrogen Oksida (NO_x)

Kenaikan temperatur silinder akan memicu produksi gas NO_x dalam gas buang. Kenaikan temperatur disebabkan oleh banyak faktor antara lain; kenaikan beban dan putaran mesin, campuran yang terlalu miskin, dan temperatur udara dan

bahan bakar yang tinggi. Besaran gas NO_x pada mesin SI 4 tak dalam kondisi normal adalah 2000-3000ppm untuk sistem karburator, 1500-2500ppm untuk sistem EFI dan 0-100ppm untuk sistem EFI dengan katalis

4. Karbon Dioksida

Peningkatan produksi gas karbon dioksida pada pembakaran bahan bakar fosil menjadi salah satu kontributor yang menimbulkan efek rumah kaca yang berakibat pada pemanasan global. Pada sisi yang lain proses pembakaran dalam mesin pembakaran dalam senantiasa berorientasi pada pembakaran sempurna yang salah satu indikatornya adalah produk gas CO₂ yang tinggi. Oleh sebab itu perlu pembatasan jenis emisi ini agar kesetimbangan lingkungan tetap terjaga. Persentase gas CO₂ yang dihasilkan oleh mesin percik sistem karburator adalah rata-rata 12-15%, sistem EFI adalah 12-16% dan 12-17% untuk sistem EFI dengan katalisator.



Gambar 2.25: Emisi gas mesin spark ignition terhadap nilai λ (Sutiman, 2004)

Eksistensi zat-zat tersebut dalam gas buang selain menimbulkan pencemaran lingkungan, juga akan menurunkan kinerja mesin. Oleh karena itu kemajuan industri otomotif, selalu diorientasikan pada peningkatan tenaga dan pengurangan emisi gas buang atau ramah lingkungan serta hemat bahan bakar.

Upaya penurunan tingkat emisi tidak hanya dilakukan melalui pengembangan teknologi otomotive, tapi harus didukung oleh regulasi yang memberi batasan terhadap produksi emisi yang dihasilkan setiap kendaraan.

Diharapkan terjadi sinergitas diantara kedua hal itu, sehingga laju kerusakan lingkungan dapat diminimalisir. Dalam rangka itu pula, maka Uni Eropa telah menetapkan standar emisi kendaraan yang digunakan yang lazim disebut EURO dimulai sejak tahun 1993. Kendaraan yang digunakan di negara-negara Eropa telah menerapkan standar emisi EURO VI bahkan EURO VII, sedangkan Indonesia sendiri masih mengacu pada standar emisi EURO III.

Tabel 2.4: Standar emisi kendaraan Uni Eropa

EURO Standard	Year of Implem.	CO (g/km)	THC (g/km)	NMHC (g/km)	NO _x (g/km)	HX+NO _x (g/km)	PN (g/km)
		Diesel / Petrol					
EURO I	1993	2,72	-	-	-	0,97	-
		2,72	-	-	-	0,97	-
EURO II	1997	1,00	-	-	-	0,70	-
		2,20	-	-	-	0,50	-
EURO III	2001	0,64	-	-	0,5	0,56	-
		2,30	0,20	-	0,15	-	-
EURO IV	2006	0,56	-	-	0,25	0,30	-
		1,00	0,10	-	0,08	-	-
EURO V	2010	0,50	-	-	0,180	0,23	6E+11
		1,00	0,10	0,068	0,060	-	6E+11
EURO VI	2014	0,50	-	-	0,080	0,17	6E+11
		0,100	0,10	0,068	0,060	-	6E+11

Sumber: Ojapah, 2014

2.5.2 Emisi Karbonil (*Unregulated Emission*)

Pembakaran bahan bakar gasolin pada mesin spark ignition selain menghasilkan emisi karbon yang biasa disebut sebagai emisi yang telah diatur (*regulated emission*), seperti CO, HC, CO₂, NO_x, benzena, toluena dll, juga menghasilkan emisi senyawa karbonil (*aldehida dan ketone*) diantaranya; *formaldehyde, acetaldehyde, propionaldehyde, acrolein, acetone, crotonaldehyde, butyraldehyde, butanone, benzaldehyde, isovaleraldehyde, valeraldehyde, o-toluenaldehyde, m-toluenaldehyde, p-toluenaldehyde, hexaldehyde, octaldehyde, 2,5-dimethyl-benzaldehyde*, dan *decaldehyde* dan lain-lain. Meskipun demikian, konsentrasi senyawa karbonil dari pembakaran bahan bakar gasolin relatif sangat kecil bahkan sebagian besar tidak terdeteksi sehingga pengaruhnya sering diabaikan (Karavalakis, 2012).

Tabel 2.5 : Emisi karbon dan karbonil dari kendaraan EURO 4 dan 5 menurut SUDC dan NEDC pada kondisi *cold start* (Clairotte, 2013)

Temperature Fuel	UDC Emission factor (in mg/km except □ in g/km)			
	22 °C		-7 °C	
	E5	E85	E5	E75
<i>Car 4 Euro4</i>				
NO (nitric oxide)	52 (6)*	36 (4)*	83.7 (0.3)**	48 (7)**
NO ₂ (nitrogen dioxide)	0.085 (0.008)	0.04 (0.04)	0.10 (0.03)	12 (20)
N ₂ O (nitrous oxide)	1.2 (0.3)	1.2 (0.6)	1.7 (0.4)	0.8 (0.9)
NH ₃ (ammonia)	11.1 (1.6)**	3.6 (0.7)**	141.2 (7.2)*	66 (21)*
HCN (hydrogen cyanide)	0.05 (0.04)	0.009 (0.005)	1.8 (0.4)	1.3 (0.3)
HCHO (formaldehyde)	1.1 (0.2)*	3.4 (0.5)*	2.09 (0.05)*	6 (1)*
CH ₃ CHO (acetaldehyde)	4 (3)**	28 (3)**	17.0 (0.4)**	178 (30)**
CH ₃ CH ₂ OH (ethanol)	14 (15)*	111 (38)*	43 (6)	2981 (1745)
CH ₄ (methane)	20 (5)	20.3 (0.9)	44 (1)*	201 (66)*
C ₂ H ₄ (ethylene)	15 (5)	14 (3)	48 (3)	158 (50)
C ₇ H ₈ (toluene)	39 (18)*	3.9 (0.7)*	263 (21)**	73 (16)**
CO (carbon monoxide) ^{a□}	1.8 (0.4)***	0.34 (0.04)***	8 (2)***	15 (1)***
CO ₂ (carbon dioxide) ^{a□}	241 (2)*	231 (7)*	290 (8)	280 (2)
NO _x (nitrogen oxide) ^a	69 (18)	49 (7)	111 (24)	101 (7)
THC (total hydrocarbons) ^a	195 (80)	179 (26)	637 (1)***	891 (1)***
NMHC FID corrected ^b	200 (87)	188 (42)	1215 (72)**	5092 (944)**
<i>Car 5 Euro5a</i>				
NO (nitric oxide)	23 (2)**	15 (1)**	35.68 (0.03)**	20 (3)**
NO ₂ (nitrogen dioxide)	1.1 (0.7)	1.5 (0.2)	0.6 (0.7)	0.9 (0.2)
N ₂ O (nitrous oxide)	1.1 (0.2)*	1.7 (0.5)*	0.8 (0.7)	0.8 (0.2)
NH ₃ (ammonia)	15 (3)*	7 (1)*	61 (2)**	33 (3)**
HCN (hydrogen cyanide)	1.2 (0.4)	0.8 (0.4)	5 (5)	2.2 (0.3)
HCHO (formaldehyde)	1.7 (0.1)**	3.0 (0.7)**	1.5 (0.4)**	5.2 (0.3)**
CH ₃ CHO (acetaldehyde)	6 (3)**	29 (8)**	19.6 (0.9)**	199 (21)**
CH ₃ CH ₂ OH (ethanol)	30 (4)***	86 (6)***	32 (36)***	1075 (73)***
CH ₄ (methane)	12 (3)**	29 (5)**	81 (2)**	285 (21)**
C ₂ H ₄ (ethylene)	10 (2)*	18 (5)*	78 (2)**	166 (6)**
C ₇ H ₈ (toluene)	82 (22)	49 (35)	348 (5)**	149 (29)**
CO (carbon monoxide) ^{a□}	1.2 (0.5)	0.66 (0.07)	10 (2)	10.1 (0.9)
CO ₂ (carbon dioxide) ^{a□}	250 (4)**	237 (5)**	272 (5)	269 (6)
NO _x (nitrogen oxide) ^a	32 (3)***	19 (2)***	64 (6)***	32.2 (0.8)***
THC (total hydrocarbons) ^a	120 (23)	141 (27)	959 (3)**	1471 (166)**
NMHC FID corrected ^b	100 (20)	140 (30)	1361 (30)***	2069 (79)***

*nilai dalam kurung adalah standar deviasi dari 3 kali repetisi pengukuran

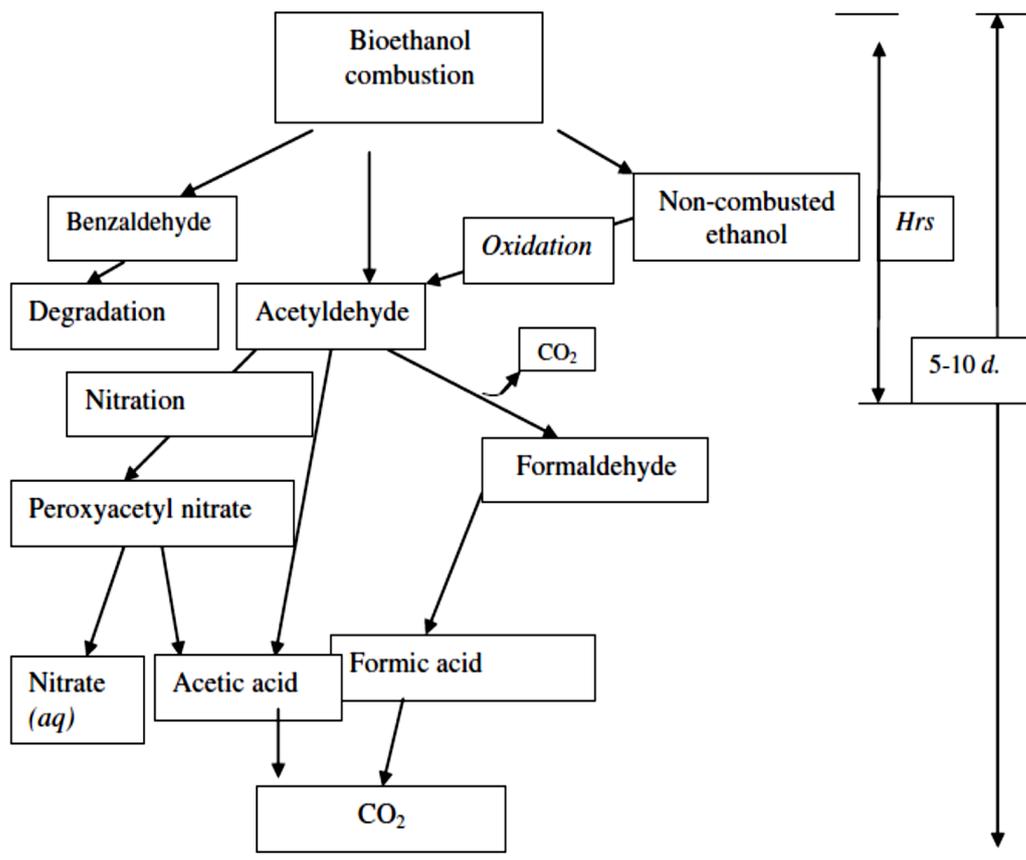
Sebaliknya pembakaran bahan bakar alkohol (ethanol, butanol dan metanol) pada mesin spark ignition akan menghasilkan emisi dalam bentuk senyawa aldehida yang relatif tinggi. Meskipun demikian, penambahan bioetanol ke dalam gasolin dapat mengurangi emisi *benzene*, *toluene* dan *volatile organic compounds* (VOC) yang dihasilkan pada pembakaran gasolin (Lilian dan Aline, 2013). Emisi aldehida yang paling dominan diproduksi dari pembakaran bahan bakar metanol dan gasolin adalah *formaldehida* (CH₂O), sedangkan campuran bahan bakar bioetanol dan gasolin lebih dominan menghasilkan emisi *acetaldehida* (C₂H₄O). Sementara itu, emisi aldehida yang paling banyak ditemukan pada pembakaran bahan bakar diesel adalah *formaldehyde*, *acetaldehyde*, *propionaldehyde*, and *acetone* (Lopez, 2013; Lilian Lefol, 2009).

Keberadaan gugus fungsional senyawa hidroksil (OH) dalam bahan bakar bioetanol menyebabkan proses pembakarannya menghasilkan emisi aldehida yang tinggi. Pemicunya disebabkan oleh kegagalan pembakaran yang umum terjadi pada kondisi dingin (*cold start*) atau pada fasa lanjut proses oksidasi dari bioetanol yang tak terbakar (Paolo Helena dan Jose Ricardo, 2016). Pengaruh temperatur terhadap emisi acetaldehida juga dibuktikan oleh penelitian R. Suarez-Bertoa (2015), dengan melakukan pengujian terhadap bahan bakar E75 dan E85 pada sembilan jenis mesin *World harmonized Light-duty vehicle Test Cycle* (WLTC) dan *New European Driving Cycle* (NEDC). Hasilnya, ditemukan peningkatan acetaldehida sebesar 350% (E75) dan 120% (E85) pada temperatur 23°C dibanding dengan bahan bakar gasolin, dan meningkat sebesar 390% (E75) dan 400% (E85) pada temperatur -7°C. Hasil tersebut hampir sama dengan penelitian yang dilakukan oleh M. Clairotte (2013) pada temperatur 23°C dan -7°C yang secara detail ditunjukkan pada Tabel 2-5. Selain itu, konsentrasi emisi aldehida pada pembakaran bioetanol akan meningkat seiring bertambahnya konsentrasi bioetanol serta naiknya putaran dan daya mesin, bahkan peningkatannya bisa mencapai 500% dengan penggunaan bioetanol lebih dari 70% jika dibandingkan dengan E10 (Lopez, 2013; Pouloupoulos, 2001).

Menurut Lopez (2013), emisi acetaldehida merupakan produk utama yang dihasilkan pada pembakaran campuran gasolin dan bioetanol. Sementara, formadelhida dan asam asetat adalah sebagai produk sekunder dan tersier dari pembakaran campuran bahan bakar bioetanol dan gasolin. Adapun proses terbentuknya emisi *aldehyde* dari pembakaran bioetanol dapat dilihat pada Gambar 2-26. Pada Gambar tersebut degradasi bioetanol tak terbakar menjadi benzaldehida dan acetaldehida terjadi dalam hitungan jam, sementara penelitian Mark Z. Jacobson (2007) menyebutkan bahwa siklus hidup emisi *acetaldehyde* yang dihasilkan dari oksidasi ethanol yang tak terbakar adalah mencapai 8 jam di udara yang tercemar dan 8 hari di lapisan udara trobosfer bebas.

Emisi *acetaldehyde* maupun *formadelhyde* merupakan ancaman bagi kesehatan manusia, karena keduanya merupakan senyawa karsinogen pembentuk sel kanker dalam darah manusia. Selain itu, kedua senyawa tersebut juga dapat menimbulkan gangguan pernapasan seperti asma dan *bronchitis*, yang dapat

berubah menjadi karbon dioksida dengan katalis sinar matahari sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2-26. Kesimpulan itu diperkuat oleh penelitian Lopez terhadap kendaraan EEV (*Enhanced Environmentally-friendly Vehicle*) di Oslo dengan bahan bakar E5-E20 bahwa penggunaan bioetanol dapat merusak kualitas udara dan berbahaya bagi kesehatan manusia, bahkan akan mengganggu proses reproduksi dan tingkat kelahiran (Jacobson, 2007).



Gambar 2-26 : Proses pembentukan emisi *acetaldehyde* dan turunannya dari pembakaran bioetanol serta periode proses degradasi ke kondisi atmosfer (Manzetti dan Andersen, 2015)

Sementara itu, konsentrasi *formaldehyde* di udara terbuka dan pengaruhnya terhadap CO, NO₂, Ozon (O₃), suhu lingkungan, tekanan udara dan kelembaban relatif diteliti oleh Mohammad Hadi Dehghani (2017). Penelitian tersebut dilakukan pada musim dingin dan musim semi selama 6 bulan dari Desember 2013 sampai Juni 2014 dengan 108 sampel yang diambil dari 6 lokasi berbeda di Teheran, Iran. Hasilnya, konsentrasi *formaldehyde* pada musim semi 1,31 lebih tinggi

dibandingkan pada musim dingin, yaitu 22,7:17,2 ppb. Demikian halnya perubahan temperatur udara, CO, NO₂ dan O₃ signifikan berpengaruh terhadap konsentrasi *formaldehyde*, sedangkan tekanan udara dan kelembaban relatif tidak berpengaruh secara signifikan baik pada musim dingin maupun pada musim semi. Secara keseluruhan kendaraan adalah kontributor utama meningkatnya konsentrasi *formaldehyde* di Teheran pada kedua musim, khususnya pada musim dingin, sedangkan proses oksidasi fotokimia dianggap faktor utama peningkatan *formaldehyde* pada musim semi. Perbandingan produksi emisi aldehida terhadap penggunaan gasolin dan bioetanol telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pouloupoulos (2001), menemukan penambahan ethanol 3% dan 10% ke dalam bahan bakar gasolin akan meningkatkan emisi evaporasi dan aldehida dua kali lipat pada setiap kasus, meskipun emisi benzena, asam asetat dan toluene menurun secara bersamaan. Sementara Lopez (2013) menemukan lebih dari 150ppm acetaldehida dan 20-30ppm asam asetat jika bioetanol 5-20% ditambahkan ke dalam gasolin.

Untuk mengatasi meningkatnya emisi aldehida dengan penggunaan bahan bakar bioetanol dapat dilakukan melalui, perbaikan sistem atomisasi bahan bakar dan pengontrolan perbandingan udara-bahan bakar yang dapat dilakukan secara elektronik agar hasilnya lebih presisi, menyusun formulasi untuk penggunaan katalis konverter serta implementasi penggunaan teknologi baru khususnya pasca perawatan untuk penggunaan bahan bakar alternatif (M. Clairotte, 2013; Lan Li, 2015). Sejauh ini penggunaan katalis konverter telah banyak dilakukan oleh peneliti untuk mengurangi emisi aldehida pada penggunaan bioetanol, meskipun tidak sepenuhnya efektif mengatasi masalah tersebut dengan bertambahnya konsentrasi bioetanol yang digunakan. Hal ini dibuktikan oleh penelitian S.G. Pouloupoulos (2001), dimana penggunaan katalis konverter berhasil menurunkan emisi acetaldehida yang signifikan untuk E10 sementara pada E3 kurang efektif.

2.6 Sistem Injeksi dan Mekanisme Pencampuran Bahan Bakar pada Mesin Spark Ignition

Sistem pemasukan bahan bakar pada mesin pembakaran dalam khususnya mesin gasolin terus mengalami perkembangan, mulai sistem karburator, *port fuel injection* (PFI) sampai *Gasolin Direct Injection* (GDI). Sistem karburator mulai

ditinggalkan orang meskipun sistem ini mempunyai beberapa keuntungan, antara lain: murah, mudah dalam perbaikan dan perawatan, mobilitasnya tinggi dan fungsinya langsung *door to door*. Meskipun demikian kekurangan utama sistem karburator adalah pada tingkat emisi gas buang yang tinggi serta boros bahan bakar, membuat sistem injeksi bahan bakar terus dikembangkan untuk mengatasi dua masalah tersebut. Pada bahasan ini akan diberikan gambaran umum dan pemahaman singkat tentang PFI dan GDI termasuk kelebihan dan kekurangan kedua teknologi sistem injeksi tersebut. Adapun teknologi karburator tidak lagi dibahas mengingat tidak lagi digunakan untuk produk kendaraan bermotor saat ini.

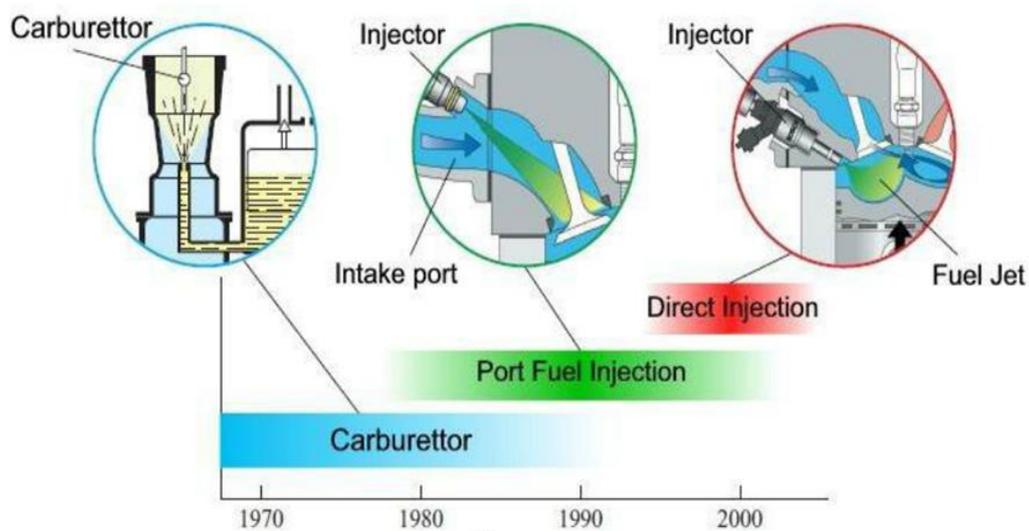
2.6.1 *Port Fuel Injeksi*

Teknologi sistem injeksi PFI mulai dikembangkan di awal tahun 1980 untuk menggantikan sistem karburator. Pada sistem ini bahan bakar tidak diinjeksikan secara langsung ke ruang bakar, tetapi melalui saluran masuk (intake manifold). Sistem ini mengandalkan kontrol elektronik untuk mengontrol aliran bahan bakar sesuai yang dibutuhkan melalui penempatan beberapa alat sensor seperti sensor beban, putaran dan sebagainya.

Sistem PFI telah berevolusi dari *single port injection* (SPI) menjadi *multi port injection* (MPI) dengan injektor disetiap silinder mesin. Pada sistem PFI, pengontrolan laju aliran bahan bakar menjadi lebih baik, perbandingan udara-bahan bakar (AFR) juga dapat diatur secepat mungkin untuk meningkatkan stabilitas pembakaran, menurunkan emisi hidrokarbon tak terbakar (ubHC) dan meningkatkan daya spesifik mesin jika dibandingkan dengan sistem karburator.

Pada mesin SPI, injektor ditempatkan pada saluran hisap untuk menghantarkan bahan bakar ke semua silinder yang ada. Bahan bakar cair biasanya diinjeksi dengan tekanan dibawah 5 bar. Campuran udara dan bahan bakar terjadi sebelum mencapai silinder. Adanya jarak antara lokasi injektor dan katub hisap memungkinkan untuk membuat variasi AFR pada setiap silinder (Cordosa, 2011). Sementara itu pada MPI, injektor disusun sedemikian rupa sehingga setiap injektor ditempatkan di setiap silinder. Dengan susunan ini, injector yang ditempatkan lebih dekat ke katub hisap menyebabkan mesin akan sangat responsif. Parameter pengontrolan yang sangat penting pada sistem ini terletak pada semprotan bahan

bakar. Bahan bakar yang disemprotkan diarahkan agar menumbuk bagian belakang katub hisap yang panas sehingga penguapan bahan bakar serta pencampuran dengan udara akan meningkat. Jika posisinya tidak tepat, maka bahan bakar akan mengenai permukaan yang lain pada dinding dan membentuk lapisan tipis bahan bakar. Lapisan tipis bahan bakar (*wall fuel film*), sebagai akibat dari kegagalan atomisasi menyebabkan peningkatan *ubHC* dan penurunan daya mesin.



Gambar 2.27: Perkembangan sistem injeksi bahan bakar (Nicolas, 2013)

Kekurangan lain dari sistem port injeksi adalah rendahnya tekanan injeksi bahan bakar. Persoalan lain yang sangat penting diperhatikan adalah saat mesin dijalankan dalam kondisi dingin (*cold start*), dimana pertama-tama permukaan katub masuk harus dalam kondisi panas. Selain itu kelebihan bahan bakar memerlukan daya penguapan, pencampuran dan pengapian yang lebih kuat dalam selinder. Pusaran aliran campuran udara dan bahan bakar yang besar oleh gerakan hisap akan menyebabkan aliran turbulen yang tinggi dalam silinder. Hal ini akan mengakibatkan distorsi pada pembentukan inti api sehingga akan menurunkan efektifitas variasi siklus (Run Chen, 2014).

Kelebihan sistem MPI adalah memungkinkan untuk melakukan injeksi bahan bakar secara berjenjang (*phase*). Waktu injeksi dapat divariasikan sesuai timing katub pada setiap silinder, sehingga AFR dapat dikontrol. Injeksi dapat dilakukan selama periode katub terbuka atau tertutup, yang akan meningkatkan

fleksibilitas mesin. Pada kondisi itu pula kontrol emisi dapat dilakukan dan pembakaran miskin dapat dikembangkan meski dalam skala yang terbatas.

Tabel 2.6: Kelebihan dan kekurangan sistem DI dibandingkan sistem PFI

Kelebihan DI dari PFI	Kekurangan DI dari PFI
Improve transient response	Complex control system to between operation modes, stratified and homogeneous, high cost
Higher compression ratio	Throttle still required for medium and high loads
Reduced pumping losses for stratified charge mode	Higher emissions NOx (stratified charge)
Charge cooling effect, higher volumetric efficiency	Complex in cylinder flows, air motion sensitivity
Less enrichment used for acceleration	Increased complexity of injection system, with higher energy requirements, more expensive
Better AFR control (no port wetting)	3 way catalytic converter, not efficient for lean operation
Higher tolerance to EGR	Soot formation at high loads
10% less fuel consumption over the European driving cycle	Sensitive to combustion chamber design

Sumber: Cordosa, 2011

Pada sistem PFI beban mesin dapat dikontrol oleh katub throttle untuk memvariasikan laju aliran udara ke katub hisap. Jumlah aliran udara yang dibutuhkan diatur oleh sebuah alat sensor aliran melalui sistem ECU agar sesuai dengan bahan bakar yang diinjeksikan. Distribusi bahan bakar lebih baik pada sistem ini dengan pengaturan bahan bakar pada setiap silinder, penurunan variasi AFR antar silinder akan menurunkan emisi mesin dan meningkatkan stabilitas pembakaran. Pengaturan durasi injeksi diatur oleh sebuah alat kontrol yang biasanya bervariasi antara 1,5ms – 1,8ms (Cordosa, 2011).

Sistem pengapian dikendalikan oleh sebuah busi yang menghasilkan bunga api listrik sesaat sebelum akhir langkah kompresi. Jika campuran udara-bahan bakar berada pada titik flammability, maka inti api akan mengembang di sekitar busi kemudian merambat keseluruh ruang dan membakar campuran udara-bahan bakar. Keakuratan pengontrolan pengapian sangat penting sebab jika terlambat akan menyebabkan pembakaran tidak sempurna, efisiensi turun, emisi ubHC dan CO meningkat. Sementara itu pengapian yang terlalu cepat akan menimbulkan knocking. Hal ini terjadi karena kenaikan tekanan oleh pembakaran menyebabkan temperatur akhir gas sudah mencapai titik auto-ignation bahan bakar

(sebagian campuran udara–bahan bakar sudah mencapai titik nyala), sehingga kenaikan tekanan yang sangat cepat ini menimbulkan knocking.

2.6.2 Injektor

Injektor yang digunakan pada sistem PFI diklasifikasikan dalam beberapa jenis, yaitu:

1. Menurut jumlah lubang (*pintle*, lubang tunggal, lubang banyak, *spray ganda*)
2. Cara aktuasi (*solenoid*, *piezoelectric*, *ultrasonic*, vibrasi)
3. Tekanan injeksi (rendah, < 5 bar; sedang 5-15 bar; tinggi > 15 bar)

Jenis injektor yang digunakan pada sistem PFI relatif lebih murah dan sederhana dibanding yang digunakan pada sistem DI. Sebagai pembanding; pada kondisi operasi yang memerlukan tekanan tinggi, misalnya tekanan sampai 200 bar dan temperatur luar 300°C, maka injektor DI 10 kali lebih mahal dibandingkan injektor PFI. Secara umum tipikal injektor PFI didesain pada kisaran tekanan 3–5 bar dan temperatur luar sampai 80°C sehingga biaya produksinya jauh lebih murah dibanding sistem DI. Selain itu, syarat umum yang harus dipenuhi oleh sebuah injektor PFI adalah atomisasi bahan bakar yang baik, akurasi terhadap pengukuran bahan bakar tinggi, aktuasi yang cepat, minim terhadap kebocoran, tidak rentan terhadap pembentukan deposit dan variasi “shot to shot” yang rendah.



Gambar 2.28: Injektor pada sistem PFI tipe LH buatan Bosch

Pada injeksi bahan bakar yang menjadi parameter utama adalah bahan bakar itu sendiri dalam bentuk waktu injeksi dan ukuran dropletnya. Diameter droplet dapat diukur dengan *Santer mean diameter (SMD)*, dimana rata-rata diameter droplet yang dihasilkan oleh injektor PFI antara 70 dan 150 μm . Jika ukuran droplet terlalu besar, maka droplet akan menumbuk dinding sehingga

pembentukan campuran bukan bergantung terhadap droplet lagi tetapi pada lapisan tipis bahan bakar.

Untuk menghindari hal seperti ini, maka diameter aliran masuk dan kecepatan bahan bakar dalam fase gas harus diperhitungkan. Penelitian yang dilakukan oleh Holthaus yang melakukan pengukuran droplet bahan bakar dengan alat ukur interferometer. Putaran mesin 1000 rpm, dimana radius saluran masuk 31,5mm dan kecepatan gas 15m/s. Diameter droplet yang dihasilkan $< 10\mu\text{m}$ tanpa menumbuk dinding silinder, sehingga disimpulkan bahwa droplet tidak akan menumbuk dinding jika diameter droplet $< 10\mu\text{m}$.

Jenis injektor lubang banyak memiliki karakteristik distribusi droplet yang lebih kecil dan sudut yang dibentuk relatif kecil, akumulasi pembentukan cairan tipis bahan bakar kecil meski pada kecepatan udara yang rendah. Sementara itu jenis injektor lubang tunggal mempunyai momentum injeksi yang tinggi sehingga menghasilkan akurasi yang lebih baik, khususnya pada kondisi aliran balik yang tinggi. Hal ini akan sangat berdampak pada pembentukan lapisan tipis bahan bakar pada dinding yang menyebabkan daya mesin turun dan emisi meningkat. Untuk memperbaiki proses atomisasi dan pencampuran bahan bakar, beberapa injektor biasanya ditambahkan dengan beberapa mekanisme alat bantu seperti; *air assisted* injeksi, *swirl tips*, *nozzle tip*, vibrasi ultrasonik dan pemanasan. Pada sejumlah alat bantu tersebut, jenis *air assisted* injeksi yang paling baik untuk meningkatkan stabilitas mesin, respon transien dan menurunkan emisi ubHc meski memerlukan penanganan yang lebih teliti (Cordosa, 2011).

Sementara itu waktu injeksi merupakan variabel lain yang sangat berpengaruh terhadap kinerja mesin khususnya pada periode timing injeksi OVI. Aliran bahan bakar akan mengalami fluktuasi tekanan dan bentuk yang tidak identik dan serupa dengan karakteristik injektor yang dikeluarkan oleh pabrik pembuatnya. Jumlah injeksi bahan bakar yang diinginkan setiap siklus dikontrol secara elektronik melalui signal modulasi lebar gelombang. Karakteristik gasolin seperti; titik didih dan volatilitas akan berdampak pada laju penguapan, oleh sebab itu tekanan pada ruang masuk harus lebih rendah dari tekanan atmosfer. Saat tekanan *manifold* diturunkan lebih rendah dari tekanan uap jenuh bahan bakar, maka proses

penguapan akan meningkat, tetapi penurunan laju aliran udara tidak berdampak positif pada proses pencampuran bahan bakar dan udara (Cordosa, 2011)

2.6.3 Pembentukan Campuran

Proses pencampuran udara dan bahan bakar pada sistem PFI diatur oleh aliran gas di dalam manifold dan silinder. Pada proses langkah isap, silinder diisi udara karena adanya perubahan tekanan yang terjadi oleh gerakan piston menuju ke titik mati bawah. Gerakan bolak balik dari piston dan katub menghasilkan aliran turbulen yang sangat kuat dan bentuknya tidak beraturan. Oleh sebab itu gerakan fluida yang sangat kompleks dimana perpindahan panas dan massa berlangsung secara simultan, maka percampuran udara dan bahan bakar menjadi bagian yang sangat penting dalam pengembangan mesin pembakaran dalam.

Ada beberapa parameter yang sangat berpengaruh terhadap interaksi semprotan bahan bakar dan aliran udara, diantaranya adalah; geometri manifold, bentuk ruang bakar, tekanan injeksi, momentum aliran udara (tergantung putaran mesin dan daya angkat katub), karakteristik geometri injektor, durasi dan pentahapan injeksi, bentuk semprotan, distribusi ukuran droplet, sifat bahan bakar, dan temperatur dinding. Selain itu, sisa gas pembakaran yang terdapat dalam ruang bakar pada siklus sebelumnya harus juga diperhitungkan, karena deposit bahan bakar yang tidak terbakar dalam silinder akan menurunkan tenaga mesin dan meningkatkan emisi (Cordosa, 2011)

Interaksi aliran udaran dan momentum semprotan bahan bakar sangat signifikan berdampak pada karakteristik emisi hidrokarbon yang dihasilkan. Putaran mesin yang tinggi membutuhkan proses pencampuran udara dan bahan bakar yang tinggi pula. Secara umum, pada periode injeksi katub tertutup (CVI) interaksi antara aliran udara dan semprotan bahan bakar rendah. Setelah injeksi, gerakan droplet yang berukuran kecil cenderung melambat sementara droplet yang berukuran besar cenderung bertahan pada lintasannya sampai menghantam katub atau dinding. Ketika droplet menumbuk dinding atau katub, cairan tipis bahan bakar akan terbentuk atau droplet akan memantul dan berubah arah lintasan. Endapan lapisan tipis bahan bakar inilah yang kemudian menjadi penyebab menurunnya

proses atomisasi karena terjadi gaya geser antara bahan bakar pada fasa gas dan cair.

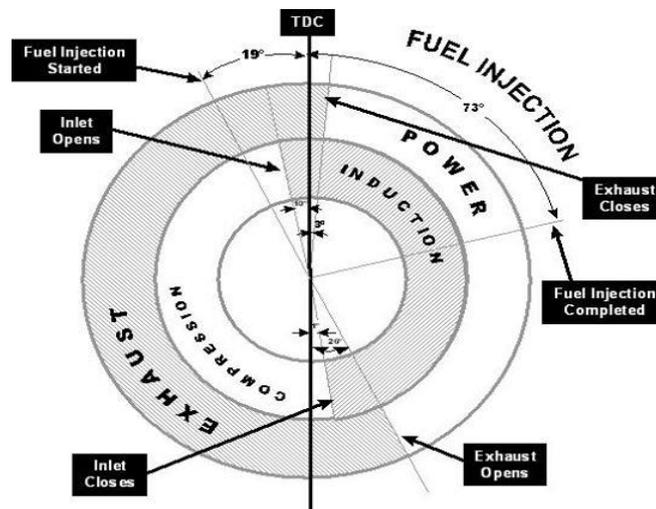
Meskipun dampaknya tidak terlalu signifikan, akan tetapi langkah hisap dapat mempengaruhi kinerja mesin, sehingga perlu menyelaraskan antara waktu injeksi dan posisi katub. Jika dilakukan dengan baik, maka hal ini dapat meningkatkan respon mesin dan efisiensi volumetris. Sedangkan bentuk struktur aliran seperti aliran berputar dan lurus juga secara signifikan berpengaruh terhadap penurunan emisi gas buang dan meningkatkan stabilitas pembakaran, karena bentuk gerakan aliran udara dalam ruang bakar berpengaruh terhadap pembakaran melalui pengontrolan kecepatan perambatan api. Efektifitas aliran udara yang berdampak pada kinerja mesin, diindikasikan melalui besaran efisiensi volumetric. Semakin besar efisiensi volumetris, maka akan semakin besar pula daya mesin yang dihasilkan (Cordosa, 2011)

2.6.4 Mekanisme Katub Pada Mesin *Spark Ignition*

Mekanisme katub pada mesin *spark ignition* harus menjamin proses pemasukan campuran udara dan bahan bakar serta pengeluaran gas sisa pembakaran berlangsung secara maksimal. Settingan harus membuat katub mampu menutup dan membuka pada waktu yang tepat. Mekanisme *valve timing* sangat berpengaruh pada banyak parameter kinerja mesin antara lain, konsumsi bahan bakar spesifik, daya, emisi dan lain sebagainya. Oleh sebab itu mekanisme *valve timing* mesin pembakaran dalam penting diperhitungkan pada mesin pembakaran dalam selain waktu dan durasi injeksi serta derajat pengapian.

Pada mesin penyalaan kompresi dan penyalaan percik, biasanya katub *overlap*-nya hanya sampai 15° CA yang dikategorikan sebagai *overlap* kecil, sedangkan mesin penyalaan percik dengan performa tinggi, katub *overlap*-nya bisa mencapai 65° CA yang dikategorikan sebagai *overlap* besar. Pada mesin yang mempunyai *overlap* kecil, katub hisap membuka 5° BTDC sampai 45° ABDC sebagai langkah hisap. Adapun panjang waktu katub hisap membuka bergantung besarnya tekanan kompresi yang dibutuhkan (Phuangwongtrakul, 2013).

Jika dibutuhkan tekanan kompresi yang lebih besar, maka penutupan katub hisap dilakukan lebih awal. Pengaruh pembukaan atau penutupan katub hisap maupun katub buang yang terlalu cepat atau lambat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.29: Diagram *valve timing* (Saurabhjain, 2013)

1. Jika katub hisap membuka lebih cepat, maka gas buang akan kembali ke intake manifold dan menekan udara segar yang akan masuk silinder.
2. Katub hisap menutup lebih lambat akan menyebabkan tekanan dan temperatur silinder yang rendah sehingga menghasilkan efisiensi pembakaran yang rendah.
3. Jika katub buang membuka terlalu lambat, maka volume gas buang dalam silinder akan meningkat dan menyebabkan kerugian pemompaan yang tinggi.
4. Katub buang membuka terlalu cepat, akan menghasilkan kerugian kerja dari ekspansi gas dalam silinder, efisiensi volumetris yang rendah, dan tekanan udara yang rendah pada periode overlap
5. Jika katub buang menutup terlalu lambat, piston akan menghisap kembali gas buang masuk ke silinder atau campuran udara-bahan bakar langsung ke luar ke katub buang menjadi emisi sehingga menjadi lebih boros.

Dengan demikian penyetelan katub hisap dan katub buang harus disesuaikan dengan karakteristik mesin dan sifat bahan bakar

2.6.5 Mekanisme Injeksi CVI dan OVI Pada Mesin *Spark Ignition*

Mekanisme injeksi bahan bakar yang umum digunakan pada mesin SI adalah CVI karena rendahnya emisi ubHC yang dihasilkan pada beban rendah dan

start dingin. Pada mekanisme CVI, bahan bakar mempunyai waktu yang cukup untuk menguap dalam intake port meskipun waktu yang tersisa makin pendek dengan semakin meningkatnya putaran mesin. Hal ini tidak berarti bahwa bahan bakar akan menguap seluruhnya saat katub hisap membuka, khususnya selama kondisi start dingin. Pada saat permukaan mesin dalam kondisi dingin, bahan bakar tidak akan menguap seluruhnya dan sejumlah bahan bakar yang diinjeksikan membentuk lapisan film di sekitar katub hisap. Oleh karena lambatnya laju penguapan bahan bakar, maka siklus yang pertama mengalami *over fueling* yang menyebabkan naiknya emisi ubHC.

Untuk mengatasi hal tersebut, maka semprotan harus diarahkan ke belakang katub hisap yang panas untuk mengurangi pembasahan dinding. Target semprotan yang tepat akan meningkatkan respon transien dan meningkatkan proses pencampuran dan mempercepat proses penguapan bahan bakar. Pada mekanisme CVI, semprotan awal tidak berdampak pada ukuran droplet, jika cairan bahan bakar mencapai silinder. Hal itu dikarenakan proses atomisasi sekunder yang terjadi pada lapisan film bahan bakar. Droplet terbentuk dari kegagalan proses atomisasi yang terjadi pada tepi katub hisap dengan diameter yang bervariasi tergantung pada ketebalan lapisan bahan bakar dan laju aliran udara yang masuk

Proses induksi dan pencampuran bahan bakar terjadi selama proses langkah hisap dan langkah kompresi. Proses ini dapat diamati dengan menggunakan alat ukur berupa *Laser Induced Fluorescence Measurements*. Biasanya pada kondisi mesin panas dan WOT tidak ada droplet yang terbentuk, akan tetapi pada kondisi mesin dingin (*cold start*) akan ditemukan 60 – 70 μm diameter droplet dalam silinder pada proses langkah hisap. Sedangkan pada langkah kompresi diameter droplet yang ditemukan adalah 40 μm (Cordosa, 2011).

Meyer dan Heywood mengidentifikasi empat tahap proses dimana droplet dapat terbentuk pada mesin sistem PFI dengan menggunakan *Droplet Particle Analyser*, yang kebanyakan terbentuk sebagai dampak dari proses atomisasi sekunder dalam silinder yaitu, (a) atomisasi aliran awal (CVI), (b) Pemasukan udara dengan kecepatan tinggi, (c) lapisan (film) bahan bakar dan (d) proses injeksi (OVI). Kondisi yang pertama terjadi setelah ada arus balik dari aliran masuk saat

campuran mulai memasuki silinder, dan gaya geser antara udara dan cairan bahan bakar yang besar menyebabkan terjadinya kegagalan proses atomisasi bahan bakar. Keadaan yang kedua terjadi ketika bahan bakar cair masuk ke silinder dan udara yang masuk melalui port dengan kecepatan yang terlalu tinggi.

Tabel 2.7: Kelebihan dan kekurangan mekanisme injeksi OVI dan CVI

Oven Valve Injection	Closed Valve Injection
<i>Faster transient response</i>	<i>More time for fule evaporation</i>
<i>In-cylinder charge cooling</i>	<i>Lower volumetric efficiency</i>
<i>Certain degree of stratification</i>	<i>Lower cold start emissions</i>
<i>Higher degree of heterogeneities in mixture</i>	<i>Lower dependence of finer atomization</i>
<i>Possible wetting of cylinder walls</i>	<i>Port wall wetting (liquid film formed)</i>
<i>Reduced port wall wetting</i>	-

Sumber: Cordosa, 2011

Hal ini akan menyebabkan bahan bakar cair akan bergeser ke daerah dekat sisi katub yang menyebabkan kegagalan atomisasi. Kondisi yang ketiga terjadi pada akhir langkah hisap saat katub tertutup, dimana terdapat bahan bakar cair pada tepi katub yang terdorong masuk ke dalam silinder. Sedangkan keadaan yang terakhir terjadi ketika proses injeksi bahan bakar dilakukan saat katub isap terbuka (OVI). Keadaan itu menimbulkan interaksi yang tinggi antara semprotan bahan bakar dan aliran udara sehingga mekanisme OVI membutuhkan karakteristik injektor yang lebih sensitif. Kecepatan udara yang terlalu tinggi dibandingkan kecepatan semprotan dapat menyebabkan tertahannya droplet dalam aliran udara, yang mana untuk mekanisme OVI perubahan laju aliran udara berdasarkan perubahan putaran mesin. Berdasarkan keadaan-keadaan yang telah disebutkan di atas, maka dapat disimpulkan kelebihan dan kekurangan mekanisme CVI dan OVI.

2.7 Metode Permukaan Respon

Response Surface Methodology (RSM) adalah sebuah metode statistika untuk menyatakan hubungan antara satu atau lebih variabel faktor (perlakuan) terhadap satu atau lebih variabel respon pada sebuah percobaan (eksperimen) kuantitatif untuk mengoptimalkan respon percobaan (Montgomery, 2001). Hubungan tersebut dinyatakan dalam sebuah persamaan yang dapat berupa model

persamaan orde satu (first order model), yaitu:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \dots \quad (2 - 9)$$

Atau, model persamaan orde dua (*second order model*);

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{1i} x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{2i} x_i^2 + \sum_i \sum_j \hat{\beta}_{ij} x_{ij}, \quad i < j \dots \dots \quad (2 - 10)$$

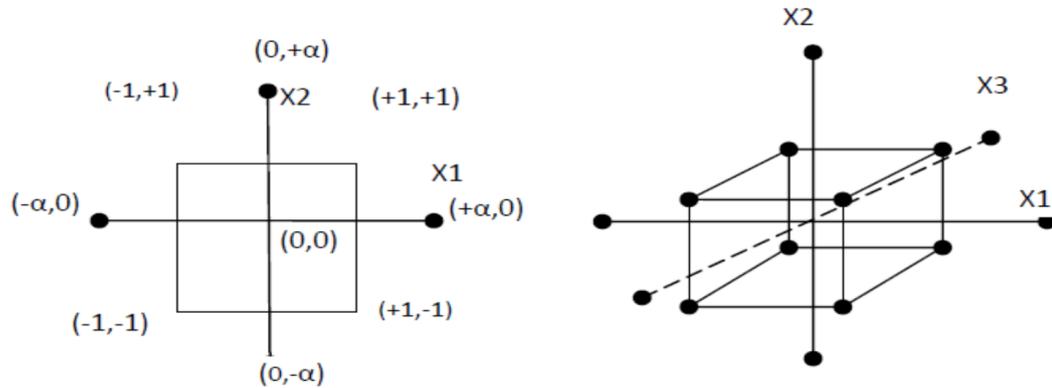
Setidaknya ada dua hal yang perlu dipertimbangkan dalam memilih jenis rancangan percobaan yang akan digunakan dalam analisa analisa data jika menggunakan metode permukaan respon, yaitu: bentuk persamaan dan sifat percobaan. Jika persamaan yang terbentuk hanya berorde satu (fungsi linear), maka cukup menggunakan rancangan percobaan 2^k faktorial dengan 2 level perlakuan untuk setiap pengamatan, dimana level rendah diberi kode -1 dan level tinggi diberi kode +1 dan k adalah banyaknya variabel faktor perlakuan. Sedangkan jika persamaan yang terbentuk adalah persamaan orde dua atau lebih, maka rancangan percobaan yang lebih sesuai adalah metode *central composite design* (CCD) atau metode *Box-Behnken*. Dalam memilih satu diantara dua metode yang terakhir dapat dilakukan dengan menentukan sifat percobaan. Jika percobaan yang dilakukan bersifat *sequential* maka metode *composite design* yang paling tepat. Sebaliknya jika sifat percobaan adalah *non-sequential*, maka sebaiknya memilih metode *box behnken* (Hari Sakti Wibowo, 2008).

2.7.1 Central Composite Design (CCD)

Central Composite Design adalah rancangan percobaan *two level factorial* (2^k) dengan penambahan elemen *Centre Runs* $(0, 0, \dots, 0)$ dan *Axial Runs* $\{(\pm\alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, \dots, 0), (0, 0, \dots, \pm\alpha)\}$, dimana nilai $\alpha = (nf)^{\frac{1}{4}}$ dan (nf) adalah nilai (jumlah titik) pada *factorial portion*. *Central Composite Design* secara visual diberikan dalam Gambar 2-30.

Dalam Gambar 2-30, diketahui bahwa pada CCD design bersifat *ortogonal* dan *rotatable* yang dimaksudkan agar estimasi respon mendekati hasil sebenarnya (presisi), dimana variabel respon (x_1, x_2, \dots, x_n) mempunyai jarak yang sama dengan titik pusat (*centre runs*) dan besarnya tidak bergantung pada arahnya. Selain itu, agar dihasilkan nilai prediksi respon yang baik, maka model seharusnya

memiliki nilai variansi yang stabil dan konsisten terhadap nilai x . Banyaknya total *Run Order* yang digunakan pada CCD dengan jumlah k tertentu dituliskan dalam Tabel 2-8.



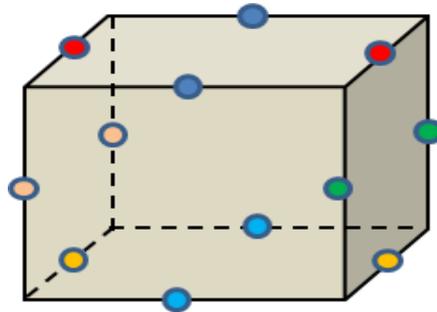
Gambar 2-30: Rancangan percobaan *Central Composite Design* (CCD)

Tabel 2-8: Jumlah runs order desain eksperimen CCD

	Jumlah Variabel Faktor (k)					
	2	3	4	5	6	7
$nf (2^k \text{ atau } 2^{k-p})$	4	8	16	32	64	128
Titik axial ($2k$)	4	6	8	10	12	14
$\alpha = (nf)^{\frac{1}{4}}$	$\pm 1,414$	$\pm 1,682$	± 2	$\pm 2,378$	$\pm 2,828$	$\pm 3,364$
Jumlah titik pusat ($nc \leq 3$), optional	-	-	-	-	-	-
Total runs order ($nf + 2k + nc$)	$8 + nc$	$14 + nc$	$24 + nc$	$42 + nc$	$76 + nc$	$132 + nc$

2.7.2 *Box-Behnken Design*

Box-Behnken Design adalah bagian pengembangan dari *two level factorial design* yang hanya menambahkan *elemen centre point* pada desain eksperimennya, sehingga lebih efisien dan efektif dibandingkan desain CCD karena melibatkan sedikit unit percobaan (*runs order*). Pengaplikasian metode *box behnken* hanya dapat digunakan pada sebuah eksperimen yang mempunyai minimal 3 faktor, sehingga elemen-elemen pada desain box behnken akan berbentuk $(0, 0, \dots, 0)$ dan $(\pm 1, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm 1, \dots, 0)$, $(0, 0, \dots, \pm 1)$, $(\pm 1, 0, \dots, \pm 1)$. Secara visual desain eksperimen menggunakan box behnken digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2-31: Desain eksperimen *Box-Behnken*, $k=3$

Perbedaan antara metode *central composite design* dan *box-behnken design* dalam menyelesaikan persamaan orde dua pada metode permukaan respon untuk $k=3$, dapat dilihat pada Tabel berikut ini:

Tabel 2.9: Perbedaan desain CCD dan *Box-Behnken* dengan $k=3$

Metode CCD				Metode <i>Box-Behnken</i>			
<i>Repetisi</i>	X_1	X_2	X_3	<i>Repetisi</i>	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0
1	+1	-1	-1	1	+1	-1	0
1	-1	+1	-1	1	-1	+1	0
1	+1	+1	-1	1	+1	+1	0
1	-1	-1	+1	1	-1	0	-1
1	+1	-1	+1	1	+1	0	-1
1	-1	+1	+1	1	-1	0	+1
1	+1	+1	+1	1	+1	0	+1
1	-1,682	0	0	1	0	-1	-1
1	+1,682	0	0	1	0	+1	+1
1	0	-1,682	0	1	0	-1	-1
1	0	+1,682	0	1	0	+1	+1
1	0	0	-1,682	3	0	0	0
1	0	0	+1,682				
6	0	0	0				
20	Jumlah total runs			15	Jumlah total runs		

BAB 3

BAHAN, PERALATAN DAN METODE PENGUJIAN

3.1 Bahan Bakar

3.1.1 Bahan Bakar Gasolin

Spesifikasi bahan bakar gasolin yang digunakan pada penelitian ini adalah pertamax RON 92 dengan sifat dan karakteristik sesuai dengan Surat Keputusan Dirjen Migas Nomor 3674K/24/DJM/2006, tanggal 17 Maret 2006 tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Gasolin yang dipasarkan dalam negeri (lampiran 1).

3.1.2 Bahan Bakar Bioetanol

Secara umum bahan baku etil alkohol terdiri dari dua jenis, yaitu etanol yang diperoleh melalui proses hidrasi elkana, dan bioetanol yang diperoleh dari proses fermentasi tanaman yang mengandung sari pati. Adapun jenis bioetanol yang digunakan pada penelitian ini adalah bioetanol kering (*anhydrous bioethanol*) yang didapatkan langsung dari PT. Energi Agro Nusantara (ENERO) yang merupakan produsen bioetanol terbesar di Jawa Timur.

3.2 Peralatan Pengujian

3.2.1 Mesin Port Fuel Injeksi (PFI) Satu Silinder



Gambar 3-1: Model Motor dan Silinder Honda CB150R



Gambar 3-2: Potongan silinder mesin pengujian

Mesin yang digunakan pada pengujian ini adalah mesin gasolin satu silinder, 4 katub dengan sistem PFI yang digunakan pada motor Honda CB150R. Adapun spesifikasi mesin ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3.1: Spesifikasi Mesin Kondisi Standar dan Modifikasi

Parameter	Standar
Engine type	4 Stroke, 4 Valve Single Cylinder DOHC
Bore	63,5 mm
Stroke	47,2 mm
Displacement volume	149,5 mm
Compression ratio	11,0 : 1
Ignition system	Full transistorized
Maximum power	12,5kW(17 PS)/10000RPM
Maximum torque	13,1Nm(1,34kgf.m)/8000RPM
Intake valve opening	5° BTDC, lifting 1 mm
Intake valve closure	35° ABDC, lifting 1 mm
Exhaust valve opening	35° BBDC, lifting 1 mm
Exhaust valve closure	5° ATDC, lifting 1 mm
Valve Train	Chain, DOHC

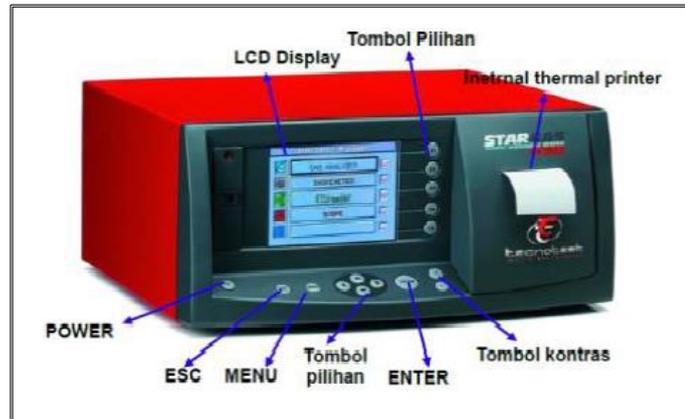
*Sumber: manual book Honda CB150R

3.2.2 Komposisi Bahan Bakar dan Karakteristiknya

Proses pencampuran bahan bakar gasolin dan bioetanol pada komposisi 50:50 (E50), 30:70 (E70) dan 15:85 (E85) akan dilakukan secara manual dengan menggunakan gelas ukur (*by volume*) yang ada pada Laboratorium Bahan Bakar dan Sistem Energi, Departemen Teknik Mesin, FTI-ITS Surabaya.

3.2.3 Exhaust Gas Analyzer

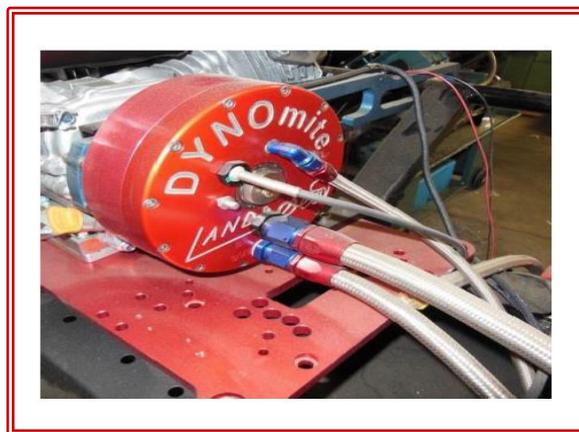
Peralatan ini dipergunakan untuk mengukur persentase emisi (CO, HC, NOx dan CO₂) dalam gas buang yang akan terdisplay pada layar alat tersebut secara digital. Jenis *exhaust gas analyzer* yang digunakan adalah STARGAS 898IND.



Gambar 3-3: Gas analyzer

3.2.4 Waterbrake Dynamometer

Alat ini untuk mengatur beban dan putaran mesin (RPM) yang secara seri terkopel pada mesin uji.



Gambar 3-4; Waterbrake Dynamometer

3.2.5 Electronic Control Unit (ECU)

Alat ini terdiri dari rangkaian elektronik yang berisi program untuk mengontrol seluruh parameter yang diinginkan dalam percobaan, antara lain volume injeksi, sudut pengapian bahan bakar, *start of injection* (SoI), sudut semprotan dan lain-lain. Untuk membandingkan kinerja ECU *programmable* yang

dirancang (Gambar 3-5), maka pengujian juga dilakukan dengan menggunakan ECU pada mesin standar (Gambar 3-6)



Gambar 3-5: ECU *programmable* dan *display* monitor



Gambar 3-6: ECU mesin standar

3.2.6 Peralatan Bantu

Selain peralatan utama yang disebutkan di atas, diperlukan beberapa bantu untuk mendukung proses pengujian agar dapat berlangsung dengan baik. Peralatan-peralatan yang dimaksud, antara lain; pengontrol dinamometer, *water break dynamometer*, termokoppel untuk mengukur; temperatur silinder, temperatur gas

buang, temperatur radiator dan oli pendingin mesin, flow meter bahan bakar (gelas ukur), dan *roller* sebagaiudukan ban belakang motor dan terhubungan dengan *waterbreak dynamometer* (Gambar 3-8b)



Gambar 3-7: Peralatan bantu pengujian (a) blower, (b) gelas ukur



Gambar 3-8: Peralatan bantu pengujian (a) *stopwacth*, dan (b) *roller*

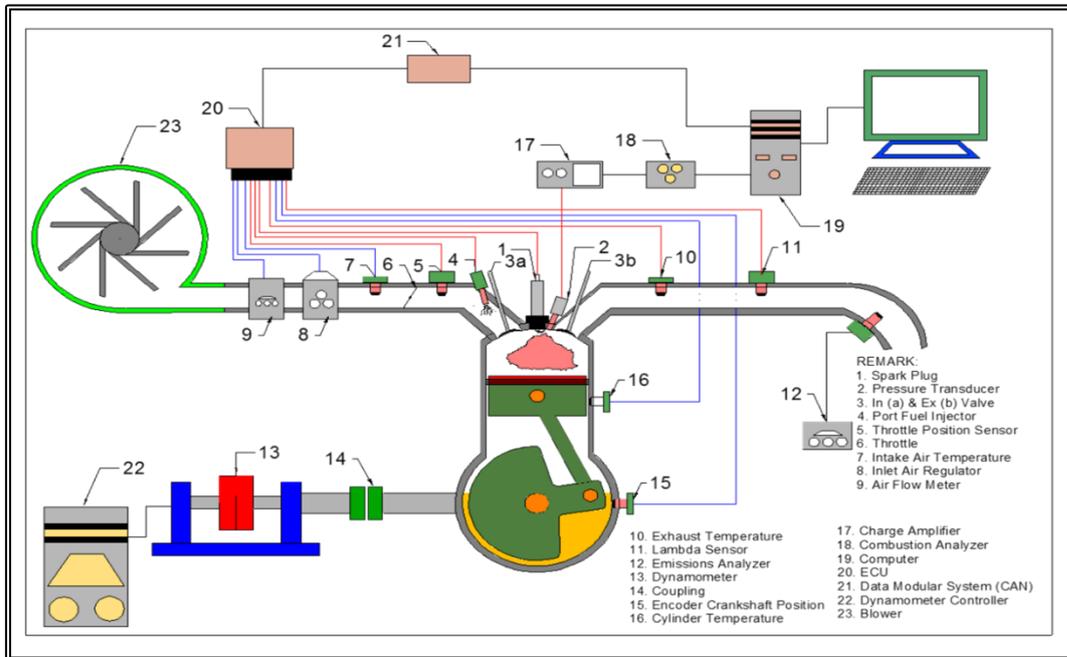


Gambar 3-9: Peralatan bantu pengambilan *formadelhyde* (*probe dan reagent*)

3.3 Rangkaian Peralatan Uji

3.3.1 Diagram Rangkaian Peralatan Pengujian

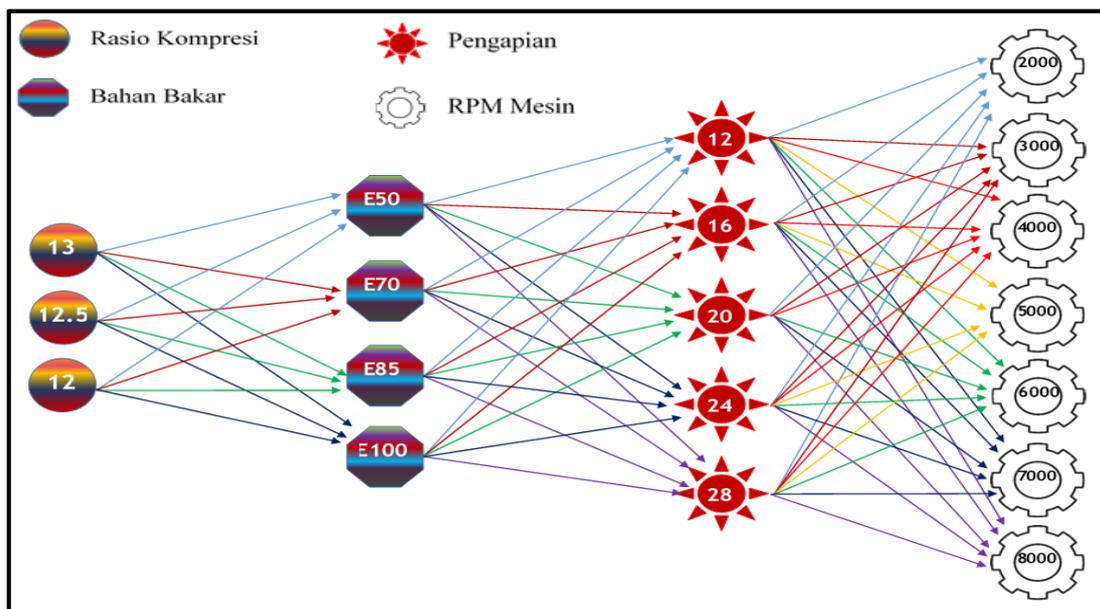
Rangkaian peralatan uji ditunjukkan pada Gambar 3-10 seperti di bawah ini:



Gambar 3-10: Diagram rangkaian peralatan uji

3.3.1 Desain Eksperimen

Skema dan desain eksperimen diperlihatkan pada Gambar 3-11 sebagai berikut:

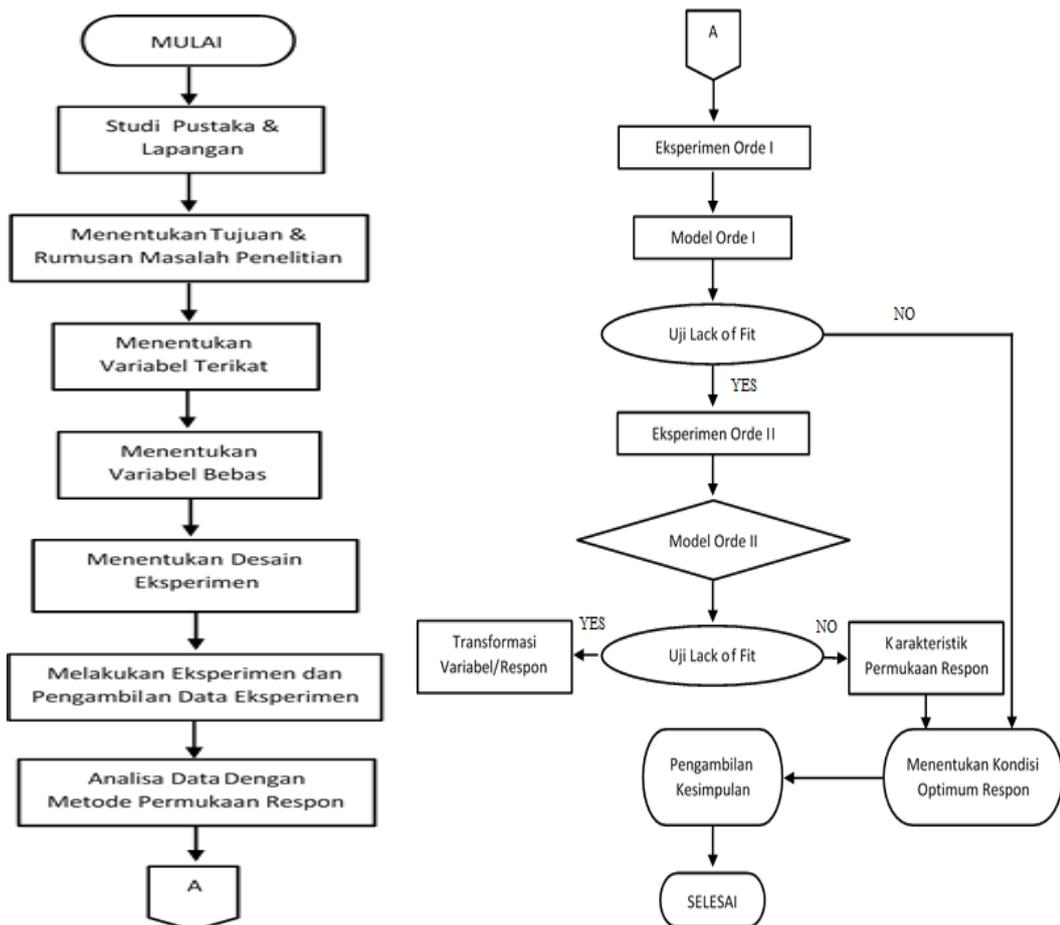


Gambar 3-11: Skema dan Desain Eksperimen

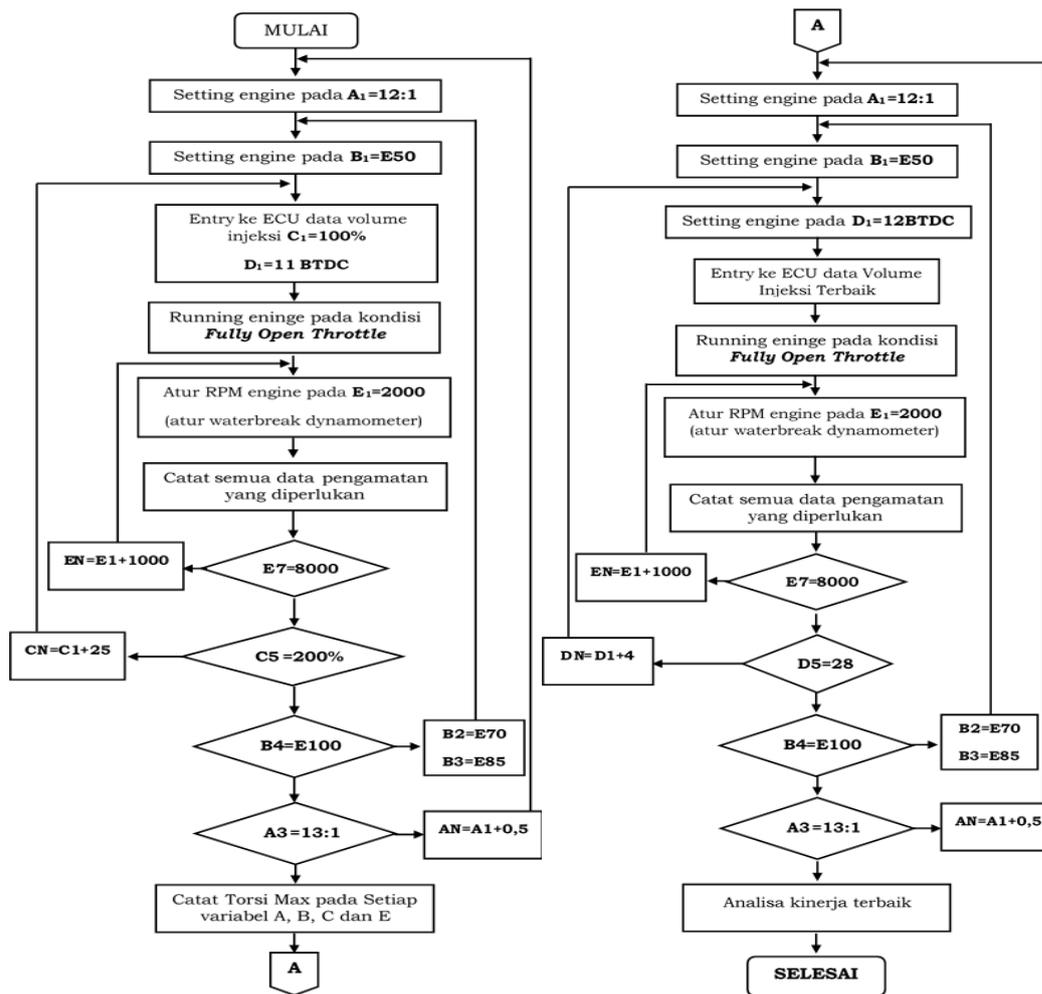
3.4 Prosedur dan Tahapan Pengujian

Penelitian ini adalah sebuah pengembangan strategi pembakaran campuran bahan bakar gasolin dan bioetanol pada konsentrasi tinggi (50% - 100%). Strategi yang dimaksud adalah melakukan mapping volume injeksi dan derajat pengapian bahan bakar pada setiap perbandingan kompresi, komposisi bahan bakar dan putaran mesin untuk menghasilkan performa mesin maksimal yang didasarkan pada metode MBT. Dengan demikian pengujian dilakukan pada semua kondisi variabel faktor yang ditentukan sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 3-12 di atas.

Sementara itu optimasi kinerja mesin didesain menggunakan *box behnken design* dari respon permukaan untuk mengoptimasi torsi mesin. Oleh sebab itu metode dan prosedur pengujian pada penelitian ini dijelaskan secara terpisah sebagaimana digambarkan pada diagram alir Gambar 3-12 dan 3-13 di bawah ini:



Gambar 3-12: Diagram alir prosedur desain penelitian dan optimasi



Gambar 3-13: Diagram alir prosedur pengujian dan pengambilan data

3.4.1 Prosedur Menentukan Rancangan Penelitian

Optimasi respon menggunakan metode permukaan respon dengan perangkat lunak *minitab 17*. Adapun prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.4.1.1 Menetapkan Variabel Penelitian

Variabel pada penelitian ini diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu variabel bebas (independent variabel) dan variabel terikat (dependent variabel). Variabel bebas atau variabel faktor berupa parameter desain, operasional dan pembakaran mesin yang dapat diatur dan dikontrol secara langsung pada mesin, yang meliputi; perbandingan kompresi (X_1), derajat pengapian bahan bakar (X_2) dan putaran mesin (X_3). Sedangkan variabel terikat atau variabel respon adalah variabel

yang dihasilkan dari perubahan variabel faktor baik melalui pengamatan langsung maupun analisa data, dan terdiri dari; torsi, brake thermal efficiency (BTE), brake specific fuel consumption (BSFC), emisi CO dan emisi HC.

3.4.1.2 Menentukan Rancangan Percobaan dan Level Variabel Faktor

Dengan mempertimbangkan kondisi variabel faktor dalam penelitian ini, maka rancangan percobaan menggunakan *Box Behnken Design* dari *Metode Respon Permukaan*. Adapun proses optimasi variabel respon dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Non Linear Generalized Optimazer (LINGO) 17* dan *Metode Respon Permukaan*.

Variabel-variabel alami faktor kemudian diubah dalam bentuk variabel kode sesuai dengan rancangan percobaan yang ditetapkan. Level-level variabel faktor tersebut terangkum dalam Tabel 3.2 di bawah ini:

Tabel 3.2 Level, variabel kode dan variabel alami dari variabel faktor penelitian

Variabel Faktor	Satuan	Level Variabel Kode/Alami		
		Rendah	Tengah	Tinggi
Perbandingan Kompresi, X_1	-	-1	0	1
		12:1	12,5:1	13:1
Derajat Pengapian, X_3	BTDC	-1	0	1
		16	20	24
Putaran Mesin, X_4	RPM	-1	0	1
		2000	5000	8000

Selanjutnya desain eksperimen metode *Box Behnken* dibuat dan diaplikasikan pada pengujian berdasarkan kombinasi variabel proses, sebagaimana diperlihatkan contoh pada Tabel 3.3 di bawah ini:

Tabel 3.3 Rancangan Percobaan *Box Behnken*

Std Ord	Run Ord	Nilai Koding			Nilai Sebenarnya		
		X_1	X_3	X_4	CR	IT	RPM
1	1	-1	-1	0	12	16	5000
2	2	1	-1	0	13	16	5000
3	3	-1	1	0	12	24	5000
4	4	1	1	0	13	24	5000
5	5	-1	0	-1	12	20	2000
6	6	1	0	-1	13	20	2000
7	7	-1	0	1	12	20	8000
8	8	1	0	1	13	20	8000
9	9	0	-1	-1	12.5	16	2000
10	10	0	1	-1	12.5	24	2000
11	11	0	-1	1	12.5	16	8000
12	12	0	1	1	12.5	24	8000
13	13	0	0	0	12.5	20	5000
14	14	0	0	0	12.5	20	5000
15	15	0	0	0	12.5	20	5000

3.4.1.3 Transformasi Variabel Faktor

Transformasi nilai variabel faktor dari variabel kode menjadi variabel alami ataupun sebaliknya diperlukan untuk mengetahui nilai variabel faktor sebenarnya. Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{CR - M_L}{H_L - M_L = M_L - L_L} \dots (3 - 1)$$

$$X_2 = \frac{IT - M_L}{H_L - M_L = M_L - L_L} \dots (3 - 2)$$

$$X_3 = \frac{RPM - M_L}{H_L - M_L = M_L - L_L} \dots (3 - 3)$$

dengan:

CR = perbandingan kompresi

IT = derajat pengapian bahan bakar

RPM = putaran mesin

H_L = level tertinggi variabel faktor

M_L = level tengah variabel faktor

L_L = level terendah variabel faktor

3.4.2 Prosedur Optimasi Respon

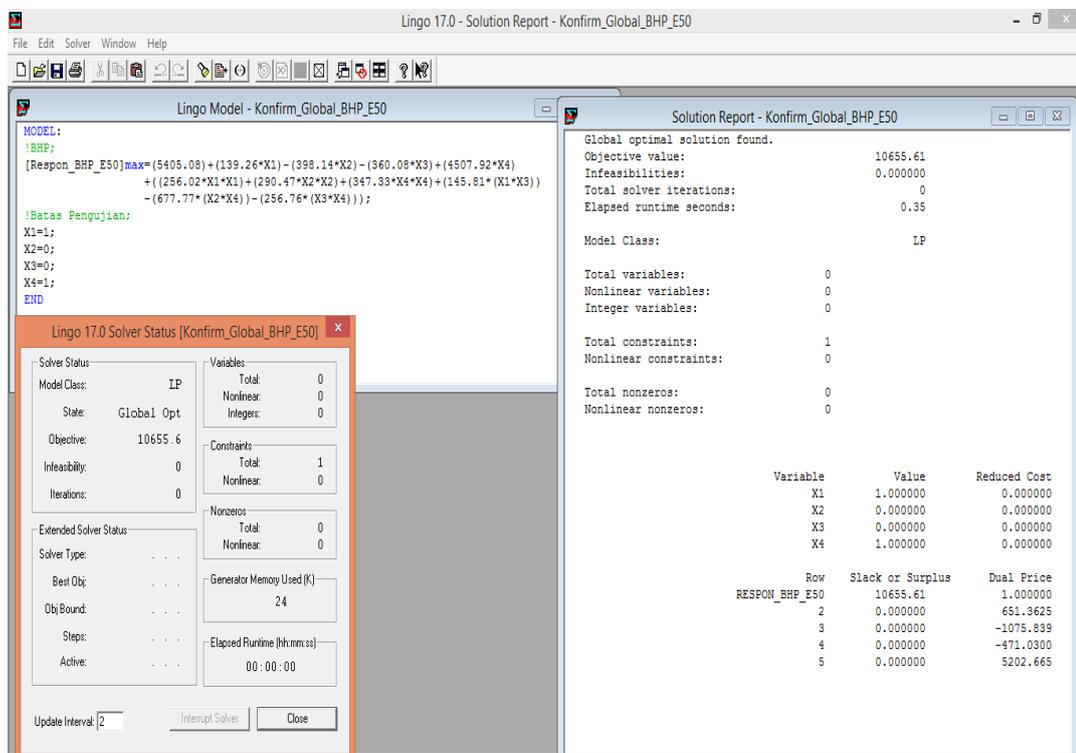
Langkah dan tahapan operasi minitab adalah sebagai berikut:

1. Menentukan Desain Eksperimen/Rancangan Percobaan
 - ✓ Klik *stat – DOE* (design of experiment) – *Response Surface– Create Response Surface Design*
 - ✓ Pada menu *Create Response Surface Design*, beri *tick* pada *Box Behnken* – masukkan jumlah faktor - klik *design* – klik *OK (default)*
 - ✓ Pada menu *Factors* – masukkan nama-nama faktor - *OK*
 - ✓ Pada menu *Option*– *untick Rndomize runs* - *OK*
 - ✓ Pada menu *Results* – *tick summary table* – *OK - OK*
2. Analisis Hasil Rancangan Percobaan
 - ✓ Masukkan nilai-nilai respon hasil pengamatan (perhitungan) baris kolom sesuai dengan kombinasi faktor pada pengujian

- ✓ Klik *stat – DOE - Response Surface – Analyze Response Surface Design*
- ✓ Pada kolom *Response* masukkan nama response yang ingin dianalisis – *tick coded units*
- ✓ Pada menu *Response* masukkan nama response yang ingin dianalisis – *tick coded units*
- ✓ Klik *Prediction – input variabel faktor – OK*
- ✓ Klik *Graph – input masukkan jenis grafik yang ingin ditampilkan – OK*
- ✓ Klik *Results – tick unusual observation in addition to the above – OK*
- ✓ Klik *Storage – tick jenis Fit and Residual yang ingin disimpan – OK - OK*

3. Optimasi Persamaan Regresi Dengan Non Linear Programming

- ✓ Buka perangkat lunak *LINGO*
- ✓ Masukkan *persamaan linear* yang diperoleh dari RSM
- ✓ Klik *SOLVE* (Contoh hasil diperlihatkan pada Gambar 3-14)



Gambar 3-14: Contoh input sintak dan solusi persamaan optimasi dengan *LINGO*

3.5 Jadwal Penelitian

Jadwal dan rencana penelitian dijelaskan pada Tabel 3.4 di bawah ini:

Tabel 3.4 Jadwal dan rencana penelitian

NO	RENCANA KEGIATAN	TAHUN / BULAN															
		2016						2017				2018					
		< 06	07	08	09	10	11	12	01-03	04-06	07-09	10-12	01-02	03 - 04	05 - 06	07 - 08	09
1	Studi pustaka, metodologi & Tujuan penelitian	■															
2	Penulisan disertasi	■	■	■	■												
3	Seminar Kemajuan Disertasi I & II	■															
4	Seminar Kemajuan Disertasi III & IV						■	■									
5	Perbaikan Disertasi						■	■									
6	Ujian Kualifikasi (Proposal)						■										
7	Perbaikan & assembling alat/ bahan pengujian						■	■									
8	Pengujian dan Pengambilan Data						■	■	■	■			■	■	■		
9	Analisa Data dan penyelesaian disertasi						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
10	Submit Paper I – III ke Jurnal Internasional Scopus			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
11	Seminar Kemajuan Disertasi V-VI									■		■					
12	Submit Paper ke IV-V											■	■				
13	Ujian Tutup												■	■			
14	Ujian Terbuka (Promosi Doktor)														■	■	
15	Wisuda																■

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Pengamatan Respon Hasil Eksperimen

Untuk mengetahui pengaruh beberapa variabel faktor, yaitu; perbandingan kompresi (CR), derajat pengapian (IT) dan putaran mesin (RPM) terhadap variabel respon yang dikehendaki, yaitu; Torsi (T), konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), efisiensi thermal (BTE), emisi karbon monoksida (CO), dan emisi hidrokarbon (HC), maka dilakukan pengujian sesuai dengan variasi hasil koding yang telah dibuat pada desain eksperimen dengan menggunakan perangkat lunak *minitab 17*. Hasil beberapa variabel respon yang diperoleh baik pada hasil pengukuran langsung maupun melalui perhitungan dicatatkan dan dimasukkan sebagai variabel respon untuk masing-masing kombinasi koding yang sesuai. Adapun data pengukuran/perhitungan respon berdasarkan rancangan percobaan *Box – Behnken* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pengamatan dan Perhitungan Percobaan Untuk Respon E100

Run Order	CR	IT	RPM	Torsi	BSFC	BTE	CO	HC
				(Nm)	(kg/HP.min)	(%)	(%)	(ppm)
1	-1	-1	0	12,356	0,004757	0,349617	1,401	69
2	1	-1	0	13,337	0,00412	0,403668	0,805	63
3	-1	1	0	10,885	0,005501	0,302363	1,765	71
4	1	1	0	11,866	0,004746	0,350457	1,169	65
5	-1	0	-1	6,472	0,012935	0,128585	1,422	75
6	1	0	-1	6,963	0,011302	0,147163	0,366	65
7	-1	0	1	14,961	0,005578	0,29821	3,651	85
8	1	0	1	16,442	0,004447	0,373983	2,612	81
9	0	-1	-1	6,570	0,013555	0,122707	0,973	72
10	0	1	-1	6,472	0,015446	0,107681	1,015	81
11	0	-1	1	12,984	0,007743	0,214797	3,562	87
12	0	1	1	12,425	0,008304	0,200309	4,362	88
13	0	0	0	12,376	0,004011	0,365820	0,880	69
14	0	0	0	14,876	0,004311	0,385820	1,063	70
15	0	0	0	13,676	0,004811	0,405820	1,246	71

4.2 Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi Respon E100

Pendugaan model hubungan antara variabel proses dan respon dilakukan dengan beberapa tahapan proses yang akan dijelaskan pada bagian ini. Melalui proses tersebut akan diketahui seberapa besar pengaruh beberapa variabel proses sebagai paramater pembakaran pada mesin SI-PFI satu silinder, yaitu perbandingan kompresi, derajat pengapian dan putaran mesin terhadap variabel-variabel respon berupa; Torsi, efisiensi thermal, konsumsi bahan bakar spesifik, emisi CO dan emisi HC. Sebagai contoh analisa, akan dilakukan pada bahan bakar bioetanol 100% (E100).

4.2.1 Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi Torsi E100

Hasil pendugaan model Torsi dilakukan pertama-tama dengan analisis regresi dan analisis variansi menggunakan perangkat lunak minitab, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan 4.3 di bawah ini:

Tabel 4.2 Nilai pendugaan koefisien regresi untuk Torsi E100

Response Surface Regression: Torsi versus CR; IT; RPM						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		13,643	0,717	19,04	0,000	
CR	0,983	0,492	0,439	1,12	0,313	1,00
IT	-0,900	-0,450	0,439	-1,03	0,352	1,00
RPM	7,584	3,792	0,439	8,64	0,000	1,00
CR*CR	0,065	0,033	0,646	0,05	0,962	1,01
IT*IT	-3,128	-1,564	0,646	-2,42	0,060	1,01
RPM*RPM	-4,931	-2,466	0,646	-3,82	0,012	1,01
CR*IT	-0,000	-0,000	0,621	-0,00	1,000	1,00
CR*RPM	0,495	0,247	0,621	0,40	0,706	1,00
IT*RPM	-0,231	-0,115	0,621	-0,19	0,860	1,00

Regression Equation in Uncoded Units						
Torsi =	13,643	+ 0,492 CR	- 0,450 IT	+ 3,792 RPM	+ 0,033 CR*CR	
		- 1,564 IT*IT	- 2,466 RPM*RPM	- 0,000 CR*IT	+ 0,247 CR*RPM	
		- 0,115 IT*RPM				

Tabel 4.3 Analisis variansi Torsi E100

Response Surface Regression: Torsi versus CR; IT; RPM						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	148,727	16,525	10,73	0,009	
Linear	3	118,580	39,527	25,66	0,002	
CR	1	1,935	1,935	1,26	0,313	
IT	1	1,619	1,619	1,05	0,352	

RPM	1	115,027	115,027	74,69	0,000
Square	3	29,849	9,950	6,46	0,036
CR*CR	1	0,004	0,004	0,00	0,962
IT*IT	1	9,034	9,034	5,87	0,060
RPM*RPM	1	22,448	22,448	14,58	0,012
2-Way Interaction	3	0,298	0,099	0,06	0,976
CR*IT	1	0,000	0,000	0,00	1,000
CR*RPM	1	0,245	0,245	0,16	0,706
IT*RPM	1	0,053	0,053	0,03	0,860
Error	5	7,701	1,540		
Lack-of-Fit	3	4,574	1,525	0,98	0,542
Pure Error	2	3,127	1,563		
Total	14	156,428			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	1,24103	95,08%	86,22%	48,72%	

4.2.1.1 Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model, dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji Koefisien Determinasi (R-Sq)

Nilai koefisien determinansi (R-Sq) pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa sebanyak 95.08% variasi dari nilai respon dapat dijelaskan oleh prediktor, sedangkan sisanya 4.92 dianggap sebagai galat atau variabel dependen dipengaruhi oleh variabel lain. Nilai R-sq (*adjusted*) bermakna besarnya tingkat keyakinan terhadap penambahan variabel faktor yang tepat untuk menambah daya prediksi model. Nilai R-sq (*adjusted*) tidak akan melebihi nilai R-sq, bahkan akan semakin turun jika dilakukan penambahan variabel faktor yang tidak diperlukan. Dengan demikian dari nilai koefisien determinansi sebesar 95.08% dapat disimpulkan bahwa secara statistik model pendugaan respon Torsi E100 adalah cocok.

b. Uji Lack of Fit

Uji kesesuaian pendugaan model Torsi selanjutnya adalah uji *lack of fit* pada analisis variansi dengan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : model regresi cocok (tidak ada lack of fit)

H_1 : model regresi tidak cocok (ada lack of fit)

dengan tingkat keyakinan 95% dan level signifikansi (α) sebesar 5% atau 0.05, serta kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 jika $p_{value} < 0,05$

Maka dari hasil analisa variansi disimpulkan bahwa hipotesa H_0 gagal tolak karena $p_{value} = 0,542 > \alpha$ sehingga model pendugaan Torsi E100 cocok.

4.2.1.2 Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui variabel faktor dan kombinasi variabel faktor yang berpengaruh terhadap nilai respon Torsi dengan tahapan sebagai berikut:

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesa yang digunakan untuk uji koefisien regresi secara individu terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut:

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ untuk setiap } i = 1,2,3, \dots, k$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ untuk setiap } i = 1,2,3, \dots, k$$

dengan β_i adalah parameter koefisien regresi yang besarnya tidak diketahui. Jika $\beta_i = 0$ dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara variabel x dan y dalam Persamaan 2-10. Untuk menguji hipotesis koefisien regresi di atas digunakan uji-F atau dengan melihat nilai P_{value} masing-masing variabel dari ANOVA, dengan kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 : Jika $F_{hitung} > F_{Tabel}$; dan atau

Tolak H_0 : Jika $P_{value} < \alpha = 0,05$

Hasil $F_{Tabel} = F_{(0,05;1;14)} = 4,60$ dan dari ANOVA Tabel 4.3 yang memenuhi kriteria tolak H_0 adalah putaran mesin (RPM) baik secara linear maupun kuadratik.

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut;

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ (minimal ada satu } \beta_i \text{ yang tidak sama dengan nol)}$$

kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 : jika $p_{value\text{model}} < \alpha = 0,05$; dan atau

tolak H_0 : jika $F_{hitung} > F_{tabel}$

Hasil analisa *variance* pada Tabel 4.3 diketahui; $P_{value-Model} = 0,009$ dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, serta nilai $F_{hitung} = 10.73$. Sementara itu, diperoleh nilai $F_{tabel} = F_{(0,05;9;14)} = 2.65$, dimana $F_{hitung} > F_{tabel}$. Berdasarkan kedua nilai tersebut maka diambil keputusan untuk menolak H_0 . Hal ini berarti bahwa minimal

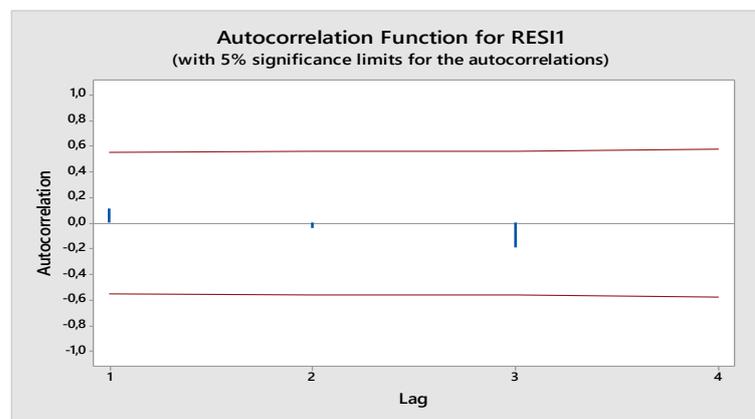
ada satu variabel dalam model persamaan regresi yang berkontribusi secara signifikan terhadap kesesuaian model.

4.2.1.3 Pengujian Asumsi Residual

Model dikatakan sesuai jika residual memiliki sedikitnya 3 (tiga) kriteria, yaitu masing-masing; (1) mengikuti asumsi $\varepsilon \approx IID Normal (0, \sigma^2)$ yang artinya bahwa residual bersifat bebas (independen) satu sama lain, (2) memiliki rata-rata nol dan variansi yang konstan (σ^2) atau identik, dan (3) terdistribusi normal, dengan pengujian masing-masing sebagai berikut:

a. Uji Independensi

Residual dikatakan independen jika nilai *Auto Correlation Function*nya (ACF) masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$. Dalam penelitian ini jumlah pengamatan eksperimen didesain sebanyak (n) = 15, maka asumsi residual independen jika nilai ACF-nya dalam interval $\pm 0,5164$. Sementara itu hasil uji independensi residual pada *software* Minitab menghasilkan ACF untuk model persamaan regresi Torsi E100 berada dalam interval +0,1183 dan -0,1903 sehingga asumsi residual independen terpenuhi, sebagaimana pada Gambar 4-1 di bawah ini.

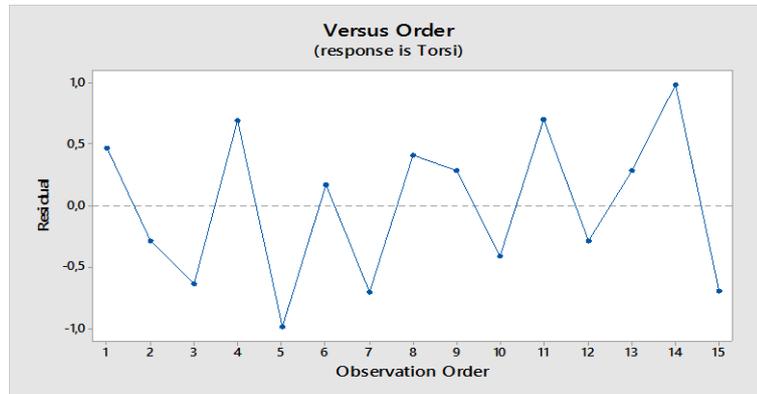


Gambar 4-1 Grafik AFC untuk model respon Torsi

b. Uji Keidentikan

Uji keidentikan residual dapat dilakukan dengan membuat plot antara *residual* dengan urutan pengamatan respon Torsi, *Y* estimasi (*observation order*). Asumsi residual dikatakan identik apabila grafik yang terbentuk menyebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Pada Gambar 4-2 menunjukkan bahwa

residual menyebar secara acak di sekitar garis yang berharga nol dan tidak membentuk suatu pola tertentu yang sama dan berulang secara regular. Hal ini mengindikasikan bahwa penyebaran residu merata dan tidak sama sehingga **asumsi residual identik** untuk model respon Torsi E100 terpenuhi.



Gambar 4-2 Uji keidentikan residual respon Torsi

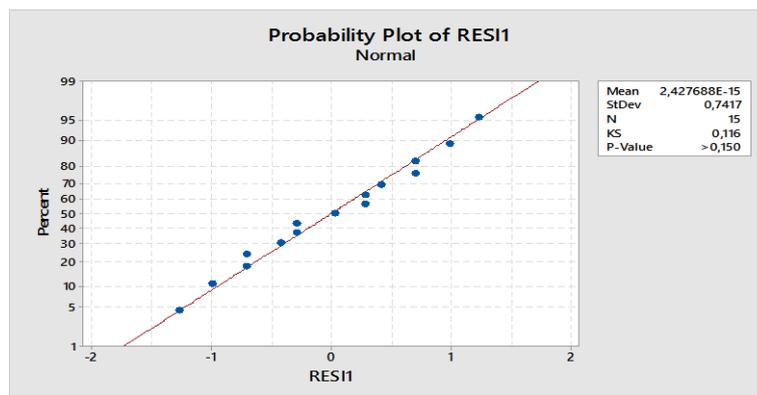
c. Uji Kenormalan

Uji kenormalan dilakukan dengan uji *Kolmogorov-Smirnov* dengan derajat signifikan (α) = 0,05 dan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : residual model regresi terdistribusi Normal

H_1 : residual model regresi tidak terdistribusi Normal

dengan kriteria penolakan: tolak H_0 jika $p_{value} < 0.05$



Gambar 4-3 Grafik distribusi normal residual dari respon Torsi

Gambar 4-3 memperlihatkan hasil uji normalitas dari residual respon Torsi E100 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov test*. Pengujian tersebut menghasilkan nilai $p_{value} > 0.15 > \alpha$, sehingga dari kriteria yang ditetapkan pada pengujian ini

menerima hipotesa H_0 . Dengan demikian asumsi bahwa residual model regresi Torsi E100 terdistribusi normal terpenuhi, dengan rata-rata = 0 dan $KS_{hitung} = 0,1160 < KS_{tabel} = 0,3512$.

Dari rangkaian proses di atas, maka dapat dibuat persamaan empiris yang menyatakan kombinasi variabel faktor yang signifikan berpengaruh terhadap nilai optimasi respon Torsi-E100, yaitu sebagai berikut:

$$\text{Torsi} = (13.643) + (3,792 * \text{RPM}) - (2,466 * \text{RPM} * \text{RPM}) \quad \dots (4 - 1)$$

4.2.2 Analisis Pendugaan Model BSFC Bahan Bakar E100

Pendugaan model BSFC diperoleh melalui analisis regresi dan analisis variansi dengan hasil diperlihatkan pada Tabel 4.4 dan 4.5 berikut ini:

Tabel 4.4 Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BSFC

Response Surface Regression: BSFC versus CR; IT; RPM						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,004378	0,000246	17,81	0,000	
CR	-0,001039	-0,000519	0,000151	-3,45	0,018	1,00
IT	0,000955	0,000478	0,000151	3,17	0,025	1,00
RPM	-0,006791	-0,003396	0,000151	-22,56	0,000	1,00
CR*CR	-0,002293	-0,001147	0,000222	-5,18	0,004	1,01
IT*IT	0,003100	0,001550	0,000222	7,00	0,001	1,01
RPM*RPM	0,010669	0,005334	0,000222	24,08	0,000	1,01
CR*IT	-0,000059	-0,000029	0,000213	-0,14	0,895	1,00
CR*RPM	0,000251	0,000126	0,000213	0,59	0,581	1,00
IT*RPM	-0,000665	-0,000332	0,000213	-1,56	0,179	1,00
Regression Equation in Uncoded Units						
BSFC = 0,004378 - 0,000519 CR + 0,000478 IT - 0,003396 RPM						
- 0,0001147 CR*CR + 0,001550 IT*IT + 0,005334 RPM*RPM						
- 0,000029 CR*IT + 0,000126 CR*RPM - 0,000332 IT*RPM						

Tabel 4.5 Analisis Variansi untuk BSFC

Response Surface Regression: BSFC versus CR; IT; RPM					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,000217	0,000024	132,83	0,000
Linear	3	0,000096	0,000032	177,01	0,000
CR	1	0,000002	0,000002	11,91	0,018
IT	1	0,000002	0,000002	10,08	0,025
RPM	1	0,000092	0,000092	509,03	0,000
Square	3	0,000120	0,000040	220,56	0,000
CR*CR	1	0,000005	0,000005	26,78	0,004
IT*IT	1	0,000009	0,000009	48,94	0,001
RPM*RPM	1	0,000105	0,000105	579,77	0,000

2-Way Interaction	3	0,000001	0,000000	0,94	0,489
CR*IT	1	0,000000	0,000000	0,02	0,895
CR*RPM	1	0,000000	0,000000	0,35	0,581
IT*RPM	1	0,000000	0,000000	2,44	0,179
Error	5	0,000001	0,000000		
Lack-of-Fit	3	0,000001	0,000000	1,18	0,489
Pure Error	2	0,000000	0,000000		
Total	14	0,000218			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0,0004257	99,58%	98,83%	95,40%	

4.2.2.1 Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model, dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji Koefisien Determinasi (R-Sq)

Nilai R-Sq sebesar 99,58% yang mendiskripsikan bahwa sebanyak 99.58% variasi dari nilai respon dapat dijelaskan oleh prediktor atau variabel faktor berpengaruh terhadap respon sebesar 99.58% sehingga model signifikan sesuai.

b. Uji Lack of Fit

Uji *lack of fit* pada analisis variansi pendugaan model BSFC menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : model regresi cocok (tidak ada *lack of fit*)

H_1 : model regresi tidak cocok (ada *lack of fit*)

Dengan tingkat keyakinan 95% dan level signifikansi (α) sebesar 5% atau 0.05, dengan kriteria penolakan adalah:

tolak H_0 jika $p_{value} < 0,05$

Hasil pengujian pada Tabel 4.5 diperoleh $p_{value} \text{ lack of fit} = 0,489$ sehingga hipotesa H_0 gagal ditolak atau model sesuai.

4.2.2.2 Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian ini dilakukan mengetahui variabel faktor dan kombinasinya yang berpengaruh terhadap nilai respon BSFC dengan tahapan sebagai berikut:

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesa yang digunakan untuk uji koefisien regresi secara individu terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut:

H_0 : $\beta_i = 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

H_1 : $\beta_i \neq 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

dengan β_i adalah parameter koefisien regresi yang besarnya tidak diketahui. Jika $\beta_i = 0$ dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara variabel x dan y dalam Persamaan 2-10. Untuk menguji kedua hipotesis di atas digunakan uji-F atau dengan melihat nilai P_{value} masing-masing variabel faktor dari ANOVA, dengan kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 : Jika $F_{Hitung} > F_{Tabel}$; dan atau

Tolak H_0 : Jika $P_{Value} < \alpha = 0,05$

Hasil $F_{Tabel} = F_{(0,05;1;14)} = 4,60$ dan dari ANOVA Tabel 4.5 yang memenuhi kriteria tolak H_0 adalah semua variabel x dalam bentuk linear maupun kuadrat, tetapi tidak berkontribusi secara signifikan terhadap model jika masing-masing variabel x saling berinteraksi.

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut;

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ (minimal ada satu } \beta_i \text{ yang tidak sama dengan nol)}$$

kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 : jika $p_{value\text{ model}} < \alpha = 0,05$; dan atau

tolak H_0 : jika $F_{hitung} > F_{tabel}$

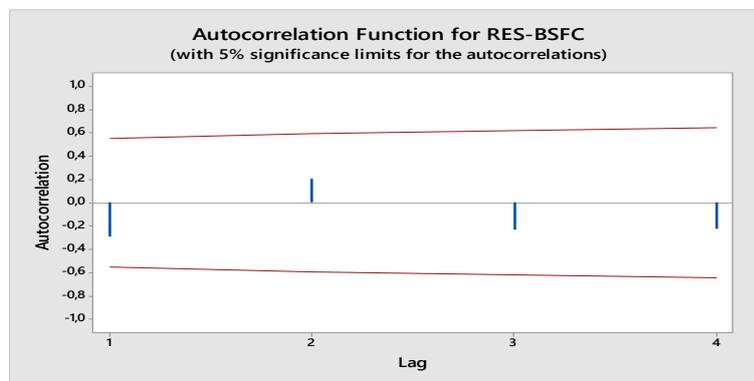
Hasil analisa *variance* pada Tabel 4.5 diketahui; $P_{value-Model} = 0,000$ dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, serta nilai $F_{hitung} = 132,83$. Sementara itu, diperoleh nilai $F_{tabel} = F_{(0,05;9;14)} = 2.65$, dimana $F_{hitung} > F_{tabel}$. Berdasarkan kedua nilai tersebut maka diambil keputusan untuk menolak H_0 . Hal ini berarti bahwa minimal ada satu variabel dalam model persamaan regresi yang berkontribusi secara signifikan terhadap kesesuaian model.

4.2.2.3 Pengujian Asumsi Residual

Tahapan ini juga digunakan untuk uji konfirmasi kesesuaian model. Model dikatakan sesuai jika residual mengikuti asumsi $\varepsilon \approx IID \text{ Normal } (0, \sigma^2)$ yang artinya bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), memiliki rata-rata nol dan variansi yang konstan (σ^2) atau identik serta terdistribusi normal.

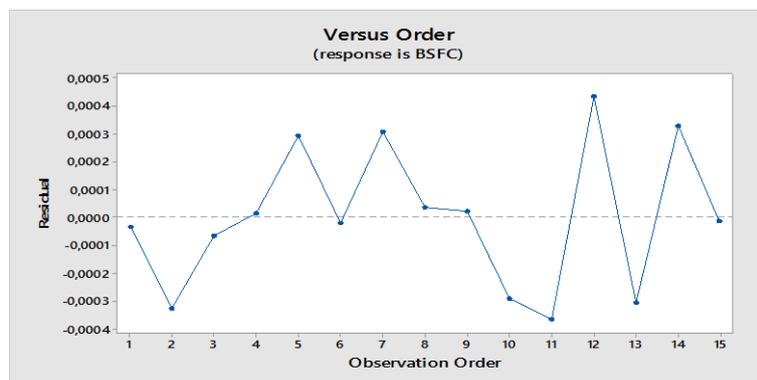
a. Uji Independensi

Residual dikatakan independen jika nilai *Auto Correlation Function*nya (ACF) masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$. Dalam penelitian ini jumlah pengamatan pengujian didesain sebanyak (n) = 15, maka asumsi residual independen jika nilai ACF-nya dalam interval $\pm 0,5164$. Sementara itu hasil uji independensi residual pada *software* Minitab menghasilkan ACF untuk model persamaan regresi BSFC E100 berada dalam interval +0,207 dan -0,288 sehingga asumsi residual independen terpenuhi, sebagaimana pada Gambar 4-4 di bawah ini



Gambar 4-4: Grafik ACF residual untuk model respon BSFC-E100

b. Uji Keidentikan



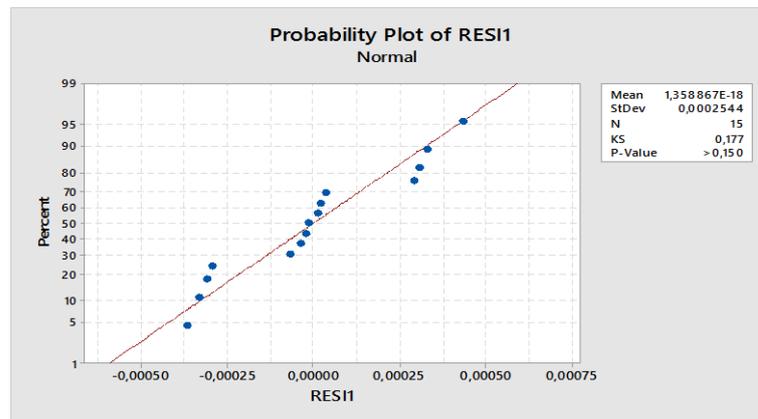
Gambar 4-5 Uji keidentikan residual respon BSFC-E100

Uji keidentikan residual dapat dilakukan dengan membuat plot antara *residual* dengan urutan pengamatan respon BSFC, *Y* estimasi (*observation order*). Asumsi residual dikatakan identik apabila grafik yang terbentuk menyebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Pada Gambar 4-5 menunjukkan bahwa

residual menyebar secara acak di sekitar garis yang berharga nol dan tidak membentuk suatu pola tertentu yang sama dan berulang secara regular. Hal ini mengindikasikan bahwa penyebaran residu merata dan tidak sama sehingga **asumsi residual identik** untuk model respon BSFC E100 terpenuhi.

c. Uji Kenormalan

Uji kenormalan dilakukan menggunakan metode uji *Kolmogorov-Smirnov*, dengan derajat signifikan (α) = 0,05 dan hipotesa sebagai berikut:



Gambar 4-6: Grafik distribusi normal residual dari respon BSFC

H_0 : residual model regresi terdistribusi Normal

H_1 : residual model regresi tidak terdistribusi Normal

dengan kriteria penolakan: tolak H_0 jika $p_{value} < 0.05$

Gambar 4-6 memperlihatkan hasil uji normalitas dari residual respon BSFC E100 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov test*. Pengujian tersebut menghasilkan nilai $p_{value} > 0.15 > \alpha$, sehingga dari kriteria yang ditetapkan pada pengujian ini menerima hipotesa H_0 . Dengan demikian asumsi bahwa residual model regresi BSFC E100 terdistribusi normal terpenuhi, dengan rata-rata = 0 dan $KS_{hitung} = 0,177 < KS_{tabel} = 0,3521$.

Dari rangkaian proses pengujian di atas, maka dapat dibuat persamaan empiris yang menyatakan kombinasi variabel faktor yang signifikan berpengaruh terhadap nilai optimasi respon BSFC-E100, yaitu sebagai berikut::

$$\begin{aligned}
 \text{BSFC} = & (0,004378) - (0,000519\text{CR}) + (0,000478 * \text{IT}) - (0,003396 * \text{RPM}) \\
 & - (0,001147 * \text{CR} * \text{CR}) + (0,001550 * \text{IT} * \text{IT}) \\
 & + 0,005334 * \text{RPM} * \text{RPM}) \quad \dots (4 - 2)
 \end{aligned}$$

4.2.3 Analisis Pendugaan Model BTE Bahan Bakar E100

Pendugaan model *BTE* diperoleh melalui analisis regresi dan analisis variansi sebagaimana terlihat pada Tabel 4.6 dan 4.7 berikut ini:

Tabel 4.6: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BTE-E100

Response Surface Regression: BTE versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,3858	0,0217	17,81	0,000	
CR	0,0491	0,0246	0,0133	1,85	0,123	1,00
IT	-0,0325	-0,0162	0,0133	-1,22	0,275	1,00
RPM	0,1453	0,0726	0,0133	5,48	0,003	1,00
CR*CR	0,0413	0,0207	0,0195	1,06	0,339	1,01
IT*IT	-0,1099	-0,0550	0,0195	-2,81	0,037	1,01
RPM*RPM	-0,3390	-0,1695	0,0195	-8,68	0,000	1,01
CR*IT	-0,0030	-0,0015	0,0188	-0,08	0,940	1,00
CR*RPM	0,0286	0,0143	0,0188	0,76	0,480	1,00
IT*RPM	0,0003	0,0001	0,0188	0,01	0,995	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{BTE} = & 0,3858 + 0,0246 \text{ CR} - 0,0162 \text{ IT} + 0,0726 \text{ RPM} + 0,0207 \text{ CR*CR} \\ & - 0,0550 \text{ IT*IT} - 0,1695 \text{ RPM*RPM} - 0,0015 \text{ CR*IT} + 0,0143 \text{ CR*RPM} \\ & + 0,0001 \text{ IT*RPM} \end{aligned}$$

Tabel 4.7: Analisis Variansi untuk BTE-E100

Response Surface Regression: BTE versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,167608	0,018623	13,23	0,005
Linear	3	0,049157	0,016386	11,64	0,011
CR	1	0,004826	0,004826	3,43	0,123
IT	1	0,002112	0,002112	1,50	0,275
RPM	1	0,042219	0,042219	29,98	0,003
Square	3	0,117624	0,039208	27,85	0,002
CR*CR	1	0,001576	0,001576	1,12	0,339
IT*IT	1	0,011150	0,011150	7,92	0,037
RPM*RPM	1	0,106073	0,106073	75,33	0,000
2-Way Interaction	3	0,000827	0,000276	0,20	0,895
CR*IT	1	0,000009	0,000009	0,01	0,940
CR*RPM	1	0,000818	0,000818	0,58	0,480
IT*RPM	1	0,000000	0,000000	0,00	0,995
Error	5	0,007040	0,001408		
Lack-of-Fit	3	0,006240	0,002080	5,20	0,166
Pure Error	2	0,000800	0,000400		
Total	14	0,174649			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0375244	95,97%	88,71%	41,80%

4.2.3.1 Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model, dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji Koefisien Determinasi (R-Sq)

Nilai R-Sq sebesar 95.97% menunjukkan tingkat determinansi variasi faktor terhadap model respon BTE. Nilai tersebut juga mengandung arti bahwa variabel faktor berpengaruh terhadap respon sebesar 95.97% sehingga model pendugaan BSFC signifikan atau sesuai.

b. Uji Lack of Fit

Uji *lack of fit* pada analisis variansi pendugaan model BTE menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : model regresi cocok (tidak ada *lack of fit*)

H_1 : model regresi tidak cocok (ada *lack of fit*)

dimana tingkat keyakinan 95% dan level signifikansi (α) sebesar 5% atau 0,05, sehingga kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 jika $p_{value} < 0,05$

Maka hipotesa H_0 diterima dan model sesuai dimana $p_{value} = 0,166$

4.2.3.2 Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui variabel faktor dan kombinasi variabel faktor yang berpengaruh terhadap nilai respon BTE yang terdiri dari:

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesa yang digunakan untuk uji koefisien regresi secara individu terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut:

$H_0 : \beta_i = 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

$H_1 : \beta_i \neq 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

dengan β_i adalah parameter koefisien regresi yang besarnya tidak diketahui. Jika $\beta_i = 0$ dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara variabel x dan y dalam Persamaan 2-10. Untuk menguji kedua hipotesis di atas digunakan uji-F atau dengan melihat nilai P_{value} masing-masing variabel dari ANOVA, dengan kriteria penolakan adalah:

Tolak $H_0 : \text{Jika } F_{Hitung} > F_{Tabel} ; \text{ dan atau}$

Tolak H_0 : Jika $P_{value} < \alpha = 0,05$

Hasil $F_{Tabel} = F_{(0,05;1;14)} = 4,60$ dan dari ANOVA Tabel 4.7 yang memenuhi kriteria tolak H_0 dan berkontribusi signifikan terhadap kesesuaian model regresi adalah variabel x_3 (RPM) dalam bentuk linear dan kuadratik serta variabel x_2 (IT) dalam bentuk kuadratik.

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut;

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ (minimal ada satu } \beta_i \text{ yang tidak sama dengan nol)}$$

kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 : jika $p_{value} \text{ model} < \alpha = 0,05$; dan atau

tolak H_0 : jika $F_{hitung} > F_{tabel}$

Hasil analisa *variance* pada Tabel 4.7 diketahui; $P_{value-Model} = 0,005$ dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, serta nilai $F_{hitung} = 13,23$. Sementara itu, diperoleh nilai $F_{tabel} = F_{(0,05;9;14)} = 2.65$, dimana $F_{hitung} > F_{tabel}$. Berdasarkan kedua nilai tersebut maka diambil keputusan untuk menolak H_0 . Hal ini berarti bahwa minimal ada satu variabel dalam model persamaan regresi yang berkontribusi secara signifikan terhadap kesesuaian model.

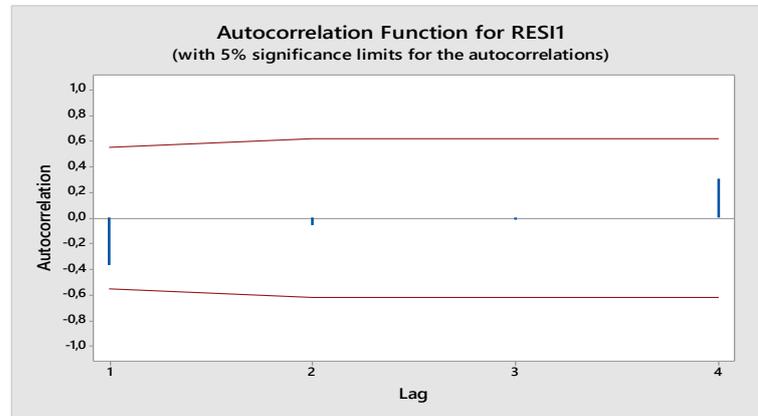
4.2.3.3 Pengujian Asumsi Residual

Tahapan ini juga digunakan untuk uji konfirmasi kesesuaian model. Model dikatakan sesuai jika residual mengikuti asumsi $\varepsilon \approx IID \text{ Normal } (0, \sigma^2)$ yang artinya bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), memiliki rata-rata nol dan variansi yang konstan (σ^2) atau identik serta terdistribusi normal. Dengan demikian dibutuhkan pengujian pada asumsi-asumsi tersebut, yaitu:

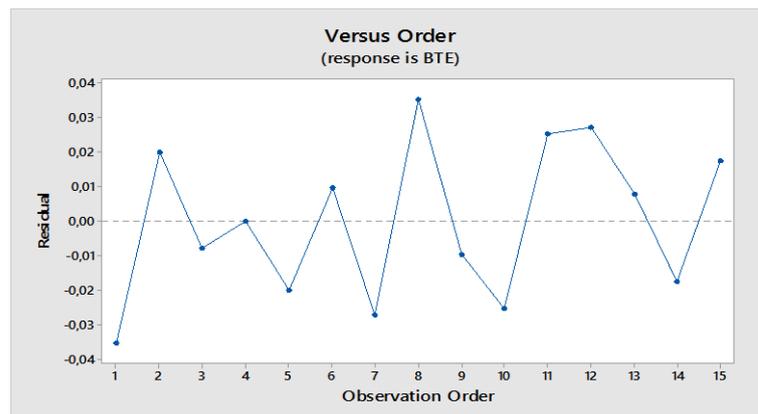
a. Uji Independensi

Residual dikatakan independen jika nilai *Auto Correlation Function*nya (ACF) masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$. Dalam penelitian ini jumlah pengamatan pengujian didesain sebanyak (n) = 15, maka asumsi residual independen jika nilai ACF-nya dalam interval $\pm 0,5164$. Sementara itu hasil uji independensi residual

pada *software* Minitab menghasilkan ACF untuk model persamaan regresi BTE E100 berada dalam interval $+0,3062$ dan $-0,3665$ sehingga asumsi residual independen terpenuhi, sebagaimana pada Gambar 4-7 di bawah ini



Gambar 4-7: Grafik ACF residual untuk model respon BTE



Gambar 4-8: Uji keidentikan residual respon BTE

b. Uji Keidentikan

Uji keidentikan residual dapat dilakukan dengan membuat plot antara *residual* dengan urutan pengamatan respon BTE, *Y* estimasi (*observation order*). Asumsi residual dikatakan identik apabila grafik yang terbentuk menyebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Pada Gambar 4-8 menunjukkan bahwa residual menyebar secara acak di sekitar garis yang berharga nol dan tidak membentuk suatu pola tertentu yang sama dan berulang secara reguler. Hal ini mengindikasikan bahwa penyebaran residu merata dan tidak sama sehingga **asumsi residual identik** untuk model respon BTE E100 terpenuhi.

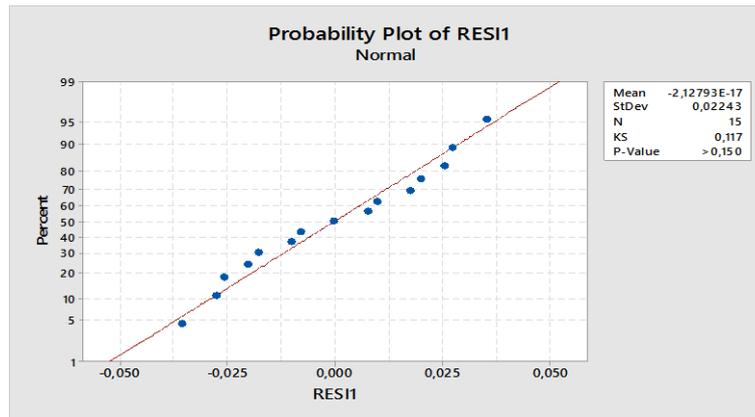
c. Uji Kenormalan

Uji kenormalan menggunakan metode uji *Kolmogorov-Smirnov*, dengan derajat signifikan (α) = 0,05 dan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : residual model regresi terdistribusi Normal

H_1 : residual model regresi tidak terdistribusi Normal

dengan kriteria penolakan: tolak H_0 jika $p_{value} < 0.05$



Gambar 4-9: Grafik distribusi normal residual dari respon BTE-E100

Gambar 4-9 memperlihatkan hasil uji normalitas dari residual respon BTE E100 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov test*. Pengujian tersebut menghasilkan nilai $p_{value} > 0.15 > \alpha$, sehingga dari kriteria yang ditetapkan pada pengujian ini menerima hipotesa H_0 . Dengan demikian asumsi bahwa residual model regresi BTE E100 terdistribusi normal terpenuhi, dengan rata-rata = 0 dan $KS_{hitung} = 0,117 < KS_{tabel} = 0,3512$.

Dengan rangkaian proses pengujian di atas, maka dapat dibuat persamaan empiris yang menyatakan kombinasi variabel faktor yang signifikan berpengaruh terhadap nilai optimasi respon BTE-E100, yaitu sebagai berikut::

$$BTE = (0,3858) + (0,0726 RPM) - (0,0550 IT * IT) - (0,1695 RPM * RPM) \quad \dots \dots (4 - 3)$$

4.2.4 Analisis Pendugaan Model Emisi CO Bahan Bakar E100

Pendugaan model *emisi CO* diperoleh melalui analisis regresi dan analisis variansi sebagaimana terlihat pada Tabel 4.8 dan 4.9 di bawah ini

Tabel 4.8: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk Emisi CO-E100

Response Surface Regression: CO versus CR; IT; RPM						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1,063	0,171	6,23	0,002	
CR	-0,822	-0,411	0,105	-3,93	0,011	1,00
IT	0,393	0,196	0,105	1,88	0,119	1,00
RPM	2,603	1,301	0,105	12,45	0,000	1,00
CR*CR	-0,243	-0,122	0,154	-0,79	0,465	1,01
IT*IT	0,687	0,344	0,154	2,23	0,076	1,01
RPM*RPM	2,143	1,071	0,154	6,96	0,001	1,01
CR*IT	-0,000	-0,000	0,148	-0,00	1,000	1,00
CR*RPM	0,009	0,004	0,148	0,03	0,978	1,00
IT*RPM	0,379	0,190	0,148	1,28	0,256	1,00

Regression Equation in Uncoded Units
 $CO = 1,063 - 0,411 CR + 0,196 IT + 1,301 RPM - 0,122 CR*CR + 0,344 IT*IT + 1,071 RPM*RPM - 0,000 CR*IT + 0,004 CR*RPM + 0,190 IT*RPM$

Tabel 4.9: Analisis Variansi untuk Emisi CO-E100

Response Surface Regression: CO versus CR; IT; RPM					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	20,0278	2,2253	25,44	0,001
Linear	3	15,2073	5,0691	57,95	0,000
CR	1	1,3505	1,3505	15,44	0,011
IT	1	0,3081	0,3081	3,52	0,119
RPM	1	13,5486	13,5486	154,90	0,000
Square	3	4,6768	1,5589	17,82	0,004
CR*CR	1	0,0546	0,0546	0,62	0,465
IT*IT	1	0,4360	0,4360	4,98	0,076
RPM*RPM	1	4,2382	4,2382	48,45	0,001
2-Way Interaction	3	0,1437	0,0479	0,55	0,671
CR*IT	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
CR*RPM	1	0,0001	0,0001	0,00	0,978
IT*RPM	1	0,1436	0,1436	1,64	0,256
Error	5	0,4373	0,0875		
Lack-of-Fit	3	0,3704	0,1235	3,69	0,221
Pure Error	2	0,0670	0,0335		
Total	14	20,4651			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,295751	97,86%	94,02%	70,31%

4.2.4.1 Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model, dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji Koefisien Determinasi (R-Sq)

Tabel 4.8 menunjukkan koefisien determinasi masing-masing; $R - Sq = 97.86\%$ dan $R - Sq (adj) = 70.31$. Hal ini menandakan bahwa hampir seluruh

variasi dari nilai respon CO dapat dijelaskan oleh prediktor atau variabel faktor atau tingkat determinansi variabel faktor berpengaruh terhadap respon sebesar 97.86% sehingga model dinyatakan cocok atau signifikan.

b. Uji Lack of Fit

Cara lain untuk mengetahui kesesuaian model adalah dengan melakukan uji *lack of fit* pada analisis variansi pendugaan model CO, dengan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : model regresi cocok (tidak ada lack of fit)

H_1 : model regresi tidak cocok (ada lack of fit)

dimana tingkat keyakinan 95% dan level signifikansi (α) sebesar 5% atau 0.05, sehingga kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 jika $p_{value} < 0,05$

Dengan kriteria tersebut pendugaan model respon CO signifikan cocok dengan hipotesa H_0 gagal ditolak dimana $P_{value} = 0,221$.

4.2.4.2 Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian dilakukan untuk mengetahui variabel faktor dan kombinasinya yang berpengaruh terhadap pendugaan model respon emisi CO yang terdiri dari:

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesa yang digunakan untuk uji koefisien regresi secara individu terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut:

$H_0 : \beta_i = 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

$H_1 : \beta_i \neq 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

dengan β_i adalah parameter koefisien regresi yang besarnya tidak diketahui. Jika $\beta_i = 0$ dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara variabel x dan y dalam Persamaan 2-10. Untuk menguji kedua hipotesis di atas digunakan uji-F atau dengan melihat nilai P_{value} masing-masing variabel dari ANOVA, dengan kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 : Jika $F_{Hitung} > F_{Tabel}$; dan atau

Tolak H_0 : Jika $P_{Value} < \alpha = 0,05$

Hasil $F_{Tabel} = F_{(0,05;1;14)} = 4,60$ dan dari ANOVA Tabel 4.9 yang memenuhi

kriteria tolak H_0 dan berkontribusi signifikan terhadap kesesuaian model regresi adalah variabel x_1 (CR) dalam bentuk linear dan variabel x_3 (RPM) dalam bentuk linear dan kuadratik.

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut;

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ (minimal ada satu } \beta_i \text{ yang tidak sama dengan nol)}$$

kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 : jika $p_{\text{value model}} < \alpha = 0,05$; dan atau

tolak H_0 : jika $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$

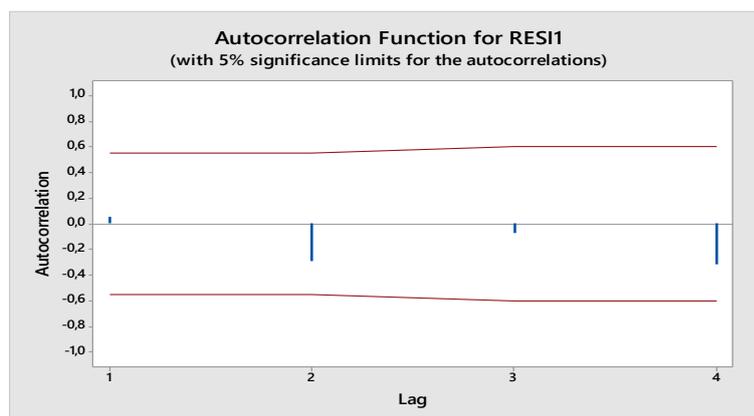
Hasil analisa *variance* pada Tabel 4.9 diketahui; $P_{\text{value-Model}} = 0,001$ dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, serta nilai $F_{\text{hitung}} = 25,44$. Sementara itu, diperoleh nilai $F_{\text{tabel}} = F_{(0,05;9;14)} = 2.65$, dimana $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$. Berdasarkan kedua nilai tersebut maka diambil keputusan untuk menolak H_0 . Hal ini berarti bahwa minimal ada satu variabel dalam model persamaan regresi yang berkontribusi secara signifikan terhadap kesesuaian model.

4.2.4.3 Pengujian Asumsi Residual

Model dikatakan sesuai jika residual mengikuti asumsi $\varepsilon \approx IID \text{ Normal } (0, \sigma^2)$ yang artinya bahwa residual bersifat bebas satu sama lain (independen), memiliki variansi konstan (σ^2) atau identik dan terdistribusi normal.

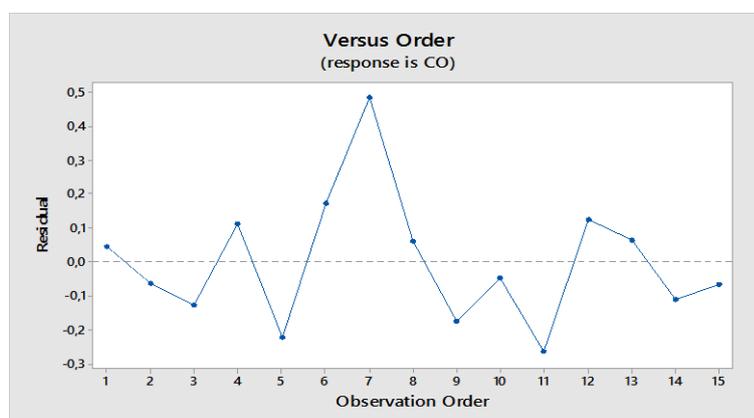
a. Uji Independensi

Residual dikatakan independen jika nilai *Auto Correlation Function*nya (ACF) masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$. Dalam penelitian ini jumlah pengamatan eksperimen didesain sebanyak (n) = 15, maka asumsi residual independen jika nilai ACF-nya dalam interval $\pm 0,5164$. Sementara itu hasil uji independensi residual pada *software* Minitab menghasilkan ACF untuk model persamaan regresi emisi CO E100 berada dalam interval +0,0989 dan -0,3445 sehingga asumsi residual independen terpenuhi, sebagaimana pada Gambar 4-10 di bawah ini



Gambar 4-10 Grafik ACF residual untuk model respon emisi CO

b. Uji Keidentikan



Gambar 4-11 Uji keidentikan residual respon emisi CO

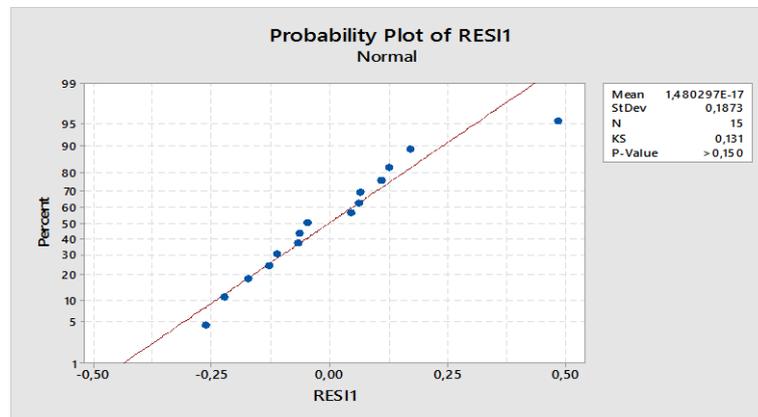
Uji keidentikan residual dapat dilakukan dengan membuat plot antara residu dengan urutan pengamatan respon emisi CO, Y estimasi (*observation order*). Asumsi residual dikatakan identik apabila grafik yang terbentuk menyebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Pada Gambar 4-11 menunjukkan bahwa residual menyebar secara acak di sekitar garis yang berharga nol dan tidak membentuk suatu pola tertentu yang sama dan berulang secara regular. Hal ini mengindikasikan bahwa penyebaran residu merata dan tidak sama sehingga **asumsi residual identik** untuk model respon emisi CO E100 terpenuhi.

c. Uji Kenormalan

Uji kenormalan dilakukan menggunakan metode uji *Kolmogorov-Smirnov*, dengan derajat signifikan (α) = 0,05 dan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : residual model regresi terdistribusi Normal

H_1 : residual model regresi tidak terdistribusi Normal



Gambar 4-12 Grafik distribusi normal residual dari respon emisi CO

dengan kriteria penolakan: tolak H_0 jika $p_{value} < 0.05$

Gambar 4-12 menunjukkan hasil uji normalitas dari residual respon emisi CO E100 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov test*. Pengujian tersebut menghasilkan nilai $p_{value} > 0.15 > \alpha$, sehingga dari kriteria yang ditetapkan pada pengujian ini menerima hipotesa H_0 . Dengan demikian asumsi bahwa residual model regresi CO E100 terdistribusi normal terpenuhi, dengan rata-rata = 0 dan $KS_{hitung} = 0,131 < KS_{tabel} = 0,3512$.

Dari rangkaian proses pengujian di atas, maka dapat dibuat persamaan empiris yang menyatakan kombinasi variabel faktor yang signifikan berpengaruh terhadap nilai optimasi respon emisi CO-E100, yaitu sebagai berikut::

$$CO - E100 = 1,063 - 0,411 CR + 1,301 RPM + 1,071 RPM * RPM \dots (4 - 4)$$

4.2.5 Analisis Pendugaan Model Emisi HC Bahan Bakar E100

Pendugaan model emisi HC diperoleh melalui analisis regresi dan analisis variansi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.10 dan 4.11 sebagai berikut:

Tabel 4.10: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk Emisi HC-E100

Response Surface Regression: HC versus CR; IT; RPM						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		70,000	0,775	90,37	0,000	
CR	-6,500	-3,250	0,474	-6,85	0,001	1,00
IT	3,500	1,750	0,474	3,69	0,014	1,00

RPM	12,000	6,000	0,474	12,65	0,000	1,00
CR*CR	-8,500	-4,250	0,698	-6,09	0,002	1,01
IT*IT	2,500	1,250	0,698	1,79	0,133	1,01
RPM*RPM	21,500	10,750	0,698	15,40	0,000	1,01
CR*IT	-0,000	-0,000	0,671	-0,00	1,000	1,00
CR*RPM	3,000	1,500	0,671	2,24	0,076	1,00
IT*RPM	-4,000	-2,000	0,671	-2,98	0,031	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{HC} = & 70,000 - 3,250 \text{ CR} + 1,750 \text{ IT} + 6,000 \text{ RPM} - 4,250 \text{ CR*CR} \\
 & + 1,250 \text{ IT*IT} + 10,750 \text{ RPM*RPM} - 0,000 \text{ CR*IT} + 1,500 \text{ CR*RPM} \\
 & - 2,000 \text{ IT*RPM}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.11: Analisis Variansi untuk Emisi HC-E100

Response Surface Regression: HC versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	946,733	105,193	58,44	0,000
Linear	3	397,000	132,333	73,52	0,000
CR	1	84,500	84,500	46,94	0,001
IT	1	24,500	24,500	13,61	0,014
RPM	1	288,000	288,000	160,00	0,000
Square	3	524,733	174,911	97,17	0,000
CR*CR	1	66,692	66,692	37,05	0,002
IT*IT	1	5,769	5,769	3,21	0,133
RPM*RPM	1	426,692	426,692	237,05	0,000
2-Way Interaction	3	25,000	8,333	4,63	0,066
CR*IT	1	0,000	0,000	0,00	1,000
CR*RPM	1	9,000	9,000	5,00	0,076
IT*RPM	1	16,000	16,000	8,89	0,031
Error	5	9,000	1,800		
Lack-of-Fit	3	7,000	2,333	2,33	0,314
Pure Error	2	2,000	1,000		
Total	14	955,733			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,34164	99,06%	97,36%	87,81%

4.2.5.1 Pengujian Kesesuaian Model

Untuk mengetahui kesesuaian model, dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Uji Koefisien Determinasi (R-Sq)

Nilai koefisien determinasi sebesar 99.06% menjelaskan bahwa sebanyak 99.06% variasi respon dapat dijelaskan oleh prediktor atau variabel faktor berpengaruh terhadap respon sebesar 99.06% sehingga model pendugaan respon HC adalah cocok

b. Uji Lack of Fit

Pengujian kesesuaian model dengan uji *lack of fit* pada analisis variansi pendugaan model HC menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : model regresi cocok (tidak ada lack of fit)

H_1 : model regresi tidak cocok (ada lack of fit)

dimana tingkat keyakinan 95% dan level signifikansi (α) sebesar 5% atau 0,05; dengan kriteria penolakan adalah:

tolak H_0 jika $p_{value} < 0,05$

Dengan kriteria pendugaan model respon HC pada pengujian ini adalah signifikan dengan $p_{value} \text{ lack of fit} = 0,314$ dan lebih besar dari nilai α sehingga hipotesa H_0 gagal ditolak atau model cocok.

4.2.5.2 Pengujian Koefisien Regresi

Pengujian ini dilakukan mengetahui variabel faktor dan kombinasinya yang berpengaruh terhadap nilai respon *emisi HC* dengan tahapan sebagai berikut:

a. Pengujian Koefisien Regresi Secara Individu

Hipotesa yang digunakan untuk uji koefisien regresi secara individu terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut:

$H_0 : \beta_i = 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

$H_1 : \beta_i \neq 0$ untuk setiap $i = 1,2,3, \dots, k$

dengan β_i adalah parameter koefisien regresi yang besarnya tidak diketahui. Jika $\beta_i = 0$ dapat disimpulkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara variabel x dan y dalam Persamaan 2-10. Untuk menguji kedua hipotesis di atas digunakan uji-F atau dengan melihat nilai P_{value} masing-masing variabel dari ANOVA, dengan kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 : Jika $F_{Hitung} > F_{Tabel}$; dan atau

Tolak H_0 : Jika $P_{Value} < \alpha = 0,05$

Hasil $F_{Tabel} = F_{(0,05;1;14)} = 4,60$ dan dari ANOVA Tabel 4.11 yang memenuhi kriteria tolak H_0 dan berkontribusi signifikan terhadap kesesuaian model regresi adalah variabel semua variabel x dalam bentuk linear, x_1 dan x_3 dalam bentuk kuadratik serta interaksi antara x_2 dan x_3 .

b. Pengujian Koefisien Regresi Secara Serentak

Hipotesa untuk uji koefisien regresi secara serentak terhadap model respon Torsi adalah sebagai berikut;

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ (minimal ada satu } \beta_i \text{ yang tidak sama dengan nol)}$$

kriteria penolakannya adalah:

tolak H_0 : jika $p_{\text{value model}} < \alpha = 0,05$; dan atau

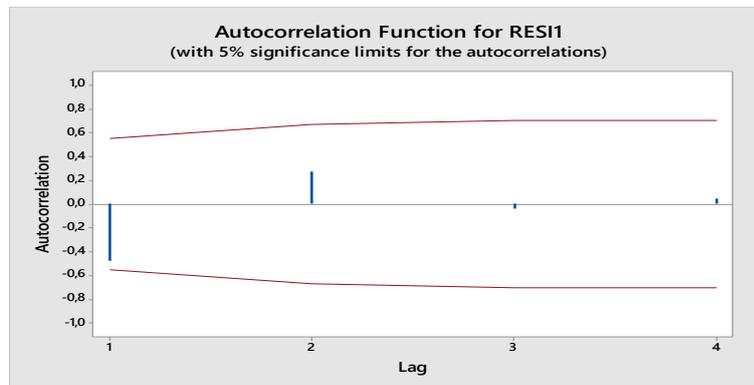
tolak H_0 : jika $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$

Hasil analisa *variance* pada Tabel 4.11 diketahui; $P_{\text{value-Model}} = 0,000$ dan lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, serta nilai $F_{\text{hitung}} = 58,44$. Sementara itu, diperoleh nilai $F_{\text{tabel}} = F_{(0,05;9;14)} = 2.65$, dimana $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$. Berdasarkan kedua nilai tersebut maka diambil keputusan untuk menolak H_0 . Hal ini berarti bahwa minimal ada satu variabel dalam model persamaan regresi yang berkontribusi secara signifikan terhadap kesesuaian model.

4.2.5.3 Pengujian Asumsi Residual

Model dikatakan sesuai jika residual mengikuti asumsi $\varepsilon \approx IID \text{ Normal } (0, \sigma^2)$ atau residual independen satu sama lain, memiliki rata-rata nol dan variansi yang konstan (σ^2) atau identik serta terdistribusi normal.

a. Uji Independensi



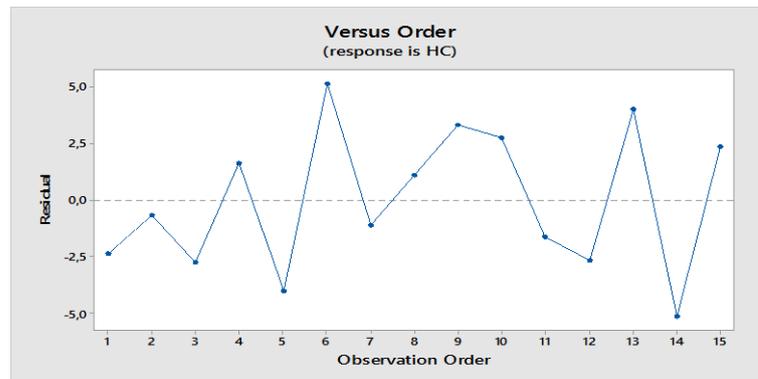
Gambar 4-13: Grafik ACF residual untuk model respon emisi HC

Residual dikatakan independen jika nilai *Auto Correlation Function*nya (ACF) masih berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$. Dalam penelitian ini jumlah pengamatan eksperimen didesain sebanyak (n) = 15, maka asumsi residual idependen jika nilai ACF-nya dalam interval $\pm 0,5164$. Sementara itu hasil uji indenpendensi residual pada *software* Minitab menghasilkan ACF untuk model persamaan regresi emisi

HC E100 berada dalam interval $+ 0,2787$ dan $-0,4777$ sehingga asumsi residual independen terpenuhi, sebagaimana pada Gambar 4-13 di atas.

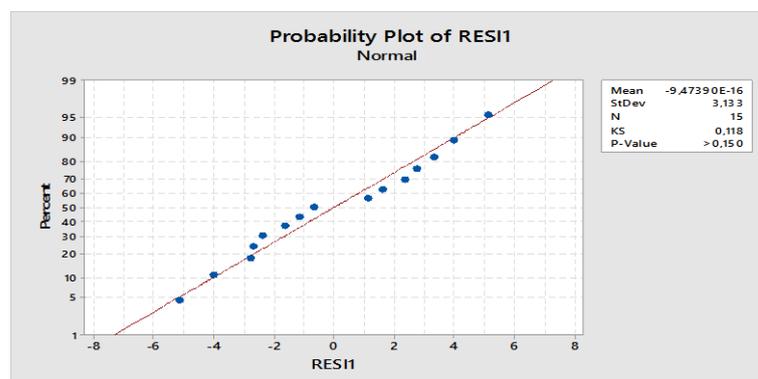
b. Uji Keidentikan

Uji keidentikan residual dapat dilakukan dengan membuat plot antara residu dengan urutan pengamatan respon emisi HC, Y estimasi (*observation order*). Asumsi residual dikatakan identik apabila grafik yang terbentuk menyebar secara acak dan tidak membentuk pola tertentu. Pada Gambar 4-14 menunjukkan bahwa residual menyebar secara acak di sekitar garis yang berharga nol dan tidak membentuk suatu pola tertentu yang sama dan berulang secara regular. Hal ini mengindikasikan bahwa penyebaran residu merata dan tidak sama sehingga **asumsi residual identik** untuk model respon emisi HC E100 terpenuhi



Gambar 4-14: Uji keidentikan residual respon emisi HC

c. Uji Kenormalan



Gambar 4-15: Grafik distribusi normal residual dari respon emisi HC

Uji kenormalan dilakukan menggunakan metode uji *Kolmogorov-Smirnov*, dengan derajat signifikan (α) = 0,05 dan menggunakan hipotesa sebagai berikut:

H_0 : residual model regresi terdistribusi Normal

H_1 : residual model regresi tidak terdistribusi Normal

dengan kriteria penolakan: tolak H_0 jika $p_{value} < 0.05$

Gambar 4-15 menunjukkan hasil uji normalitas dari residual respon emisi CO E100 dengan metode *Kolmogorov-Smirnov test*. Pengujian tersebut menghasilkan nilai $p_{value} > 0.15 > \alpha$, sehingga dari kriteria yang ditetapkan pada pengujian ini menerima hipotesa H_0 . Dengan demikian asumsi bahwa residual model regresi CO E100 terdistribusi normal terpenuhi, dengan rata-rata = 0 dan $KS_{hitung} = 0,118 < KS_{tabel} = 0,3512$.

Dari rangkaian proses pengujian di atas, maka dapat dibuat persamaan empiris yang menyatakan kombinasi variabel faktor yang signifikan berpengaruh terhadap nilai optimasi respon emisi HC-E100, yaitu sebagai berikut::

$$HC = 70,000 - 3,250 CR + 1,750 IT + 6,000 RPM - 4,250 CR * CR + 10,750 RPM * RPM - 2,000 IT * RPM \quad \dots (4 - 5)$$

4.3 Plot Permukaan-Kontur dan Optimasi Lokal Respon

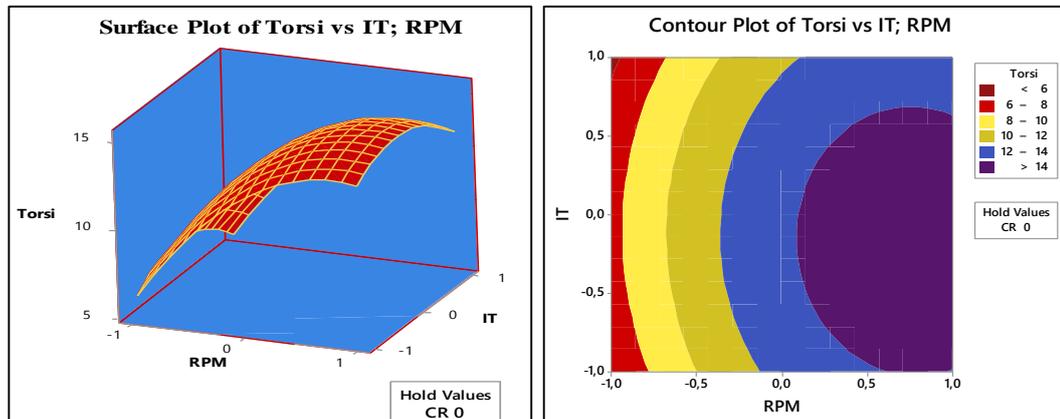
Grafik plot permukaan dan kontur dibuat untuk melihat variasi kombinasi variabel proses (faktor) terhadap variabel respon. Plot kontur dan permukaan dapat membantu memvisualisasikan permukaan respons. Sebuah plot kontur dan permukaan menunjukkan bagaimana sebuah variabel respon berhubungan dengan dua variabel faktor berdasarkan persamaan model.

Poin yang memiliki nilai respon yang sama dihubungkan untuk menghasilkan garis kontur respons konstan. Karena plot kontur hanya menunjukkan dua faktor sekaligus, maka faktor tambahan dibuat konstan pada level medium. Sementara itu plot permukaan respon adalah grafik tiga dimensi, mewakili hubungan fungsional antara sebuah respon dan dua variabel faktor.

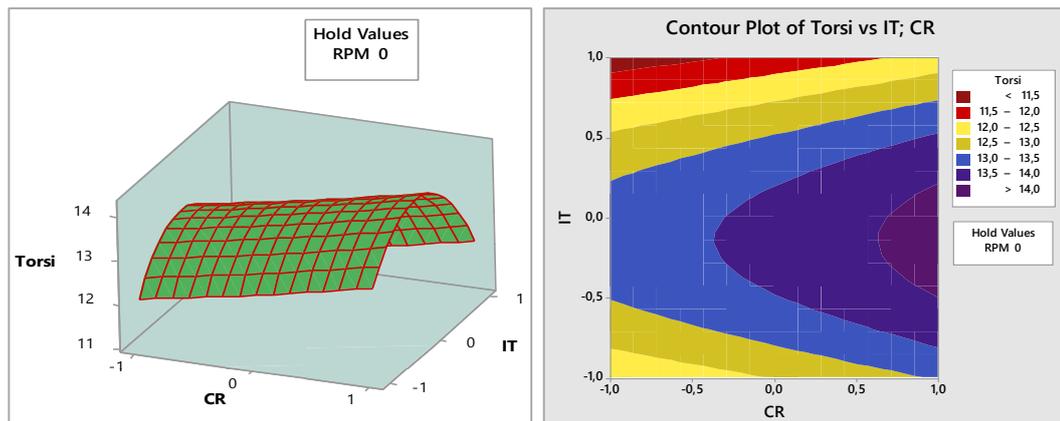
4.3.1 Plot Permukaan dan Kontur Respon Torsi-E100

Grafik plot kontur dan plot permukaan respon Torsi bahan bakar E100 dengan pengaturan *ignition timing* (IT) dan putaran mesin (RPM) dari yang tertinggi sampai yang terendah dengan perbandingan kompresi (CR) pada posisi konstan di level medium (0) diperlihatkan pada Gambar 4-16.

Gambar 4-16 menjelaskan bahwa nilai respon Torsi maksimum diperoleh jika RPM berada pada level medium sampai level tinggi dan IT pada level rendah sampai level medium, sedangkan nilai minimumnya berada pada daerah RPM level terendah dan daerah IT mulai dari level terendah sampai tertinggi.



Gambar 4-16: Plot permukaan dan kontur optimasi Torsi vs IT; RPM



Gambar 4-17: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs IT; CR

Sementara itu dalam Gambar 4-17 memperlihatkan bahwa nilai minimum Torsi diperoleh pada daerah IT level tertinggi dan CR level rendah, sedangkan nilai optimumnya diperoleh pada IT level medium dan CR level tinggi. Gambar plot permukaan dan kontur respon BSFC, BTE, Emisi CO dan HC untuk bahan bakar E100 diberikan pada Lampiran 3 – 6.

4.3.2 Optimasi Lokal Model Persamaan Regresi Respon

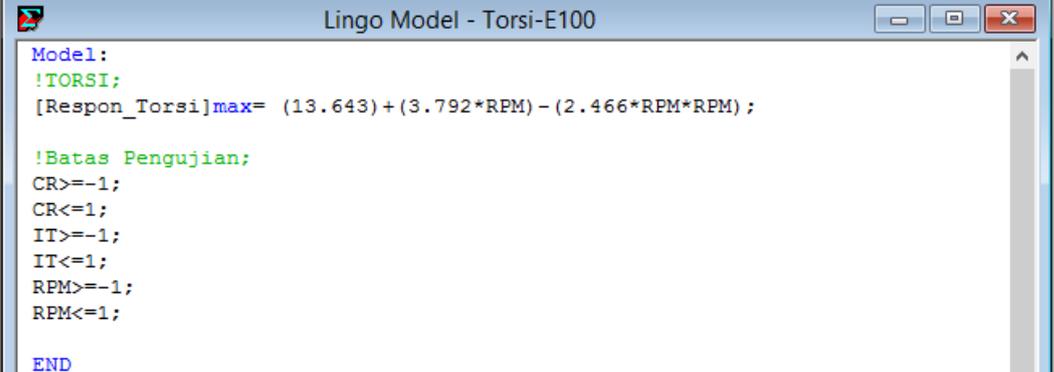
Otimasi lokal respon dilakukan dengan memasukkan model persamaan regresi respon yang telah melalui uji statistik dan dianggap signifikan berpengaruh

terhadap respon (persamaan 4-1 sampai 4-5) ke dalam perangkat *non linear programming (LINGO)* dengan batas pengujian pada masing-masing variabel faktor yang dikehendaki. Pada penelitian ini respon sasaran sebagai tujuan utama yang ingin dioptimalkan adalah Torsi sementara respon lainnya sebagai penghambat. Hal ini didasari oleh metodologi dalam penelitian ini, dimana proses mapping variabel proses di dasarkan pada metode *maximum brake torque*.

4.3.2.1 Optimasi Lokal Respon Torsi

Model persamaan optimasi dan solusi optimasi respon Torsi ditunjukkan pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13 di bawah ini:

Tabel 4.12: Model persamaan optimasi respon Torsi



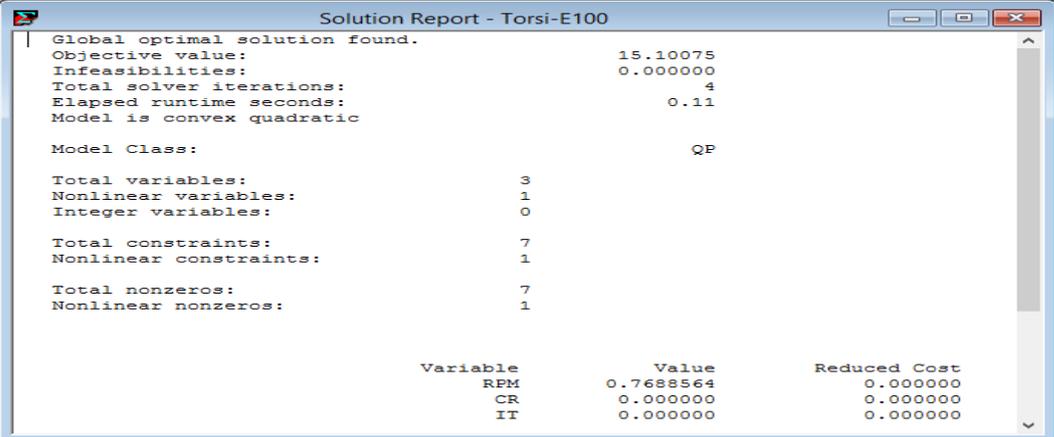
```

Model:
!TORSI;
[Respon_Torsi]max= (13.643)+(3.792*RPM)-(2.466*RPM*RPM);

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END
  
```

Tabel 4.13: Solusi persamaan optimasi respon Torsi



Solution Report - Torsi-E100			
Global optimal solution found.			
Objective value:		15.10075	
Infeasibilities:		0.000000	
Total solver iterations:		4	
Elapsed runtime seconds:		0.11	
Model is convex quadratic			
Model Class:		QP	
Total variables:	3		
Nonlinear variables:	1		
Integer variables:	0		
Total constraints:	7		
Nonlinear constraints:	1		
Total nonzeros:	7		
Nonlinear nonzeros:	1		
	Variable	Value	Reduced Cost
	RPM	0.7688564	0.000000
	CR	0.000000	0.000000
	IT	0.000000	0.000000

4.3.2.2 Optimasi Lokal Respon BSFC

Model persamaan optimasi dan solusi optimasi respon BSFC ditunjukkan pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15 di bawah ini:

Tabel 4.14: Model persamaan optimasi respon BSFC

```

Lingo Model - BSFC-E100

Model:
!BSFC_E100;
[Respon_BSFC_E100]min=(0.004378)-(0.000519*CR)+(0.000478*IT)-(0.003396*RPM)-(0.0001147*CR*CR)
+(0.001550*IT*IT)+(0.005334*RPM*RPM);

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

```

Tabel 4.15: Solusi persamaan optimasi respon BSFC

```

Solution Report - BSFC-E100

Local optimal solution found.
Objective value:                0.3203767E-02
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:       36
Elapsed runtime seconds:       0.95

Model Class:                    QP

Total variables:                3
Nonlinear variables:           3
Integer variables:              0

Total constraints:              7
Nonlinear constraints:          1

Total nonzeros:                 9
Nonlinear nonzeros:            3

Variable      Value      Reduced Cost
CR            1.000000    0.000000
IT            0.000000    0.4780000E-03
RPM          0.3183352    0.000000

```

4.3.2.3 Optimasi Lokal Respon BTE

Model persamaan optimasi dan solusi optimasi respon BTE ditunjukkan pada Tabel 4.16 dan Tabel 4.17 di bawah ini:

Tabel 4.16: Model persamaan optimasi respon BTE

```

Lingo Model - Lingo1

Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E100]max= (0.3858)+(0.0726*RPM)-(0.0550*IT*IT)-(0.1695*RPM*RPM);

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END

```

Tabel 4.17: Solusi persamaan optimasi respon BTE

Screenshot of the Lingo Solution Report window titled "Solution Report - Lingo1". The report shows the following details:

- Global optimal solution found.
- Objective value: 0.3935740
- Infeasibilities: 0.000000
- Total solver iterations: 4
- Elapsed runtime seconds: 0.09
- Model is convex quadratic
- Model Class: QP
- Total variables: 3
- Nonlinear variables: 2
- Integer variables: 0
- Total constraints: 7
- Nonlinear constraints: 1
- Total nonzeros: 8
- Nonlinear nonzeros: 2

Variable	Value	Reduced Cost
RPM	0.2141593	0.000000
IT	0.000000	0.000000
CR	0.000000	0.000000

4.3.2.4 Optimasi Lokal Respon CO

Model persamaan optimasi dan solusi optimasi respon CO ditunjukkan pada Tabel 4.18 dan Tabel 4.19 di bawah ini:

Tabel 4.18: Model persamaan optimai respon CO

Screenshot of the Lingo Model window titled "Lingo Model - CO-2-E100". The model code is as follows:

```

Model:
!CO_E100;
[Respon_CO_E100]min=(1.063)-(0.411*CR)+(1.301*RPM)+(1.071*(RPM*RPM))

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
    
```

Tabel 4.19: Solusi persamaan optimasi respon CO

Screenshot of the Lingo Solution Report window titled "Solution Report - CO-2-E100". The report shows the following details:

- Global optimal solution found.
- Objective value: 0.6520000
- Infeasibilities: 0.000000
- Total solver iterations: 4
- Elapsed runtime seconds: 0.08
- Model is convex quadratic
- Model Class: QP
- Total variables: 3
- Nonlinear variables: 1
- Integer variables: 0
- Total constraints: 7
- Nonlinear constraints: 1
- Total nonzeros: 8
- Nonlinear nonzeros: 1

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.000000	1.301000
IT	0.000000	0.000000

4.3.2.5 Optimasi Lokal Respon HC

Model persamaan optimasi dan solusi persamaan optimasi respon HC ditunjukkan pada Tabel 4.20 dan Tabel 4.21 di bawah ini:

Tabel 4.20: Model persamaan optimasi respon HC

```

Model:
!HC_E100;
[Respon_HC_E100]min=(70) - (3.25*CR) + (1.75*IT) + (6*RPM) - (4.25*(CR*CR)) |
+ (10.75*(RPM*RPM)) - (2.00*(IT*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
    
```

Tabel 4.21: Solusi persamaan optimasi respon HC

```

Local optimal solution found.
Objective value:                62.50000
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:        21
Elapsed runtime seconds:        0.66

Model Class:                    QP

Total variables:                3
Nonlinear variables:            3
Integer variables:              0

Total constraints:              7
Nonlinear constraints:          1

Total nonzeros:                9
Nonlinear nonzeros:            3

Variable      Value      Reduced Cost
CR            1.000000    0.000000
IT            0.000000    1.750000
RPM           0.000000    6.000000
    
```

Dari proses optimasi lokal masing-masing respon bahan bakar E100 diperoleh kombinasi variabel faktor dalam bentuk nilai koding sebagaimana terangkum pada Tabel 4.22 sebagai berikut:

Tabel 4.22: Kombinasi koding variabel faktor dan nilai optimasi lokal respon E100

Respon	Variabel Kode Faktor			Nilai Optimasi
	CR	IT	RPM	
Torsi, Nm	0,000000	0,000000	0,7688564	15,10075
BSFC, kg/HP.h	1,000000	0,000000	0,3183352	0,00321
BTE, %	0,000000	0,000000	0,2141593	0,393574
Emisi CO, %	1,000000	0,000000	0,000000	0,652
Emisi HC, ppm	1,000000	0,000000	0,000000	62,500

4.4 Transformasi Variabel Faktor

Variabel alami faktor yang terpasang pada mesin dapat diketahui dengan mentransformasikan nilai variabel koding dengan menggunakan persamaan (3-1) samapi (3-3) dan diberikan contoh analisa pada respon Torsi, yaitu sebagai berikut:

1. Perbandingan Kompresi

$$0 = \frac{(CR) - 12,5}{0,5}$$

$$\text{Perbandingan Kompresi} = 12,5$$

2. Derajat Pengapian Bahan Bakar

$$0 = \frac{(IT) - 20}{4}$$

$$\text{Derajat Pengapian} = 20$$

3. Putaran Mesin

$$0,7688564 = \frac{(RPM) - 5000}{3000}$$

$$\text{Putaran Mesin} = 7307$$

Dengan cara perhitungan yang sama pada variabel koding respon yang lain, maka akan diperoleh nilai variabel alami faktor yang terpasang pada mesin sebagaimana dituliskan dalam Tabel 4.23 di bawah ini:

Tabel 4.23: Kombinasi variabel faktor sebenarnya dan nilai optimasi lokal respon E100

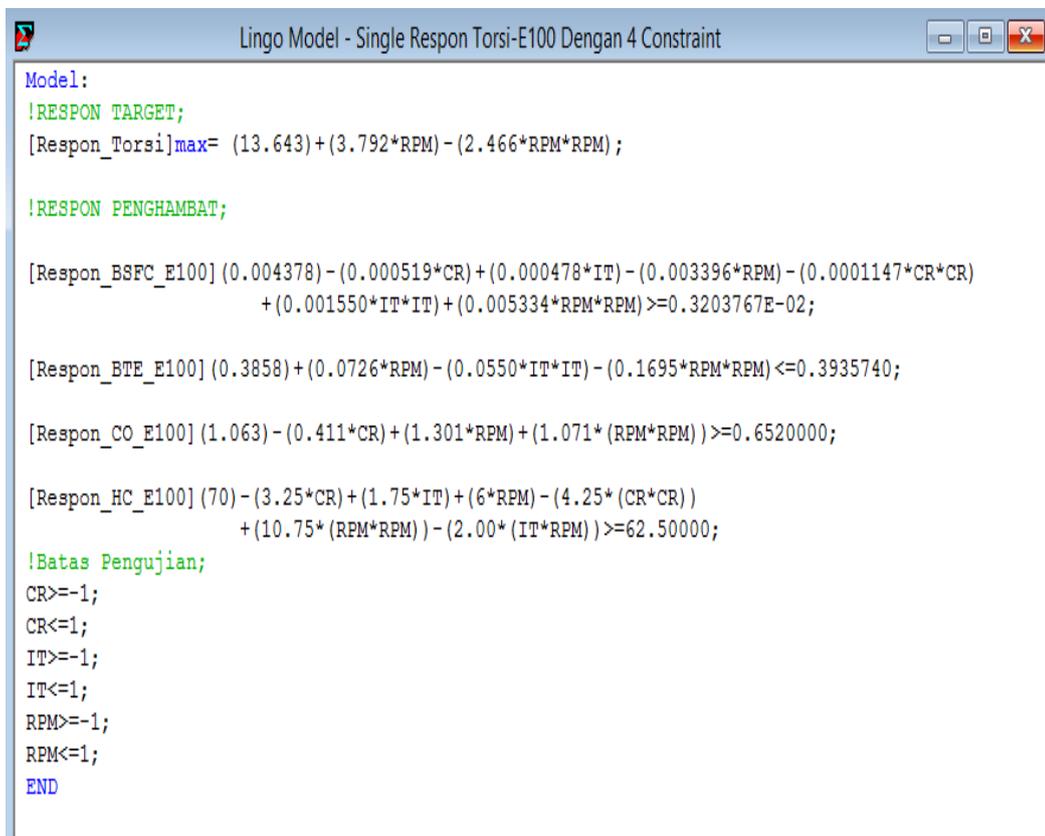
Respon	Variabel Kode Faktor			Nilai Optimasi
	CR	IT	RPM	
Torsi, Nm	12,5	20	7307≈7300	15,101
BSFC, kg/HP.h	13	20	5955≈6000	0,0032
BTE, %	12,5	20	5642≈5600	0,3936
Emisi CO, %	12,5	20	5000	2,34
Emisi HC, ppm	13	24	5511≈5500	64,05

4.5 Optimasi Single Respon Torsi dengan 4 Constraint

Optimasi *single* respon pada penelitian ini adalah mengoptimasi respon Torsi (T) sebagai target utama dan efisiensi thermal (BTE), konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), emisi CO dan emisi HC sebagai respon penghambat (*constraint*) secara serentak. Dengan proses tersebut akan didapatkan kombinasi variabel faktor yang menghasilkan nilai optimum respon Torsi, dengan model persamaan dan solusinya ditunjukkan pada Tabel 4.24 dan Tabel 4.25.

Dengan proses optimasi single respon dihasilkan nilai Torsi untuk bahan bakar bioetanol 100% sebesar **15, 10075Nm** pada kondisi variabel proses masing-masing, perbandingan kompresi (CR) adalah **1.0000**, derajat pengapian bahan bakar (IT) adalah **1.0000** dan putaran mesin (RPM) adalah **0,7688564**. Kemudian substitusi nilai koding variabel proses ke dalam persamaan (4-2) sampai (4-5) untuk mendapatkan nilai sebenarnya, yaitu; CR sebesar **13:1**, IT sebesar **24° BTDC** dan RPM sebesar **7300**

Tabel 4.24: Input model persamaan optimasi Single respon Torsi-E100



```
Lingo Model - Single Respon Torsi-E100 Dengan 4 Constraint
Model:
!RESPON TARGET;
[Respon_Torsi]max= (13.643)+(3.792*RPM)-(2.466*RPM*RPM);

!RESPON PENGHAMBAT;

[Respon_BSFC_E100] (0.004378)-(0.000519*CR)+(0.000478*IT)-(0.003396*RPM)-(0.0001147*CR*CR)
+(0.001550*IT*IT)+(0.005334*RPM*RPM)>=0.3203767E-02;

[Respon_BTE_E100] (0.3858)+(0.0726*RPM)-(0.0550*IT*IT)-(0.1695*RPM*RPM)<=0.3935740;

[Respon_CO_E100] (1.063)-(0.411*CR)+(1.301*RPM)+(1.071*(RPM*RPM))>=0.6520000;

[Respon_HC_E100] (70)-(3.25*CR)+(1.75*IT)+(6*RPM)-(4.25*(CR*CR))
+(10.75*(RPM*RPM))-(2.00*(IT*RPM))>=62.50000;

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 4.25: Hasil optimasi single respon Torsi-E100

Variable	Value	Reduced Cost
RPM	0.7688564	0.000000
CR	1.000000	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Untuk mendapatkan nilai respon BSFC, BTE, CO dan HC pada kondisi optimasi *optimasi respon* Torsi, dilakukan dengan memasukkan (*input*) nilai *koding* variabel proses kondisi optimasi *single* respon Torsi ke dalam persamaan *sintak program* masing-masing respon dan menjadi batas pengujian. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.26 berikut ini:

Tabel 4.26: Nilai variabel respon pada kondisi optimasi *single* respon Torsi

Nilai Koding Variabel Proses			Nilai Variabel Respon Hasil Optimasi				
CR	IT	RPM	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP.h)	BTE (%)	CO (%)	HC (ppm)
13:1	24 BTDC	7300	15,101	63,14-E4	28,64	2,29	73,68

4.6 Uji Konfirmasi Dengan Uji One Sample-t

Tahapan yang dilakukan untuk uji konfirmasi dan validasi nilai optimasi adalah melakukan uji hipotesis dan *interval konfidensi* terhadap rata-rata data populasi nilai respon pengujian konfirmasi, μ_o (Tabel 4.27) dan membandingkannya dengan nilai respon optimum, μ (Tabel 4.26) pada kombinasi level variabel proses yang diperoleh dari perhitungan optimasi. Besarnya penyimpangan yang terjadi antara hasil pengujian konfirmasi dan hasil perhitungan optimasi teoritis dapat diketahui melalui pengujian *one sample-t*. Uji hipotesis dan interval konfidensi pada *uji one sample-t*, menggunakan hipotesa sebagai berikut:

$$H_0 : \mu = \mu_o \quad \text{atau} \quad H_1 : \mu \neq \mu_o$$

dengan kriteria penolakan;

tolak H_0 : jika $P_{\text{value}} < 0,05$ atau $T_{\text{Hitung}} > T_{\text{Tabel}}$

Adapun nilai hasil pengamatan/perhitungan respon yang diperoleh dengan kombinasi variabel faktor kondisi optimasi adalah sebagai berikut:

Tabel 4.27: Kombinasi variabel proses dan hasil uji konfirmasi respon

Nilai Koding			Data Hasil Uji Konfirmasi				
CR	IT	RPM	Torsi	BSFC	BTE	CO	HC
			Nm	Kg/Hp.h	%	%	Ppm
1	1	0,769	14,77	58,81-E4	26,83	2,24	73
			15,11	63,35-E4	28,94	2,52	76
			14,91	61,12-E4	27,45	2,41	75

a. Pengujian One Sample-T Respon Torsi

Hasil uji one-sample T dan diagram Box Plot respon Torsi disajikan pada Tabel 4.28 dan Gambar 4-18 berikut ini:

Tabel 4.28: Uji One Sample-T respon Torsi

One-Sample T: Torsi

Test of $\mu = 15,101$ vs $\neq 15,101$

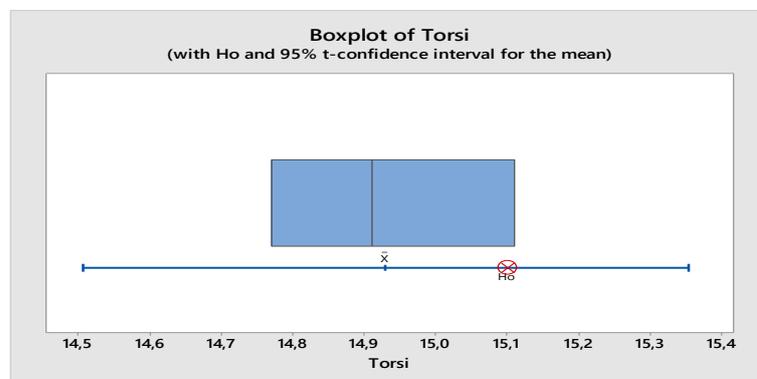
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Torsi	3	14,9300	0,1709	0,0987	(14,5055; 15,3545)	-1,73	0,225

Hipotesis:

$H_0 : \mu = 15.101$

$H_1 : \mu \neq 15.101$

dengan kriteria penolakan; tolak H_0 : jika $P_{\text{value}} < 0,05$ atau $T_{\text{Hitung}} > T_{\text{Tabel}}$



Gambar 4-18: Box plot one sample-t respon Torsi

Dari hasil pengujian *One Sample-T* respon Torsi diperoleh nilai $P_{value} > 0,05$ (0,225) dan $T_{Tabel} = T_{(0,05;2)} = 4,30$. Dengan demikian hipotesis $H_0 : \mu = \mu_0$ adalah gagal tolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata hasil uji konfirmasi respon sama dengan nilai hasil optimasi teoritis. Sementara itu diagram box plot menunjukkan nilai H_0 cenderung berada pada kuartil ketiga (Q_3) dan masih berada dalam batas sebaran data interquartile range (IQR).

b. Pengujian *One Sample-T* Respon BSFC

Hasil uji *one-sample-t* dan diagram Box Plot respon BSFC disajikan pada Tabel 4.29 dan Gambar 4-19 berikut ini:

Tabel 4.29: Uji *One Sample-T* respon BSFC

One-Sample T: BSFC							
Test of $\mu = 0,006314$ vs $\neq 0,006314$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BSFC	3	0,006109	0,000227	0,000131	(0,005545; 0,006673)	-1,56	0,259

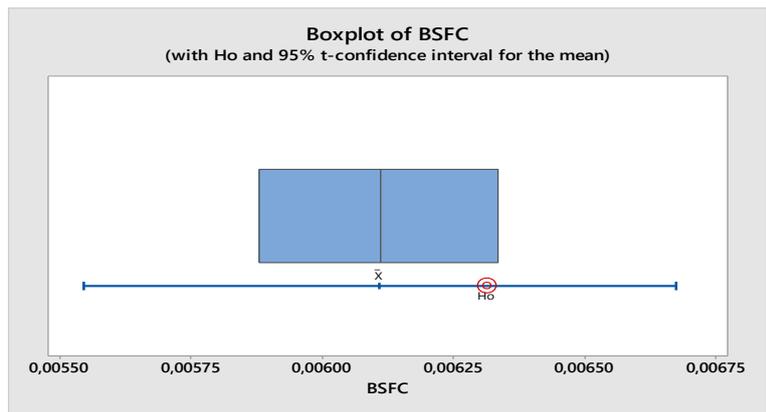
Hipotesis:

$H_0 : \mu = 0,006314$

$H_1 : \mu \neq 0,006314$

dengan kriteria penolakan;

tolak H_0 : jika $P_{value} < 0,05$ atau $T_{Hitung} > T_{Tabel}$



Gambar 4-19: Box plot one *sample-t* respon BSFC

Dari hasil pengujian *One Sample-T* respon BSFC diperoleh nilai $P_{value} > 0,05$ (0,259) dan $T_{Tabel} = T_{(0,05;2)} = 4,30$, sehingga hipotesis

$H_0 : \mu = \mu_o$ diterima. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara statistik nilai rata-rata hasil uji konfirmasi respon BSFC sama dengan nilai hasil optimasi teoritis respon BSFC. Hasil yang diperoleh dari diagram box plot menunjukkan nilai H_0 berada pada quartile ketiga (Q_3) serta masih berada dalam batas sebaran data interquartile range (IQR).

c. Pengujian *One Sample-T* Respon BTE

Hasil uji *one-sample-t* dan diagram Box Plot respon BTE disajikan pada Tabel 4.30 dan Gambar 4-20 berikut ini:

Tabel 4.30: Uji *One Sample-T* respon BTE

One-Sample T: BTE							
Test of $\mu = 0,2864$ vs $\neq 0,2864$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BTE	3	0,27740	0,01084	0,00626	(0,25046; 0,30434)	-1,44	0,287

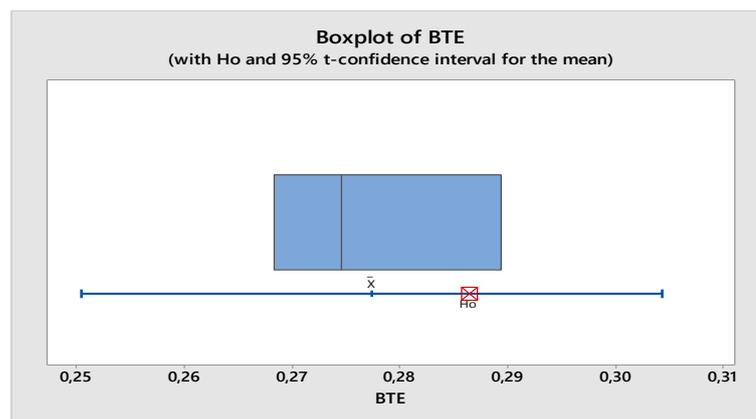
Hipotesis:

$$H_0 : \mu = 0,2864$$

$$H_1 : \mu \neq 0,2864$$

dengan kriteria penolakan;

tolak H_0 : jika $P_{value} < 0,05$ atau $T_{Hitung} > T_{Tabel}$



Gambar 4-20: Box plot *one sample-t* respon BTE

Dari hasil pengujian *One Sample-T* respon BTE diperoleh nilai $P_{value} > 0.05$ (0.287) dan $T_{Tabel} = T_{(0,05;2)} = 4.30$, sehingga hipotesis $H_0 : \mu = \mu_o$ diterima. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara statistik nilai

rata-rata hasil uji konfirmasi respon BTE sama dengan nilai hasil optimasi teoritisnya. Hasil yang diperoleh dari diagram box plot menunjukkan nilai H_o lebih dekat berada pada kuartil ketiga (Q_3) dan masih berada dalam batas sebaran data interquartile range (IQR).

d. Pengujian *One Sample-T* Respon CO

Hasil uji *one-sample-t* dan diagram Box Plot respon CO disajikan pada Tabel 4.31 dan Gambar 4-21 berikut ini:

Tabel 4.31: Uji *One Sample-T* respon CO

One-Sample T: CO							
Test of $\mu = 2,29$ vs $\neq 2,29$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
CO	3	2,3900	0,1411	0,0814	(2,0396; 2,7404)	1,23	0,344

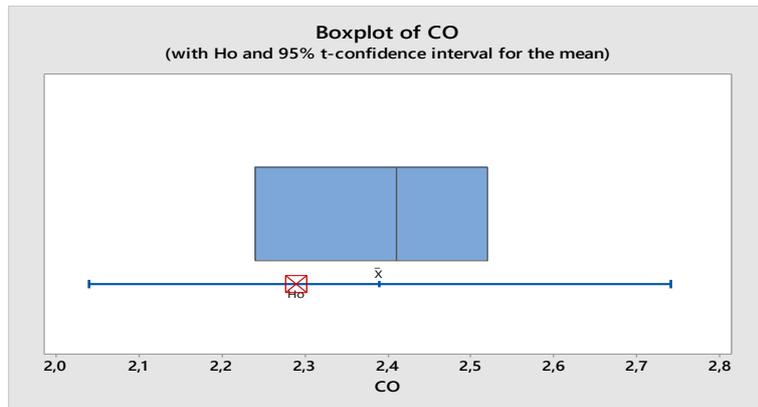
Hipotesis:

$H_0 : \mu = 2,29$

$H_1 : \mu \neq 2,29$

dengan kriteria penolakan;

tolak H_0 : jika $P_{value} < 0,05$ atau $T_{Hitung} > T_{Tabel}$



Gambar 4-21: Box plot *one sample-t* respon CO

Dari hasil pengujian *One Sample-T* respon emisi CO diperoleh nilai $P_{value} > 0,05$ (0,344) dan $T_{Tabel} = T_{(0,05;2)} = 4,30$ sehingga hipotesis $H_o : \mu = \mu_o$ diterima. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa secara statistik nilai hasil uji konfirmasi respon CO sama dengan nilai hasil optimasi teoritisnya. Hasil

yang diperoleh dari diagram box plot menunjukkan nilai H_o berada antara kuartil pertama (Q_1) dan kedua (Q_2) dan masih berada dalam batas sebaran data interquartile range (IQR).

e. Pengujian *One Sample-T* Respon HC

Hasil uji *one-sample-t* dan diagram Box Plot respon HC disajikan pada Tabel 4.32 dan Gambar 4-22 berikut ini:

Tabel 4.32: Uji *One Sample-T* respon HC

One-Sample T: HC							
Test of $\mu = 73,68$ vs $\neq 73,68$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
HC	3	74,667	1,528	0,882	(70,872; 78,461)	1,12	0,380

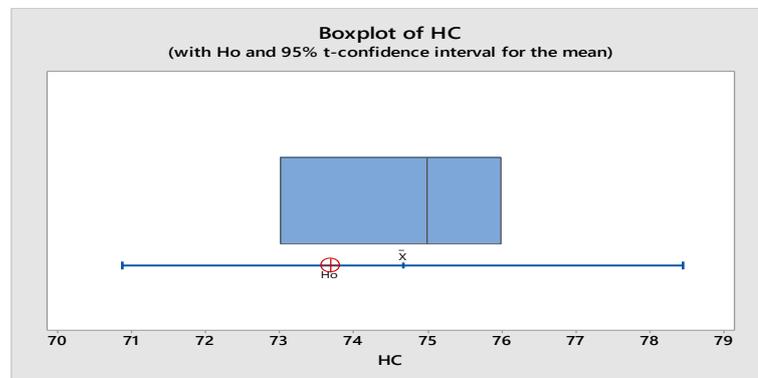
Hipotesis:

$H_0 : \mu = 73,68$

$H_1 : \mu \neq 73,68$

dengan kriteria;

tolak H_0 : jika $P_{value} < 0,05$ atau $T_{Hitung} > T_{Tabel}$



Gambar 4-22: Box plot *one sample-t* respon HC

Hasil pengujian *One Sample-T* emisi HC diperoleh nilai $P_{value} = 0.38 > \alpha$ dan $T_{Tabel} = T_{(0,05;2)} = 4,30$ sehingga hipotesis $H_0 : \mu = \mu_o$ gagal tolak. Hal ini berarti bahwa secara statistik nilai rata-rata hasil pengamatan uji konfirmasi respon HC sama dengan nilai hasil optimasi respon HC. Hasil yang diperoleh dari diagram box plot menunjukkan nilai H_o berada antara kuartil pertama (Q_1) dan kuartil kedua (Q_2) dan berada dalam batas sebaran data interquartile range (IQR).

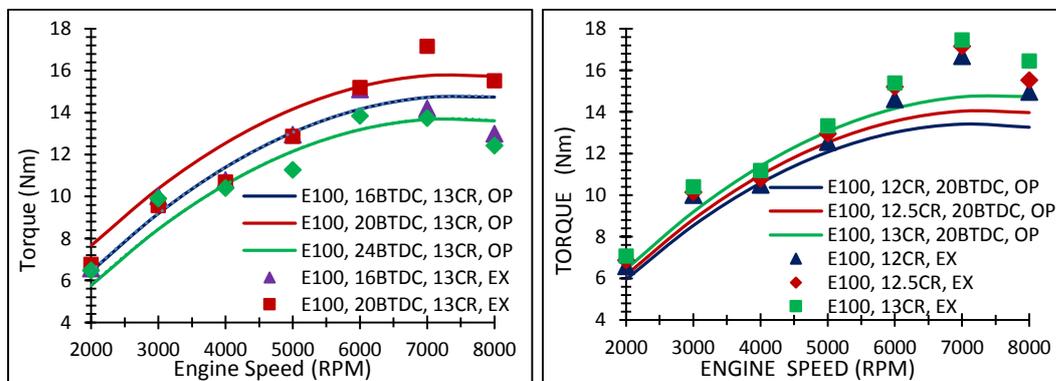
4.7 Pembahasan Hasil Pengujian dan Optimasi

Pada bahasan selanjutnya akan diuraikan secara lebih mendetail pengaruh variabel proses terhadap optimasi dan karakteristik respon yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar E50 – E100.

4.7.1 Pengaruh Variabel Proses Terhadap Respon Torsi

Angka oktan bahan bakar bioetanol yang lebih tinggi dari gasolin (~88 vs ~110, Tabel 2.1) akan berimplikasi pada kenaikan angka oktan bahan bakar gasolin jika ditambahkan bahan bakar bioetanol. Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya setiap kenaikan lima angka oktan bahan bakar dapat menaikkan satu nilai perbandingan kompresi, sedangkan setiap penambahan 10% bioetanol ke dalam gasolin dapat meningkatkan 2 – 3 nilai oktan bahan bakar. Oleh sebab itu bahan bakar gasolin yang ada saat ini dengan angka oktan 88-90 perlu dimodifikasi dengan menambahkan bioetanol untuk meningkatkan nilai oktannya sehingga dapat digunakan pada mesin spark ignition modern yang saat ini telah didesain dengan perbandingan kompresi yang lebih tinggi.

Dengan aplikasi perbandingan kompresi yang lebih tinggi maka daya dan Torsi mesin dapat ditingkatkan. Hal ini diakibatkan oleh sifat panas laten penguapan bioetanol (HoV) yang lebih baik dibandingkan dengan gasolin (~920 vs ~305, Tabel 2-1) yang memberi efek pada temperatur campuran udara dan bahan bakar yang masuk ke *intake manifold* menjadi lebih rendah. Selanjutnya dengan turunnya temperatur campuran udara bahan bakar yang masuk ke ruang bakar maka densitas campuran akan bertambah sehingga efisiensi volumetrik meningkat sehingga akan menghasilkan tekanan pembakaran yang lebih tinggi.



Gambar 4-23: Grafik Torsi-E100 vs CR; IT; RPM hasil optimasi dan mapping

Pada pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini diketahui bahwa nilai Torsi semakin meningkat jika perbandingan kompresi dinaikkan (Gambar 4-23). Nilai tersebut juga terus mengalami peningkatan seiring bertambahnya putaran mesin sebelum mengalami penurunan secara kontinyu pada putaran mesin 7000 RPM. Fenomena ini terjadi pada semua jenis bahan bakar yang diujikan, dimana *trend* tersebut menggambarkan kecenderungan yang sama jika mesin diujikan menggunakan menggunakan bahan bakar gasolin (Paloboran, 2017).

Terjadinya peningkatan Torsi seiring naiknya putaran mesin disebabkan oleh semakin meningkatnya aliran udara yang masuk ke ruang bakar sehingga akan di dapatkan campuran udara-bahan bakar yang lebih baik dan relatif mendekati kondisi stoikiometri. Peningkatan aliran udara ke ruang bakar selain dipicu oleh meningkatnya mekanisme katub dengan naiknya putaran mesin, juga dikontribusi oleh panas laten penguapan (HoV) bioetanol yang tinggi dan memberi efek dingin pada ruang bakar sehingga tekanan dalam ruang silinder menurun dan laju aliran massa udara-bahan bakar meningkat. Selain itu, naiknya RPM mesin menghasilkan panas yang lebih tinggi untuk mengatasi RVP bioetanol yang rendah sehingga lebih mudah diuapkan dan menghasilkan Torsi yang lebih tinggi. Sebaliknya terjadinya penurunan Torsi setelah putaran mesin mencapai 7000 RPM disebabkan oleh terbatasnya asupan udara yang dihasilkan oleh katup hisap (*valve intake*) sementara aliran bahan bakar meningkat sehingga akan terjadi pembakaran tidak sempurna dalam ruang bakar, dan sebagian unsur karbon tidak teroksidasi dengan baik yang menghasilkan emisi hidrokarbon (CO dan HC). Selain itu, pada putaran tinggi potensi terjadi gesekan diakibatkan oleh naiknya temperatur operasional mesin yang mengakibatkan pemuai mikroscopik ruang bakar sehingga menimbulkan gesekan dan penurunan tekanan silinder.

Gambar 4-23 juga menunjukkan hubungan antara Torsi terhadap variasi derajat pengapian bahan bakar, perbandingan kompresi dan putaran mesin untuk bahan bakar E100. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa Torsi bahan bakar E100 akan meningkat secara bertahap jika *ignition timing* dimajukan dan akan mengalami penurunan secara bertahap pula setelah mencapai *ignition timing* 20° BTDC. Sementara itu, pada bahan bakar E80, E70 dan E50 diperoleh nilai Torsi maksimal pada derajat pengapian secara berturut-turut adalah 24°, 24° dan 20°

BTDC. Hal ini menunjukkan bahwa sebagai bahan bakar campuran, derajat pengapian bahan bakar campuran akan semakin maju jika konsentrasi bioetanol bertambah yang hasil lengkapnya dapat dilihat dalam Lampiran 88, 89 dan 90.

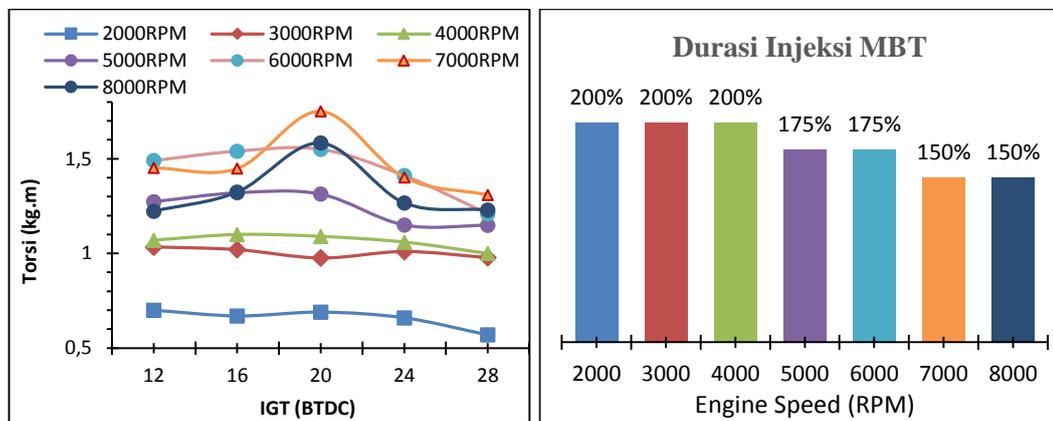
Pengujian dengan variasi *ignition timing* berdasarkan putaran mesin sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.23 diketahui bahwa Torsi maksimal pada putaran awal mesin (2000-3000 RPM) diperoleh pada *ignition timing* 16° BTDC. Selanjutnya secara konsisten Torsi maksimal akan diperoleh pada *ignition timing* yang semakin maju seiring meningkatnya putaran mesin. Meningkatnya Torsi seiring *ignition timing* makin maju dan naiknya putaran mesin dikontribusi oleh sifat tekanan penguapan yang rendah dan kecepatan api laminar bioetanol yang lebih tinggi dibandingkan dengan gasolin. Dengan sifat RVP yang rendah maka pembakaran bioetanol membutuhkan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan gasolin untuk meningkatkan volatilitas bioetanol. Oleh sebab itu *ignition timing* bahan bakar campuran harus dimajukan dari pengapian standar agar proses penguapan dan atomisasi bioetanol menjadi lebih baik. Sementara itu, kecepatan api laminar bioetanol yang tinggi akan menghasilkan durasi pembakaran menjadi lebih singkat dan menyebabkan stabilitas pembakaran menjadi lebih baik sehingga kegagalan pembakaran dapat dihindari jika pengapian bioetanol lebih awal .

Pengapian bioetanol yang semakin *advance* akan menghasilkan *ignition delay* yang lebih panjang sehingga akan menghasilkan panas yang lebih tinggi oleh HoV bioetanol dan menyebabkan tekanan puncak yang dicapai sesaat sebelum terbakar menjadi lebih tinggi pula. Dengan demikian panas yang terkonversi menjadi langkah kerja daya dan diteruskan menjadi Torsi dan daya akan lebih tinggi. Pengujian *ignition timing* bahan bakar campuran juga menjelaskan bahwa semakin tinggi konsentrasi bioetanol maka *ignition timing* bahan bakar makin *advance*. Akan tetapi aplikasi bahan bakar bioetanol murni pada penelitian ini mempunyai *ignition timing* setingkat lebih rendah dari E85 dan E70.

Sebagaimana disebutkan sebelumnya bahwa pada pengujian ini tren *ignition timing* yang mengalami fluktuasi kuat pada putaran tinggi diakibatkan terjadinya ketidakstabilan pembakaran terutama pada putaran mesin 7000-8000 RPM. Kejadian tersebut mengakibatkan sulitnya melakukan pengaturan dan pengontrolan *waterbreak dynamometer* untuk mendapatkan RPM mesin yang

stasioner sesuai yang diinginkan pada pengujian. Fluktuasi nilai Torsi maksimal terhadap derajat pengapian bahan bakar cenderung semakin besar jika konsentrasi bioetanol dan putaran mesin meningkat. Hal ini diakibatkan solubilitas (kelarutan) yang rendah dan titik didih antara bioetanol dan gasolin yang sangat berbeda seiring naiknya tekanan dan temperatur dalam silinder. Fenomena tersebut akan menghasilkan pembakaran parsial dan berdampak pada ketidakstabilan pembakaran serta memicu terjadinya knocking dalam ruang bakar.

Sementara itu pengaruh perubahan perbandingan kompresi terhadap Torsi yang ditunjukkan dalam Gambar 4-23b secara jelas menggambarkan bahwa peningkatan perbandingan kompresi pada mesin pengapian percik akan meningkatkan efisiensi mesin sehingga menghasilkan daya dan Torsi mesin yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini aplikasi perbandingan kompresi 12:1 sampai 13:1 masih menunjukkan tren Torsi mesin yang lebih baik dengan semakin meningkatnya perbandingan kompresi untuk bahan bakar E85, E70 dan E50, meskipun dalam uji statistik perubahan tersebut tidak terlalu signifikan berpengaruh terhadap perubahan nilai Torsi sebagaimana dapat dilihat dalam Lampiran 11, 38 dan 65 dan Lampiran 88 – 90.

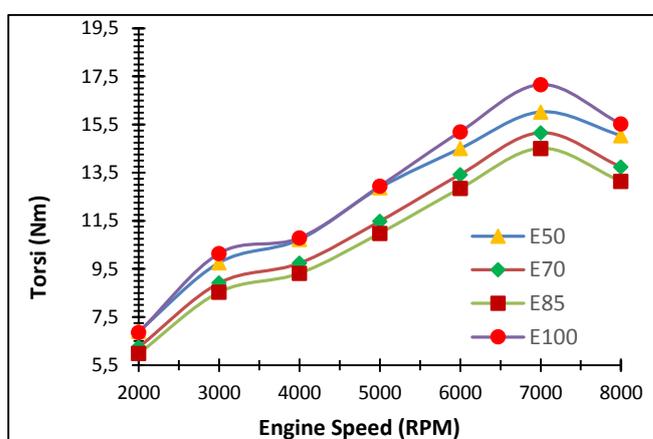


Gambar 4-24: Torsi E100 vs Pengapian (a), dan durasi injeksi vs RPM (b)

Gambar 4-24b menunjukkan volume injeksi bahan bakar bioetanol E100 selama proses pengujian. Gambar tersebut mendiskripsikan bahwa semakin tinggi putaran mesin maka volume injeksi bahan bakar semakin menurun pada nilai Torsi yang maksimal. Hal ini diakibatkan oleh kandungan energi bioetanol yang lebih rendah dibandingkan dengan gasolin (~26,9 vs ~44, Tabel 2-1) sehingga dibutuhkan

volume injeksi bahan bakar yang lebih besar pada RPM rendah. Selain itu rendahnya tekanan penguapan bioetanol menyebabkan tekanan dalam silinder menjadi lebih rendah sehingga aliran udara dan bahan bakar meningkat. Kondisi yang sama terjadi pada bahan bakar E85, E70 dan E50, dimana diketahui bahwa volume injeksi yang dibutuhkan pada putaran mesin yang sama semakin menurun seiring berkurangnya konsentrasi bioetanol dalam bahan bakar campuran.

Hal ini disebabkan nilai kalor bahan bakar campuran meningkat dengan bertambahnya gasolin dalam bahan bakar sehingga volume bahan bakar yang dibutuhkan lebih sedikit untuk menghasilkan daya yang sama. Pada Gambar 4-24 terlihat pula bahwa pada putaran tinggi terjadi fluktuasi perubahan derajat pengapian yang sangat tajam. Hal ini dipicu oleh karakteristik dan sifat kedua bahan bakar tersebut yang sangat berbeda sehingga akan berdampak pada kestabilan pembakaran. Fenomena tersebut juga terjadi pada bahan bakar E85, E70 dan E50 dengan pola yang terbentuk relatif sama, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 88-11, 89-11 dan 90-11 dalam Lampiran 88, 89 dan 90.



Gambar 4-25: Grafik Torsi vs RPM E100, E85, E70 dan E50 pada kondisi MBT

Dalam pengujian bahan bakar E50, E70 dan E85 diketahui bahwa secara kuantitas nilai Torsi akan semakin menurun dengan bertambahnya persentase bioetanol dalam bahan bakar campuran. Hal ini disebabkan nilai kalor bahan bakar campuran akan menurun dengan naiknya persentase bioetanol. Akan tetapi dengan penggunaan bioetanol E100 akan dihasilkan Torsi yang lebih besar dibandingkan dengan Torsi bahan bakar campuran gasolin-bioetanol pada putaran mesin yang sama, meskipun dibutuhkan laju aliran massa bahan bakar E100 yang jauh lebih

besar untuk mencapai titik maksimalnya, baik pada proses optimasi maupun yang diperoleh dari hasil pengujian langsung sebagaimana terlihat pada Gambar 4-25.

Pada pengujian ini pula diketahui bahwa *ignition timing* bioetanol E100 sedikit *retard* (lambat) jika dibandingkan dengan *ignition timing* E70 dan E85 pada kondisi MBT. Hasil pengujian menunjukkan Torsi maksimal secara berturut-turut adalah 17,46 Nm, 14,51 Nm, 15,48 Nm dan 16,64 Nm, untuk bahan bakar E100, E85, E70 dan E50 yang seluruhnya diperoleh pada 7000RPM serta perbandingan kompresi dan pengapian masing-masing adalah 13; 20° BTDC, 12,5;24° BTDC, 13;24° BTDC dan 13;20° BTDC. Sedangkan nilai optimasi Torsi E100 diperoleh dengan menggunakan metode respon permukaan dan non linear program adalah sebesar 15,101 Nm pada kombinasi variabel proses yaitu perbandingan kompresi sebesar 13:1, derajat pengapian bahan bakar adalah 24° BTDC dan putaran mesin sebesar 7300 RPM.

Fenomena yang terjadi dari nilai torsi keempat jenis bahan bakar baik yang diperoleh dari hasil optimasi maupun dari hasil pengujian langsung seperti yang tampak pada Gambar 4-25 dapat dijelaskan sebagai berikut; (a) Metode pengontrolan terpadu pada parameter desain, operasi dan pembakaran mesin SI-PFI melalui mapping MBT secara berjenjang untuk volume injeksi, pengapian bahan bakar dan rasio kompresi pada setiap putaran mesin sangat tepat untuk mengoptimalkan karakteristik dan sifat bahan bakar bioetanol murni E100 dibandingkan jika bioetanol bercampur bersama gasolin, sehingga menghasilkan nilai torsi yang lebih tinggi dibandingkan ketiga bahan bakar lainnya. Ketepatan proses mapping pengapian dan volume injeksi yang telah ditentukan meningkat masing-masing 25% pada volume injeksi dan 4° BTDC pada pengapian bahan bakar menghasilkan tekanan puncak rata-rata (BMEP) bioetanol lebih baik dibandingkan dengan bahan bakar campuran. Angka oktan yang tinggi, panas laten penguapan yang besar dan kecepatan perambatan api laminar bioetanol yang singkat menjadi kontributor utama dalam mapping ketiga parameter pembakaran tersebut sehingga menghasilkan daya yang lebih baik, (b) Karakteristik bahan bakar gasolin yang berbeda secara signifikan dengan bioetanol akan menimbulkan beberapa masalah dalam proses pembakarannya jika digunakan sebagai bahan bakar campuran. Daya kelarutan bahan bakar gasolin dan bioetanol yang rendah,

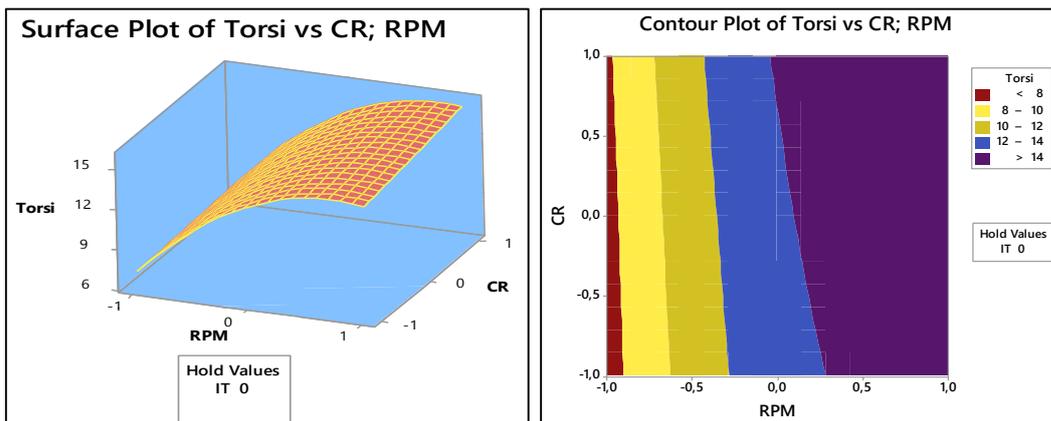
tekanan penguapan dan titik didih kedua bahan bakar yang berada pada interval yang jauh dapat menyebabkan separasi aliran dalam ruang bahan yang menghasilkan pembakaran parsial dan membentuk sisa gas campuran udara-bahan bakar, karena homogenitas campuran dalam ruang bakar sulit tercapai. Pembentukan sisa gas campuran udara dan bahan bakar yang belum terbakar pada siklus sebelumnya berpotensi memicu terjadinya *knocking* jika pada akhirnya sisa gas campuran tersebut terbakar sendiri akibat kenaikan tekanan dan temperatur pembakaran pada siklus berikutnya. Fenomena *knocking* inilah yang menyebabkan penurunan daya dari bahan bakar campuran. Sebaliknya pembakaran bahan bakar bioetanol E100 dengan kecepatan perambatan api laminar yang tinggi menyebabkan proses pembakaran lebih stabil sehingga kehilangan tekanan dapat dihindari, (c) Kondisi optimal dari pembakaran bahan bakar bioetanol E100 melalui mapping volume injeksi dan pengapian pada setiap putaran mesin lebih konsisten dibandingkan dengan bahan bakar campuran. Sementara itu, pengapian bahan bakar yang ditentukan meningkat dalam interval 4° BTDC dari pengapian standar mesin adalah tidak terlalu tepat untuk bahan bakar campuran sehingga pengapian terlalu terlambat atau cepat dari pengapian sebenarnya yang dapat memicu terjadinya *knocking* atau sebagian campuran gas udara dan bahan bakar tidak terbakar seluruhnya. Demikian halnya mapping volume injeksi dengan interval kenaikan 25% terlalu lebar sehingga tidak memberi nilai torsi optimal dari bahan bakar campuran. Hal ini disebabkan nilai kalor bahan bakar semakin meningkat dengan berkurangnya persentase bioetanol dalam campuran sehingga dengan sendirinya volume injeksi yang diperlukan semakin berkurang. Hal ini terbukti dari pengujian dimana torsi akan meningkat jika persentase bioetanol dalam campuran berkurang.

Tren torsi E100 yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol konsentrasi lebih dari 50% juga telah ditunjukkan oleh beberapa penelitian sebelumnya, antara lain MS Badwan et al (1985), M Koc et al (2009), Rodrigo et al (2011) dan lain-lain.. Penelitian Rodrigo menunjukkan daya bioetanol E100 lebih tinggi dari bahan bakar E22 pada perbandingan kompresi 10, 11 dan 12. Hal itu menandakan bahwa pada perbandingan kompresi tersebut masih dalam batas kerja bioetanol E100 sesuai angka oktan bahan bakar sehingga menghasilkan torsi dan daya yang lebih besar dari E22 meskipun konsumsi bahan

bakar spesifik E100 jauh lebih besar dari E22. Dengan demikian pengaturan perbandingan kompresi, volume injeksi bahan bakar dan pengapian bahan bakar yang tepat untuk bahan bakar bioetanol murni akan menghasilkan daya mesin lebih tinggi dibandingkan bahan bakar campuran. Dengan kata lain, angka oktan bahan bakar bioetanol yang tinggi dapat mengkompensasi nilai kalornya yang rendah jika diaplikasikan pada perbandingan kompresi yang tinggi, pengapian dan volume injeksi yang tepat sehingga menghasilkan daya yang lebih besar meskipun untuk tujuan itu diperlukan konsumsi bahan bakar yang lebih besar pula. Sementara itu, untuk E22 perbandingan kompresi tersebut terlalu tinggi, dimana pengujian tersebut dilakukan pada pengapian dan volume injeksi standar mesin dan hanya memvariasikan perbandingan kompresi. Untuk mengetahui secara pasti fenomena yang disebutkan di atas, dibutuhkan penelitian lanjutan untuk mengamati secara mikroskopik fenomena yang terjadi dalam ruang bakar dengan menggunakan beberapa alat ukur tambahan serta *software* analisis dan simulasi. Adapun nilai optimasi bahan bakar E85, E70 dan E50 dan kombinasi variabel prosesnya dapat dilihat pada Tabel 33.11, 60.11 dan 87.11 dalam Lampiran 33, 60 dan 70. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mapping durasi injeksi dan ignition timing yang tepat untuk penggunaan bahan bakar bioetanol murni akan menghasilkan nilai Torsi dan daya yang lebih besar jika dibandingkan dengan campuran gasolin dan bioetanol lebih dari 50%.

Analisis statistik dengan perangkat minitab dan non linear program digunakan untuk mengetahui kombinasi variabel proses pada kondisi optimasi dari data pengujian pembakaran E100 yang sebelumnya dilakukan melalui serangkaian proses asumsi model dan validasi kesesuaian model persamaan regresi respon Torsi yang terbentuk. Seluruh proses uji statistik yang dilakukan menyatakan bahwa model persamaan respon E100, E85, E70 dan E50 yang terbentuk adalah sesuai dan memenuhi syarat-syarat hipotesa penerimaan dengan asumsi-asumsi model dan validasi model yang dipersyaratkan. Hal tersebut juga dapat dikonfirmasi melalui nilai koefisien regresi model baik secara individu maupun secara serentak menyatakan bahwa seluruh variabel proses atau faktor (variabel bebas) berpengaruh terhadap respon pembakaran bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol 50% sampai 100% pada mesin SI-PFI satu silinder dengan nilai *P-value* < 0,05.

Hasil analisa statistik pembakaran bahan bakar E100 diketahui bahwa variabel proses yang signifikan berpengaruh signifikan terhadap model respon Torsi adalah putaran mesin (RPM) baik secara linear maupun dalam bentuk kuadrat, akan tetapi tidak signifikan berpengaruh jika RPM berinteraksi dengan variabel proses yang lain. Signifikansi pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen juga ditunjukkan oleh koefisien korelasi persamaan model. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa CR kuadrat dan kombinasi antara CR dan RPM cukup berpengaruh terhadap variasi dan perubahan nilai respon Torsi-E100 yang ditunjukkan oleh koefisien korelasi yang positif mendekati 1 (satu) meskipun tidak cukup signifikan karena nilai **P-value-nya** $> 0,05$. Dari pengujian ini pula diketahui bahwa variabel derajat pengapian (IT) tidak berpengaruh terhadap respon Torsi hampir pada semua jenis bahan bakar yang digunakan, yang hasilnya dapat dilihat pada Lampiran 8, 35 dan 62 untuk bahan bakar E85, E70 dan E50.



Gambar 4-26: Plot permukaan dan kontur Torsi E100 vs CR; RPM

Dengan analisa metode permukaan respon diperoleh plot permukaan dan kontur respon Torsi E100 dalam Gambar 4-16, 4-17 dan 4-26 yang mendiskripsikan nilai optimasi respon pada berbagai kondisi variabel faktor. Pada grafik Torsi vs RPM; IT diperoleh nilai optimum Torsi jika RPM mesin di level tinggi dan IT di level rendah sampai medium dengan CR konstan di 12.5. Sementara jika IT konstan di 20° BTDC nilai optimasi diperoleh jika RPM berada di level rendah sampai tinggi dan CR di level tinggi. Sedangkan jika kecepatan mesin konstan di 5000 RPM, nilai optimasi berada di level medium baik CR maupun IT. Analisa dan penjelasan yang sama didiskripsikan secara lengkap pada Gambar 11-1 sampai 11-3, 38-1

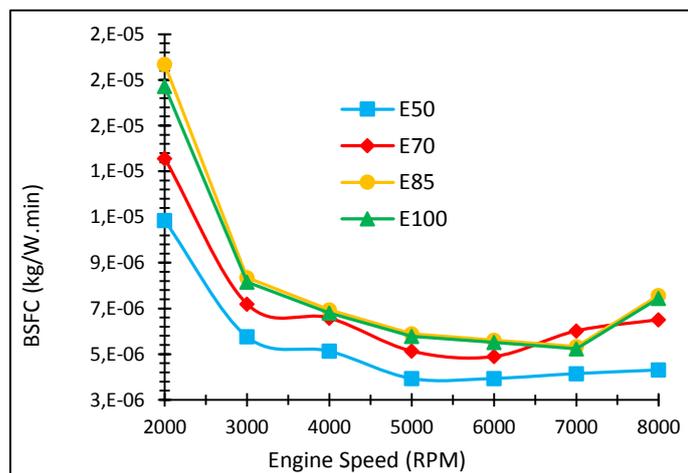
sampai 38-3 dan 65-1 sampai 65-3 dalam Lampiran 11, 38 dan 65 untuk bahan bakar E85, E70 dan E50.

4.7.2 Pengaruh variabel proses terhadap BSFC

Konsumsi bahan bakar dalam proses pembakaran adalah kuantitas laju aliran massa bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan satu satuan daya dalam setiap satuan waktu tertentu yang sering kali disebut sebagai konsumsi bahan bakar spesifik ($\frac{kg}{HP.s}$), atau dirumuskan dengan persamaan (Juan E. Tibaquirá, 2018):

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad \dots \quad (4 - 1)$$

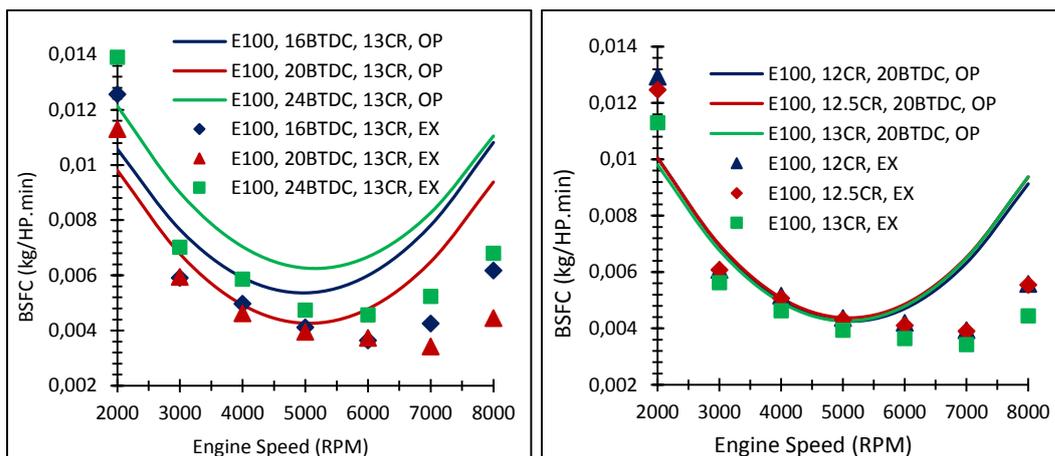
Dalam sejumlah penelitian tentang aplikasi campuran bahan bakar gasolin dan bioetanol yang telah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi bioetanol dalam campuran, laju aliran konsumsi bahan bakar akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan nilai kalor bioetanol 30% lebih kecil dibandingkan bahan bakar gasolin, sehingga dibutuhkan volume injeksi bioetanol yang lebih besar untuk menghasilkan daya mekanis yang sama dengan bahan bakar gasolin.



Gambar 4-27: Grafik BSFC vs IT; RPM bahan bakar E50 – E100

Fenomena berbeda diperoleh pada penelitian ini khususnya pada nilai konsumsi bahan bakar spesifik E100 yang nilainya relatif lebih rendah dari E85

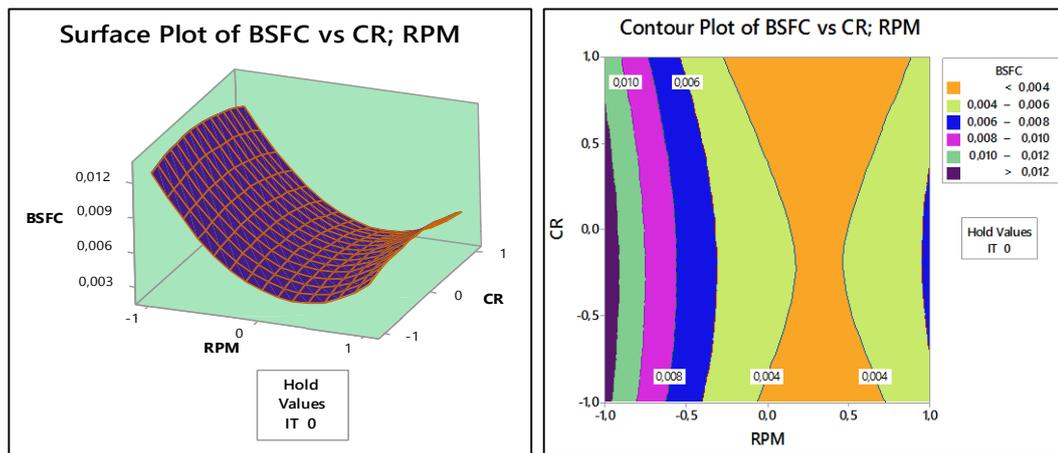
meskipun nilai kalor E85 lebih tinggi dari E100. Hasil ini membuktikan bahwa strategi pembakaran yang diterapkan pada penelitian ini lebih efektif mengeksplorasi sifat dan karakteristik bahan bakar E100 sehingga selain menghasilkan Torsi yang lebih besar dari semua bahan bakar campuran yang digunakan dalam penelitian ini, BSFC E100 juga lebih rendah dari E85, seperti yang diperlihatkan Gambar 4-27. Hasil pengujian menunjukkan bahwa secara kuantitas BSFC E100 minimum berdasarkan mapping ignition timing dan perbandingan kompresi adalah rata-rata sebesar $\frac{0,003424kg}{HP\cdot min}$ sedangkan BSFC E85 adalah sebesar $\frac{0,003437kg}{HP\cdot min}$ yang diperoleh pada 7000 RPM, perbandingan kompresi 13:1 dan pengapian 20°BTDC dan 24°BTDC. Hasil ini tentu berbeda dengan banyak hasil penelitian sebelumnya dimana diketahui bahwa BSFC E85 lebih rendah dari BSFC E100 karena kandungan energi E85 lebih besar dari E100.



Gambar 4-28: Grafik BSFC-E100 vs CR; IT; RPM hasil optimasi dan mapping

Oleh sebab itu dengan fenomena ini menjadi sebuah temuan baru yang menguntungkan untuk penggunaan bahan bakar bioetanol murni, bahwa dengan strategi pembakaran yang diterapkan pada penelitian ini sangat efektif menurunkan konsumsi bahan bakar bioetanol murni. Hal ini dimungkinkan akibat efek dari proses mapping secara berjenjang dari volume injeksi sampai ignition timing dalam kondisi MBT. Selain itu bioetanol sebagai bahan bakar tunggal dalam proses pembakaran cenderung lebih stabil dan tidak mengalami banyak gangguan seperti gesekan dan kerugian panas dibandingkan jika sebagai bahan bakar campuran dengan gasolin dimana keduanya memiliki titik didih dan RVP yang sangat kontras.

Sementara itu untuk bahan bakar E70 dan E50 mengikuti *trend* yang umum terjadi di banyak penelitian sejenis lainnya, dimana harga BSFC semakin menurun seiring berkurangnya konsentrasi bioetanol sehingga nilai kalor campuran bahan bakar meningkat dan konsumsi bahan bakar spesifik menurun sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-28. Dari hasil pengujian diperoleh nilai BSFC E70 dan E50 masing-masing adalah $\frac{0,00336kg}{HP.min}$ dan $\frac{0,00284kg}{HP.min}$ pada variabel proses masing-masing yaitu perbandingan kompresi adalah 13:1, derajat pengapian adalah 24 dan 20° BTDC serta putaran mesin adalah 7000 dan 6000 RPM. Dengan hasil ini pula diketahui bahwa derajat pengapian bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol lebih dari 50% akan semakin maju jika persentase bioetanol meningkat untuk mendapatkan konsumsi bahan bakar spesifik yang minimum.



Gambar 4-29: Plot permukaan dan kontur respon BSFC vs CR; RPM

Memperhatikan Gambar 88-6b (Lampiran 88) dan Gambar 4-24b terlihat bahwa volume injeksi bahan bakar untuk E100 dan E85 relatif sama pada putaran mesin yang sama, sementara nilai Torsi dan BSFC E100 lebih baik daripada E85. Hal ini menjadi salah satu indikasi bahwa proses pembakaran E100 lebih stabil dibandingkan E85 sehingga efisiensi energinya meningkat dan konsumsi bahan bakarnya menurun. Untuk mengetahui secara micro tentang fenomena ini serta dapat menjelaskan karakteristik pembakarannya, diperlukan penelitian lanjutan dengan peralatan pendukung yang lebih memadai. Adapun grafik hubungan volume injeksi dan torsi terhadap perubahan putaran mesin untuk bahan bakar E70 dan E50 ditunjukkan pada Gambar 89-6b dan 90-6b dalam Lampiran 89 dan 90. Pada

gambar-gambar dalam lampiran tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi bioetanol maka diperlukan volume injeksi bahan bakar yang lebih besar disebabkan nilai kalor bahan bakar yang rendah. Selain itu, semakin tinggi putaran mesin semakin menurun konsumsi bahan bakar spesifik disebabkan oleh tekanan penguapan bioetanol yang rendah semakin meningkat seiring naiknya putaran mesin sehingga proses atomisasi bahan bakar jauh lebih baik. Dalam pengujian ini diperoleh volume injeksi E70 dan E50 dalam rentang 2000 – 8000 RPM adalah 175-125%.

Gambar 4-28 menunjukkan grafik hubungan BSFC terhadap IT, CR dan RPM yang diperoleh dari hasil pengujian dan optimasi. Grafik tersebut menjelaskan bahwa pada putaran rendah BSFC-E100 meningkat karena volatilitas dan tekanan penguapan bioetanol yang rendah, sedangkan pada putaran tinggi BSFC-E100 meningkat disebabkan oleh beban mesin yang meningkat. Hal ini terjadi pada semua jenis bahan bakar yang diujikan, akan tetapi grafik yang diperoleh dari persamaan optimasi diketahui bahwa BSFC minimum dari E100 diperoleh pada putaran mesin 5000 RPM sedangkan hasil pengujian pada 7000 RPM. Demikian halnya E85, E70 dan E50 diperoleh pada putaran mesin 6000 RPM sedangkan dari hasil pengujian diperoleh pada putaran 6000-7000 RPM. Meskipun demikian nilai BSFC minimum untuk semua jenis bahan bakar hasil optimasi diperoleh pada perbandingan kompresi dan derajat pengapian bahan bakar yang sama dengan hasil pengujian. Hasil lengkapnya dapat dilihat pada Gambar 88-2, 89-2 dan 90-2 dalam Lampiran 88, 89 dan 90.

Sebagaimana diketahui bahwa konsumsi bahan bakar spesifik akan semakin menurun dengan meningkatnya perbandingan kompresi mesin, akan tetapi pada penelitian ini hal itu tidak signifikan terlihat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-28. Hal ini disebabkan interval variasi perbandingan kompresi yang diaplikasikan pada penelitian ini terlalu kecil yaitu hanya sebesar 0.5, sehingga hubungan antara perbandingan kompresi dan model respon BSFC tidak signifikan. Meskipun demikian variasi perbandingan kompresi dengan interval 0,5 akan terlihat jika konsentrasi bioetanol semakin berkurang dalam campuran sebagaimana diperlihatkan Gambar 88-2b, 89-2b dan 90-2b dalam Lampiran 88, 89 dan 90. Turunnya nilai BSFC pada perbandingan kompresi yang tinggi dimungkinkan oleh

tekanan, temperatur ruang bakar dan homogenitas campuran meningkat akibat turbulensi campuran udara dan bahan bakar yang meningkat karena mengecilnya volume ruang bakar sehingga efisiensi energi meningkat dimana BSFC yang dihasilkan akan lebih rendah.

Hasil analisis statistik dengan persamaan regresi pendugaan model respon BSFC E100 diketahui bahwa dari uji koefisiensi regresi serentak dan individu seluruh variabel faktor berpengaruh signifikan terhadap respon baik dalam bentuk linear maupun kuadrat, tetapi variabel faktor tidak berpengaruh terhadap respon BSFC-E100 jika saling diinteraksikan satu sama lain. Sementara dari hasil plot permukaan dan kontur respon (Gambar 4-29) diperoleh bahwa jika IT konstan, nilai optimum respon diperoleh antara ~5000~7300 RPM dan CR mulai dari 12 – 13. Sementara jika CR konstan, nilai optimum diperoleh pada ~5000~7300RPM dan IT sebesar 12~23° BTDC. Jika RPM konstan nilai optimum berada pada IT sebesar ~16~24° BTDC dan CR adalah 13 (Lampiran 3). Penjelasan yang sama dan gambar plot permukaan serta kontur untuk bahan bakar E85-E50 dapat dilihat dalam Lampiran 16, 43 dan 70.

Sementara itu nilai BSFC dari masing-masing bahan bakar yang diperoleh dari kondisi optimasi single respon Torsi menunjukkan hasil berbeda dari hasil pengujian. Dengan kondisi optimasi Torsi masing-masing bahan bakar diketahui bahwa BSFC meningkat jika bioetanol meningkat dalam bahan bakar yang hasil lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.27 dan Tabel 33.11, 60.11 dan 87.11 dalam Lampiran 33, 60 dan 87.

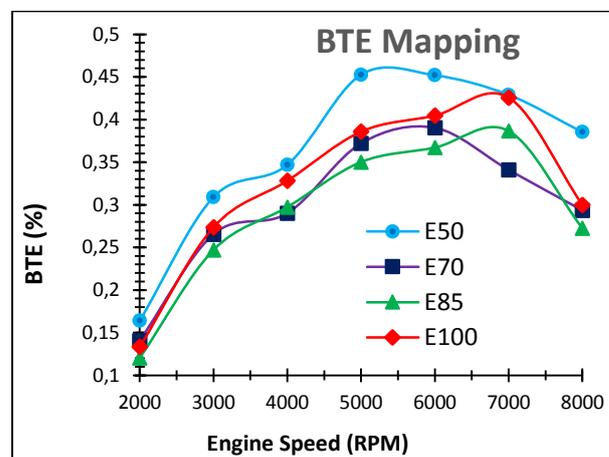
4.7.3 Pengaruh variabel proses terhadap Efisiensi Thermal (BTE)

Effisiensi thermal didefenisikan sebagai daya atau kerja yang dihasilkan dari besarnya laju pembakaran bahan bakar dalam ruang bakar, dan dirumuskan dengan persamaan (Heywood, 1988):

$$\eta_{th} = \frac{P}{\dot{m}_f \times Q_{LHV}} \quad , , , , \quad (4 - 2)$$

Persamaan (4-2) di atas mengekspresikan bahwa efisiensi thermal mempunyai hubungan yang linear dengan daya yang dihasilkan dan berbanding terbalik dengan laju aliran bahan bakar. Pernyataan tersebut ditunjukkan pula pada penelitian ini

yang hasilnya tampak pada Gambar 4-30. Pada gambar tersebut terlihat nilai BTE tertinggi dari ke-empat jenis bahan bakar diperoleh secara berturut-turut masing-masing E50, E100, E70 dan E85. Dengan hasil ini dapat diketahui bahwa strategi pembakaran yang diterapkan pada penelitian ini menghasilkan nilai yang optimal untuk pembakaran bioetanol E100 sehingga mencapai efisiensi termal yang lebih besar dari E70 dan E85 meskipun nilai kalor E100 lebih kecil dari nilai kalor kedua bahan bakar tersebut. Dengan efisiensi termal yang tinggi mengindikasikan bahwa kehilangan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran lebih rendah sehingga konversi energi panas menjadi kerja yang dihasilkan lebih besar. Nilai efisiensi termal yang tinggi menjadi salah satu indikator dan berkontribusi pada peningkatan nilai Torsi E100 sehingga nilainya lebih tinggi dari empat bahan bakar lainnya. Sementara itu dalam kondisi sebagai bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol diketahui bahwa harga efisiensi termal bahan bakar semakin berkurang jika persentase bioetanol dalam campuran bahan bakar bertambah, demikian pula sebaliknya. Kondisi tersebut sangat bergantung pada nilai kalor bahan bakar dimana kandungan energi bahan bakar akan berkurang jika konsentrasi bioetanol bertambah.

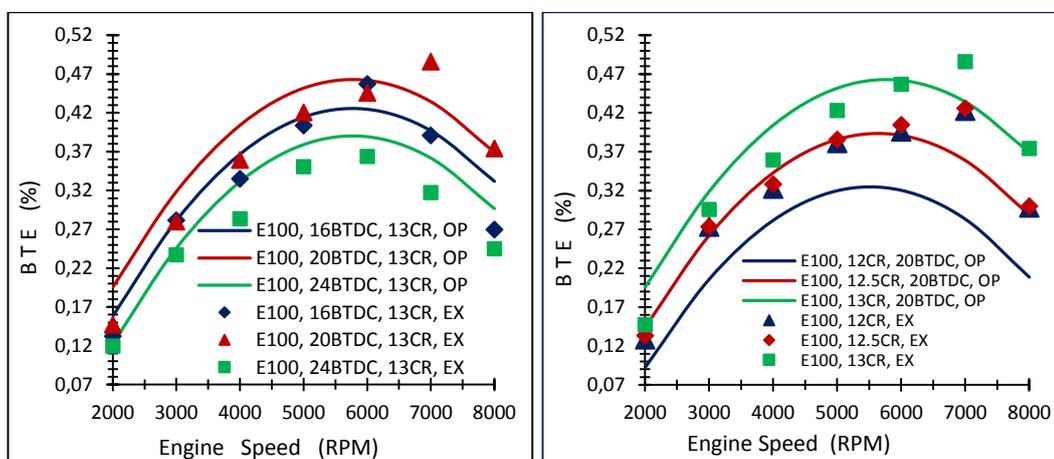


Gambar 4-30: Grafik BTE E50-E100 vs CR; IT; RPM hasil mapping

Gambar tersebut juga menjelaskan bahwa BTE semakin meningkat dengan naiknya putaran mesin dan menurun setelah mencapai putaran mesin di 5000–6000 RPM untuk semua jenis bahan bakar. Meningkatnya efisiensi thermal seiring meningkatnya putaran mesin disebabkan komposisi bahan bakar udara semakin

mendekati kondisi stoikiometri sehingga proses pembakaran tuntas dapat dicapai. Selain itu dengan meningkatkan RPM mesin maka temperatur ruang bakar meningkat dan meningkatkan volatilitas bahan bakar meningkat khususnya bahan bakar bioetanol yang mempunyai tekanan penguapan yang rendah sehingga massa bahan bakar dapat terbakar secara maksimal.

Sementara penurunan BTE yang terjadi pada putaran tinggi, selain disebabkan AFR campuran yang semakin mengecil juga disebabkan timbulnya gesekan akibatnya naiknya temperatur operasional mesin dan menimbulkan kehilangan energi. Kejadian ini dapat dikonfirmasi pada hasil sebelumnya dimana pada kondisi tersebut terjadi peningkatan konsumsi bahan bakar dan penurunan torsi serta daya pada mesin. Mapping nilai BTE terhadap variasi perbandingan kompresi dan *ignition timing* yang diperoleh dari pengujian secara berturut-turut adalah 0.4258%; 0,3866%; 0.4046%; 0.4526% masing-masing untuk bahan bakar E100, E85, E70 dan E50. Nilai-nilai tersebut diperoleh derajat pengapian bahan bakar masing-masing adalah 20, 24, 20 dan 16° BTDC untuk E100, E85, E70 dan E50.

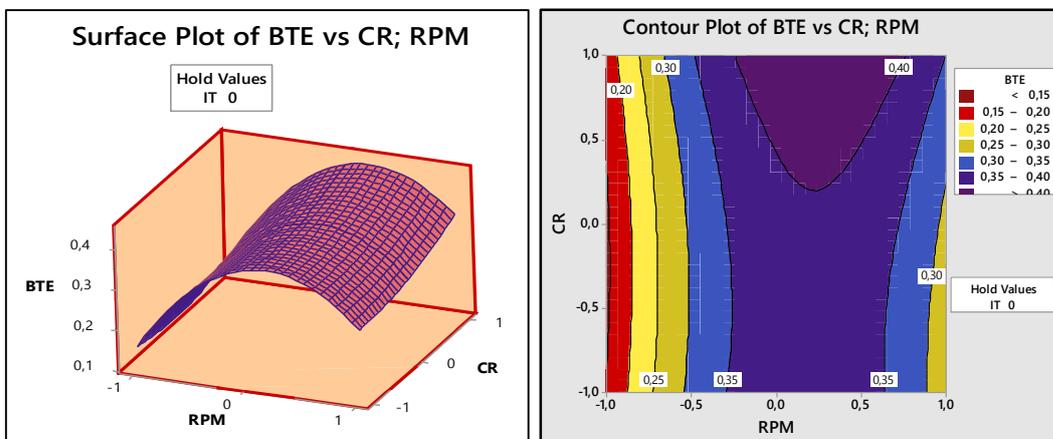


Gambar 4-31: Grafik BTE vs CR; IT; RPM E100 hasil mapping dan optimasi

Pengaruh perubahan pengapian bahan bakar terhadap campuran gasolin dan bioetanol sebagaimana terlihat dalam Gambar 4-31a. Gambar tersebut menegaskan bahwa derajat pengapian bahan bakar akan meningkat seiring bertambahnya putaran mesin untuk mencapai BTE maksimalnya. Sementara itu derajat pengapian bahan bakar dengan BTE maksimal semakin maju (*advance*) jika konsentrasi

bioetanol dalam campuran meningkat, sedangkan pengapian bioetanol E100 pada mesin SI-PFI satu silinder untuk BTE maksimalnya diperoleh pada pengapian 20° BTDC. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi bioetanol dalam gasolin maka diperlukan *ignition timing* yang semakin *advance* untuk menghasilkan efisiensi termal yang tinggi.

Dalam hubungannya dengan variasi perbandingan kompresi terhadap efisiensi thermal E100 diperlihatkan pada grafik Gambar 4-31b. Grafik tersebut menjelaskan bahwa harga BTE E100 maksimal dihasilkan pada perbandingan kompresi yang terbesar, yaitu 13, demikian halnya untuk bahan bakar E85, E70 dan E50. Hal ini terjadi karena dengan meningkatnya perbandingan kompresi maka proses transfer kalor dalam ruang bakar lebih efektif sehingga menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi sebagaimana didiskripsikan pada Persamaan (2-2). Grafik hubungan BTE terhadap perubahan perbandingan kompresi, derajat pengapian dan putaran mesin untuk bahan bakar E50, E70 dan E85 dapat dilihat pada Gambar 88-6, 89-6 dan 90-6 dalam Lampiran 88, 89 dan 90.



Gambar 4-32: Plot permukaan dan kontur BTE vs CR; RPM E100

Hasil analisa optimasi BTE-E100 menggunakan metode respon permukaan diketahui bahwa daerah optimasi BTE-E100 jika IT konstan pada 20° BTDC adalah di daerah CR antara 12.25 – 13 dan pada putaran mesin antara 5000 – 7000 RPM (Gambar 4-32b). Akan tetapi jika pengujian dilakukan pada perbandingan kompresi yang konstan (12.5), maka nilai optimum lokal BTE-E100 berada di daerah IT sebesar 12 – 22° BTDC dan putaran mesin sebesar 4000 – 7000 RPM.

Sedangkan jika putaran mesin konstan pada 5000 RPM, maka nilai optimasi lokal respon BTE-E100 diperoleh pada perbandingan kompresi antara 12,75 – 13 dan derajat pengapian bahan bakar antara 15 – 23° BTC sebagaimana terlihat pada Gambar 4-2 dan Gambar 4-3 dalam Lampiran 4. Dengan analisis yang sama diperoleh kombinasi variabel proses yang menghasilkan nilai optimasi lokal BTE untuk bahan bakar masing-masing E85, E70 dan E50 yang ditunjukkan Gambar 21-2 dan 21-3, Gambar 48-2 dan 48-3 serta Gambar 75-2 dan 75-3 dalam Lampiran 21, 48 dan 75.

Adapun hasil analisis menggunakan program non linear LINGO menunjukkan nilai optimasi lokal BTE untuk masing-masing bahan bakar dan diberikan pada Tabel 4.33 di bawah ini:

Tabel 4.33: Optimasi Lokal BTE E100, E85, E75 dan E50

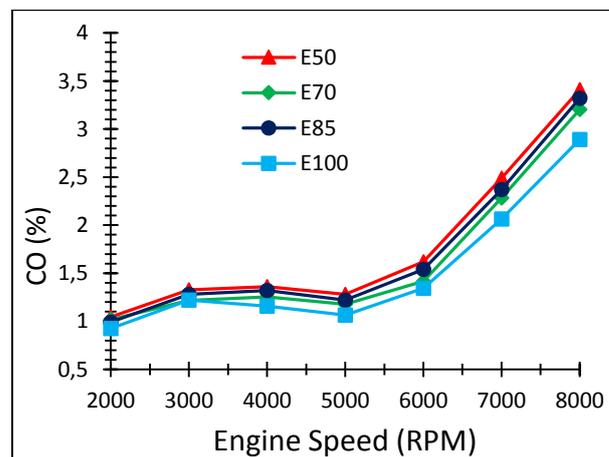
Bahan Bakar	BTE (%)	Kombinasi Variabel Proses		
		CR	IT	RPM
E100	39,36	12.5	20	5640
E85	37.54	13	24	5520
E70	38,13	12.5	20	5750
E50	41,83	12.5	20	5000

Tabel 4.33 menunjukkan bahwa optimasi lokal BTE untuk setiap jenis bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol diperoleh rata-rata pada putaran mesin 5500 RPM, perbandingan kompresi adalah 12.5 dan derajat pengapian bahan bakar adalah 20BTDC yang terkonfirmasi juga melalui grafik optimasi lokal BTE Lampiran 88, 89 dan 90 serta Tabel 22.2, Tabel 49.2 dan Tabel 76.2. Sementara itu dengan optimasi single respon dengan respon sasaran Torsi optimum untuk setiap jenis bahan bakar diperoleh masing-masing nilai BTE E100, E85, E70 dan E50 adalah **28.64%**, **31.72%**, **32.80** dan **32,05%** sebagaimana disebutkan dalam Tabel 33.11, Tabel 60.11 dan Tabel 87.11 dalam Lampiran 33, 60 dan 87.

4.7.4 Pengaruh variabel proses terhadap CO

Salah satu keunggulan bahan bakar bioetanol dibandingkan bahan bakar fosil yang paling menonjol adalah emisi hidrokarbon yang dihasilkan jauh lebih rendah. Dalam banyak penelitian penggunaan bahan bakar bioetanol 50-100% dapat menurunkan emisi karbon monoksida (CO) 40-70% dan emisi hidrokarbon

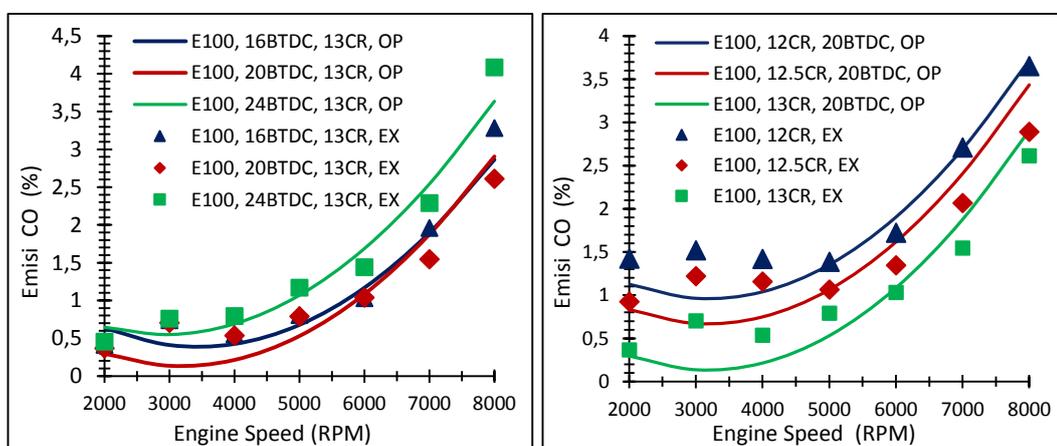
(HC) turun 18-40% dibandingkan dengan bahan bakar gasolin (Paloboran, 2017). Sebagai bahan bakar *oxigenate* kandungan oksigen yang terdapat dalam bioetanol kurang lebih sebesar 35% sangat berperan dalam membuat campuran dalam kondisi stoikiometri sehingga proses pembakaran tuntas dapat dicapai dan menghasilkan emisi hidrokarbon yang rendah. Dengan kandungan oksigen yang besar dalam bioetanol sehingga AFR stoikiometri bioetanol lebih kecil dibandingkan dengan gasolin (~8.9 vs ~15.1, Tabel 2.1), dimana dalam banyak penelitian oksigen yang ada pada bioetanol lebih efektif menurunkan emisi karbon dibandingkan dengan suplai udara dari luar. Dengan kondisi itulah sehingga semakin besar konsentrasi bioetanol dalam campuran maka emisi karbon menurun demikian pula sebaliknya, sebagaimana hasil penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 4-33. Grafik Gambar 4-33 juga menunjukkan emisi CO E85 sedikit lebih tinggi dari E70. Hal ini mengindikasikan proses mapping volume injeksi untuk bahan bakar E85 kurang tepat, dimana campuran yang diperoleh cenderung lebih kaya sehingga sebagian campuran tidak terbakar dan membentuk emisi CO. Analisa ini diperkuat oleh hasil analisa konsumsi bahan bakar spesifik dimana nilai BSFC E85 lebih tinggi dibanding E100 terutama pada RPM rendah meskipun nilai kalor E100 lebih rendah dari E100.



Gambar 4-33: Grafik emisi CO vs RPM hasil mapping MBT

Sementara itu pengaruh perubahan derajat pengapian bahan bakar terhadap produksi emisi karbon monoksida bahan bakar E100 ditunjukkan pada Gambar 4-34a. Grafik tersebut mendiskripsikan bahwa emisi CO-E100 minimum rata-rata

diperoleh pada derajat pengapian bahan bakar sebesar 20° BTDC. Grafik tersebut juga memperlihatkan bahwa emisi CO semakin menurun dengan naiknya putaran mesin sampai 5000 RPM. Hal ini dimungkinkan karena proses atomisasi bioetanol yang makin baik yang diikuti oleh volatilitas bioetanol yang meningkat seiring naiknya temperatur silinder. Sedangkan menjelang puncak putaran mesin, emisi CO meningkat secara gradual disebabkan AFR semakin menurun atau kondisi campuran semakin kaya (*rich*) dengan meningkatnya putaran mesin sehingga ada sebagian massa campuran bahan bakar yang tidak terbakar. Hal ini dapat dikonfirmasi pada nilai BSFC, dimana pada kondisi yang sama terlihat konsumsi bahan bakar yang semakin meningkat.

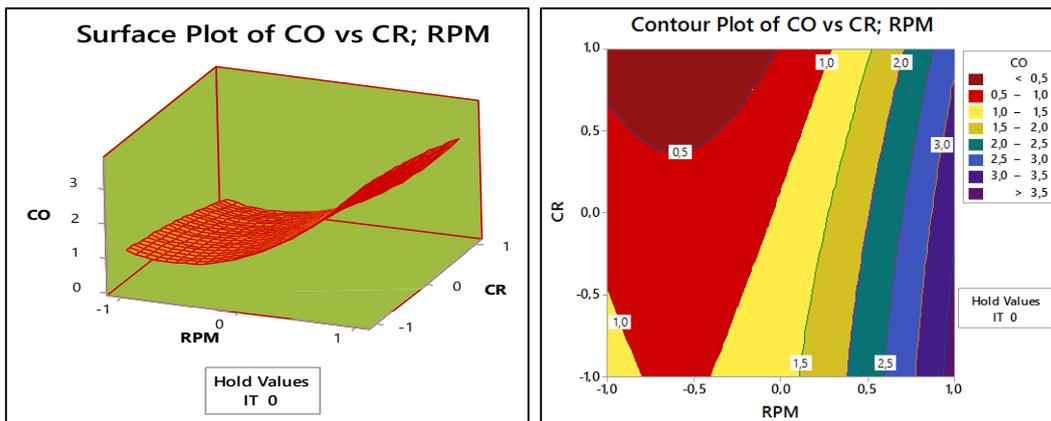


Gambar 4-34: Grafik emisi CO-E100 vs RPM; CR; IT hasil optimasi dan mapping

Pada pengujian bahan bakar E85, E70 dan E50 terlihat bahwa nilai emisi CO minimum diperoleh pada pengapian bahan bakar sebesar 24° BTDC untuk ketiga bahan bakar tersebut. Hasil ini mengungkapkan bahwa derajat pengapian bahan bakar campuran bahan bakar gasolin dan bioetanol jauh lebih *advance* (maju) dibandingkan pengapian bahan bakar gasolin. Hasil-hasil analisa emisi CO untuk bahan bakar E85, E70 dan E50 selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 88-4a, 89-4a dan 90-4a dalam Lampiran 88, 89 dan 90.

Adapun pengaruh variasi perbandingan kompresi terhadap emisi CO-E100 ditunjukkan pada Gambar 4-34b. Hasil yang diperoleh dari proses pengujian dan optimasi membuktikan bahwa aplikasi perbandingan kompresi yang tinggi untuk pembakaran bioetanol menghasilkan proses pembakaran sempurna yang salah satunya ditandai dengan produksi emisi CO yang rendah. Grafik yang diperoleh

dari proses optimasi menunjukkan bahwa variasi perbandingan kompresi berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan nilai respon emisi CO untuk semua jenis bahan bakar. Hasil tersebut secara jelas dinyatakan dalam model persamaan regresi respon CO pada semua jenis bahan bakar. Analisa lengkap mengenai hal tersebut, dapat dilihat pada Gambar 88-4b, 89-4b dan 90-4b dalam Lampiran 88, 89 dan 90 untuk bahan bakar E85, E70 dan E50.



Gambar 4-35: Plot permukaan dan kontur CO E100 vs CR; RPM

Sementara itu dari hasil analisa dengan metode permukaan respon nilai optimasi emisi CO diperoleh pada kondisi kombinasi variabel proses yaitu perbandingan kompresi pada daerah antara 12.75 – 13 dan putaran mesin antara 2000 – 5000 RPM jika pengapian bahan bakar ditetapkan konstan di 20° BTDC (Gambar 4-35). Sedangkan jika CR ditetapkan pada nilai konstan 12.5 daerah optimasinya berada pada IT daerah antara 16~23° BTDC dan putaran mesin antara 2000–5000 RPM. Adapun jika putaran mesin ditentukan nilai konstantanya adalah 5000 RPM, maka daerah optimasi emisi CO-E100 berada pada daerah *ignition timing* adalah di antara ~17 ~22° BTDC dan CR adalah 13:1, sebagaimana terlihat pada Gambar 5-1b, Gambar 5-2b dan Gambar 5-3b dalam Lampiran 5. Analisa yang sama untuk optimasi emisi CO bahan bakar E85, E70 dan E50 dapat dilihat pada Gambar 26-1 sampai Gambar 26-3, Gambar 53-1 sampai Gambar 53-3 dan Gambar 80-1 sampai Gambar 80-3 dalam Lampiran 26, 53 dan 80.

Hasil optimasi lokal respon CO-E100 dengan menggunakan program *non linear LINGO* menghasilkan nilai emisi karbon monoksida sebesar 0,65% pada kombinasi variabel proses yaitu CR adalah 13, derajat pengapian adalah 20° BTDC

dan putaran mesin adalah 5000 RPM, sedangkan hasil optimasi lokal emisi CO untuk bahan bakar E85, E70 dan E50 diberikan pada tabel 4.34 di bawah ini:

Tabel 4.34: Optimasi Lokal CO E85, E75 dan E50

Bahan Bakar	CO (%)	Kombinasi Variabel Proses		
		CR	IT	RPM
E85	0,74	13	20	5000
E70	0,69	13	20	5000
E50	0,76	13	20	5000

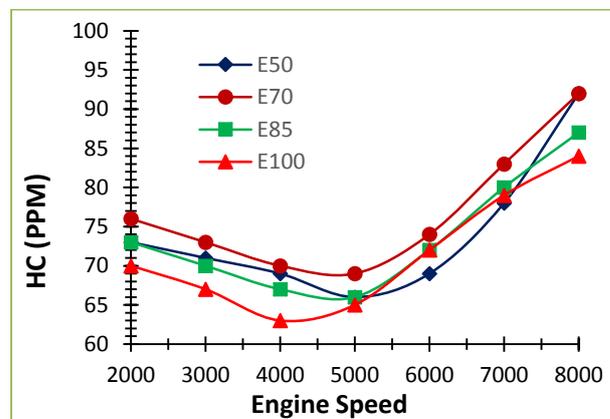
Hasil Tabel 4.34 menjelaskan bahwa emisi CO menurun jika konsentrasi bioetanol meningkat, dan hasil optimasinya menunjukkan bahwa emisi optimum CO diperoleh pada kombinasi variabel proses yang sama. Proses dan hasil analisa yang diperoleh pada Tabel 4.34 dapat dilihat pada Tabel 27.2, Tabel 54.2 dan Tabel 81.2 dalam Lampiran 27, 54 dan 81. Sedangkan hasil optimasi single respon dengan target utama Torsi optimum untuk bahan bakar E100, E85, E70 dan E50 adalah 2.29%, 2.61%, 3.56% dan 3.51% sebagaimana proses analisisnya ditunjukkan pada Tabel 33.11, Tabel 60.11 dan Tabel 87.11 dalam Lampiran 33, 60 dan 87.

4.7.5 Pengaruh variabel proses terhadap HC

Tingginya produksi emisi HC dalam pembakaran, bukan saja disebabkan karena campuran bahan bakar tidak berada dalam kondisi stoikiometri yang menyebabkan bahan bakar tidak teroksidasi dengan baik sehingga memicu terjadinya kegagalan pembakaran. Kegagalan pembakaran dapat pula disebabkan oleh gangguan pada sistem pengapian, misalnya pada kabel busi, koil dan busi yang tidak terstandar sehingga tidak dapat membangkitkan dan menghantarkan arus listrik dengan baik sebagai pemantik api di ruang bakar. Selain itu, pengaturan pengapian bahan bakar yang terlalu mundur atau maju mengakibatkan kegagalan pembakaran sehingga tekanan kompresi ruang bakar akan menurun.

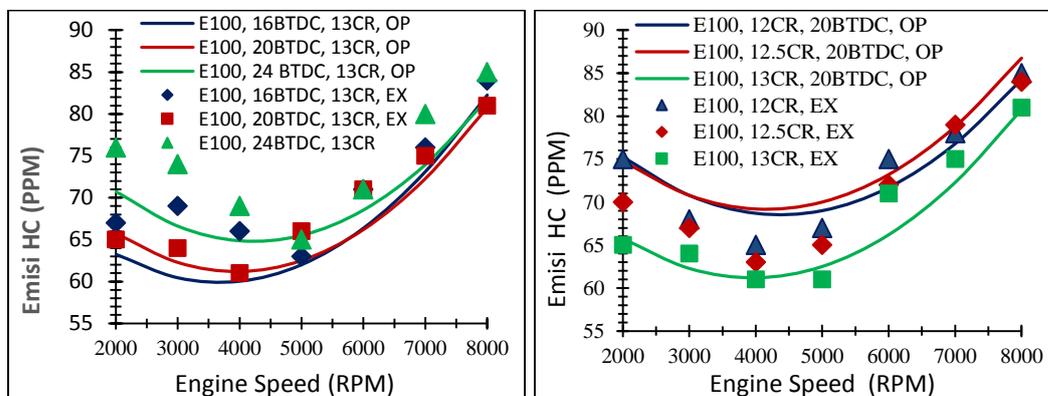
Pernyataan yang disebutkan di atas dibuktikan dalam Gambar 4-36 yang menampilkan pengaruh mapping durasi injeksi dan pengapian terhadap emisi HC bahan bakar E100, E85, E70 dan E50 pada variasi putaran mesin. Gambar tersebut menunjukkan bahwa meskipun secara kuantitatif komposisi oksigen dalam bahan bakar E70 lebih tinggi dibandingkan E50, tetapi hasil yang diperoleh dari pengujian menunjukkan emisi HC-E70 relatif lebih tinggi dari E50. Kondisi ini membuktikan

mapping pengapian bahan bakar yang diaplikasikan pada penelitian ini paling tidak sesuai untuk bahan bakar E70 dalam hal mengurangi produksi emisi HC. Meskipun demikian secara umum penambahan bioetanol ke dalam gasolin berdampak pada penurunan emisi HC pada pengapian dan perbandingan kompresi yang sama. Pada gambar yang sama diperlihatkan emisi HC untuk semua jenis bahan bakar cenderung menurun dengan semakin meningkatnya putaran mesin. Hal ini salah satunya dimungkinkan oleh turbulensi campuran udara dan bahan bakar meningkat dengan naiknya RPM mesin sehingga menghasilkan produk pembakaran yang lebih baik.



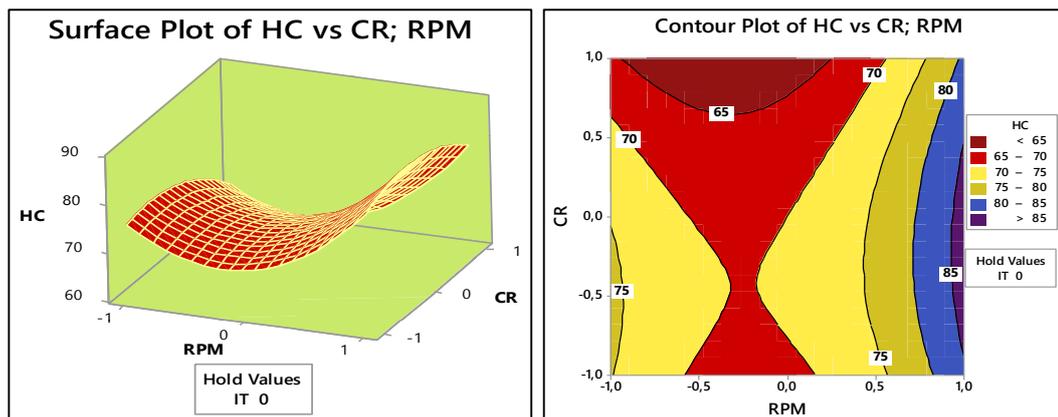
Gambar 4-36: Grafik emisi HC E100 – E50 vs CR; IT; RPM hasil mapping MBT

Pengaruh perubahan pengapian bahan bakar E100 terhadap emisi hidrokarbon ditampilkan pada Gambar 4-37a. Pada gambar tersebut terlihat pengapian dengan emisi HC minimum dihasilkan pada 20° BTDC pada putaran mesin 6000 – 8000 RPM, sedangkan pada putaran mesin 2000-5000 RPM emisi minimum diperoleh pada 16° BTDC sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-37a.



Gambar 4-37: Grafik emisi HC E100 vs RPM; CR; IT hasil mapping dan optimasi

Hasil tersebut menunjukkan bahwa emisi HC akan semakin menurun jika pembakaran bahan bakar bioetanol dan campuran gasolin-bioetanol dilakukan lebih awal, terutama jika putaran mesin semakin meningkat. Hal tersebut diperoleh dari data pengujian dan hasil analisis optimasi untuk bahan bakar E85, E70 dan E50 yang menunjukkan kecenderungan yang sama dimana emisi HC minimumnya diperoleh pada pengapian 20, 20 dan 24° BTDC. Sementara itu efek perubahan perbandingan kompresi dari 12:1 ke 12.5 tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon emisi HC untuk semua jenis bahan bakar. Meskipun demikian nilai emisi HC minimum untuk semua jenis bahan bakar diperoleh pada perbandingan kompresi 13:1, baik dari hasil pengujian maupun dari analisis optimasi. Hasil dan proses analisa pengujian bahan bakar E85, E70 dan E50 dapat dilihat pada Gambar 88-10, 89-10 dan 90-10 dalam Lampiran 88, 89 dan 90.



Gambar 4-38: Plot permukaan dan kontur emisi HC E100 vs CR; RPM

Analisis optimasi dengan metode permukaan respon memperlihatkan bahwa daerah optimasi emisi HC E100 akan dicapai pada putaran mesin antara 2000-6000 RPM dan CR adalah 13:1 jika pengapian konstan pada 20° BTDC (Gambar 4-38). Sedangkan jika CR mesin ditetapkan pada 12.5, daerah optimumnya diperoleh pada putaran mesin antara 2000–5000 RPM dan pengapian antara 12 – 20° BTDC. Adapun jika putaran mesin konstan pada 5000 RPM daerah optimasi HC diperoleh pada perbandingan kompresi 13:1 dan pengapian bahan bakar sebesar 12–20° BTDC. Dengan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa daerah optimum emisi HC E100 diperoleh pada RPM adalah 2000–5000, pengapian bahan bakar adalah 12–20° BTDC dan perbandingan kompresi sebesar 13.

Oleh sebab itu memajukan pengapian bahan bakar sampai 24° BTDC akan memperbesar emisi HC untuk bahan bakar E100. Penjelasan dan analisa yang sama untuk E85, E70 dan E50 dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 31, Gambar 58 dan Gambar 85 dalam Lampiran 6, 31, 58 dan Lampiran 85.

Sementara hasil optimasi lokal dengan perangkat program *non linear* LINGO menghasilkan emisi HC dan kombinasi variabel proses dari setiap bahan bakar sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 4.35 sebagai berikut:

Tabel 4.35: Optimasi Lokal emisi HC E100, E85, E75 dan E50

Bahan Bakar	HC (ppm)	Kombinasi Variabel Proses		
		CR	IT	RPM
E100	62,5	13	20	5000
E85	68,3	13	20	5000
E70	65,5	13	20	5000
E50	64,6	13	24	5000

Hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.35 menjelaskan bahwa pada kondisi optimasi lokal emisi HC minimum pembakaran bahan bakar bioetanol baik sebagai campuran maupun bioetanol murni dihasilkan pada perbandingan kompresi maksimum dan putaran mesin serta pengapian bahan bakar menengah. Hasil pada tabel tersebut juga memperlihatkan kecenderungan emisi HC menurun dengan naiknya konsentrasi bioetanol. Sementara itu dari hasil optimasi single respon dengan Torsi sebagai target utama diperoleh hasil emisi HC untuk bahan bakar E100, E85, E70 dan E50 adalah 73.7ppm, 68.3ppm, 65.5ppm dan 64,6ppm. Hasil-hasil ini dapat dilihat pada Lampiran 33, 60 dan 87.

4.8 Persamaan Optimasi Respon Pengujian

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa persamaan regresi respon yang dihasilkan pada pengujian ini diperoleh dengan bantuan perangkat lunak minitab 17. Aplikasi dari persamaan tersebut digunakan untuk menggambarkan pengaruh laju perubahan variabel faktor terhadap respon optimum setiap jenis bahan bakar. Sedangkan satu titik optimum respon yang menyatakan kombinasi variabel faktor diperoleh dari *software non-linear program (LINGO)*, yang mana dengan memasukkan sintak persamaan ke program. Sebelum memasukkan sintak persamaan ke dalam program, terlebih dahulu dilakukan uji statik untuk mengetahui

variabel faktor dan kombinasi variabel faktor yang signifikansi berpengaruh terhadap respon baik secara linear, kuadrat maupun interaksi antar faktor terhadap respon sebagaimana telah dilakukan di atas. Variabel faktor dan hubungan interaksi antar faktor yang dinyatakan signifikan berpengaruh secara statistik kemudian dimasukkan ke dalam program sebagai sintak persamaan.

Memperhatikan persamaan optimasi yang dihasilkan untuk satu jenis respon yang sama dari masing-masing bahan bakar dimana melibatkan interaksi variabel faktor yang berbeda, dapat disebabkan oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Jenis atau komposisi bahan bakar bukan merupakan salah satu variabel faktor dalam penelitian ini, sehingga bentuk persamaan yang dihasilkan pada jenis respon yang sama akan berbeda karena komposisi bahan bakar yang digunakan juga berbeda
2. Perbandingan kompresi mesin dengan kondisi MBT pada setiap putaran mesin berbeda untuk setiap jenis bahan bakar, sehingga level signifikansi pengaruh perbandingan kompresi terhadap respon untuk setiap jenis bahan bakar akan berbeda.
3. *Ignition timing* bahan bakar dengan kondisi MBT pada setiap putaran mesin berbeda untuk setiap jenis bahan bakar, sehingga level signifikansi pengaruh pengapian bahan bakar terhadap respon setiap jenis bahan bakar akan berbeda.
4. Volume injeksi bahan bakar dengan kondisi MBT pada setiap putaran mesin berbeda untuk setiap jenis bahan bakar, sehingga level signifikansi pengaruh volume injeksi terhadap respon untuk setiap jenis bahan bakar akan berbeda.

Akan tetapi kondisi optimum masing-masing jenis bahan bakar menunjukkan *tren* respon yang umum terjadi berdasarkan konsentrasi bioetanol yang ada dalam campuran. Sementara itu, untuk memberikan pengertian fisik dari setiap model persamaan regresi optimasi respon dapat dilakukan dengan menjelaskan salah satu model regresi respon E100 sebagai berikut:

$$\text{HC} = 70,000 - 3,250 \text{ CR} + 1,750 \text{ IT} + 6,000 \text{ RPM} - 4,250 \text{ CR} * \text{CR} + 10,750 \text{ RPM} * \text{RPM} - 2,000 \text{ IT} * \text{RPM}$$

Persamaan di atas mengandung pengertian sebagai berikut (Montgomery, 2012; Sudjana, 2012);

1. Konstanta sebesar 70.000 menunjukkan bahwa jika variabel faktor perbandingan kompresi, *ignition timing* dan RPM mesin konstan, maka rata-rata emisi HC yang dihasilkan dari pembakaran E100 sebesar 70.000ppm.
2. Koefisien regresi CR sebesar 3.250 menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu konstanta pada variabel CR akan menurunkan emisi HC sebesar 3.250ppm. Koefisien regresi bernilai negatif menunjukkan bahwa semakin tinggi perbandingan kompresi mesin, maka emisi HC akan semakin menurun.
3. Koefisien regresi *ignition timing* sebesar 1.750 menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu konstanta pada variabel *ignition timing* akan meningkatkan emisi HC sebesar 1.75ppm. Koefisien regresi bernilai positif menunjukkan bahwa semakin maju pengapian bahan bakar, maka emisi HC akan semakin meningkat
4. Koefisien regresi RPM mesin sebesar 6.000 menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu konstanta pada variabel RPM mesin akan meningkatkan emisi HC sebesar 6ppm. Koefisien regresi bernilai positif menunjukkan bahwa semakin tinggi RPM mesin, maka emisi HC akan semakin meningkat.

4.9 Bahan bakar gasolin-bioetanol dan emisi aldehida

Sebagaimana diketahui penggunaan bahan bakar bioetanol pada mesin SI-PFI akan memberi dampak yang sangat signifikan terhadap penurunan emisi karbon sehingga bioetanol menjadi salah satu pilihan energi alternatif dalam menanggulangi peningkatan efek rumah kaca yang dipicu oleh tingginya konsentrasi emisi karbon dari pembakaran bahan bakar fosil. Akan tetapi, di saat yang sama penggunaan bahan bakar bioetanol, baik sebagai bahan bakar murni maupun sebagai bahan bakar campuran bersama gasolin akan menghasilkan emisi aldehida sebagai emisi utama bahan bakar bioetanol yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan bersifat karsinogen (pemicu penyakit kanker). Menurut Juan E. Tibaquirá (2018) emisi aldehida yang dihasilkan dari bahan bakar gasolin dan bioetanol berdampak pada tiga hal sebagai sebuah siklus, yaitu gangguan kesehatan manusia, penurunan kualitas ekosistem dan kerusakan sumber daya alam.

Gangguan pada kesehatan manusia yang ditimbulkan oleh emisi aldehida dapat berupa penyakit pernapasan (asma) dan memicu semakin aktifnya sel-sel kanker, gangguan kesehatan disebabkan oleh radiasi ionisasi gas aldehida,

penipisan lapisan ozon dan perubahan iklim akibat naiknya temperatur bumi. Sementara itu penurunan kualitas ekosistem digambarkan dengan besarnya persentase spesies tumbuhan dan hewan yang hilang per satuan luas akibat beban lingkungan, meningkatnya toksisitas dan keasaman lahan, serta transformasi penggunaan lahan. Sedangkan kerusakan sumber daya alam disebabkan oleh ekstraksi bahan bakar fosil dan sumber daya mineral lainnya yang dinyatakan dengan besarnya kebutuhan energi per satuan bahan bakar fosil atau sumber mineral lainnya.

Tabel 4.36: Perbandingan efek E0 dan E20 terhadap kesehatan dan lingkungan

Categories	Subcategories	Gasolin	E20	Reduct
Damage to human health	Carcinogenic effects	4.13×10^{-21}	4.16×10^{-21}	-1%
	Respiratory effects due to organic emission	4.78×10^{-21}	5.38×10^{-12}	-12%
	Respiratory effects due to inorganic emissions	6.49×10^{-2}	6.39×10^{-2}	1%
	Damage to human health caused by climate change	3.50×10^{-3}	3.52×10^{-3}	-1%
Damage to ecosystem quality	Toxic emissions	2.82×10^{-46}	2.72×10^{-46}	4%
	Acidification and eutrophication	1.25×10^{-2}	1.24×10^{-2}	1%
Damage to resources	Extraction of minerals and fossil fuels	1.03×10^{-1}	8.99×10^{-2}	12%
	Fuel processing	3.57×10^{-2}	3.06×10^{-2}	14%

Sumber : Juan E. Tibaquirá (2018)

Lebih jauh Tibaquirá mengkuantifikasi perbandingan penggunaan gasolin dan E20 terhadap peningkatan gangguan kesehatan manusia, penurunan kualitas ekosistem dan lingkungan serta kerusakan sumber daya alam dengan menggunakan metode Eco-Indikator 99 dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.36. Dari Tabel 4.36 terlihat bahwa dampak terbesar penggunaan E20 dibandingkan gasolin adalah terjadinya peningkatan gangguan kesehatan manusia terutama pada bagian pernapasan akibat emisi organik. Sementara penggunaan E20 berkontribusi positif terhadap perbaikan lingkungan dan kelestarian sumber daya alam daripada gasolin.

Tabel 4.36 memberikan gambaran yang lebih nyata tentang dampak penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar, yang tidak saja berpengaruh positif

terhadap ekosistem dan lingkungan tetapi di saat yang sama mendatangkan ancaman yang serius bagi kesehatan manusia. Dengan gambaran ini pula, memberikan informasi bahwa penggunaan bioetanol dalam konsentrasi yang lebih tinggi akan meningkatkan laju gangguan kesehatan pada manusia. Pada bagian inilah diperlukan kajian dan penelitian lebih lanjut untuk mengurangi dampak negatif penggunaan bioetanol terhadap kesehatan.

Sebuah kajian yang dilakukan oleh Green (2008) mengungkapkan secara komprehensif dampak negatif yang ditimbulkan dari penggunaan bioetanol sebagai bahan bakar yang sejalan dengan penelitian Tibaquira, yaitu:

- a) Bioetanol dan emisi gas rumah kaca; campuran bioetanol dan gasolin ternyata menghasilkan lebih banyak jenis gas emisi yang lebih kuat meningkatkan pembentukan gas rumah kaca dibandingkan gas karbon dioksida yang dihasilkan oleh gasolin. Hal ini didukung oleh Paul Crutzen dan Jan F. Kreider professor dan ilmuwan kimia pemenang nobel dari Colorado, menyatakan bahwa siklus CO₂ yang dihasilkan dari *bioetanol* yang terbuat dari jagung lebih berbahaya dari gasolin dan solar dalam hal pembentukan gas rumah kaca.
- b) Bioetanol dan polusi udara; meskipun penggunaan bioetanol mengurangi pembentukan gas rumah kaca tetapi pada saat yang sama meningkatkan emisi kimia yang menghasilkan ozon yang menjadi polutan udara konvensional dan berdampak pada gangguan pernapasan bahkan kematian.
- c) Bioetanol dan konsumsi air bersih; hampir semua bentuk produksi energi mengkonsumsi banyak air, misalnya pemurnian minyak bumi membutuhkan tidak kurang 1–2,5 galon air per galon produk olahan. Kreider dan Curtiss memperkirakan pemurnian awal satu galon ethanol dari jagung membutuhkan 35 galon air. Di bagian lain, Kreider dan Curtiss menyatakan bahwa dibutuhkan tiga kali lebih banyak air dibanding proses pemurnian untuk menumbuhkan jagung yang menghasilkan satu galon etanol. Dengan demikian *dibutuhkan 140 gallon air untuk menghasilkan 1 gallon bioetanol jagung*. Hal yang sama juga terjadi pada bioetanol dari bahan selulosa yang membutuhkan air rata-rata 146-149 gallon air untuk setiap produksi 1 gallon bioetanol.
- d) Bioetanol dan polusi air; menurut National Academy of Science (NAS) USA, *tanaman jagung membutuhkan lebih banyak pupuk dan pestisida dari makanan*

dan tumbuhan bio-fuel lainnya. Dengan demikian limpasan air yang banyak dari proses pengolahan jagung menjadi bioetanol akan mencemari sumber-sumber air dan mengurangi cadangan air untuk irigasi.

- e) Bioetanol dan penggunaan (konversi) lahan; produksi bioetanol dari jagung yang besar tentu saja membutuhkan lahan pertanian yang sangat besar pula. Sebagai gambaran bahwa, untuk memproduksi 15 milyar gallon bioetanol di USA membutuhkan sekitar 12,8 juta hektar lahan pertanian. Jika kondisi ini dikaitkan dengan kebutuhan air bersih dan polusi air, maka polusi air akan semakin meluas dan cadangan air bersih akan semakin menurun.

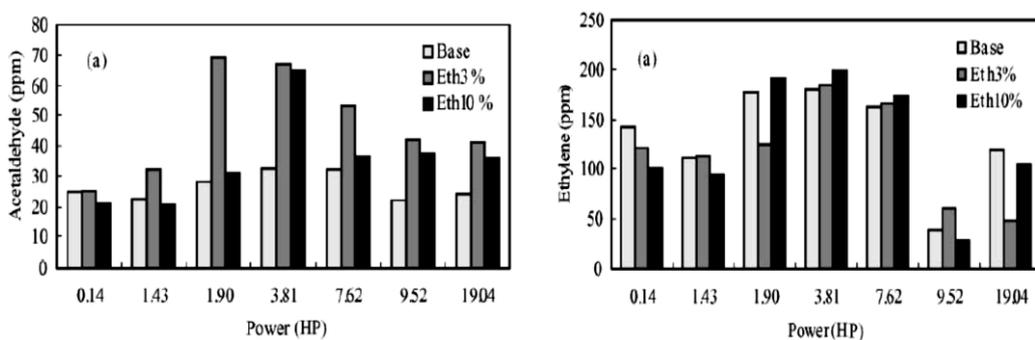
Dalam banyak penelitian emisi aldehida relatif meningkat jika persentase bioetanol dalam gasolin semakin meningkat. Hal ini disebabkan gugus hidroksil sebagai penyusun utama senyawa etil-alkohol semakin meningkat dengan naiknya konsentrasi bioetanol, dimana emisi aldehida dihasilkan dari senyawa hidroksil yang tidak teroksidasi dengan baik dalam ruang bakar. Selain itu, peningkatan emisi aldehida utamanya terjadi pada kondisi *cold start*, bahkan menurut Bertoa (2015) hampir 80% emisi aldehida yang dihasilkan dari pembakaran bioetanol diproduksi pada proses *cold start*. Dalam penelitian Bertoa disebutkan bahwa, penurunan temperatur dari 23°C ke -7°C memicu peningkatan acetaldehida hampir empat kali lipat dari 120% menjadi 400% sementara emisi formaldelhida cenderung stabil di angka 100% pada penggunaan bahan bakar E85 dan E75.

Tabel 4.37: Kondisi dan hasil pengujian mesin SI-PFI untuk emisi formaldelhida

Bahan Bakar	Variabel Faktor			Emisi Formaldelhida (mg/m ³)
	Perbandingan Kompresi	Pengapian	RPM	
E100	12.5	20	7000	2,305
E85	12.5	24	7000	1,346
E70	12.5	24	7000	1,027
E50	12.5	16	7000	2,070

Pada prinsipnya emisi yang dihasilkan dalam sebuah proses pembakaran terbentuk karena adanya ketidak tuntas pembakaran. Secara garis besar dan yang didasarkan oleh hasil-hasil penelitian, penyebab utama kegagalan pembakaran umumnya diakibatkan oleh dua hal, yaitu temperatur dan homogenitas campuran.

Berdasarkan itu pulalah dan dengan keterbatasan dana serta peralatan penelitian, maka objek penelitian untuk mengetahui karakteristik emisi formadelhida pada penggunaan bahan bakar E50, E70, E85 dan E100 dilakukan pada kondisi *brake torque maximum* masing-masing bahan bakar dengan hasil dan kondisi pengujiannya ditunjukkan pada Tabel 4.37 di atas.



Gambar 4-39: Gas acetaldehida (a) dan etilen (b) E0, E3 dan E10 (Poulopoulos, 2001)

Dengan hasil yang ditunjukkan pada tabel 4.37 di atas (hasil lengkap dapat dilihat pada Lampiran 91), terlihat bahwa konsentrasi massa formadelhida semakin meningkat dengan meningkatnya konsentrasi bioetanol, meskipun terjadi deviasi pada bahan bakar E50. Tingginya konsentrasi massa formadelhida-E50 salah satunya disebabkan pengapian bahan bakar yang terlalu *retarded* (lambat) sehingga proses pembakaran sempurna tidak tercapai dan menghasilkan emisi formadelhida. Berbeda dengan tiga bahan bakar lainnya yang dikondisikan pada *ignition timing* optimalnya yang tandai torsi maksimal dari masing-masing bahan bakar diperoleh pada kondisi tersebut.

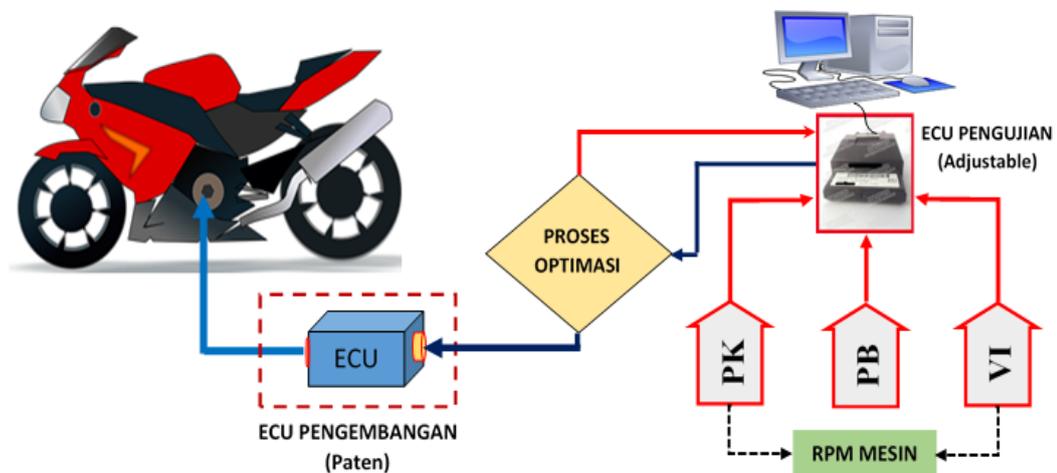
Sebagaimana telah disebutkan pada bab sebelumnya bahwa emisi utama hasil pembakaran boethanol adalah acetaldehida (Manzetti, 2015; Tibaquira, 2018). Sementara itu menurut penelitian Poulopoulos (2001), semakin tinggi konsentrasi bioetanol maka konsentrasi emisi acetaldehida semakin berkurang. Hal ini dibuktikan melalui sebuah penelitian menggunakan tiga jenis bahan bakar, yaitu gasolin murni tanpa timbal (unleaded gasoline), E3 dan E10 dan sebagaimana hasilnya diperlihatkan pada Gambar 4-39a.

Rendahnya emisi acetaldehida yang dihasilkan seiring bertambahnya konsentrasi bioetanol karena kandungan oksigen dalam bahan bakar juga semakin

meningkat. Dengan kondisi ini acetaldehida yang terbentuk lebih mudah teroksidasi dan membentuk etilen (proses dehidrasi bioetanol) sebagaimana tampak pada Gambar 4-39b. Terkait dengan emisi aldehida khususnya acetaldehida pada bioetanol diperlukan pengukuran yang lebih teliti dan komprehensif pada berbagai kondisi pengujian mesin untuk mengetahui secara pasti kuantitas emisi pada kondisi-kondisi yang dimaksud.

4.10 Aplikasi dan Pengembangan Hasil Penelitian

Sebuah penelitian yang baik diharapkan dapat menghasilkan luaran yang bermanfaat secara luas dalam rangka mempermudah aktifitas masyarakat dan meningkatkan kesejahteraannya. Oleh sebab itu dengan kemajuan teknologi otomotif termasuk di dalamnya perangkat sistem manajemen energinya, hasil penelitian ini dapat langsung diterapkan dengan melakukan pengembangan pada perangkat ECU motor dengan menstimulasi data baku dari hasil optimasi, sebagaimana terlihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4-40: Aplikasi penelitian dan pengembangan ECU kendaraan

Keterangan:

PK : Perbandingan kompresi

PB : Pengapian bahan bakar

VI : Volume injeksi bahan bakar

ECU : Electronic control unit

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian yang hasil-hasilnya dituangkan dalam pembahasan serta memperhatikan tujuan yang hendak dicapai, maka ada beberapa hal yang dapat disimpulkan terkait penelitian tentang *karakteristik dan optimasi performansi mesin spark-ignition port fuel injection satu silinder berbahan bakar E50-E100 dengan pengaturan terpadu pada parameter desain, operasi dan pembakaran*, yaitu:

1. Kinerja atau performansi mesin SI-PFI satu silinder dikarakterisasi oleh beberapa variabel respon sebagai berikut:
 - a. Torsi yang dihasilkan mesin meningkat dengan berkurangnya persentase bioetanol dalam campuran, tetapi dengan penerapan strategi mapping volume injeksi dan pengapian bahan bakar secara terpadu, Torsi bioetanol murni (E100) lebih tinggi dari bahan bakar campuran (E85, E70 dan E50). Demikian halnya pengapian semakin maju (advance) jika bioetanol dalam campuran meningkat, yaitu 16, 20 dan 24° BTDC untuk E50, E70 dan E85. Sementara Torsi maksimum E100 diperoleh pada pengapian 20° BTDC
 - b. Konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) yang dihasilkan semakin meningkat dengan bertambahnya bioetanol dalam campuran, tetapi dengan strategi mapping volume injeksi dan pengapian secara terpadu BSFC bioetanol murni (E100) lebih rendah dari E85. Pengapian bahan bakar semakin maju dengan naiknya bioetanol dalam campuran untuk BSFC minimum E50, E70 dan E85 yaitu 16, 20 dan 24° BTDC, sementara BSFC minimum E100 diperoleh pada pengapian 20° BTDC.
 - c. Efisiensi thermal yang dihasilkan semakin meningkat dengan berkurangnya bioetanol dalam campuran bahan bakar. Akan tetapi dengan strategi pembakaran yang diterapkan pada penelitian ini efisiensi thermal bioetanol

murni (E100) lebih tinggi dari E85 dan E70. Nilai efisiensi thermal maksimum bahan bakar campuran gasolin-bioetanol diperoleh pada pengapian yang semakin meningkat jika konsentrasi bioetanol meningkat, yaitu: 16, 20 dan 24° BTDC, sementara BTE maksimum E100 diperoleh pada pengapian 20° BTDC

- d. Emisi karbon monoksida (CO) yang dihasilkan semakin menurun dengan bertambahnya bioetanol baik sebagai bahan bakar murni maupun bahan sebagai bakar bakar campuran. Dengan pengontrolan terpadu pada variabel proses emisi CO minimum pada semua jenis bahan bakar diperoleh pada pengapian 24° BTDC.
 - e. Emisi hidrokarbon (HC) yang dihasilkan semakin menurun dengan bertambahnya bioetanol baik sebagai bahan bakar murni maupun bahan sebagai bakar bakar campuran. Dengan pengontrolan terpadu pada variabel proses, emisi HC minimum bahan bakar campuran gasolin-bioetanol diperoleh pada pengapian yang semakin meningkat jika konsentrasi bioetanol meningkat, yaitu: 16, 20 dan 24° BTDC, sementara emisi HC minimum E100 diperoleh pada pengapian 20° BTDC
 - f. Seluuh parameter performansi terbaik mesin SI-PFI satu silinder diperoleh pada perbandingan kompresi 13.
2. Karakteristik performnasi mesin SI-PFI satu silinder melalui optimasi lokal variabel respon ditunjukkan pada Tabel 5.1 sebagai berikut:

Tabel 5.1: Nilai optimasi lokal vaariabel respon E100-E50

BAHAN BAKAR	RESPON – NILAI RESPON – VARIABEL FAKTOR														
	TORSI (Nm)			BSFC (kg/HP-min)			BTE(%)			CO (%)			HC(ppm)		
	CR	IT	RPM	CR	IT	RPM	CR	IT	RPM	CR	IT	RPM	CR	IT	RPM
E100	15,101			0,003204			39,35			0,65			62,5		
	12.5	20	7300	13	20	5960	12.5	20	5640	13	20	5000	13	20	5000
E85	12,44			0,003585			37,54			0,744			68,3		
	13	24	7240	13	20	5896	13	24	5520	13	20	5000	13	20	5000
E70	12,91			0,003231			38,13			0,69			65,5		
	13	24	7530	13	20	6100	12	20	5750	13	20	5000	13	20	5000
E50	14,101			0,002470			41,83			0,76			64,6		
	12.5	20	800	13	20	6250	12.5	20	6030	13	20	5000	13	24	5000

3. Karakteristik performansi mesin SI-PFI satu silinder melalui optimasi single respon Torsi sebagai respon target ditunjukkan pada Tabel 5.2 sebagai berikut:

Tabel 5.2: Nilai variabel BSFC, BTE, CO dan HC pada kondisi optimasi Torsi

Bahan Bakar	Variabel Proses			Variabel Respon			
	CR	IT	RPM	BSFC	BTE	CO	HC
E100	13	24	7300	0.006314	0.2864	2.2854	73.6802
E85	13	24	7240	0.004764	0.3172	2.6127	82.4974
E70	12.5	24	7530	0.004186	0.3280	3.5588	95.9911
E50	13	24	8000	0.004430	0.3205	3.5120	89.8750

4. Strategi Pembakaran dengan pengaturan terpadu pada parameter desain-operasi dan pembakaran menghasilkan Torsi E100 lebih baik dari E50, E70 dan E85 meskipun ada kenaikan pada BSFC yaitu; 42.53% > E50, 39.05% > E70 dan 32,54% > E85 jika kondisi optimasi di plot pada variabel faktor yang sama.
5. Dari proses optimasi, dalam keadaan campuran penambahan 15-20% biethanol untuk konsentrasi >50% menyebabkan penurunan Torsi dan BTE rata-rata sebesar 0.85Nm dan 0,014% serta kenaikan BSFC rata-rata sebesar $\frac{0.0003kg}{HP.menit}$ akibat nilai kalor bahan bakar campuran menurun dengan naiknya persentase bioetanol.
6. Penelitian dengan strategi mapping secara berjenjang dari volume injeksi ke pengapian bahan bakar menghasilkan peningkatan torsi dan daya sebesar 1-5%, efisiensi thermal 52-62%, emisi CO menurun 17-24%. Akan tetapi BSFC meningkat 5-7% pada perbandingan kompresi 12 ke 12.5, tetapi menurun 2% pada rasio kompresi 13. Demikian halnya emisi HC meningkat 3% pada 2000-4000 RPM, tetapi menurun sebesar 1-2% pada 5000-8000 RPM.
7. Karakteristik optimasi performansi mesin SI-PFI satu silinder yang dinyatakan melalui signifikansi pengaruh variabel faktor terhadap variabel respon dituliskan melalui persamaan-persamaan sebagai berikut:
- Torsi
 - E100 = (13.643) + (3,792 * RPM) – (2,466 * RPM * RPM)
 - E85 = 11,083 + 2,868RPM– 2,428RPM * RPM + 0,760IT * RPM
 - E70 = (11.484) + (3.380 * RPM) – (2.004 * RPM * RPM) – (0.745 * CR * RPM)
 - E50 = (11.650) + (3.919 * RPM) – (1.468 * (RPM * RPM))

b. Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (BSFC)

- $E_{100} = (0,004378) - (0,000519CR) + (0,000478 * IT) - (0,003396 * RPM) - (0,001147 * CR * CR) + (0,001550 * IT * IT) + 0,005334 * RPM * RPM$
- $E_{85} = 0,004591 - 0,000512 CR - 0,003306 RPM + 0,005536 RPM * RPM$
- $E_{70} = 0,003818 - (0,000272 * CR) - (0,002993 * RPM) + (0,000506 * CR * CR) + (0,004067 * RPM * RPM)$
- $E_{50} = 0,003307 + 0,000531 IT - 0,002371 RPM - 0,000342 CR * CR + 0,000463 IT * IT + 0,002842 RPM * RPM$

c. Efisiensi Thermal (BTE)

- $E_{100} = (0,3858) + (0,0726 RPM) - (0,0550 IT * IT) - (0,1695 RPM * RPM)$
- $E_{85} = 0,32902 + 0,01971 CR + 0,05867 RPM + 0,02154 IT * IT - 0,16917 RPM * RPM$
- $E_{70} = 0,3720 + 0,07503 RPM - 0,1509 RPM * RPM$
- $E_{50} = (0,4013) - (0,0361 * IT) + (0,0986 * RPM) - (0,1433 * (RPM * RPM))$

d. Emisi Karbon Monoksida (CO)

- $E_{100} = 1,063 - 0,411 CR + 1,301 RPM + 1,071 RPM * RPM$
- $E_{85} = 1,317 - (0,573 * CR) + (1,455 * RPM) + (1,270 * RPM * RPM)$
- $E_{70} = 1,317 - 0,632 CR + 1,519 RPM + 1,351 RPM * RPM$
- $E_{50} = (1,320) - (0,563 * CR) + (1,461 * RPM) + (1,294 * (RPM * RPM))$

e. Emisi Hidrokarbon (HC)

- $E_{100} = 70,000 - 3,250 CR + 1,750 IT + 6,000 RPM - 4,250 CR * CR + 10,750 RPM * RPM - 2,000 IT * RPM$
- $E_{85} = 77,00 - 8,75 CR + 6,75 RPM + 14,50 RPM * RPM$
- $E_{70} = (74.000) - (2.875 * CR) + (1.625 * IT) + (8.750 * RPM) - (5.625 * (CR * CR)) + (1.875 * (IT * IT)) + (15.625 * (RPM * RPM)) + (2.000 * (CR * RPM))$
- $E_{50} = (69.000) - (2.000 * CR) + (8.875 * RPM) - (2.375 * (CR * CR)) + (16.375 * (RPM * RPM))$

5.2 Saran – Saran

Sejumlah saran terkait hasil penelitian ini dan perlu dilanjutkan adalah::

1. Penelitian dengan metode eksperimen sebaiknya berdasarkan design eksperimen yang berbasis RSM yang terdiri dari beberapa metode yaitu; CCD, Box Behnken dan Taguchi atau metode campuran (sesuai karakteristik data penelitian) agar dihasilkan hasil prediksi yang lebih valid dan mempermudah proses penelitian serta lebih ekonomis.

2. Untuk pengujian dengan menggunakan variasi perbandingan kompresi sebagai variabel faktor sebaiknya interval perbandingan kompresi lebih besar dari 0,5 untuk menghasilkan nilai respon yang signifikan.
3. Diperlukan penelitian lanjutan pada variasi ignition timing dengan metode memajukan atau memundurkan IT pembakaran beberapa derajat dari ignition timing standar pembakaran pada setiap RPM engine. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi penurunan performansi dan peningkatan emisi mesin yang terlalu curam untuk desain mesin standar.
4. Diperlukan pengujian mapping volume injeksi dan pengapian bahan bakar pada interval yang lebih kecil seiring semakin berkurangnya persentase bioetanol dalam campuran bahan bakar. Hal ini dikarenakan nilai kalor bahan bakar akan meningkat dan kecepatan perambatan api laminar menurun dengan turunnya konsentrasi bioetanol. Dengan demikian variasi volume injeksi dan pengapian bahan bakar pada interval yang lebih kecil akan diperoleh hasil yang lebih presisi untuk meningkatkan performansi mesin dan menurunkan emisi pembakaran.
5. Untuk mengurangi ketidakstabilan pembakaran khususnya dalam penggunaan bahan bakar campuran gasolin dan bioetanol lebih dari 50%, maka diperlukan perlakuan awal (*pre-treatment*) pada campuran bahan bakar untuk meningkatkan volatilitas dan homogenitas campuran agar proses atomisasi dan pembakaran bahan bakar lebih baik. Hal ini dilakukan untuk mengatasi perbedaan properties kedua jenis bahan bakar utamanya *boiling point* dan *Reid vapor pressure* bahan bakar yang sangat kontras yang dapat menimbulkan *efek azeotropika* dalam campuran dan berdampak pada hasil performansi dan emisi pembakaran.
6. Diperlukan penelitian lanjutan untuk mengetahui karakteristik emisi aldehida utamanya emisi acetaldehida dan turunannya yang dihasilkan dari pembakaran bioetanol dan gasolin khususnya pada konsentrasi bioetanol lebih dari 50%.
7. Diperlukan penelitian lanjutan untuk mengurangi produksi emisi aldehida pada pemakaian bahan bakar bioetanol sebagai antisipasi untuk pemakaian secara massal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abebe M. T (2013), "*Laminar Burning Velocity of Bioethanol, Acetaldehyde and bioethanol-Acetaldehyde Flames*", Thesis Master, Lunds Universitet, Swedia
- Agarwal Krishna Mohan, Chhabra Mayank (2015), "*Study Of Performance Parameters Of Single Cylinder Four Stroke Spark Ignition Engine Using Gasoline - Bioethanol Blends*", International Journal of Technology Enhancement and Emerging Research, Indian, Vol 3, No. 2, ISSN: 2347-4289, pp: 44-46
- Alagumalai Avinash (2014), "*Internal combustion engines: Progress and prospects*", Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 38. pp: 561-571
- Algariksa A. Fintas, Susilo B, Nugroho A. Wahyunanto(2013), "*Uji Motor Bakar Bensin (On Chasis) Menggunakan Campuran Premium Bioethanol*", Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem, Universitas Brawijaya-Malang, Vol. 1, No. 3, pp: 194-203
- Amiruddin AK, Rahim IA, Semin S, Firmansyah, Rashid AAA (2009), "*Effect of Gasohol Blends On A Four Cylinder, PFI Engine Performance*", Proceeding Internastional Conference on Aplication and design in Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Perilis, Malaysia
- Anand TNC, Mohan AM, Ravikrishna RV (2012), "*Spray Characterization of Gasoline-Bioethanol Blends From a Multi Hole Port Fuel Injector*", Elsevier, Fuel 102, pp: 613-623
- Ansari Farha Tabassum^a, Verma Abhishek Prakash, Chaube Alok (2013), "*Effect on Performance and Emissions of SI Engine Using Bioethanol as Blend Fuel Under Varying Compression Ratio*", International Journal of Engineering Research and Technology, India, ISSN: 2278-0181, Vol. 2, No. 12, pp: 848-864
- Ansari Farha Tabassumb, Abhishek Prakash Verma (2012), "*Experimental determination of suitable bioethanol-gasoline blend for Spark ignition engine*", International Journal of Engineering Research and Technology, India, ISSN: 2278-0181, Vol. 1, No. 5, Hal: 1-10
- Ansari Farha Tabassumb, Abhishek Prakash Verma (2012), "*Experimental determination of suitable bioethanol-gasoline blend for Spark ignition engine*", International Journal of Engineering Research and Technology, India, ISSN: 2278-0181, Vol. 1, No. 5, pp: 1-10
- B.M. Masum, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, S.M. Palash, M. Habibullah (2015), "*Effect of alcohole-gasoline blends optimization on fuel properties, performance and emissions of a SI engine*", Elsevier, Journal of Cleaner Production 86, pp: 230-237
- Badwan MS (1985), "*Performance and knock limits of ethanol-gasoline blend in sparkignited engines*", SAE Paper 850213

- Balki MK, Sayin C (2014), *"The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fueled with pure bioethanol, mbioethanol and unleaded bensin"*, Elsevier, Energy 71, pp: 194-201
- Bambang Sudarmanta, Sudjud Darsopuspito, Djoko Sungkono (2014), *"Influence of bioethanol-gasoline blended fuel on performance and emissions characteristics from port injection Sinjai Engine 650 cc"*, Applied Mechanics and Materials, Vol. 493, pp. 273-280
- Bambang Sudarmanta., Junipitoyo B., Putra Krisna A. B., Sutantra I. N (2015), *"Influence of the compression ratio and injection timing on Sinjai Engine Performance with 50% Bioethanol – Bensin blended fuel"*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, No. 4, February 2016, pp: 2768-2774
- Bertoa R. S., Zardini A. A., Keuken H., Astorga C (2015), *"Impact of Bioethanol Containing Gasoline Blends on Emissions From a Flex Fuel Vehicle Test Over The Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle (WLTC)"*, Elsevier, Fuel 143, pp: 173-182
- Bielaczyc P, Woodburn J, Klimkiewicz D, Pajdowski P, Szczotka A (2013), *"An examination of the effect of bioethanol–gasoline blends' physicochemical properties on emissions from a light-duty spark ignition engine"*, Elsevier, Fuel Processing Technology 107, pp: 50-63
- Brusstar M, Stuhldreher M, Swain D, Pidgeon W (2000), *"High Efficiency and Low Emissions from Port Injected Engine with Neat Alcohol Fuels"*, Environmental Protection Agency, USA
- Byun Jung Joo (2011), *"Laminar Burning Velocities and Laminar Flame Speeds of Multi-Component Fuel Blends at Elevated Temperatures and Pressures"*, Disertasi PhD, University of Texas, Austin
- Charles Wyman, Erick D., Adam Han, Brian H(2004), *"Bioethanol as Duel for Recreational Boats"*, The Thayer School of Engineering at Dartmouth College.
- Chedthawut Poompipatpong (2007), *"Effect of Intake Valve Timing And Injection Timing In A Natural gas Dedicated Diesel Engine"*, Thesis Magister, King Mongkuts Institute of Technology North Bangkok
- Chelik M. Bahattin(2007), *"Experimental determination of suitable bioethanol–bensin blend rate at high compression ratio for bensin engine"*, Elsevier, Applied Thermal Engineering 28, pp: 396-404
- Chen RH, Chiang LB, Chen CN, Lin TH (2011), *"Cold-start emissions of an SI engine using bioethanolegasoline blended fuel"*, Elsevier, Applied Thermal Engineering 31, pp: 1463-1467
- Claudio Marcio Santana dan Jose Eduardo Mautone Barros (2014), *"Measuring and comparing the ignition delay times of Diesel, ethanol additive and biodiesel using a shock tube"*, Blucher Engineering Proceedings (SIMEA), Vol. 1, No. 2, Agustus 2014, pp. 1-28
- Cordosa Lourenco TJP (2011), *"Port Fuel Injection Strategies for a Lean Burn Gasoline Engine"*, Disertasi PhD, University of Brighton, USA

- Cordosa Lourenco TJP (2011), *"Port Fuel Injection Strategies for a Lean Burn Gasoline Engine"*, Disertasi PhD, University of Brighton, USA
- Costa C. Rodrigo, Sodre R. Jose (2010), *"Compression Ratio Effects on an Bioethanol/Bensin Fuelled Engine Performance"*, Elsevier, Applied Thermal Engineering 31, pp: 278-283
- Dale Turner, Hongming Xu, Roger F. Cracknell, Vinod Natarajan, Xiangdong Chen (2011), *"Combustion performance of bio-bioethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine"*, Elsevier, Fuel 90, pp: 1999-2006
- Dewan Energi Nasional (2013), *"Outlook Energi Indonesia 2014"*, Jakarta-Indonesia
- Dirrenberger P, Glaude PA, Bounaceur R, Le Gall H, da Cruz P, Konnov A, Leclerc FB (2014), *"Laminar burning velocity of gasolines with addition of bioethanol"*, Elsevier, Fuel 115, pp: 162-169
- Douglas C. Montgomery (2012), *Design and Analysis of Experiment*, 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Foong T. M., Morganti K. J., Brear M. J., da Silva G, Yang Yi, Dryer F. L (2014), *"The octane numbers of bioethanol blended with gasoline and its surrogates"*, Elsevier, Fuel 115, pp: 727-739
- Gayuh Agung Pamuji, Bambang Sudarmanta (2016), *"Studi Eksperimen Pengaruh Mapping Ignition Timing Dan Durasi Penginjeksian Bahan Bakar Terhadap Unjuk Kerja Dan Emisi Gas Buang Engine Honda CB150R Berbahan Bakar Bioetanol E100"*, Jurnal Teknik ITS, Vol. 3, No. 2, pp. 1-6
- Georgios Karavalakis, Thomas D. Durbin, Manish Shrivastava, Zhongqing Zheng, Mark Villela, Heejung Jung (2012), *"Impacts of ethanol fuel level on emissions of regulated and unregulated pollutants from a fleet of gasoline light-duty vehicles"*, Fuel, Vol. 93, pp. 549–558
- Green Kenneth P (2008), *"Ethanol and Environment"*, American Enterprise Institute for Public Policy Research, Environment Policy Outlook, 1150 Seventeenth Street, N. W., Wasinghton DC, 20036, www.aei.org, pp. 1-6
- Hari Sakti Wibowo (2008), *"Optimalisasi respon ganda pada metode permukaan respon (response surface) dengan pendekatan fungsi desirability"*, Tesis Program Magister Statistika, Sekolah Pascasarjana IPB Bogor, 60 hal
- Heywood JB (1988), *"Internal Combustion Engine Fundamentals"*, McGraw Hill Series, New York
- Holthaus B., Wagner R., Drallmeier J (1997), *"Measurements of Intake Port Fuel/Air Mixture Preparation"*, SAE Technical Paper 970867, pp: 1-13
- Ibrahim K. Adam, A.Rashid A.Aziz, Suzana Yusup, Morgan Heikal and Ftwi Hagos (2016), *"Optimization of Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Rubber Seed- Palm Biodiesel Blends using Response Surface Method"*, Asian Journal of Applied Sciences, Vol. 4, No. 2, pp. 401-421
- J.E. Anderson, D.M. Di Cicco, J.M. Ginder, U. Kramer, T.G. Leone, H.E. Raney-Pablo, T.J. Wallington, *"High octane number bioethanol–gasoline blends: Quantifying the potential benefits in the United State."*

- Jeuland N, Montagne X, Gautrat X (2004), "*Potentiality of Bioethanol as a Fuel for Dedicated Engine*", Oil & Gas Science and Technology-Rev IFV, Institut Francais du Petrole, Francis, Vol. 59, N0. 6, pp: 559-570
- Juan E. Tibaquirá, José I. Huertas, Sebastián Ospina, Luis F. Quirama, José E. Niño (2018), "The Effect of Using Ethanol-Gasoline Blends on the Mechanical, Energy and Environmental Performance of In-Use Vehicles", Energies MDPI Journal, Vol. 11, No. 221, pp. 1-17
- Kim N, Cho S, Min K. (2015), "*A study on the combustion and emission characteristics of an SI engine under full load conditions with bioethanol port injection and gasoline direct injection*", Elsevier, Fuel 158, pp: 725-732
- Lan Li, Yunshan Ge, MingdaWanga, Zihang Peng, Yanan Song, Liwei Zhang, Wanli Yuan (2015), "Exhaust and evaporative emissions from motorcycles fueled with ethanol gasoline blends", Science of the Total Environment, Vol. 502, pp. 627–631
- Lílian Lefol Nani Guarieiro, Amanda Figueiredo de Souza, Ednildo Andrade Torres, dan Jailson B. de Andrade (2009), "Emission profile of 18 carbonyl compounds, CO, CO₂, and NO_x emitted by a diesel engine fuelled with diesel and ternary blends containing diesel, ethanol and biodiesel or vegetable oils, Elsevier, Atmospheric Environment Journal, Vol. 43, pp. 2754–2761
- Lílian Lefol Nani Guarieiro dan Aline Lefol Nani Guarieiro (2013), "Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel" Biofuel, Economy, Environment and Sustainability, Intech, <http://dx.doi.org/10.5772/52513>, chapter 14, pp. 357-386
- M. Clairotte, T.W. Adam, A.A. Zardini, U. Manfredi, G. Martini, A. Krasenbrink, A. Vicet, E. Tournié, C. Astorga (2013), "Effects of low temperature on the cold start gaseous emissions from light duty vehicles fuelled by ethanol-blended gasoline", Applied Energy, Vol. 102, pp. 44–54
- Mark Z. Jacobson (2007), "Effects of Ethanol (E85) versus Gasoline Vehicles on Cancer and Mortality in the United States", Environmental Science and Technology Journal, Vol. 41, No. 11, pp. 4150-4157
- Marthen Paloboran, I Nyoman Sutantra, Bambang Sudarmanta (2016), "Performances and Emissions Characteristics of Three Main Types Composition of Gasoline–Bioethanol Blended in Spark Ignition Engines", International Review of Mechanical Engineering (IREME), Italy, Vol. 10, No. 7, pp: 552-559
- Marthen Paloboran, I Nyoman Sutantra, Bambang Sudarmanta, Darmawang, Gayuh (2017), "A Strategy in Adjustment of Combustion Parameters of SI-PFI Engine with Pure Bioethanol Fuelled for a High Performance and Low Emission", WSEAS Transaction Environment and Development Journal, Vol. 13, Nopember 2017, pp. 421–430

- Marthen Paloboran, I Nyoman Sutantra, Bambang Sudarmanta, Darmawang, Gayuh (2017), "Suitable of High Compression Ratio, Injection Duration and Ignition Timing on CB150R Engine for High Performance and Low Emissions with Pure Bioethanol Fuelled", *International Journal of Chemistry and Chemical Engineering System (IJCCES)*, Vol. 2, Dec 2017, pp. 33–44
- Marthen Paloboran, I Nyoman Sutantra, Bambang Sudarmanta, Renno FD (2017), "Suitable Injection Duration of Pure Ethanol Fuel for Motorcycle at A High Compression Ratio", *Dyna (Sapin)*, Vol. 92, No. 5, September 2017, pp. 587–592
- Masum B. M., Masjuki H. H., Kalam M. A., LM. Rizwanul Fattah(2012), "*Effect of Bioethanol Gasoline Blend on NOx Emission on SI Engine*", Elsevier, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, pp: 209-222
- Milnes R, Deller Laura, Hill N (2010), "*Bioethanol Internal Combustion Engines*", Etsap, Energy Technology System Analysis Programme, United Kingdom, England
- Mochamad Muzaki (2016), "Optimasi Kekuatan Tarik, Kekerasan dan Panjang Upset Hasil Lasan Baja SUH 3 Pada Pengelasan Gesek Menggunakan Metode Respon Permukaan dan Goal Programming", Program Magister, Rekayasa Sistem Manufaktur, ITS Surabaya
- Mohammad Hadi Dehghani, Mehdi Salari, Kazem Naddafi, Shahrokh Nazmara1, Ehsan Ahmadi, Prashant Kumar (2017), "Evaluation of formaldehyde concentration in the ambient air of a most populated Iranian city, Tehran", *Air Quality, Atmosphere and Health Journal*, DOI 10.1007/s11869-017-0468-x, pp. 1-12
- Mustafa Balat, Havva Balat, Cahide OZ (2008), "*Progress in Bioethanol Processing*", Elsevier, *Progress in Energy and Combustion Science* 34, pp: 551-573
- Nababan HM, Ambarita H, Sitorus TB (2013), "*Studi Kerja Mesin Otto Menggunakan Bahan Bakar Bensin dan Bioethanol 96%*", *Jurnal e-Dinamis USU Medan*, Vol. 4, No. 4, pp: 251-264
- Najafi G, Ghobadian B, Yusaf T, Ardebili S.M.S, Mamat R (2015), "*Optimization of Performance and Exhaust Emission Parameter of a SI Engine with Gasoline-Bioethanol Blended Fuels Using Response Surface Methodology*", Elsevier, *Energy* XXX, pp: 1-15
- Nicky Prayoga (2017), "Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur Bahan Bakar Terhadap Penyalaan Awal Dan Unjuk Kerja Serta Emisi Motor Honda CB150R Berbahan Bakar Bioetanol E100", Skripsi, Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya
- Nicky Prayoga, Bambang Sudarmanta (2017), "*Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur Bahan Bakar Terhadap Penyalaan Awal Dan Unjuk Kerja Serta Emisi Motor Honda CB150R Berbahan Bakar Bioetanol E100*", *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-7

- Ojapah M. M (2014), *"Experimental Studies of Performance and Emissions in a 2/4 Stroke Engine with Gasoline and Bioethanol"*, Disertasi PhD, Brunel University London, United Kingdom
- Oliveira E. De, Barker J. F., Chatsiz I., *"Gasoline-Water-Bioethanol Interaction and Fluid Properties"*, NONAME, pp: 252-264
- Paola Helena Barros Zarante dan José Ricardo Sodr  (2016), "Simulation of Aldehyde Emissions from an Ethanol Fueled Spark Ignition Engine and Comparison with FTIR Measurements", 7th European Thermal-Sciences Conference (Eurotherm2016), Journal of Physics: Conference Series 745 (2016) 032023, IOP Publishing, pp. 1-8, doi:10.1088/1742-6596/745/3/032023
- Paola Helena Barros Zarante dan José Ricardo Sodr  (2016), "Simulation of Aldehyde Emissions from an Ethanol Fueled Spark Ignition Engine and Comparison with FTIR Measurements", 7th European Thermal-Sciences Conference (Eurotherm), IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 745, pp. 1-8
- Park HS, Kim HJ, Suh HK, Lee CS (2009), *"Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector"*, Elsevier, International Journal of Heat and Fluid Flow 30, pp: 1183-1192
- Phuangtrakul, Wannatong SP, Laungnaratuai T, Wechsator W (2013), *"Suitable Ignition Timing and Fuel Injection Duration For Bioethanol Bensin Blended Fuels in a Spark Ignition Internal Combustion Engine"*, Proceeding of The International Conference on Future Trends in Structur, Civil, Environmental and Mechanical Engineering, Institute of Research Engineers and Doctors, FTSCem, Bangkok
- Radu Alexandru, Pana Constantin, Negurescu Niculae (2014), *"An Exprimental Study on Performance And Emission Charactersitic of Bioethanol Fueled SI Engine"*, Journal of University Politechnica of Bucharest, Romania, Series D, ISSN 1454-2358, Vol. 7. No. 1, pp: 193-200
- Renno F.D. Dharmawan, Bambang Sudarmanta (2016), *"Studi Eksperimen Pengaruh Rasio Kompresi dan Durasi Penginjeksian Terhadap Unjuk Kerja dan Emisi Gas Buang Engine Honda CB150R Berbahan E100"*, Jurnal Teknik ITS, Vol. 4, No. 1, pp. 1-6
- Romain Nicolas (2013), "Introduction to engine fuelling systems", <http://www.car-engineer.com/introduction-to-engine-fuelling-systems/>
- Rubio E. Nicolas, *"Brazilian Government Policies In The Bioethanol Program(2006) "*, A Model For The Rest of The World, Thesis Master of Art, University of Florida, USA
- Run Chen (2014), *"Characterization of Mixture Formation, Ignition and Combustion Processes of Bioethanol-Gasoline Blends Injected by Hole-Type Nozzle for DISI Engine"*, Disertasi PhD, University of Hiroshima, Jepang

- S. Lopez-Aparicio dan C. Hak(2013), "*Evaluation of The Use of Bioethanol Fuelled Buses Based Screening and on The Road Measurements*", Elsevier, Science of The Total Environment 452-453, pp: 40-49
- S.G. Pouloupoulos, D.P. Samaras, C.J. Philippopoulos (2001), "Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels", Atmospheric Environment 35, pp. 4399–4406.
- Santana C. M, Barros J. E. M (2014), "*Measuring and Comparing the Ignition Delay Times of Diesel, Bioethanol Additive, and Biodiesel Using a Shock Tube*", Blucher Engineering Proceeding, SIMEA Italy, Vol. 1, No. 2, pp: 1-28
- Saurabhjain (2013), "Valve Timing Diagram", Mechanical Engineering Community, <https://mechanical-engg.com/gallery/image/806-valve-timing-diagram/?browse=1>
- Schifter I, Diaz L, Rodrigues R, Gomez JP, Gonzalez U (2011), "*Combustion and emissions behavior for bioethanol–gasoline blends in a single cylinder engine*", Elsevier, Fuel 90, pp: 3586-3592
- SchifterI., Diaz L., Gomez J. P., Gonzales U (2013), "*Combustion characterization in a single cylinder engine with mid-levels hydrated bioethanol–gasoline blended fuels*", Elsevier, Fuel 103, pp: 292-298
- Sergio M, Otto Andersen (2014), "*A Review of Emission Products from Bioethanol and its Blends with Bensin. Background for new Guidelines for Emission Control*", Elsevier, Fuel 140, pp: 293-301
- Setiawan Atok(2012), "*Kajian Eksperimental Pengaruh Bioethanol pada Premium Terhadap Karakteristik Pembakaran Kondisi Atmosferik dan Bertekanandi Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi*", Disertasi Doktor, Universitas Indonesia, Indonesia
- Sudjana (2012), "Desain dan Analisis Eksperimen", Edisi ke-4, Tarsito, Bandung
- Sutiman (2004), "Upaya Pengendalian Pencemaran Udara Melalui Pengembangan Teknologi Motor Bensin dan EMS", Seminar Wirausaha perbengkelan Otomotif sebagai Alternatif Usaha Bagi Calon Purna Karya" PT KPI-KEPURUN, 25-26 Mei di Jogyakarta
- Tadeu C. Cordeiro de Melo, Guilherme B. Machado, Carlos R.P. Belchior, Marcelo J. Colaco, José E.M. Barros, Edimilson J. de Oliveira, Daniel G. de Oliveira (2012), "*Hydrous bioethanol–gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine*", Elsevier, Fuel 97, pp: 796-804
- Turkoz Necati, Erkus B, Karamangil MI, Surmen A, Arslanoglu N (2014), "*Experimental Investigation of The Effect of E85 on Engine Performance and Emissions under Various Ignition Timings*", Elsevier, Fuel 115, pp: 826-832
- Turner D., Xu H., Cracknell FR., Natarajan V., Chen X (2011), "*Combustion performance of bio-bioethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine*", Elsevier, Fuel 90, pp: 1999-2006

- Vilela Antonio, Macado G (2012), *"Multifuel Engine Performance, Emission and Combustion Using Anhydrous and Hydrous Bioethanol"*, Petrobras, Sao Paul, Brazil
- Westerholm R, Egeback KE, Renlund B, Henke M (2005), *"Blending of Bioethanol in Gasoline For Spark Ignition Engines"*, Problem Inventory and Evaporative Measurements, Stockholm University, Swedia
- Wiratmaja IG(2010), *"Analisa Unjuk Kerja Motor Bensin Akibat Pemakaian Bensin"*, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakra M, Universitas Udayana-Bali, Indonesia, Vol. 4, No. 1, pp: 16-25
- Yang Hsi-Hsien, Liu TC, Chang CF, Lee Eva (2012), *"Effects of bioethanol-blended gasoline on emissions of regulated air pollutants and carbonyls from motorcycle"*, Elsevier, Applied Energy 89, pp: 281-286
- Yoon Seung Hyun, Lee Chang Sik (2012), *"Effect of undiluted bioethanol on combustion and emissions reduction in a SI engine at various charge air condition"*, Elsevier, Fuel 97, pp: 887-890
- Yuan Zhuang, Guang Hong, Jianguo Wang, *"Preliminary Investigation to Combustion In a SI Engine With Direct Bioethanol Injection and Port Gasoline Injection (EDI+GPI)"*, 18th Australaian Fluid Mechanics Conference Launceston, Australia, 3-7 December 2012,
- Yung Chen Yao, Jiun-Horng Tsai, I-Ting Wang (2013), *"Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by bioethanol–gasoline blend"*, Elsevier, Applied Energy, Vol. 102, pp. 93-100
- Zhuang Y, Hong G. (2014), *"Effects of direct injection timing of bioethanol fuel on engine knock and lean burn in a port injection gasoline engine"*, Elsevier, Fuel 135, pp: 27-37

Lampiran 1: Spesifikasi Gasolin (Premium)



DEPARTEMEN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA

KEPUTUSAN DIREKTUR JENDERAL MINYAK DAN GAS BUMI
Nomor : 3674 K/24/DJM/2006

TENTANG

STANDAR DAN MUTU (SPESIFIKASI) BAHAN BAKAR MINYAK JENIS BENSIN
YANG DIPASARKAN DI DALAM NEGERI

Menimbang : bahwa dalam rangka melaksanakan ketentuan Pasal 3 ayat (1) Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor : 0048 Tahun 2005 tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) serta Pengawasan Bahan Bakar Minyak, Bahan Bakar Gas, Bahan Bakar Lain, LPG, LNG dan Hasil Olahan Yang Dipasarkan Di Dalam Negeri, perlu mengatur dan menetapkan standar dan mutu (spesifikasi) Bahan Bakar Minyak jenis Bensin yang dipasarkan di dalam negeri dalam suatu Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi.

Mengingat : 1. Undang-undang Nomor 22 Tahun 2001 Tentang Minyak dan Gas Bumi (Lembaran Negara Tahun 2001 Nomor 136, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4152);
2. Peraturan Pemerintah Nomor 36 Tahun 2004 tentang Kegiatan Usaha Hilir Minyak dan Gas Bumi (Lembaran Negara Tahun 2004 Nomor 124, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4436);
3. Keputusan Presiden Nomor 246/M Tahun 2002 tanggal 23 Desember 2002;
4. Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1088.K/20/MEM/2003 tanggal 17 September 2003 tentang Pedoman Pelaksanaan Pembinaan, Pengawasan, Pengaturan, dan Pengendalian, Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi dan Kegiatan Usaha Hilir Minyak dan Gas Bumi.
5. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 0007 Tahun 2005 tentang Persyaratan dan Pedoman Pelaksanaan Izin Usaha Dalam Kegiatan Usaha Hilir Minyak dan Gas Bumi.
6. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 0030 Tahun 2005 tanggal 20 Juli 2005 tentang Organisasi dan Tata Kerja Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral;
7. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor : 0048 Tahun 2005 tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) serta Pengawasan Bahan Bakar Minyak, Bahan Bakar Gas, Bahan Bakar Lain, LPG, LNG dan Hasil Olahan Yang Dipasarkan Di Dalam Negeri;

MEMUTUSKAN;

Menetapkan :
KESATU : Menetapkan standar dan mutu (spesifikasi) Bahan Bakar Minyak (BBM) jenis Bensin yang terdiri dari Bensin 88, Bensin 91 dan Bensin 95.

Lampiran 1: Spesifikasi Gasolin (Premium)

- 2 -

- KEDUA : Bensin 88 sebagaimana dimaksud dalam Diktum Kesatu adalah BBM jenis Bensin dengan Riset Octane Number (RON) 88 Tanpa Timbal atau Bensin dengan RON 88 Bertimbal sebagaimana standar dan mutu (spesifikasi) tercantum dalam Lampiran I Keputusan ini.
- KETIGA : Bensin 91 sebagaimana dimaksud dalam Diktum Kesatu adalah BBM jenis Bensin dengan RON 91 Tanpa Timbal sebagaimana standar dan mutu (spesifikasi) tercantum dalam Lampiran II Keputusan ini.
- KEEMPAT : Bensin 95 sebagaimana dimaksud dalam Diktum Kesatu adalah BBM jenis Bensin dengan RON 95 Tanpa Timbal sebagaimana standar dan mutu (spesifikasi) tercantum dalam Lampiran III Keputusan ini.
- KELIMA : Dengan berlakunya Keputusan ini maka:
- Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor : 112 K/72/DDJM/1995 tanggal 18 Agustus 1995 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin Super TT.
 - Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor : 03 K/72/DDJM/1996 tanggal 9 Januari 1996 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Bensin Prima TT.
 - Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor : 108 K/72/DDJM/1997 tanggal 28 Agustus 1997 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin Premium.
 - Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor : 02 K/72/DDJM/1998 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Khusus Tanpa Timbal Untuk Motor Dua Langkah.
 - Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor : 73 K/72/DDJM/2001 tanggal 21 Juni 2001 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin Premix Tanpa Timbal.
 - Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor : 74 K/72/DDJM/2001 tanggal 21 Juni 2001 tentang Spesifikasi Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin Premium Tanpa Timbal.

dinyatakan tidak berlaku lagi.

- KEENAM : Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan

Ditetapkan di Jakarta
Pada tanggal : 17 Maret 2006

Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi



Indah Takhyani

Tembusan :

1. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral
2. Menteri Perhubungan dan Telekomunikasi
3. Menteri Perdagangan
4. Menteri Negara Lingkungan Hidup
5. Sekretaris Jenderal Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral
6. Inspektur Jenderal Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral
7. Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan ESDM
8. Kepala BPH Migas

Lampiran 1: Spesifikasi Gasolin (Premium)

LAMPIRAN I: Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi
 Nomor : 3674 K/24/DJM/2006
 Tanggal : 17 Maret 2006

SPESIFIKASI BAHAN BAKAR MINYAK JENIS BENSIN 88 (BENSIN)

No	Karakteristik	Satuan	Batasan				Metode Uji	
			Tanpa Timbal		Bertimbal		ASTM	Lain
			Min.	Maks.	Min.	Maks.		
1	Bilangan Oktana - Angka Oktana Riset - (RON) - Angka Oktana Motor - (MON)	RON	88.0	-	88.0	-	D 2699 - 86	
2	Stabilitas Oksidasi (Periode Induksi)	menit	360	-	360	-	D 525 - 99	
3	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05 ¹⁾	-	0,05 ¹⁾	D 2622 - 98	
4	Kandungan Timbal (Pb)	g/l	-	0.013	-	0.3	D 3237 - 87	
5	Distilasi :						D 86 - 99a	
	10% vol. penguapan	°C	-	74	-	74		
	50% vol. penguapan	°C	88	125	88	125		
	90% vol. penguapan	°C		180		180		
	Titik didih akhir	°C	-	215	-	205		
	Residu	% vol	-	2.0	-	2.0		
6	Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,7 ²⁾		2,7 ²⁾	D 4815 - 94a	
7	Washed gum	mg/100 ml	-	5	-	5	D 381 - 99	
8	Tekanan Uap	kPa	-	62	-	62	D 5191-89 atau D 323	
9	Berat Jenis (pada suhu 15 °C)	kg/m ³	715	780	715	780	D 4052-96 atau D 1298	
10	Korosi bilah tembaga	merit	kelas I		kelas I		D 130 - 94	
11	Uji Doctor		Negatif		Negatif			IP 30
12	Sulfur Mercaptan	% massa	-	0.002	-	0.002	D 3227	
13	Penampilan visual		Jernih dan terang		Jernih dan terang			
14	Warna		Merah		Merah			
15	Kandungan pewarna	g/100 l	0.13		0.13			
16	Bau		Dapat Dipasarkan		Dapat Dipasarkan			

CATATAN UMUM :

- Aditif harus kompatibel dengan minyak mesin (tidak menambah kekotoran mesin/kerak)
Aditif yang mengandung komponen pembentuk abu (*ash forming*) tidak diperbolehkan.
- Pemeliharaan secara baik untuk mengurangi kontaminasi (debu, air, bahan bakar lain, dll.)

CATATAN KAKI :

CATATAN 1 : Batasan 0,05% m/m setara dengan 500 ppm.

CATATAN 2 : Bila digunakan oksigenat, jenis ether lebih disukai. Penggunaan etanol diperbolehkan sampai dengan maksimum 10% volum (sesuai ASTM). Alkohol berkarbon lebih tinggi (C>2) dibatasi maksimal 0.1% volum. Penggunaan metanol tidak diperbolehkan.

Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi



[Handwritten signature]
 Direktur Jenderal
 Takhyani

Lampiran 1: Spesifikasi Gasolin (Premium)

Lampiran II : Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi
 Nomor : 3674 K/24/DJM/2006
 Tanggal: 17 Maret 2006

SPESIFIKASI BAHAN BAKAR MINYAK JENIS BENSIN 91 (PERTAMAX)

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain
1	Angka Oktana Riset (RON)	-	91.0	-	D 2699 - 86	
2	Stabilitas Oksidasi	menit	480	-	D 525 - 99a	
3	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05 ¹⁾	D 2622 - 98	
4	Kandungan Timbal (Pb)	g/l	-	0,013 ²⁾	D 3237 - 97	
5	Kandungan Phosphor	mg/l	-	-	D 3231 - 99	
6	Kandungan Logam (Mangan, Besi dll.)	mg/l	-	-	D 3831 - 94	
7	Kandungan Silikon	mg/kg	-	-	ICP-AES (Merujuk pada metode in-house dengan batasan deteksi = 1 mg/kg)	
8	Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,7 ²⁾	D 4815 - 94a	
9	Kandungan Olefin	% v/v	-	7)	D 1319 - 99	
10	Kandungan Aromatik	% v/v	-	50,0	D 1319 - 99	
11	Kandungan Benzena	% v/v	-	5,0	D 4420 - 94	
12	Distilasi :				D 86 - 99a	
	10% vol. penguapan	°C	-	70		
	50% vol. penguapan	°C	77	110		
	90% vol. penguapan	°C	130	180		
	Titik didih akhir	°C	-	215		
	Residu	% vol	-	2,0		
13	Sedimen	mg/l	-	1	D 5452 - 97	
14	Unwashed gum	mg/100 ml	-	70	D 381 - 99	
15	Washed gum	mg/100 ml	-	5	D 381 - 99	
16	Tekanan Uap	kPa	45	60	D 5191-99 atau D 323	
17	Berat Jenis (pada suhu 15 °C)	kg/m ³	715	770	D 4052-96 atau D 1298	
18	Korosi bilah tembaga	ment	kelas I		D 130 - 94	
19	Uji Doctor		Negatif			IP 30
20	Sulfur Mercaptan	% massa	-	0,002	D 3227	
21	Penampilan visual		Jernih dan terang			
22	Warna		Biru			
23	Kandungan pewarna	g/100 l	-	0,13		

*) Apabila kandungan olefin di atas 20%, hasil pengujian angka stabilitas oksidasi minimum 1000 menit.

CATATAN UMUM:

- Aditif harus kompatibel dengan minyak mesin (tidak menambah kekotoran mesin/kerak)
Aditif yang mengandung komponen pembentuk abu (ash forming) tidak diperbolehkan.
- Pemeliharaan secara baik untuk mengurangi kontaminasi (debu, air, bahan bakar lain, dll.)

CATATAN KAKI:

- CATATAN 1 : Batasan 0,05% m/m setara dengan 500 ppm.
 CATATAN 2 : Pada atau di bawah batasan deteksi dari metode uji yang digunakan. Tidak ada penambahan yang disengaja.
 CATATAN 3 : Bila digunakan oksigenat, jenis ether lebih disukai. Penggunaan etanol diperbolehkan sampai dengan maksimum 10% volum (sesuai ASTM D 4086 dan pH 7-9). Alkohol berkarbon lebih tinggi (C>2) dibatasi maksimal 0,1% volum. Penggunaan metanol tidak diperbolehkan.



Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi

[Signature]
 Djoedin Takhyan

Lampiran 1: Spesifikasi Gasolin (Premium)

Lampiran III : Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi
 Nomor : 3674 K/24/DJM/2006
 Tanggal : 17 Maret 2006

**SPESIFIKASI BAHAN BAKAR MINYAK JENIS BENSIN 95
 (PERTAMAX PLUS)**

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji	
			Min.	Maks.	ASTM	Lain
1	Angka Oktana Riset (RON)	-	95.0	-	D 2699 - 85	
2	Stabilitas Oksidasi	merit	480	-	D 525 - 99a	
3	Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05 ^{*)}	D 2622 - 98	
4	Kandungan Timbal (Pb)	g/l	-	0,013 ^{*)}	D 3237 - 97	
5	Kandungan Phosphor	mg/l	tak terdeteksi		D 3231 - 99	
6	Kandungan Logam (Mangan, Besi dll.)	mg/l	tak terdeteksi		D 3831 - 94	
7	Kandungan Silikon	mg/kg	tak terdeteksi		ICP-AES (Merujuk pada metode in-house dengan batasan deteksi = 1 mg/kg)	
8	Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,7 ^{*)}	D 4815 - 94a	
9	Kandungan Olefin	% v/v	-	?)	D 1319 - 99	
10	Kandungan Aromatik	% v/v	-	40,0	D 1319 - 99	
11	Kandungan Benzene	% v/v	-	5,0	D 4420 - 94	
12	Distilasi :				D 85 - 99a	
	10% vol. penguapan	°C	-	70		
	50% vol. penguapan	°C	77	110		
	90% vol. penguapan	°C	130	180		
	Titik didih akhir	°C	-	205		
	Residu	% vol	-	2,0		
13	Sedimen	mg/l	-	1	D 5452 - 97	
14	Unwashed gum	mg/100 ml	-	70	D 381 - 98	
15	Washed gum	mg/100 ml	-	5	D 381 - 98	
16	Tekanan Uap	kPa	45	80	D 5191-99 atau D 323	
17	Berat Jenis (pada suhu 15 °C)	kgm ³	715	770	D 4052-96 atau D 1298	
18	Korosi bilah tembaga	merit	kelas I		D 130 - 94	
19	Uji Doctor		Negatif			IP 30
20	Sulfur Mercaptan	% massa	-	0,0020	D 3227	
21	Penampilan visual		Jernih dan terang			
22	Warna		Kuning			
23	Kandungan pewarna	g/100 l	-	0,13		

*) Apabila kandungan olefin di atas 20%, hasil pengujian angka stabilitas oksidasi minimum 1000 merit.

CATATAN UMUM :

- Aditif harus kompatibel dengan minyak mesin (tidak menambah kekotoran mesin/korak). Aditif yang mengandung komponen pembentuk abu (ash forming) tidak diperbolehkan.
- Pemeliharaan secara baik untuk mengurangi kontaminasi (debu, air, bahan bakar lain, dll.)

CATATAN KAMI :

- CATATAN 1 : Batasan 0,05% m/m setara dengan 500 ppm.
 CATATAN 2 : Pada atau di bawah batasan deteksi dari metode uji yang digunakan. Tidak ada penambahan yang disengaja.
 CATATAN 3 : Bila digunakan oksigenat, jenis ether lebih disukai. Penggunaan etanol diperbolehkan sampai dengan maksimum 10% volum (sesuai ASTM D 4086 dan pH 7-9). Alkohol berkarbon lebih tinggi (C>2) dibatasi maksimal 0,1% volum. Penggunaan metanol tidak diperbolehkan.

Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi


Representative Office

Jalan Rajawali No.29, Surabaya 60175
Phone +62 31 355 4502, Fax +62 31 355 4502

Head Office

Jalan Raya Gempolkerep, Gedeg, Mojokerto
61351
Phone +62 321 360 360, Fax +62 321 363 363

**ANALYSIS REPORT
LABORATORY & QUALITY CONTROL
PT ENERGI AGRO NUSANTARA**

Sample Name	Ethanol Product (S 209)
Sample Date	December 17 th , 2014
Sampling Point	PU-1806
Test Date	December 17 th , 2014
Test Time	16:00

ANALYSIS RESULT :

No	Parameter	Unit	Result	Method
1	Ethanol Content @ 15.56 ^o C	%v/v	99.76	Conversion from Table
2	Water Content	%v/v	0.1272	ASTM E 203
3	Density @ 15.56 ^o C	gr/cm ³	0.7947	ASTM D 4052
4	Acidity	%w/w	0.0002	ASTM D1613
5	pHe		6.85	ASTM D6423
6	Impurities			
	Methanol	%v/v	0.007	ASTM D5501
	1-Propanol	%v/v	0.5421	
	Isoamyl Alcohol	%v/v	0.0063	
	Isobutanol	%v/v	0.0301	
	Ethyl Acetate	%v/v	0.0349	
7	Appearance		Clear & bright, free of suspended and precipitated contaminants	Visual

Supervisor of Laboratory & Quality Control : Anggreini Fajar PL

Approved By :

Manager of Research & Development : Dimas Eko Prasetyo

Representative Office

Jalan Rajawali No.29, Surabaya 60175
Phone +62 31 355 4502, Fax +62 31 355 4502

Head Office

Jalan Raya Gempolkerep, Gedeg, Mojokerto
61351
Phone +62 321 360 360, Fax +62 321 363 363

**ANALYSIS REPORT
LABORATORY & QUALITY CONTROL
PT ENERGI AGRO NUSANTARA**

Sample Name	Ethanol Product (S 209)
Sample Date	September 30 th , 2014
Sampling Point	PU-1806
Test Date	September 30 th , 2014
Test Time	16:00

ANALYSIS RESULT :

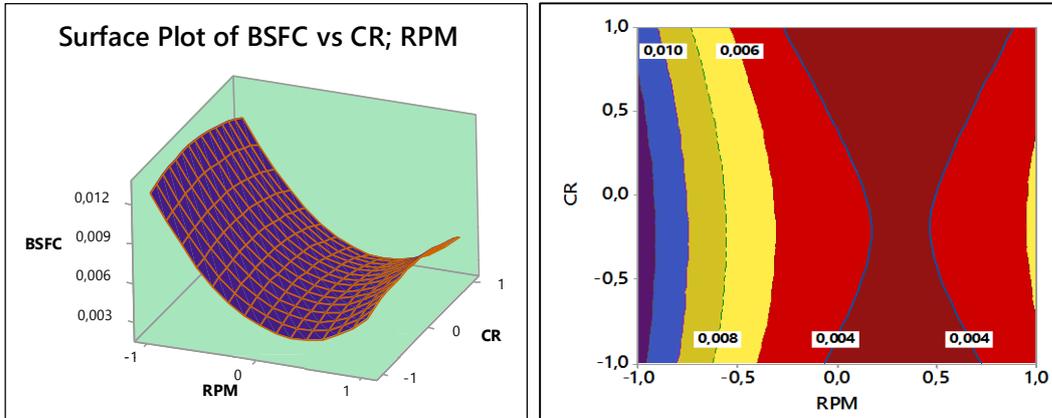
No	Parameter	Unit	Result	Method
1	Ethanol Content @ 15.56 ^o C	%v/v	99.9	Conversion from Table
2	Water Content	%v/v	0.0665	ASTM E 203
3	Density @ 15.56 ^o C	gr/cm ³	0.7940	ASTM D 4052
4	Acidity	%w/w	0.0001	ASTM D1613
5	pHe		6.89	ASTM D6423
6	Impurities			
	Methanol	%v/v	0.0145	ASTM D5501
	1-Propanol	%v/v	0.1026	
	Isoamyl Alcohol	%v/v	0.0953	
	Isobutanol	%v/v	0.038	
	Ethyl Acetate	%v/v	0.0352	
7	Appearance		Clear & bright, free of suspended and precipitated contaminants	Visual

Supervisor of Laboratory & Quality Control : Anggreini Fajar PL

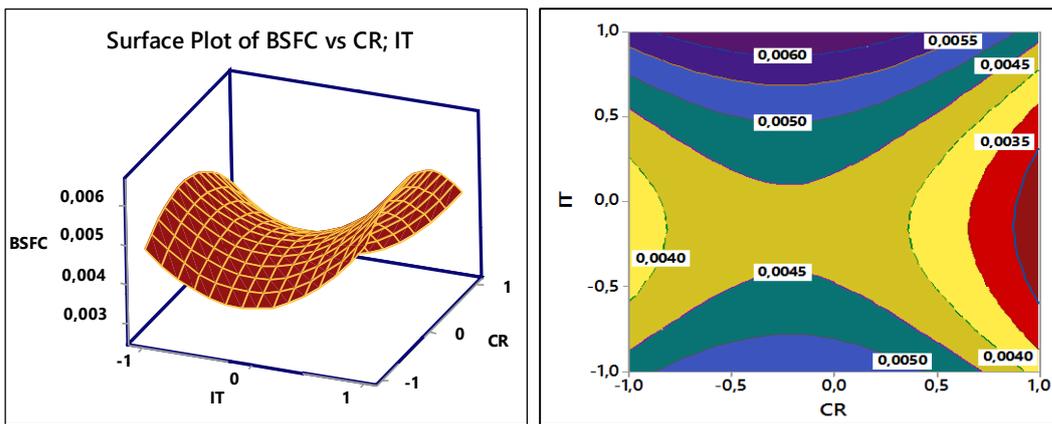
Approved By :

Manager of Research & Development : Dimas Eko Prasetyo

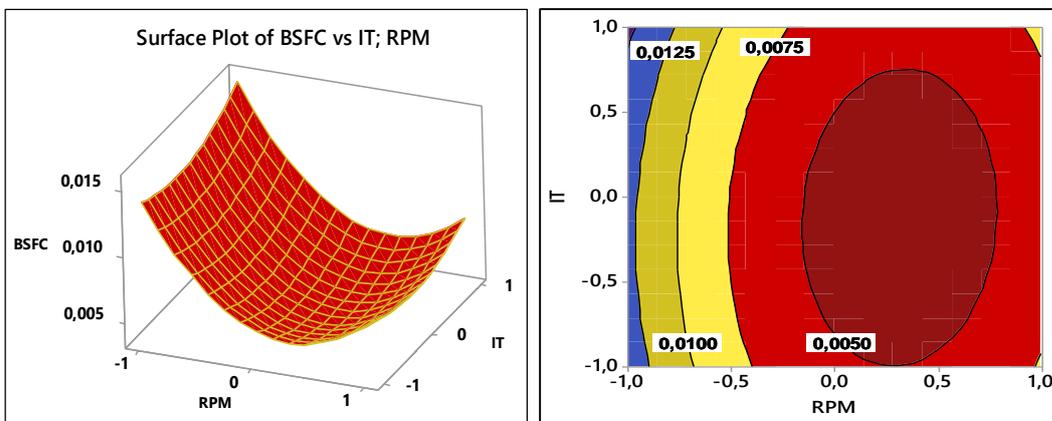
Lampiran 3: Plot Permukaan dan Kontur Optimasi Respon BSFC E100



Gambar 3-1: Plot permukaan dan kontur BSFC vs CR; RPM

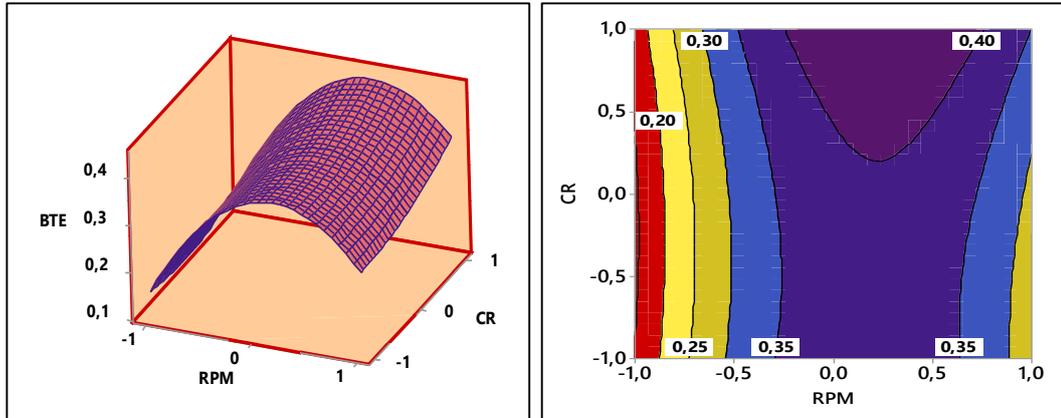


Gambar 3-2: Plot permukaan dan kontur BSFC vs CR; IT

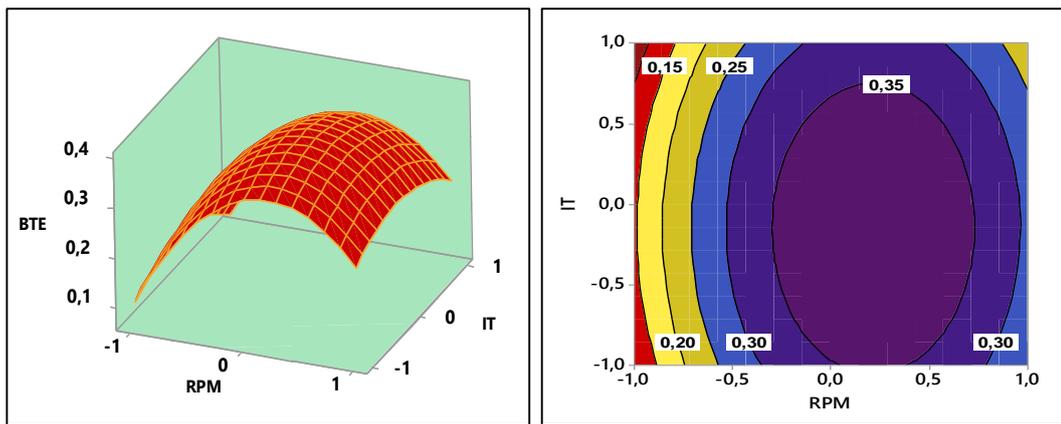


Gambar 3-3: Plot permukaan dan kontur BSFC vs IT; RPM

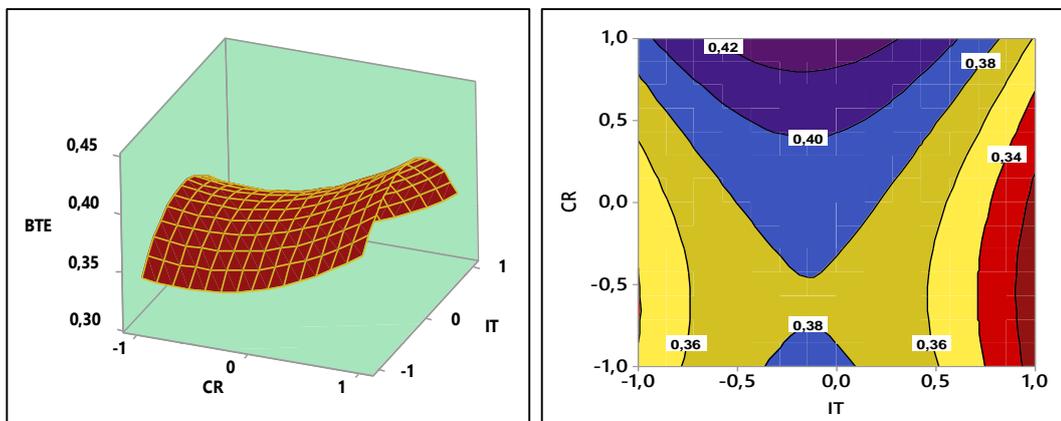
Lampiran 4: Plot Permukaan dan Kontur Optimasi Respon BTE E100



Gambar 4-1: Plot permukaan dan kontur BTE vs CR; RPM

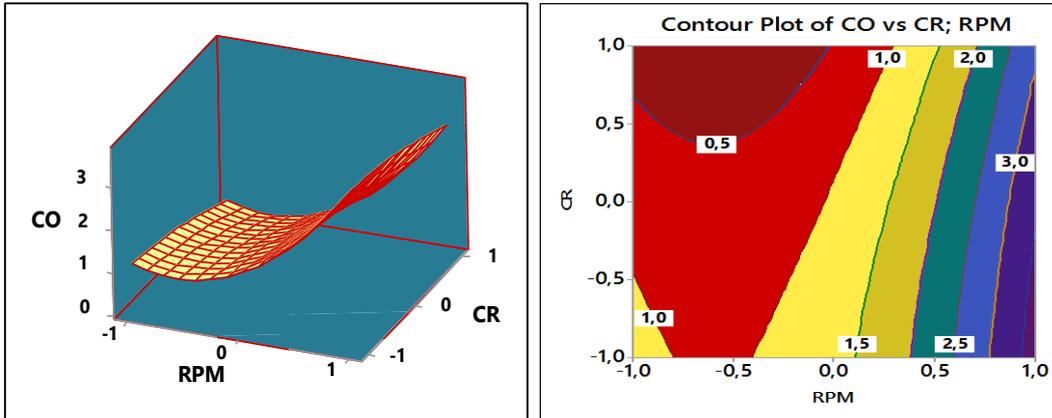


Gambar 4-2: Plot permukaan BTE vs IT; RPM

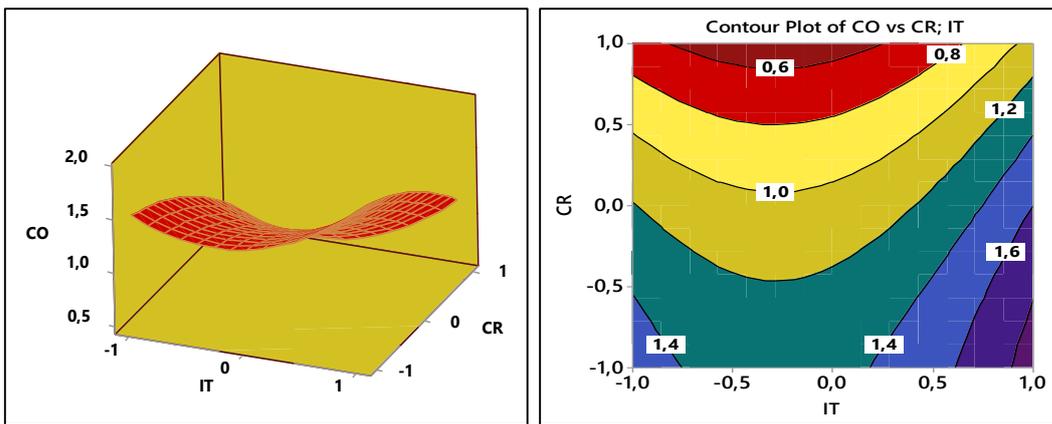


Gambar 4-3: Plot permukaan BTE vs IT; CR

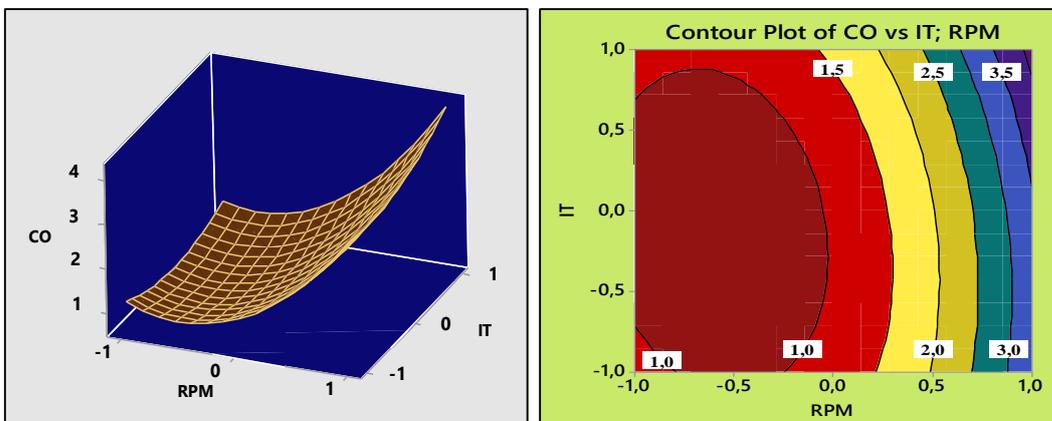
Lampiran 5: Plot Permukaan dan Kontur Optimasi Respon CO E100



Gambar 5-1: Plot permukaan dan kontur CO vs RPM; CR

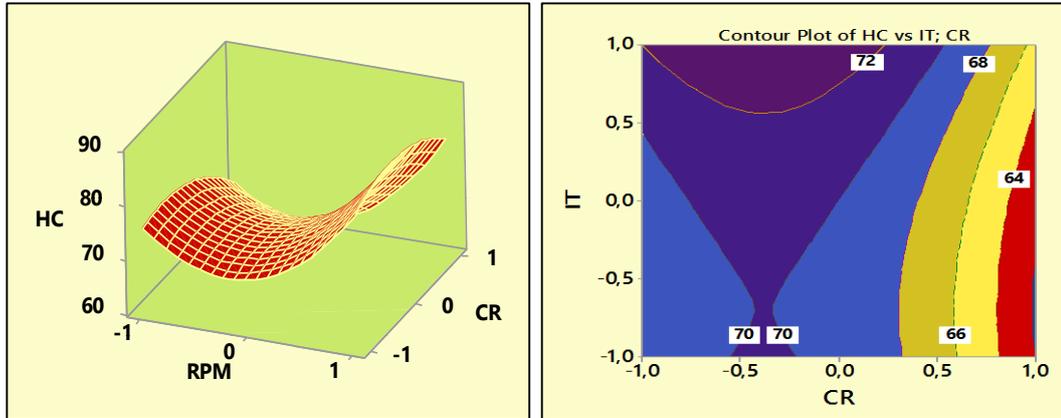


Gambar 5-2: Plot permukaan dan kontur CO vs IT; CR

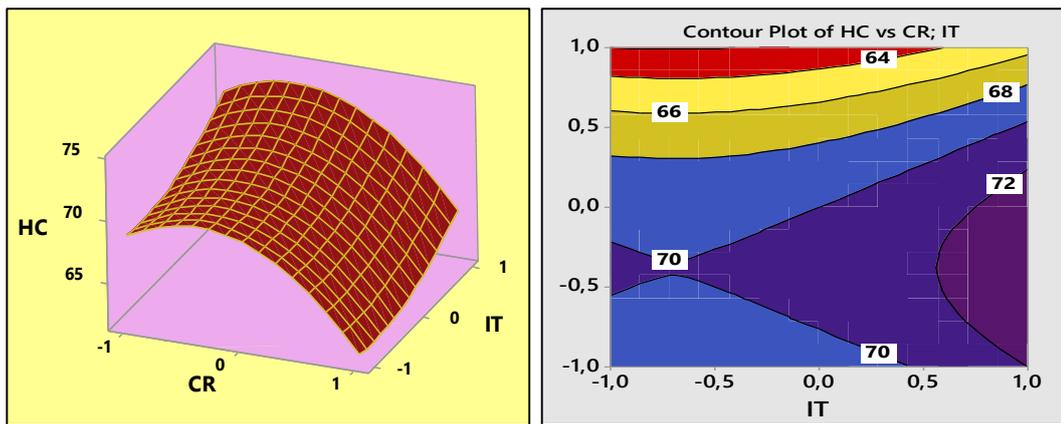


Gambar 5-3: Plot permukaan dan kontur CO vs RPM; IT

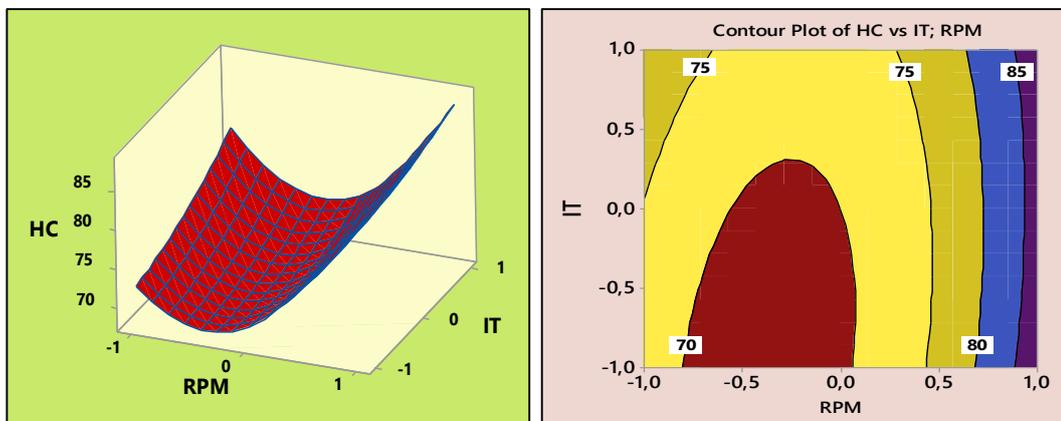
Lampiran 6: Plot Permukaan dan Kontur Optimasi Respon HC E100



Gambar 6-1: Plot permukaan dan kontur HC vs RPM; CR



Gambar 6-2: Plot permukaan dan kontur HC vs IT; CR



Gambar 6-3: Plot permukaan dan kontur HC vs RPM; IT

Lampiran 7: Data Pengamatan dan Perhitungan Respon E85

Run Order	CR	IT	RPM	Torsi	BSFC	BTE	CO	HC
				(Nm)	(kg/HP.min)	(%)	(%)	(ppm)
1	-1	-1	0	10,199	0,004792	0,320858	1,62	77
2	1	-1	0	11,082	0,003985	0,3858	0,81	61
3	-1	1	0	10,591	0,004454	0,345171	1,59	82
4	1	1	0	11,082	0,004024	0,382062	0,79	66
5	-1	0	-1	5,296	0,014359	0,107075	1,69	88
6	1	0	-1	5,688	0,012866	0,119508	0,41	67
7	-1	0	1	10,885	0,007667	0,200531	4,97	101
8	1	0	1	11,180	0,006303	0,243944	3,28	84
9	0	-1	-1	5,786	0,013183	0,116631	1,14	93
10	0	1	-1	5,688	0,012772	0,120379	1,06	80
11	0	-1	1	10,199	0,007113	0,216149	4,37	101
12	0	1	1	13,141	0,005645	0,272366	3,32	96
13	0	0	0	10,991	0,004378	0,321064	1,24	77
14	0	0	0	11,542	0,004673	0,329018	1,24	77
15	0	0	0	11,301	0,004967	0,336972	1,24	77

Lampiran 8: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi Torsi E85

Tabel 8-1: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk torsi E85

Response Surface Regression: Torsi-E85 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	92,1672	10,2408	44,89	0,000
Linear	3	67,6605	22,5535	98,87	0,000
CR	1	0,5310	0,5310	2,33	0,188
IT	1	1,3090	1,3090	5,74	0,062
RPM	1	65,8206	65,8206	288,53	0,000
Square	3	22,1555	7,3852	32,37	0,001
CR*CR	1	0,5699	0,5699	2,50	0,175
IT*IT	1	0,0086	0,0086	0,04	0,853
RPM*RPM	1	21,7646	21,7646	95,41	0,000
2-Way Interaction	3	2,3512	0,7837	3,44	0,109
CR*IT	1	0,0384	0,0384	0,17	0,699
CR*RPM	1	0,0024	0,0024	0,01	0,923
IT*RPM	1	2,3104	2,3104	10,13	0,024
Error	5	1,1406	0,2281		
Lack-of-Fit	3	0,8876	0,2959	2,34	0,314
Pure Error	2	0,2530	0,1265		
Total	14	93,3078			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,477622	98,78%	96,58%	84,17%

Tabel 8-2: Analisis varian torsi E85

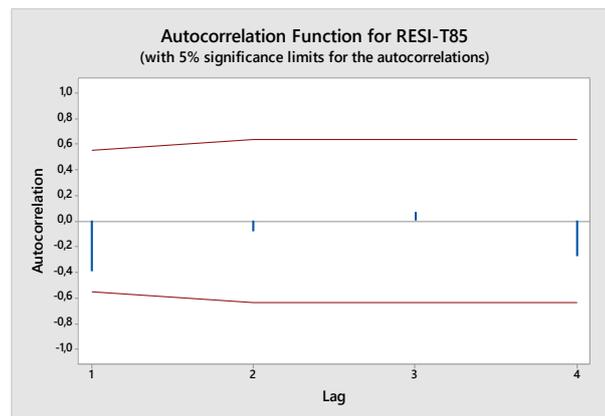
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		11,083	0,276	40,19	0,000	
CR	0,515	0,258	0,169	1,53	0,188	1,00
IT	0,809	0,404	0,169	2,40	0,062	1,00
RPM	5,737	2,868	0,169	16,99	0,000	1,00
CR*CR	-0,786	-0,393	0,249	-1,58	0,175	1,01
IT*IT	0,097	0,048	0,249	0,19	0,853	1,01
RPM*RPM	-4,856	-2,428	0,249	-9,77	0,000	1,01
CR*IT	-0,196	-0,098	0,239	-0,41	0,699	1,00
CR*RPM	-0,048	-0,024	0,239	-0,10	0,923	1,00
IT*RPM	1,520	0,760	0,239	3,18	0,024	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Torsi-E85} = 11,083 + 0,258 \text{ CR} + 0,404 \text{ IT} + 2,868 \text{ RPM} - 0,393 \text{ CR*CR} + 0,048 \text{ IT*IT} - 2,428 \text{ RPM*RPM} - 0,098 \text{ CR*IT} - 0,024 \text{ CR*RPM} + 0,760 \text{ IT*RPM}$$

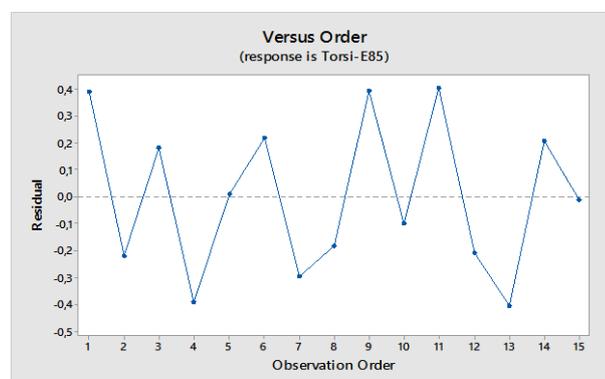
Lampiran 9: Pengujian Asumsi Residual Respon Torsi E85

a. Uji Independensi



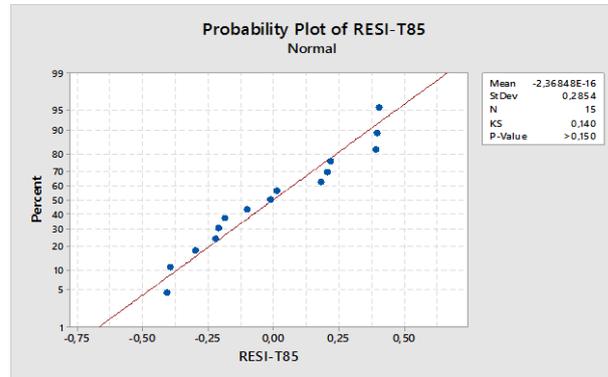
Gambar 9-1: Grafik ACF model pendugaan respon torsi E85

b. Uji Independensi



Gambar 9-2: Grafik uji keidentikan residual respon torsi E85

c. Uji Normalitas



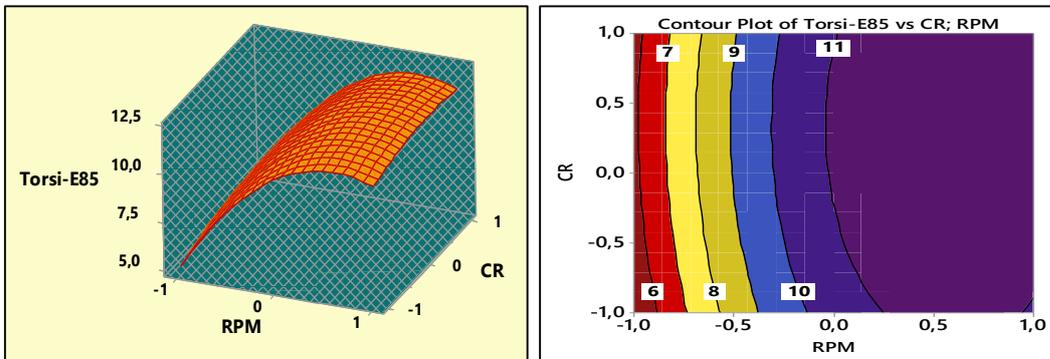
Gambar 9-3: Grafik distribusi normal residual respon torsi E85

Lampiran 10: Model Persamaan Respon Torsi E85

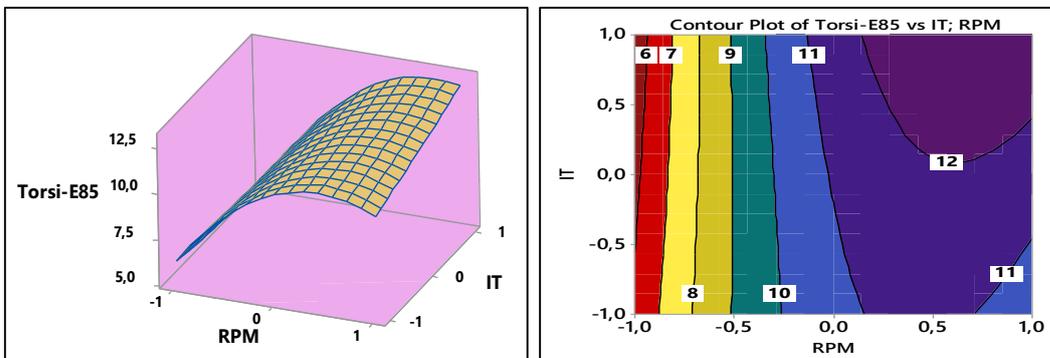
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon torsi E85 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$T - 85 = 11,083 + 2,868RPM - 2,428RPM * RPM + 0,760IT * RPM$$

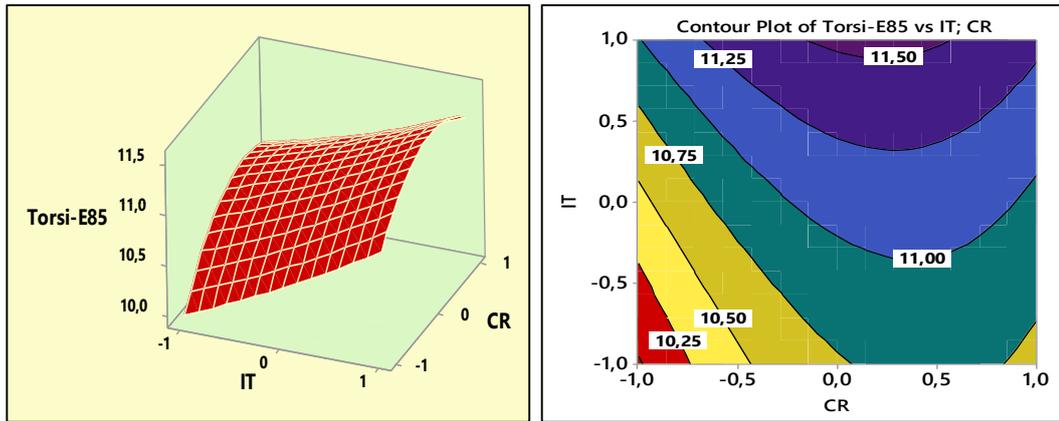
Lampiran 11: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon Torsi E85



Gambar 11-1: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs CR; RPM



Gambar 11-2: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs IT; RPM



Gambar 11-3: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs CR; IT

Lampiran 12: Input Sintak dan Solusi Optimasi Lokal Repon Torsi E85

Tabel 12-1: Input sintak model persamaan optimasi respon torsi E85

```

Lingo Model - Torsi-E85
Model:
!TORSI;
[Respon_TorsiE85]max=(11.083)+(2.868*RPM)-(2.428*RPM*RPM)+(0.760*(IT*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END

```

Tabel 12-2: Solusi optimasi lokal respon torsi E85

Solution Report - Torsi-E85			
Local optimal solution found.			
Objective value:		12.43827	
Infeasibilities:		0.000000	
Total solver iterations:		28	
Elapsed runtime seconds:		0.61	
Model Class: QP			
Total variables:	3		
Nonlinear variables:	2		
Integer variables:	0		
Total constraints:	7		
Nonlinear constraints:	1		
Total nonzeros:	8		
Nonlinear nonzeros:	2		
	Variable	Value	Reduced Cost
	RPM	0.7471170	0.000000
	IT	1.000000	0.000000
	CR	1.000000	0.000000

Lampiran 13: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi BSFC E85

Tabel 13-1: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BSFC E85

Response Surface Regression: BSFC-E85 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,000207	0,000023	123,77	0,000
Linear	3	0,000090	0,000030	162,02	0,000
CR	1	0,000002	0,000002	11,30	0,020
IT	1	0,000001	0,000001	3,20	0,134
RPM	1	0,000087	0,000087	471,57	0,000
Square	3	0,000116	0,000039	208,73	0,000
CR*CR	1	0,000000	0,000000	0,59	0,478
IT*IT	1	0,000001	0,000001	4,01	0,102
RPM*RPM	1	0,000113	0,000113	610,13	0,000
2-Way Interaction	3	0,000000	0,000000	0,57	0,657
CR*IT	1	0,000000	0,000000	0,19	0,680
CR*RPM	1	0,000000	0,000000	0,02	0,887
IT*RPM	1	0,000000	0,000000	1,51	0,274
Error	5	0,000001	0,000000		
Lack-of-Fit	3	0,000001	0,000000	1,49	0,426
Pure Error	2	0,000000	0,000000		
Total	14	0,000208			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0004307	99,55%	98,75%	94,75%

Tabel 13-2: Analisis varian BSFC E85

Response Surface Regression: BSFC-E85 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

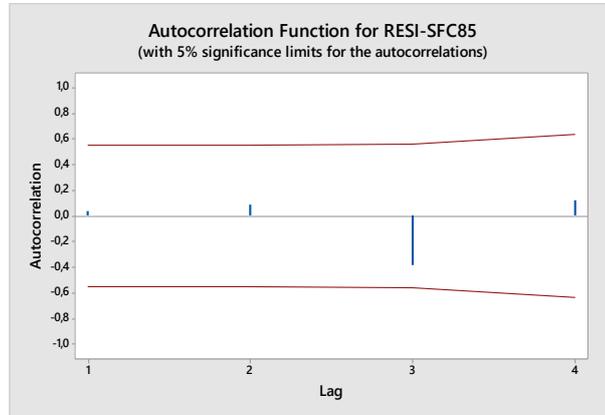
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,004591	0,000249	18,46	0,000	
CR	-0,001023	-0,000512	0,000152	-3,36	0,020	1,00
IT	-0,000545	-0,000272	0,000152	-1,79	0,134	1,00
RPM	-0,006613	-0,003306	0,000152	-21,72	0,000	1,00
CR*CR	0,000343	0,000172	0,000224	0,77	0,478	1,01
IT*IT	-0,000898	-0,000449	0,000224	-2,00	0,102	1,01
RPM*RPM	0,011072	0,005536	0,000224	24,70	0,000	1,01
CR*IT	0,000189	0,000094	0,000215	0,44	0,680	1,00
CR*RPM	0,000064	0,000032	0,000215	0,15	0,887	1,00
IT*RPM	-0,000529	-0,000264	0,000215	-1,23	0,274	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{BSFC-E85} = & 0,004591 - 0,000512 \text{ CR} - 0,000272 \text{ IT} - 0,003306 \text{ RPM} \\ & + 0,000172 \text{ CR*CR} - 0,000449 \text{ IT*IT} + 0,005536 \text{ RPM*RPM} \\ & + 0,000094 \text{ CR*IT} + 0,000032 \text{ CR*RPM} - 0,000264 \text{ IT*RPM} \end{aligned}$$

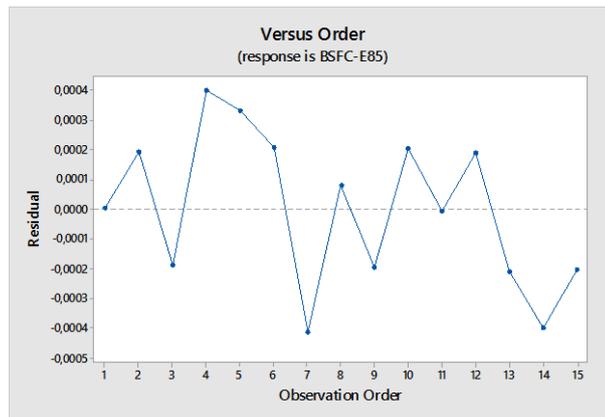
Lampiran 14: Pengujian Asumsi Residual Respon BSFC E85

a. Uji Independensi



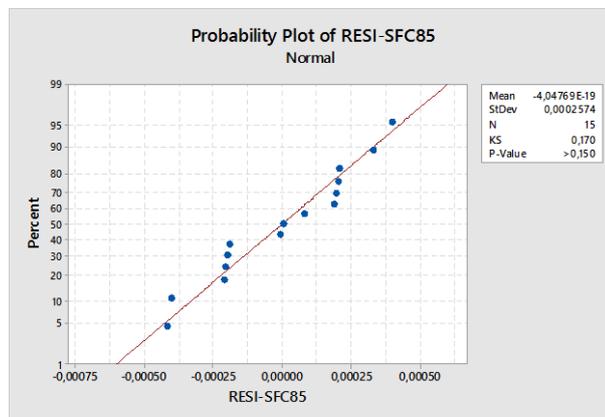
Gambar 14-1: Grafik ACF model pendugaan respon BSFC E85

b. Uji Independensi



Gambar 14-2: Grafik uji keidentikan residual respon BSFC E85

c. Uji Normalitas



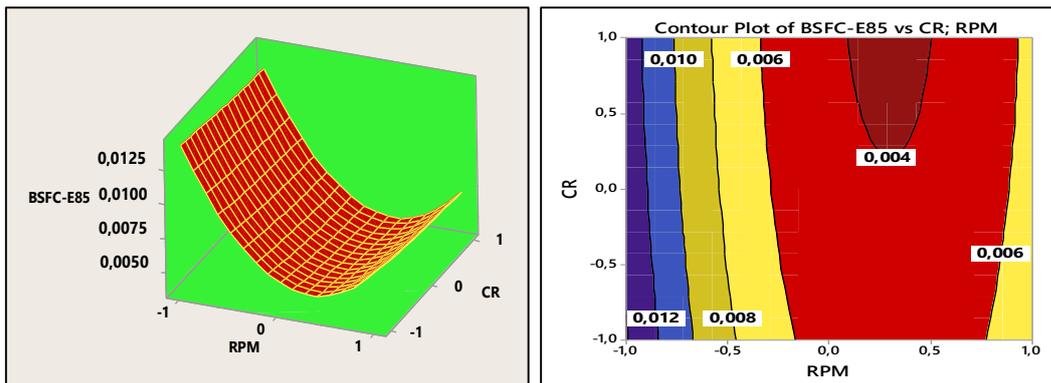
Gambar 14-3: Grafik distribusi normal residual respon BSFC E85

Lampiran 15: Model Persamaan Repon BSFC E85

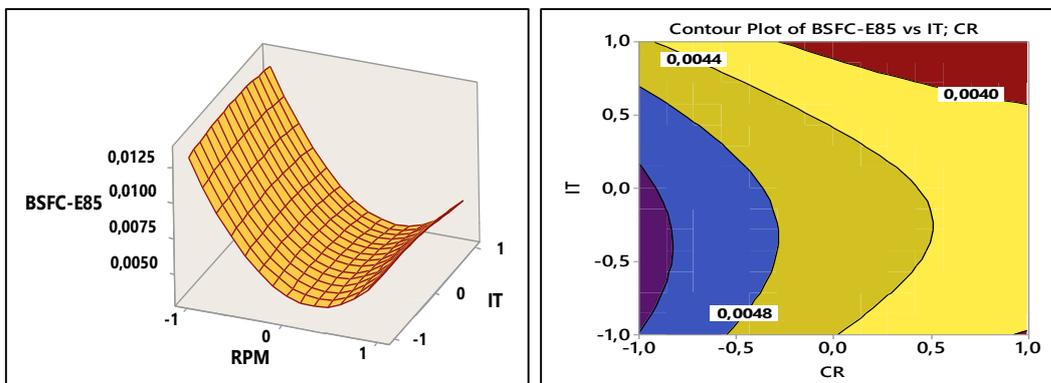
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon BSFC E85 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$BSFC - E85 = 0,004591 - 0,000512 CR - 0,003306 RPM + 0,005536 RPM * RPM$$

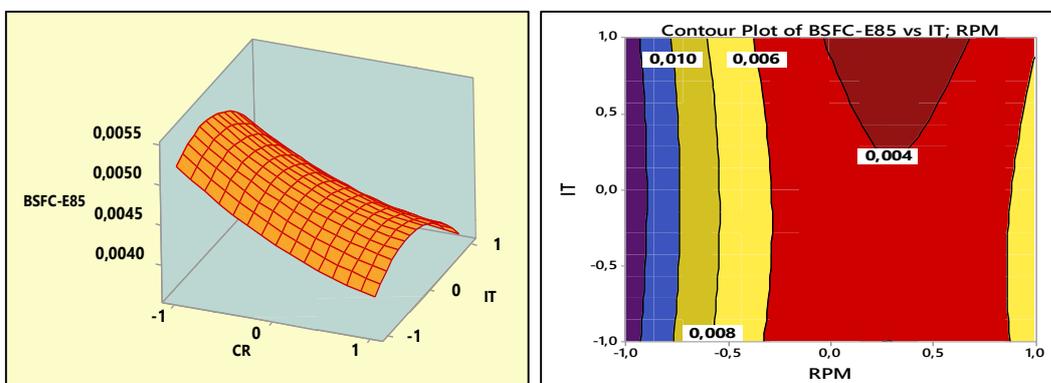
Lampiran 16: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon BSFC E85



Gambar 16-1: Plot permukaan dan kontur respon BSFC vs CR; RPM



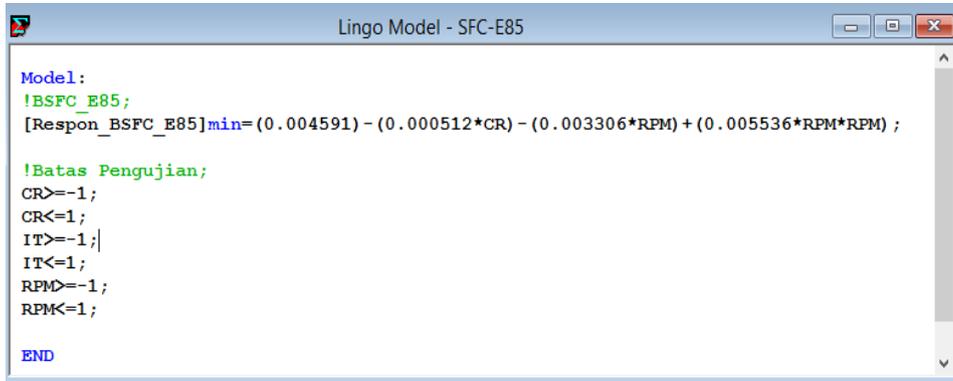
Gambar 16-2: Plot permukaan dan kontur respon BSFC vs CR; IT



Gambar 16-3: Plot permukaan dan kontur respon BSFC vs IT; RPM

Lampiran 17: Input Sintak Persamaan dan Solusi Optimasi Lokal BSFC E85

Tabel 17-1: Input model persamaan optimasi respon BSFC-E85

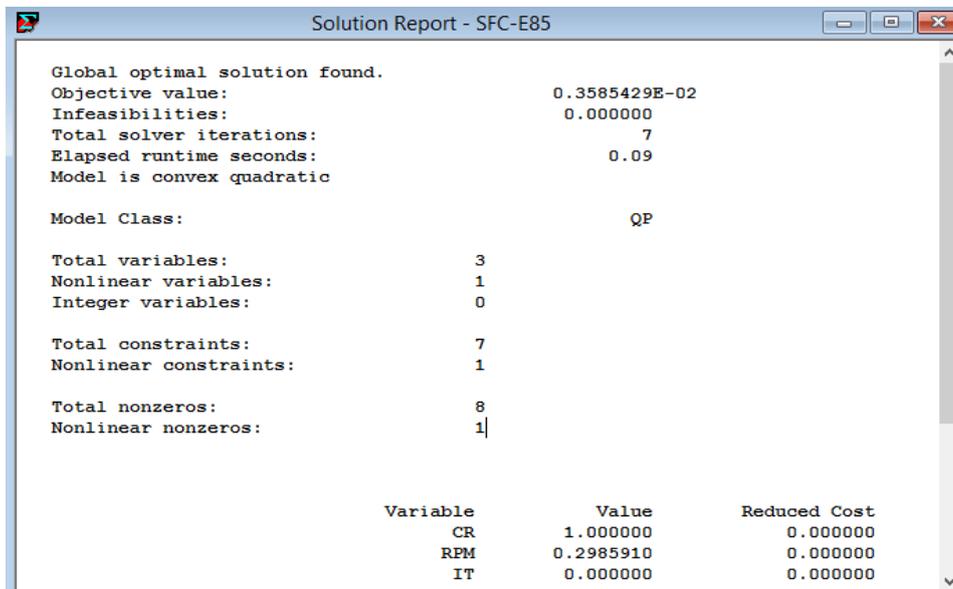


```
Model:
!BSFC_E85;
[Respon_BSFC_E85]min=(0.004591)-(0.000512*CR)-(0.003306*RPM)+(0.005536*RPM*RPM);

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END
```

Tabel 17-2: Solusi optimasi respon BSFC-E85



Global optimal solution found.		
Objective value:		0.3585429E-02
Infeasibilities:		0.000000
Total solver iterations:		7
Elapsed runtime seconds:		0.09
Model is convex quadratic		
Model Class: QP		
Total variables:	3	
Nonlinear variables:	1	
Integer variables:	0	
Total constraints:	7	
Nonlinear constraints:	1	
Total nonzeros:	8	
Nonlinear nonzeros:	1	
	Variable	Value
	CR	1.000000
	RPM	0.2985910
	IT	0.000000
		Reduced Cost
	CR	0.000000
	RPM	0.000000
	IT	0.000000

Lampiran 18: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi BTE E85

Tabel 18-1: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BTE E85

Response Surface Regression: BTE-E85 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,143963	0,015996	110,16	0,000
Linear	3	0,031460	0,010487	72,22	0,000
CR	1	0,003108	0,003108	21,40	0,006
IT	1	0,000811	0,000811	5,58	0,065
RPM	1	0,027542	0,027542	189,67	0,000
Square	3	0,111378	0,037126	255,67	0,000
CR*CR	1	0,000232	0,000232	1,59	0,262
IT*IT	1	0,001712	0,001712	11,79	0,019
RPM*RPM	1	0,105671	0,105671	727,71	0,000
2-Way Interaction	3	0,001125	0,000375	2,58	0,166
CR*IT	1	0,000197	0,000197	1,35	0,297
CR*RPM	1	0,000240	0,000240	1,65	0,255
IT*RPM	1	0,000688	0,000688	4,74	0,081
Error	5	0,000726	0,000145		
Lack-of-Fit	3	0,000600	0,000200	3,16	0,250
Pure Error	2	0,000127	0,000063		
Total	14	0,144689			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0120504	99,50%	98,59%	93,17%

Tabel 18-2: Analisis varian BTE E85

Response Surface Regression: BTE-E85 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

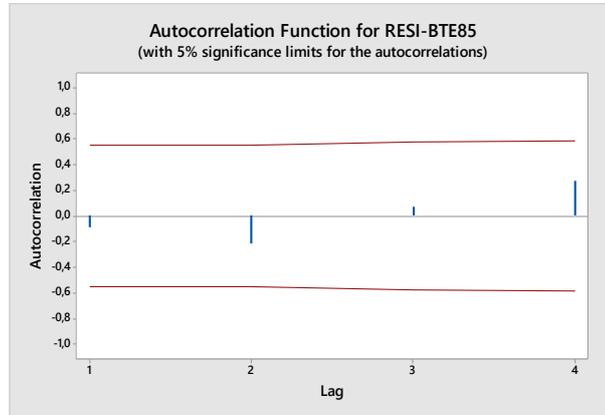
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,32902	0,00696	47,29	0,000	
CR	0,03942	0,01971	0,00426	4,63	0,006	1,00
IT	0,02014	0,01007	0,00426	2,36	0,065	1,00
RPM	0,11735	0,05867	0,00426	13,77	0,000	1,00
CR*CR	0,01584	0,00792	0,00627	1,26	0,262	1,01
IT*IT	0,04307	0,02154	0,00627	3,43	0,019	1,01
RPM*RPM	-0,33835	-0,16917	0,00627	-26,98	0,000	1,01
CR*IT	-0,01403	-0,00701	0,00603	-1,16	0,297	1,00
CR*RPM	0,01549	0,00775	0,00603	1,29	0,255	1,00
IT*RPM	0,02623	0,01312	0,00603	2,18	0,081	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{BTE-E85} = & 0,32902 + 0,01971 \text{ CR} + 0,01007 \text{ IT} + 0,05867 \text{ RPM} \\ & + 0,00792 \text{ CR*CR} + 0,02154 \text{ IT*IT} - 0,16917 \text{ RPM*RPM} \\ & - 0,00701 \text{ CR*IT} + 0,00775 \text{ CR*RPM} + 0,01312 \text{ IT*RPM} \end{aligned}$$

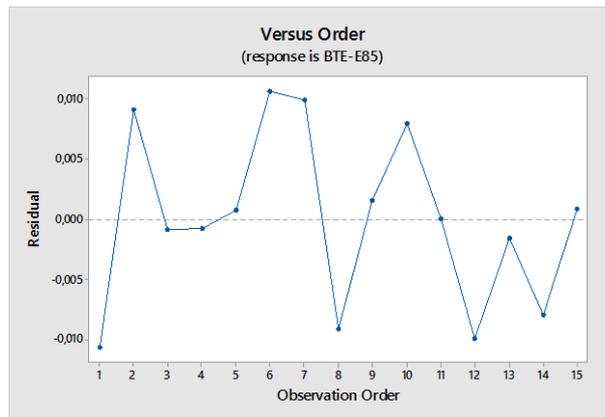
Lampiran 19: Pengujian Asumsi Residual Respon BTE E85

a. Uji Independensi



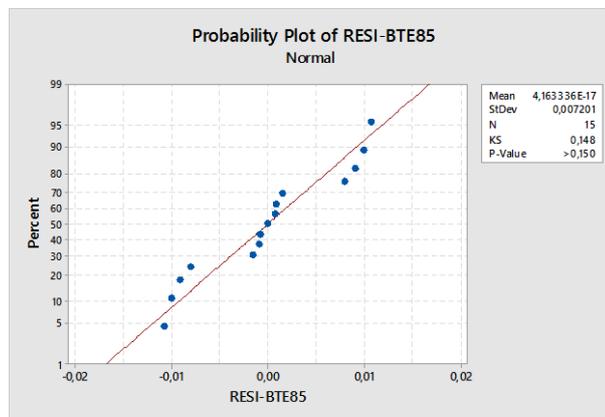
Gambar 19-1: Grafik ACF model pendugaan respon BTE E85

b. Uji Independensi



Gambar 19-2: Grafik uji keidentikan residual respon BTE E85

c. Uji Normalitas



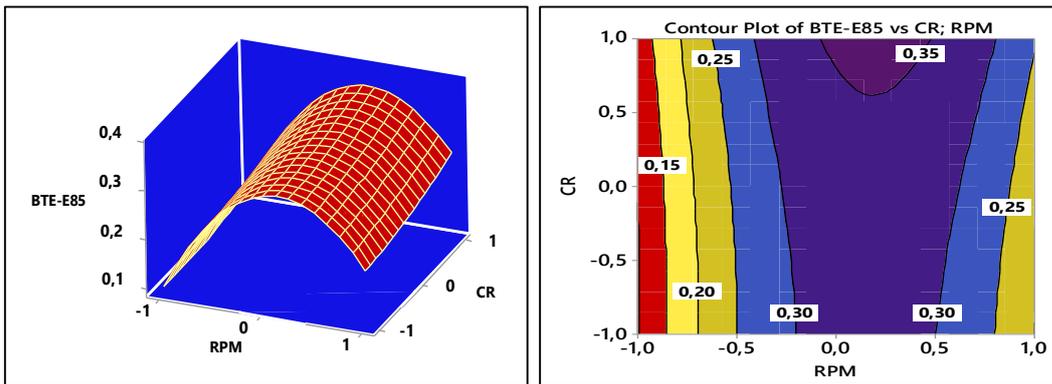
Gambar 19-3: Grafik distribusi normal residual respon BTE E85

Lampiran 20: Model Persamaan Model Repon BTE E85

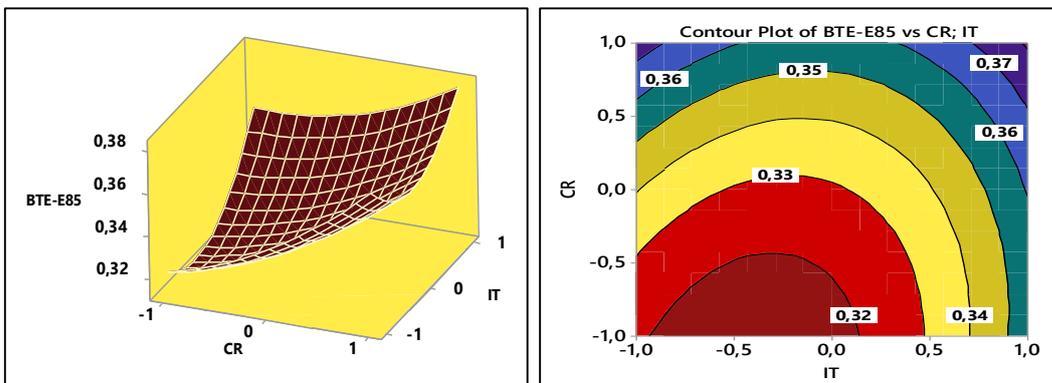
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon BTE-E85 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$BTE - E85 = 0,32902 + 0,01971 CR + 0,05867 RPM + 0,02154 IT * IT - 0,16917 RPM * RPM$$

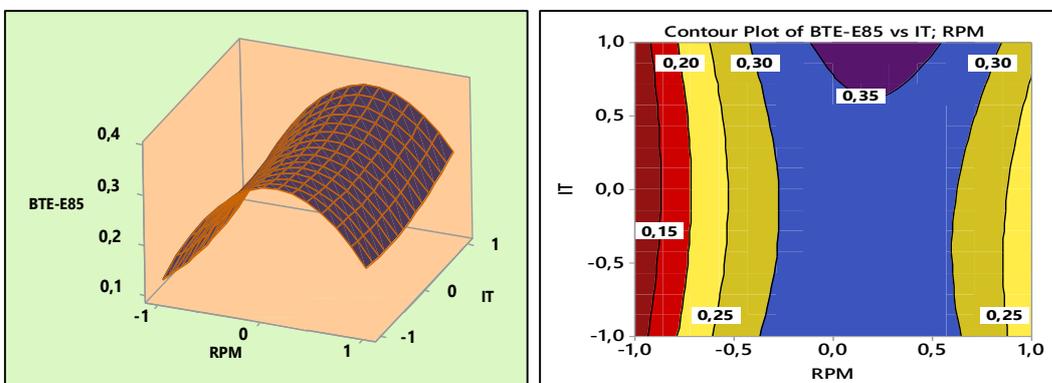
Lampiran 21: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon BTE E85



Gambar 21-1: Plot permukaan dan kontur respon BTE vs CR; RPM



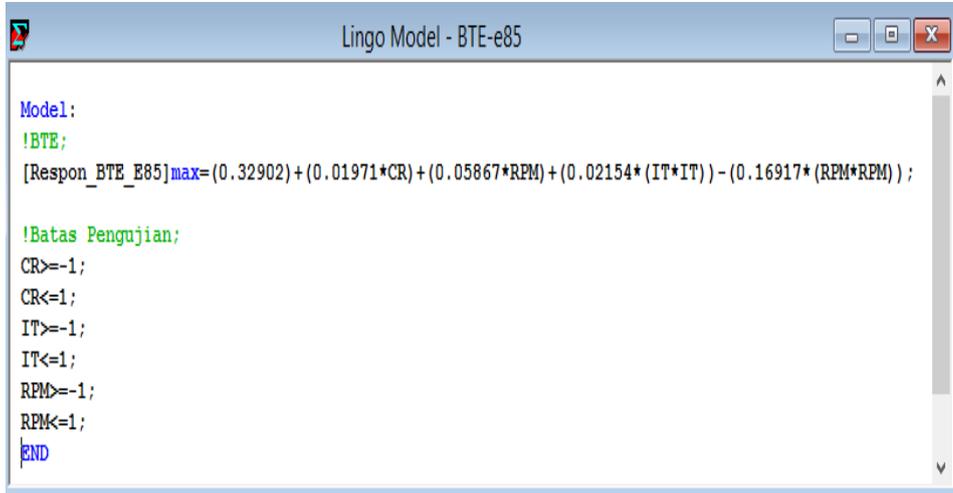
Gambar 21-2: Plot permukaan dan kontur respon BTE vs IT; CR



Gambar 21-3: Plot permukaan dan kontur respon BTE vs IT; RPM

Lampiran 22: Input Sintak dan Solusi Persamaan Optimasi Lokal BTE E85

Tabel 22-1: Input model persamaan optimasi respon BTE-E85

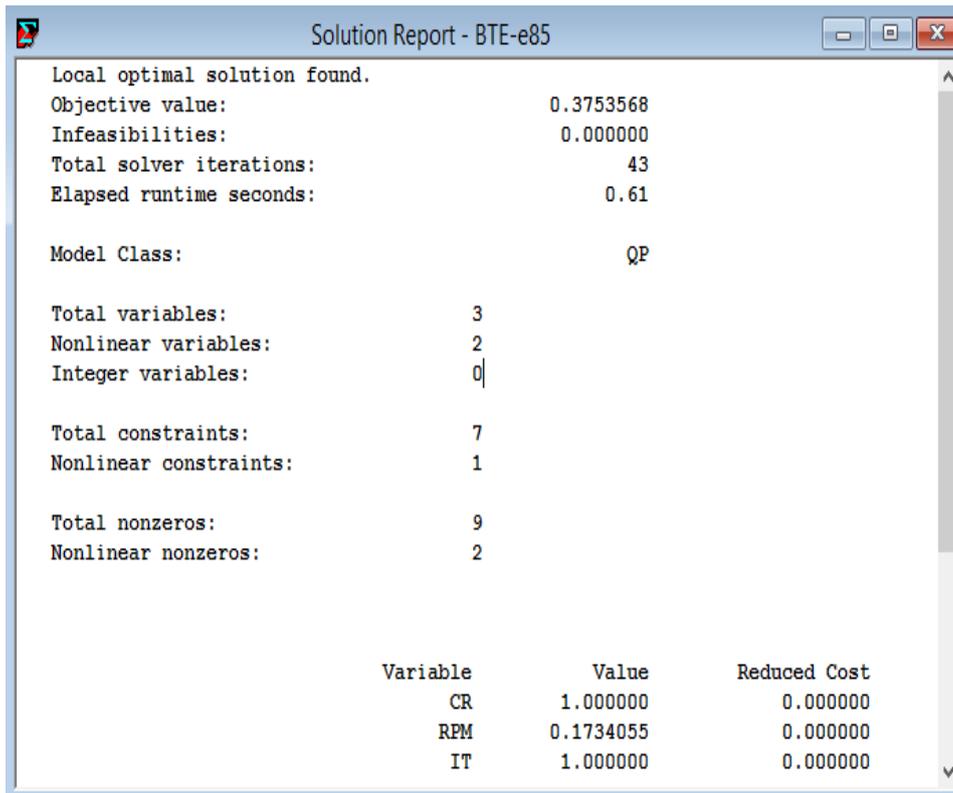


```

Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E85]max=(0.32902)+(0.01971*CR)+(0.05867*RPM)+(0.02154*(IT*IT))-(0.16917*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
    
```

Tabel 22-2: Solusi optimasi respon BTE-E85



Local optimal solution found.

Objective value:	0.3753568
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	43
Elapsed runtime seconds:	0.61
Model Class:	QP
Total variables:	3
Nonlinear variables:	2
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	9
Nonlinear nonzeros:	2

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.1734055	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Lampiran 23: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi CO E85

Tabel 23-1: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk CO E85

Response Surface Regression: CO-E85 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	26,1614	2,9068	29,04	0,001
Linear	3	19,7323	6,5774	65,71	0,000
CR	1	2,6220	2,6220	26,19	0,004
IT	1	0,1741	0,1741	1,74	0,244
RPM	1	16,9362	16,9362	169,19	0,000
Square	3	6,1518	2,0506	20,48	0,003
CR*CR	1	0,0000	0,0000	0,00	0,998
IT*IT	1	0,0485	0,0485	0,48	0,518
RPM*RPM	1	5,9592	5,9592	59,53	0,001
2-Way Interaction	3	0,2773	0,0924	0,92	0,494
CR*IT	1	0,0000	0,0000	0,00	0,988
CR*RPM	1	0,0420	0,0420	0,42	0,546
IT*RPM	1	0,2352	0,2352	2,35	0,186
Error	5	0,5005	0,1001		
Lack-of-Fit	3	0,4314	0,1438	4,16	0,200
Pure Error	2	0,0691	0,0345		
Total	14	26,6619			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,316391	98,12%	94,74%	73,53%

Tabel 23-2: Analisis varian CO E85

Response Surface Regression: CO-E85 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

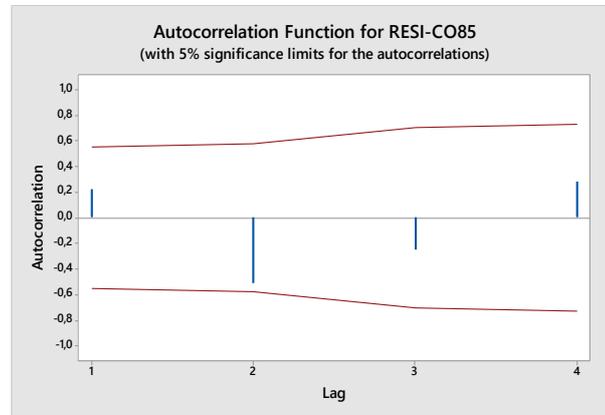
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1,317	0,183	7,21	0,001	
CR	-1,145	-0,573	0,112	-5,12	0,004	1,00
IT	-0,295	-0,147	0,112	-1,32	0,244	1,00
RPM	2,910	1,455	0,112	13,01	0,000	1,00
CR*CR	0,001	0,000	0,165	0,00	0,998	1,01
IT*IT	-0,229	-0,115	0,165	-0,70	0,518	1,01
RPM*RPM	2,541	1,270	0,165	7,72	0,001	1,01
CR*IT	0,005	0,002	0,158	0,02	0,988	1,00
CR*RPM	-0,205	-0,103	0,158	-0,65	0,546	1,00
IT*RPM	-0,485	-0,242	0,158	-1,53	0,186	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{CO-E85} = & 1,317 - 0,573 \text{ CR} - 0,147 \text{ IT} + 1,455 \text{ RPM} + 0,000 \text{ CR*CR} \\ & - 0,115 \text{ IT*IT} + 1,270 \text{ RPM*RPM} + 0,002 \text{ CR*IT} - 0,103 \text{ CR*RPM} \\ & - 0,242 \text{ IT*RPM} \end{aligned}$$

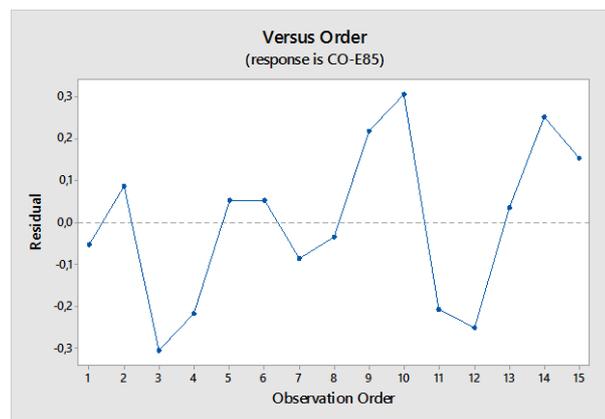
Lampiran 24: Pengujian Asumsi Residual Respon CO E85

a. Uji Independensi



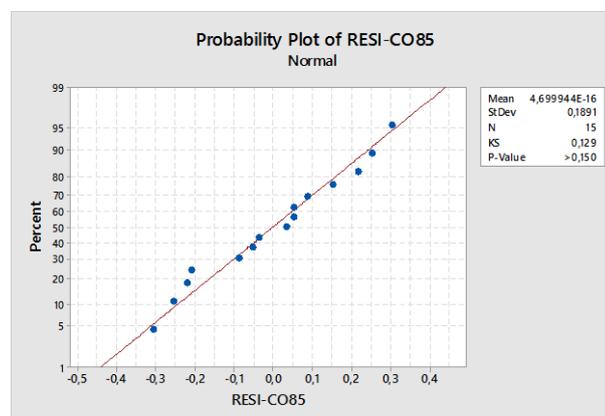
Gambar 24-1: Grafik ACF model pendugaan respon CO E85

b. Uji Independensi



Gambar 24-2: Grafik uji keidentikan residual respon CO E85

c. Uji Normalitas



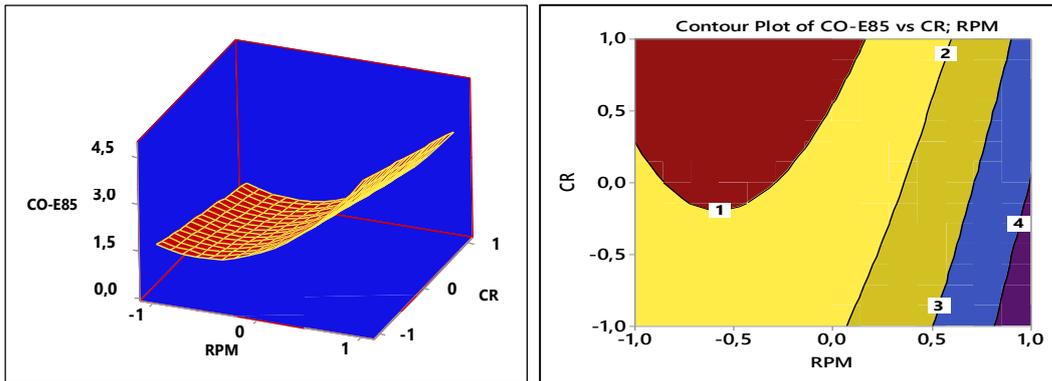
Gambar 24-3: Grafik distribusi normal residual respon CO E85

Lampiran 25: Model Persamaan Repon CO E85

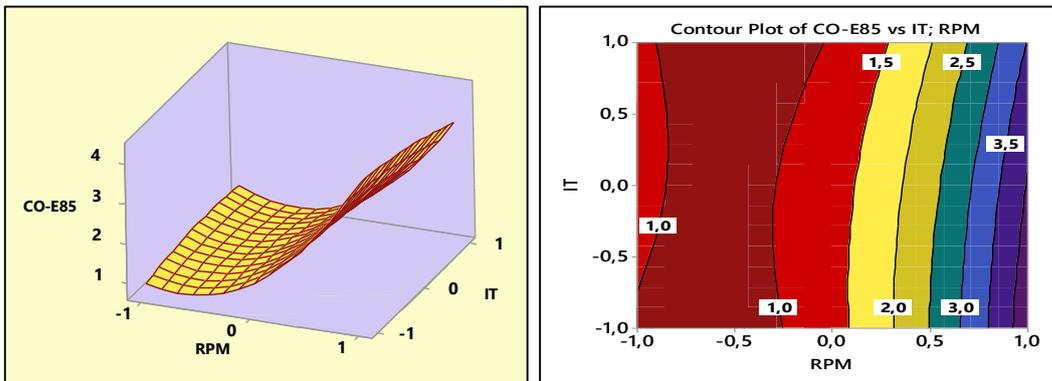
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon CO-E85 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$CO - E85 = 1,317 - (0,573 * CR) + (1,455 * RPM) + (1,270 * RPM * RPM)$$

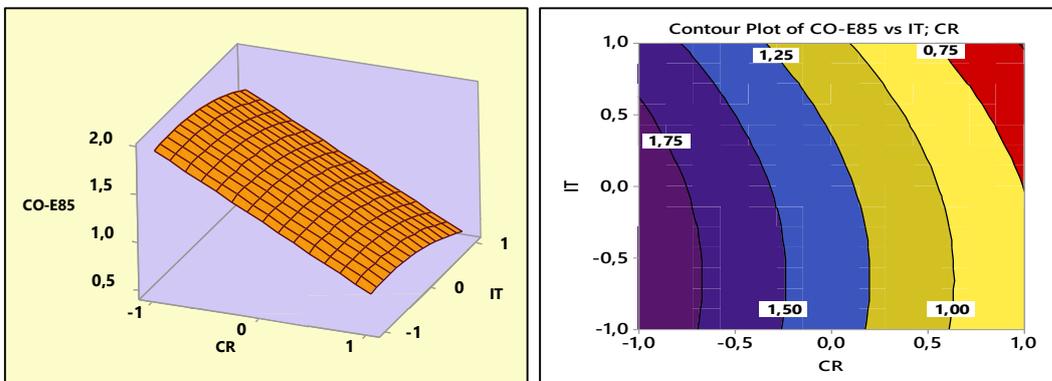
Lampiran 26: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon CO E85



Gambar 26-1: Plot permukaan dan kontur respon CO vs CR; RPM



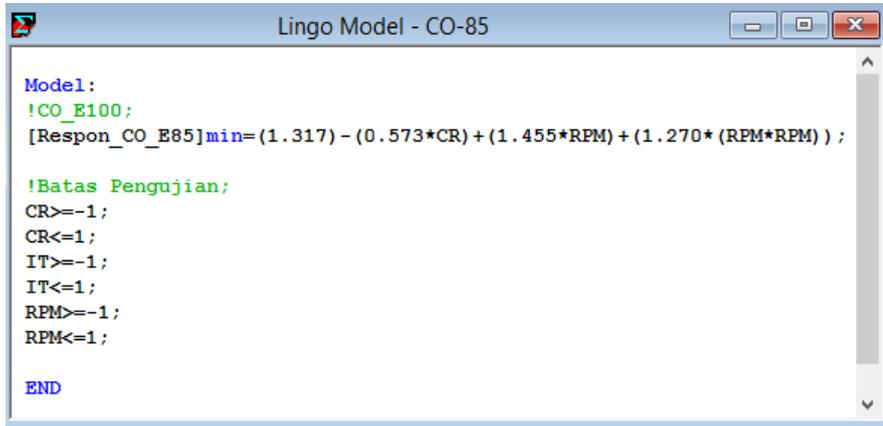
Gambar 26-2: Plot permukaan dan kontur respon CO vs IT; RPM



Gambar 26-3: Plot permukaan dan kontur respon CO vs IT; CR

Lampiran 27: Optimasi Lokal Repon CO E85

Tabel 27-1: Input model persamaan optimasi respon CO-E85

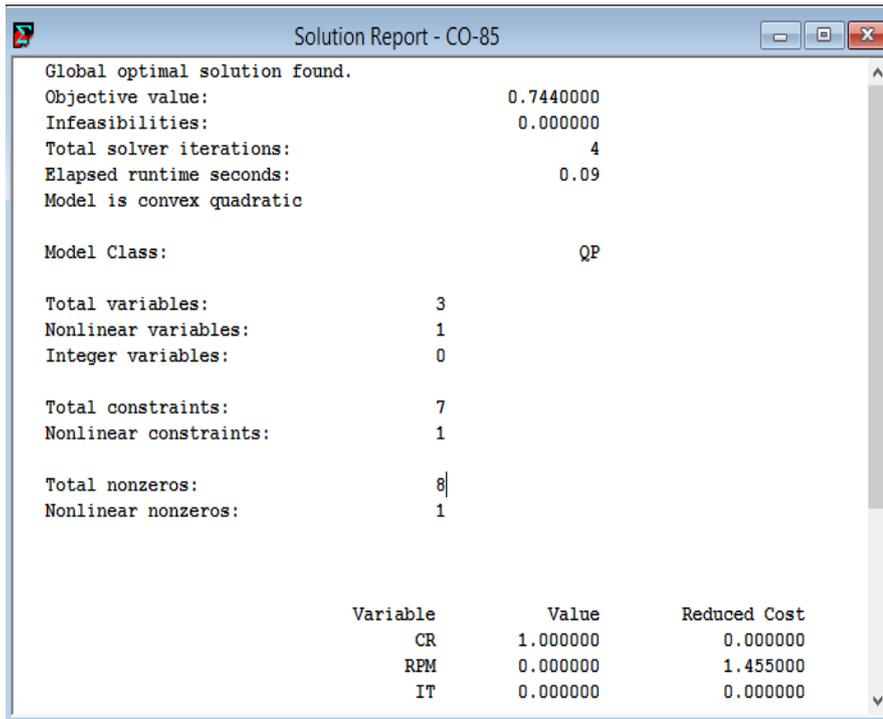


```
Model:
!CO_E100;
[Respon_CO_E85]min=(1.317) - (0.573*CR) + (1.455*RPM) + (1.270*(RPM*RPM)) ;

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END
```

Tabel 27-2: Solusi optimasi persamaan respon CO-E85



Global optimal solution found.

Objective value:	0.7440000
Infeasibilities:	0.0000000
Total solver iterations:	4
Elapsed runtime seconds:	0.09
Model is convex quadratic	
Model Class:	QP
Total variables:	3
Nonlinear variables:	1
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	8
Nonlinear nonzeros:	1

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.000000	1.455000
IT	0.000000	0.000000

Lampiran 28: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi HC E85

Tabel 28-1: Analisis varian HC E85

Response Surface Regression: HC-E85 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1997,40	221,933	9,17	0,013
Linear	3	985,00	328,333	13,57	0,008
CR	1	612,50	612,500	25,31	0,004
IT	1	8,00	8,000	0,33	0,590
RPM	1	364,50	364,500	15,06	0,012
Square	3	992,40	330,800	13,67	0,008
CR*CR	1	156,00	156,000	6,45	0,052
IT*IT	1	3,69	3,692	0,15	0,712
RPM*RPM	1	776,31	776,308	32,08	0,002
2-Way Interaction	3	20,00	6,667	0,28	0,841
CR*IT	1	0,00	0,000	0,00	1,000
CR*RPM	1	4,00	4,000	0,17	0,701
IT*RPM	1	16,00	16,000	0,66	0,453
Error	5	121,00	24,200		
Lack-of-Fit	3	107,00	35,667	5,10	0,168
Pure Error	2	14,00	7,000		
Total	14	2118,40			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,91935	94,29%	84,01%	17,70%

Table 28-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk HC E85

Response Surface Regression: HC-E85 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

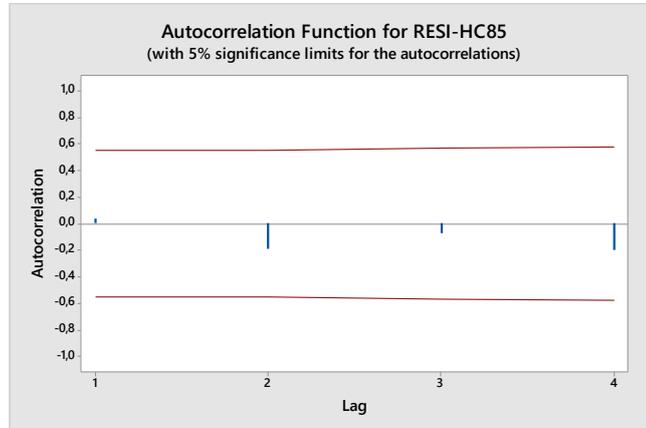
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		77,00	2,84	27,11	0,000	
CR	-17,50	-8,75	1,74	-5,03	0,004	1,00
IT	-2,00	-1,00	1,74	-0,57	0,590	1,00
RPM	13,50	6,75	1,74	3,88	0,012	1,00
CR*CR	-13,00	-6,50	2,56	-2,54	0,052	1,01
IT*IT	2,00	1,00	2,56	0,39	0,712	1,01
RPM*RPM	29,00	14,50	2,56	5,66	0,002	1,01
CR*IT	0,00	0,00	2,46	0,00	1,000	1,00
CR*RPM	2,00	1,00	2,46	0,41	0,701	1,00
IT*RPM	4,00	2,00	2,46	0,81	0,453	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{HC-E85} = & 77,00 - 8,75 \text{ CR} - 1,00 \text{ IT} + 6,75 \text{ RPM} - 6,50 \text{ CR*CR} \\
 & + 1,00 \text{ IT*IT} + 14,50 \text{ RPM*RPM} + 0,00 \text{ CR*IT} + 1,00 \text{ CR*RPM} \\
 & + 2,00 \text{ IT*RPM}
 \end{aligned}$$

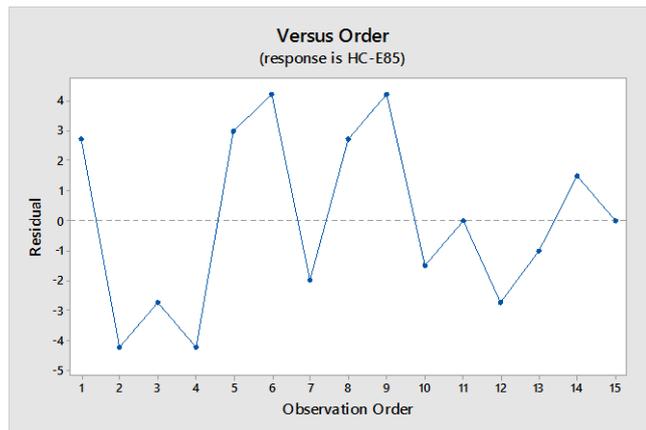
Lampiran 29: Pengujian Asumsi Residual Respon HC E85

a. Uji Independensi



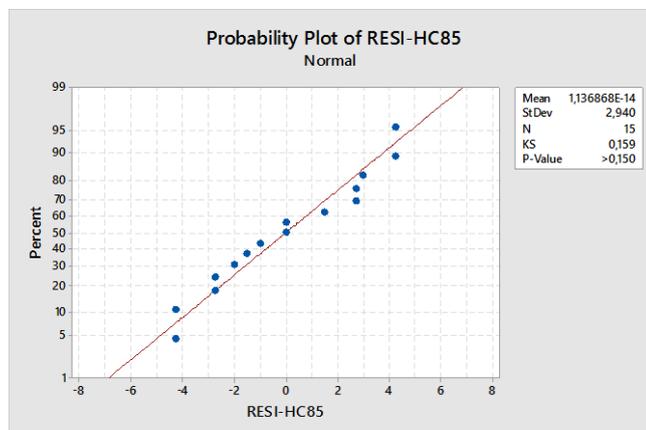
Gambar 29-1: Grafik ACF model pendugaan respon HC E85

b. Uji Independensi



Gambar 29-2: Grafik uji keidentikan residual respon HC E85

c. Uji Normalitas



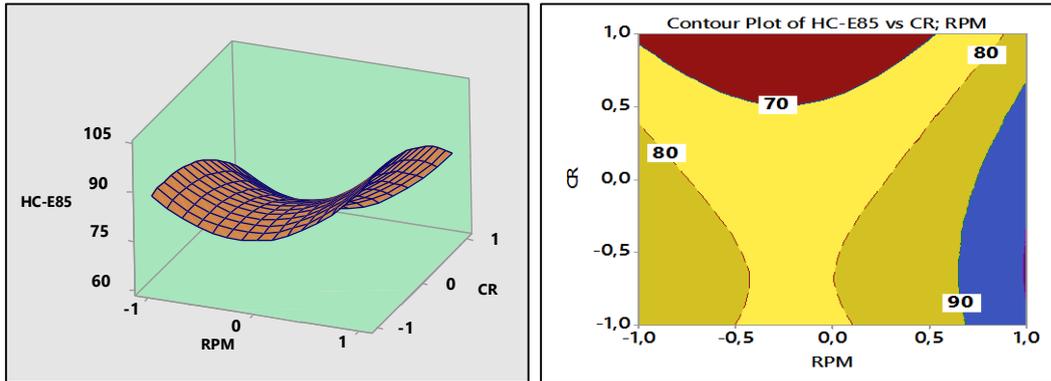
Gambar 29-3: Grafik distribusi normal residual respon HC E85

Lampiran 30: Persamaan Model Repon HC E85

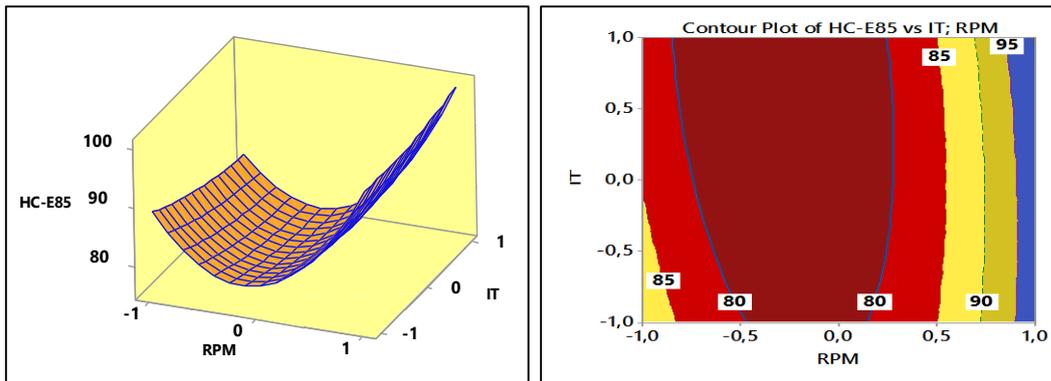
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon HC-E85 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$HC - E85 = 77,00 - 8,75 CR + 6,75 RPM + 14,50 RPM * RPM$$

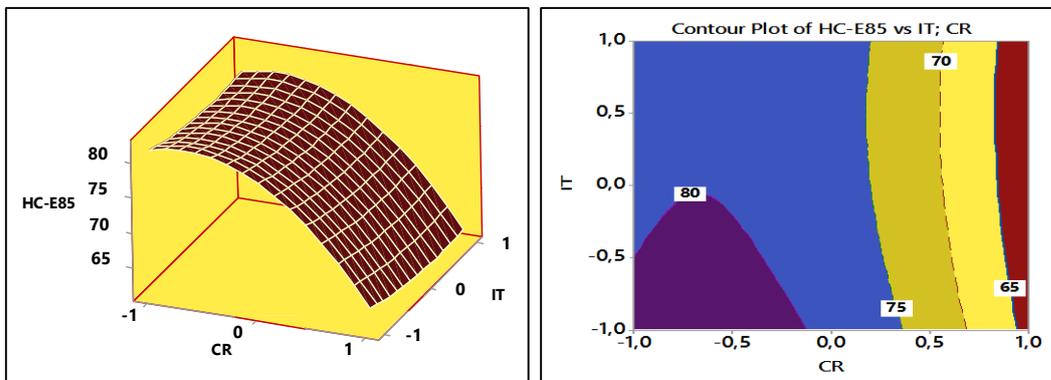
Lampiran 31: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon HC E85



Gambar 31-1: Plot permukaan dan kontur respon HC vs CR; RPM



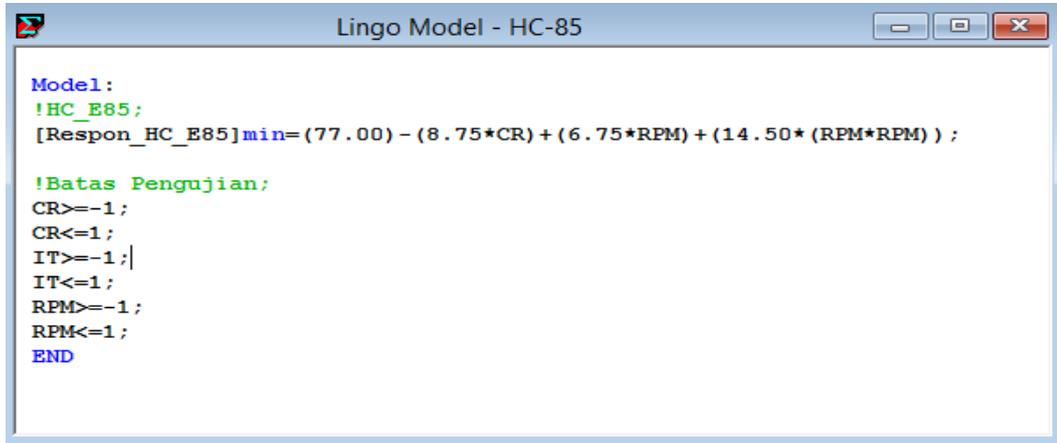
Gambar 31-2: Plot permukaan dan kontur respon HC vs IT; RPM



Gambar 31-3: Plot permukaan dan kontur respon HC vs IT; CR

Lampiran 32: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon HC E85

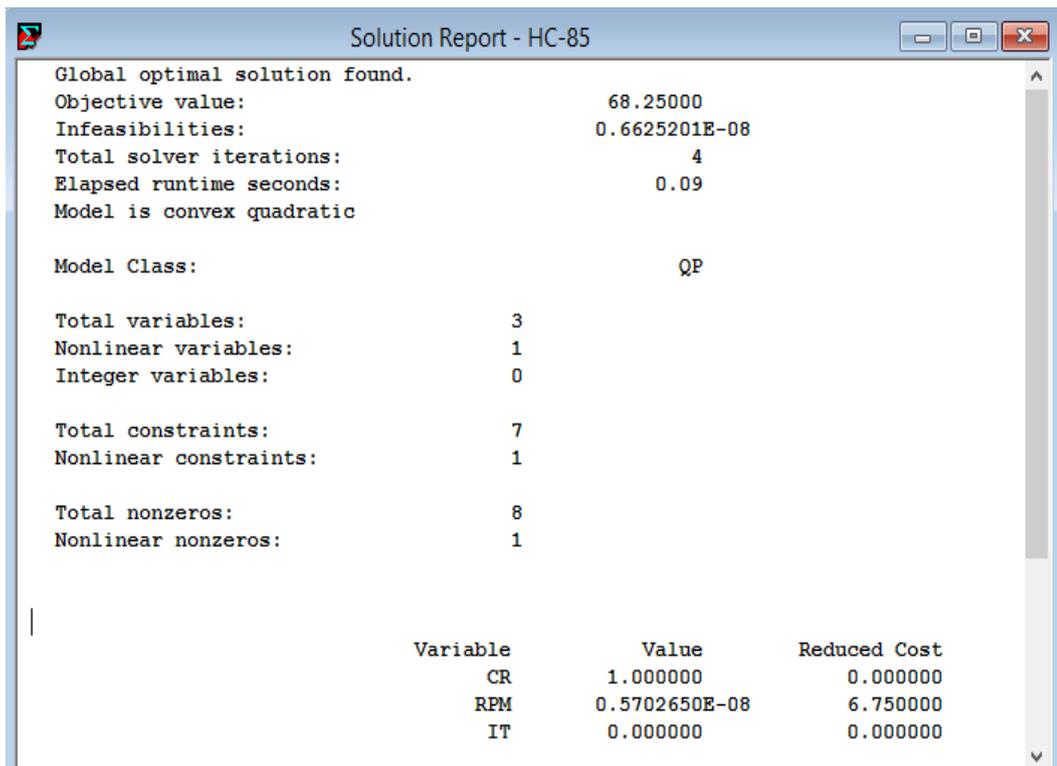
Tabel 32-1: Input model persamaan optimasi respon HC-E85



```
Model:
!HC_E85;
[Respon_HC_E85]min=(77.00) - (8.75*CR) + (6.75*RPM) + (14.50*(RPM*RPM)) ;

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 32-2: Solusi optimasi respon HC-E85



Global optimal solution found.

Objective value:	68.25000
Infeasibilities:	0.6625201E-08
Total solver iterations:	4
Elapsed runtime seconds:	0.09
Model is convex quadratic	

Model Class: QP

Total variables:	3
Nonlinear variables:	1
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	8
Nonlinear nonzeros:	1

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.5702650E-08	6.750000
IT	0.000000	0.000000

Lampiran 33: Optimasi Single Respon E85 dan Uji Konfirmasi Box Plot E85

1. Nilai Optimasi Lokal Respon E85

Respon	Variabel faktor (kode-sebenarnya)						Nilai Optimasi Lokal
	CR		IT		RPM		
Torsi (Nm)	1	13	1	24	0,7471	7241	12,44
BSFC (kg/HP.min)	1	13	0	20	0,2986	5896	35,85-E4
BTE (%)	1	13	1	24	0,1734	5520	37,54
CO (%)	1	13	0	20	0	5000	0,744
HC (ppm)	1	13	0	20	0	5000	68,25

2. Input Sintak Persamaan Model Respon dan Optimasi Single Respon-E85 Secara Serentak

Tabel 33.1: Sintak Persamaan Model Respon-E85

```

Lingo Model - Optimasi Single Respon E85 Dengan 4 Constraint

Model:
!RESPON TARGET MULTI REPON;
[Respon_Torsi]max=(11.083)+(2.868*RPM)-(2.428*RPM*RPM)+(0.760*(IT*RPM));

!RESPON PENGHAMBAT;

[Respon_BSFC_E100](0.004591)-(0.000512*CR)-(0.003306*RPM)+(0.005536*RPM*RPM)>=0.3585429E-02;

[Respon_BTE_E100](0.32902)+(0.01971*CR)+(0.05867*RPM)+(0.02154*(IT*IT))-(0.16917*(RPM*RPM))<=0.3753568;

[Respon_CO_E100](1.317)-(0.573*CR)+(1.455*RPM)+(1.270*(RPM*RPM))>=0.7440000;

[Respon_HC_E100](77.00)-(8.75*CR)+(6.75*RPM)+(14.50*(RPM*RPM))>=68.25000;

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
    
```

Tabel 33.2: Optimasi Respon Torsi dengan Respon Penghambat

```

Solution Report - Optimasi Single Respon E85 Dengan 4 Constraint

Local optimal solution found.
Objective value:                12.43827
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:       11
Elapsed runtime seconds:       0.09

Model Class:                    QP

Total variables:                3
Nonlinear variables:           2
Integer variables:              0

Total constraints:              11
Nonlinear constraints:         5

Total nonzeros:                17
Nonlinear nonzeros:            7

Variable      Value      Reduced Cost
RPM           0.7471170  0.000000
IT            1.0000000  0.000000
CR            0.8730632  0.000000
    
```

3. Sintak Persamaan Respon-E85 dan Solusinya Pada Kondisi Optimasi Torsi

Tabel 33.3: Sintak Persamaan Respon BSFC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```
Lingo Model - Optima-SFC85

Model:
!BSFC_E85;
[Respon_BSFC_E85]min=(0.004591)-(0.000512*CR)-(0.003306*RPM)+(0.005536*RPM*RPM);

!Batas Pengujian;
CR=0.8730632;
IT=1.000000;
RPM=0.7471170;
END
```

Tabel 33.4: Solusi Persamaan Respon BSFC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```
Solution Report - Optima-SFC85

Global optimal solution found.
Objective value:                0.4764128E-02
Infeasibilities:                 0.000000
Total solver iterations:         0
Elapsed runtime seconds:         0.19

Model Class:                     LP

Total variables:                 0
Nonlinear variables:             0
Integer variables:               0

Total constraints:               1
Nonlinear constraints:           0

Total nonzeros:                 0
Nonlinear nonzeros:             0

Variable      Value      Reduced Cost
CR            0.8730632  0.000000
RPM           0.7471170  0.000000
IT            1.0000000  0.000000
```

Tabel 33.5: Sintak Persamaan Respon BTE Pada Kondisi Optimasi Torsi

```
Lingo Model - Optima-BTE85

Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E85]max=(0.32902)+(0.01971*CR)+(0.05867*RPM)+(0.02154*(IT*IT))-(0.16917*(RPM*RPM))

!Batas Pengujian;
CR=0.8730632;
IT=1.000000;
RPM=0.7471170;
END
```

Tabel 33.6: Solusi Persamaan Respon BTE Pada Kondisi Optimasi Torsi

Variable	Value	Reduced Cost
CR	0.8730632	0.000000
RPM	0.7471170	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Tabel 33.7: Sintak Persamaan Respon CO Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Model:
!CO_E85;
[Respon_CO_E85]min=(1.317) - (0.573*CR) + (1.455*RPM) + (1.270*(RPM*RPM)) ;

!Batas Pengujian;
CR=0.8730632;
IT=1.000000;
RPM=0.7471170;
END
    
```

Tabel 33.8 Solusi Persamaan Respon CO Pada Kondisi Optimasi Torsi

Variable	Value	Reduced Cost
CR	0.8730632	0.000000
RPM	0.7471170	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Tabel 33.9: Sintak Persamaan Respon HC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Optima-HC85

Model:
!HC_E85;
[Respon_HC_E85]min=(77.00) - (8.75*CR) + (6.75*RPM) + (14.50*(RPM*RPM)) ;
!Batas Pengujian;
CR=0.8730632;
IT=1.000000;
RPM=0.7471170;
END
    
```

Tabel 33.10: Solusi Persamaan Respon HC Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - Optima-HC85			
Global optimal solution found.			
Objective value:		82.49740	
Infeasibilities:		0.000000	
Total solver iterations:		0	
Elapsed runtime seconds:		0.08	
Model Class:		LP	
Total variables:	0		
Nonlinear variables:	0		
Integer variables:	0		
Total constraints:	1		
Nonlinear constraints:	0		
Total nonzeros:	0		
Nonlinear nonzeros:	0		
	Variable	Value	Reduced Cost
	CR	0.8730632	0.000000
	RPM	0.7471170	0.000000
	IT	1.000000	0.000000

4. Nilai Repon Penghambat Pada Kondisi Optimasi Torsi

Tabel 33.11: Nilai Respon E85 Pada Kondisi Optimasi Torsi

Variabel Faktor			Variable Respon				
Nama	Koding	Real	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP-min)	BTE (%)	CO (%)	HC (PPM)
CR	0,8731	12,94 = 13	12,44	0,004764	31,72	2,61	82,5
IT	1	24					
RPM	0,7471	7241					

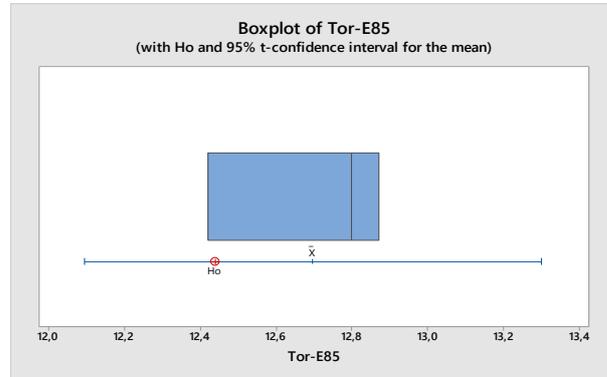
5. Data Pengamatan/Perhitungan Pada Kondisi Optimasi Respon Torsi

Tabel 33.12: Data Pengamatan Hasil Uji Konfirmasi

Variabel Faktor			Variable Respon				
CR	IT	RPM	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP-min)	BTE (%)	CO (%)	HC (PPM)
13	24	7241	12,42	0,004590	32,58	2,14	80
			12,87	0,004797	33,71	2,21	83
			12,80	0,004598	34,81	2,64	82

6. Uji Konfirmasi Nilai Optimasi Dengan Uji One Sample-t

a) Pengujian *One Sample-T* Respon Torsi-E85



Gambar 33-1: Diagram boxplot respon Torsi-E85

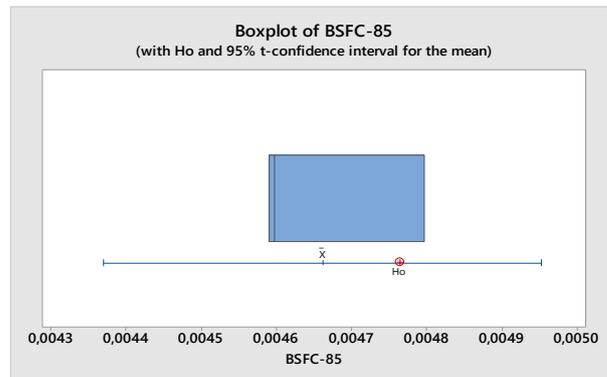
Tabel 33.13: Analisa hipotesa *one sample-t* respon Torsi-E85

One-Sample T: Tor-E85

Test of $\mu = 12,44$ vs $\neq 12,44$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Tor-E85	3	12,697	0,242	0,140	(12,095; 13,298)	1,84	0,208

b) Pengujian *One Sample-T* Respon BSFC-E85



Gambar 33-2: Diagram boxplot respon BSFC-E85

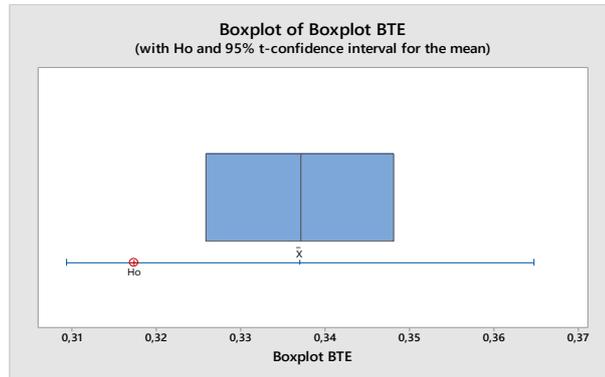
Tabel 33.14: Analisa hipotesa *one sample-t* respon BSFC-E85

One-Sample T: BSFC-85

Test of $\mu = 0,004764$ vs $\neq 0,004764$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BSFC-85	3	0,004662	0,000117	0,000068	(0,004370; 0,004953)	-1,51	0,270

c) Pengujian *One Sample-T* Respon BTE-E85



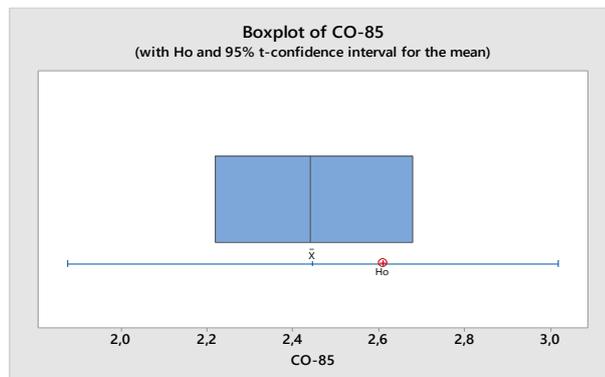
Gambar 33-3: Diagram boxplot respon BTE-E85

Tabel 33.15: Analisa hipotesa *one sample-t* respon BTE-E85

One-Sample T: Boxplot BTE
 Test of $\mu = 0,3174$ vs $\neq 0,3174$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Boxplot BTE	3	0,33700	0,01115	0,00644	(0,30930; 0,36470)	3,04	0,093

d) Pengujian *One Sample-T* Respon CO-E85



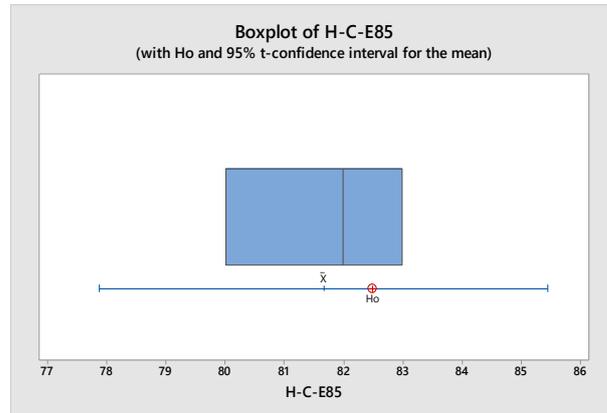
Gambar 33-4: Diagram boxplot respon CO-E85

Tabel 33.16: Analisa hipotesa *one sample-t* respon CO-E85

One-Sample T: CO-85
 Test of $\mu = 2,61$ vs $\neq 2,61$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
CO-85	3	2,447	0,230	0,133	(1,875; 3,018)	-1,23	0,344

e) Pengujian *One Sample-T* Respon HC-E85



Gambar 33-5: Diagram boxplot respon HC-E85

Tabel 33.17: Analisa hipotesa *one sample-t* respon HC-E85

One-Sample T: H-C-E85

Test of $\mu = 82,5$ vs $\neq 82,5$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
H-C-E85	3	81,667	1,528	0,882	(77,872; 85,461)	-0,94	0,444

Lampiran 34: Data Pengamatan dan Hasil Analisa dan Optimasi E70

Run Order	CR	IT	RPM	Torsi	BSFC	BTE	CO	HC
				(Nm)	(kg/HP.min)	(%)	(%)	(ppm)
1	-1	-1	0	10,650	0,004338891	0,328193865	1,623	73
2	1	-1	0	11,582	0,003683895	0,386546729	0,843	66
3	-1	1	0	11,062	0,004789202	0,297335004	1,593	74
4	1	1	0	11,582	0,004227862	0,336812691	0,813	68
5	-1	0	-1	5,531	0,011963544	0,119028065	1,684	80
6	1	0	-1	6,355	0,011215737	0,12696423	0,442	71
7	-1	0	1	13,837	0,005300609	0,268647877	5,496	93
8	1	0	1	11,680	0,005088686	0,279835974	3,243	92
9	0	-1	-1	6,041	0,010112891	0,140810123	1,156	79
10	0	1	-1	5,943	0,011108052	0,128195062	1,116	86
11	0	-1	1	11,650	0,005211024	0,273266333	4,411	99
12	0	1	1	13,739	0,004852203	0,293474394	3,403	102
13	0	0	0	11,089	0,003827497	0,372044008	1,317	73
14	0	0	0	11,480	0,003827497	0,372044008	1,317	74
15	0	0	0	11,883	0,003827497	0,372044008	1,317	75

Lampiran 35: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi Torsi E70

Tabel 35-1: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk torsi E70

Response Surface Regression: Torsi-E70 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	110,391	12,2656	38,26	0,000
Linear	3	92,092	30,6972	95,76	0,000
CR	1	0,002	0,0018	0,01	0,944
IT	1	0,722	0,7218	2,25	0,194
RPM	1	91,368	91,3682	285,02	0,000
Square	3	14,839	4,9464	15,43	0,006
CR*CR	1	0,061	0,0612	0,19	0,680
IT*IT	1	0,069	0,0685	0,21	0,663
RPM*RPM	1	14,836	14,8358	46,28	0,001
2-Way Interaction	3	3,460	1,1533	3,60	0,101
CR*IT	1	0,042	0,0424	0,13	0,731
CR*RPM	1	2,222	2,2216	6,93	0,046
IT*RPM	1	1,196	1,1957	3,73	0,111
Error	5	1,603	0,3206		
Lack-of-Fit	3	1,288	0,4292	2,72	0,280
Pure Error	2	0,315	0,1576		
Total	14	111,993			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,566182	98,57%	95,99%	80,97%

Tabel 35-2: Analisis varian torsi E70

Coded Coefficients

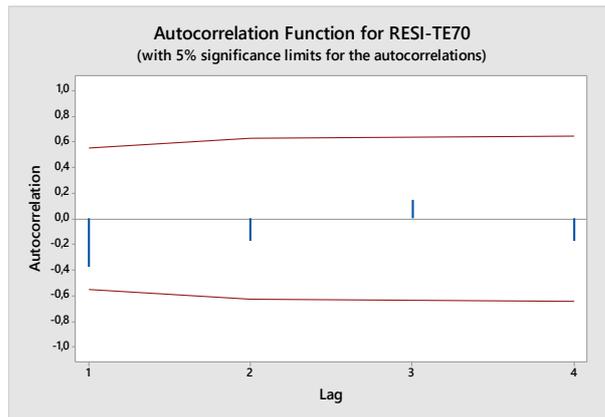
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		11,484	0,327	35,13	0,000	
CR	0,030	0,015	0,200	0,07	0,944	1,00
IT	0,601	0,300	0,200	1,50	0,194	1,00
RPM	6,759	3,380	0,200	16,88	0,000	1,00
CR*CR	-0,258	-0,129	0,295	-0,44	0,680	1,01
IT*IT	-0,272	-0,136	0,295	-0,46	0,663	1,01
RPM*RPM	-4,009	-2,004	0,295	-6,80	0,001	1,01
CR*IT	-0,206	-0,103	0,283	-0,36	0,731	1,00
CR*RPM	-1,491	-0,745	0,283	-2,63	0,046	1,00
IT*RPM	1,094	0,547	0,283	1,93	0,111	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{Torsi-E70} = & 11,484 + 0,015 \text{ CR} + 0,300 \text{ IT} + 3,380 \text{ RPM} - 0,129 \text{ CR*CR} \\ & - 0,136 \text{ IT*IT} - 2,004 \text{ RPM*RPM} - 0,103 \text{ CR*IT} - 0,745 \text{ CR*RPM} \\ & + 0,547 \text{ IT*RPM} \end{aligned}$$

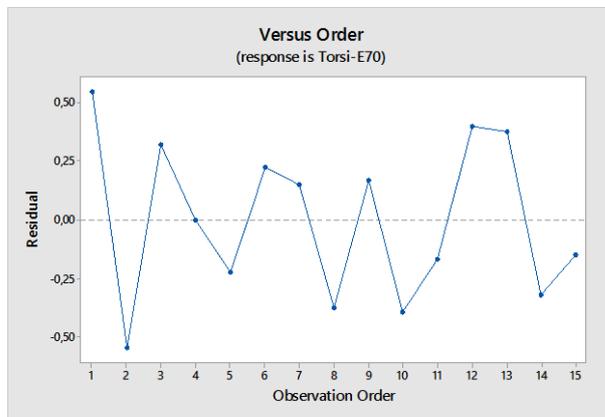
Lampiran 36: Pengujian Asumsi Residual Respon Torsi E70

a. Uji Independensi



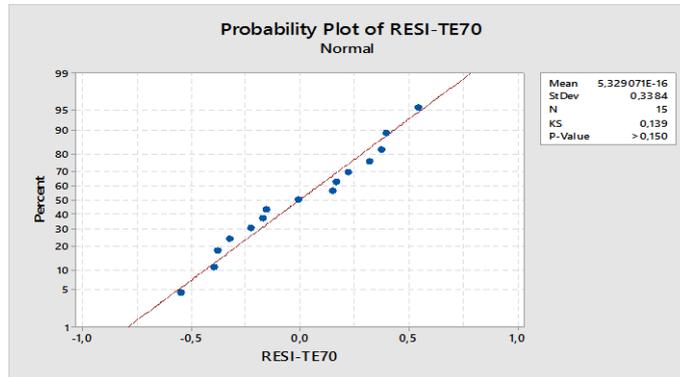
Gambar 36-1: Grafik ACF model pendugaan respon torsi E70

b. Uji Independensi



Gambar 36-2: Grafik uji keidentikan residual respon torsi E70

c. Uji Normalitas



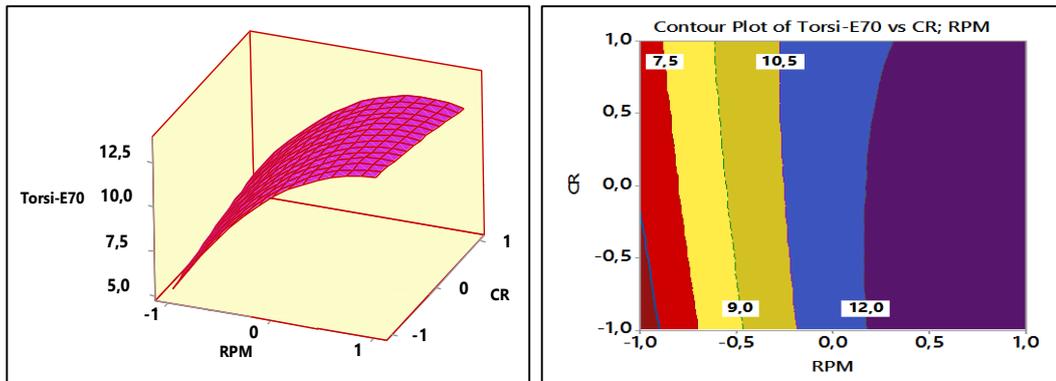
Gambar 36-3: Grafik distribusi normal residual respon torsi E70

Lampiran 37: Model Persamaan Torsi E70

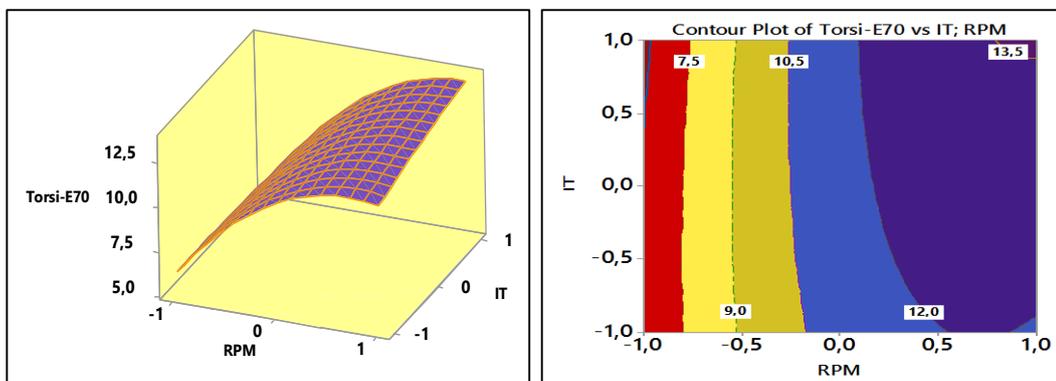
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon Torsi-E70 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$Torsi - E70 = (11.484) + (3.380 * RPM) - (2.004 * RPM * RPM) - (0.745 * CR * RPM)$$

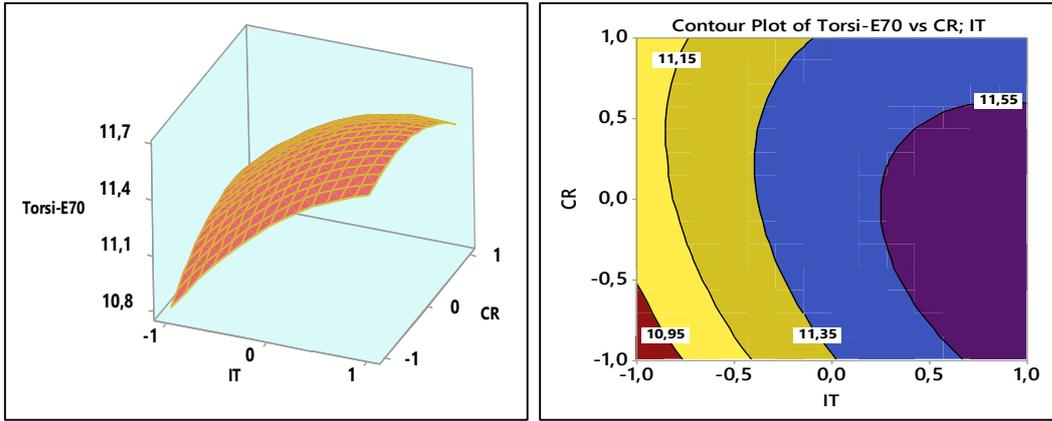
Lampiran 38: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon Torsi E70



Gambar 38-1: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs CR; RPM



Gambar 38-2: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs IT; RPM



Gambar 38-3: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs IT; CR

Lampiran 39: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon Torsi E70

Tabel 39-1: Input model persamaan optimasi respon torsi E70

```

Lingo Model - Torsi-E70

Model:
!TORSI;
[Respon_Torsi70]max=(11.484)+(3.380*RPM)-(2.004*(RPM*RPM))-(0.745*(CR*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;|
RPM>=-1;
RPM<=1;
END

```

Tabel 39-2: Solusi optimasi respon torsi E70

Solution Report - Torsi-E70			
Local optimal solution found.			
Objective value:		12.90920	
Infeasibilities:		0.000000	
Total solver iterations:		33	
Elapsed runtime seconds:		0.62	
Model Class:		QP	
Total variables:	3		
Nonlinear variables:	2		
Integer variables:	0		
Total constraints:	7		
Nonlinear constraints:	1		
Total nonzeros:	8		
Nonlinear nonzeros:	2		
	Variable	Value	Reduced Cost
	RPM	0.8433134	0.000000
	CR	0.000000	0.6282685
	IT	0.6297617	0.000000

Lampiran 40: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi BSFC E70

Tabel 40-1: Analisis varian BSFC-E70

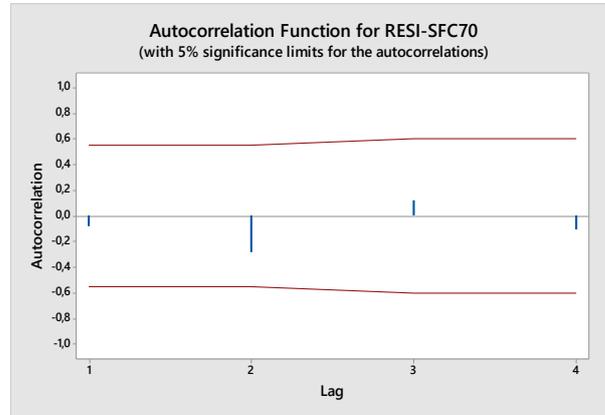
Response Surface Regression: SFC-E70 versus CR; IT; RPM						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	0,000135	0,000015	189,64	0,000	
Linear	3	0,000073	0,000024	306,15	0,000	
CR	1	0,000001	0,000001	7,49	0,041	
IT	1	0,000000	0,000000	4,20	0,096	
RPM	1	0,000072	0,000072	906,75	0,000	
Square	3	0,000062	0,000021	260,54	0,000	
CR*CR	1	0,000001	0,000001	11,97	0,018	
IT*IT	1	0,000000	0,000000	0,20	0,676	
RPM*RPM	1	0,000061	0,000061	772,63	0,000	
2-Way Interaction	3	0,000001	0,000000	2,24	0,201	
CR*IT	1	0,000000	0,000000	0,03	0,874	
CR*RPM	1	0,000000	0,000000	0,91	0,384	
IT*RPM	1	0,000000	0,000000	5,80	0,061	
Error	5	0,000000	0,000000			
Lack-of-Fit	3	0,000000	0,000000	6,27	0,141	
Pure Error	2	0,000000	0,000000			
Total	14	0,000135				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0,0002812	99,71%	99,18%	95,71%		

Tabel 40-2 Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BSFC-E70

Response Surface Regression: SFC-E70 versus CR; IT; RPM						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,003818	0,000162	23,52	0,000	
CR	-0,000544	-0,000272	0,000099	-2,74	0,041	1,00
IT	0,000408	0,000204	0,000099	2,05	0,096	1,00
RPM	-0,005987	-0,002993	0,000099	-30,11	0,000	1,00
CR*CR	0,001013	0,000506	0,000146	3,46	0,018	1,01
IT*IT	-0,000130	-0,000065	0,000146	-0,44	0,676	1,01
RPM*RPM	0,008135	0,004067	0,000146	27,80	0,000	1,01
CR*IT	0,000047	0,000023	0,000141	0,17	0,874	1,00
CR*RPM	0,000268	0,000134	0,000141	0,95	0,384	1,00
IT*RPM	-0,000677	-0,000338	0,000141	-2,41	0,061	1,00
Regression Equation in Uncoded Units						
SFC-E70	=	$0,003818 - 0,000272 \text{ CR} + 0,000204 \text{ IT} - 0,002993 \text{ RPM} \\ + 0,000506 \text{ CR*CR} - 0,000065 \text{ IT*IT} + 0,004067 \text{ RPM*RPM} \\ + 0,000023 \text{ CR*IT} + 0,000134 \text{ CR*RPM} - 0,000338 \text{ IT*RPM}$				

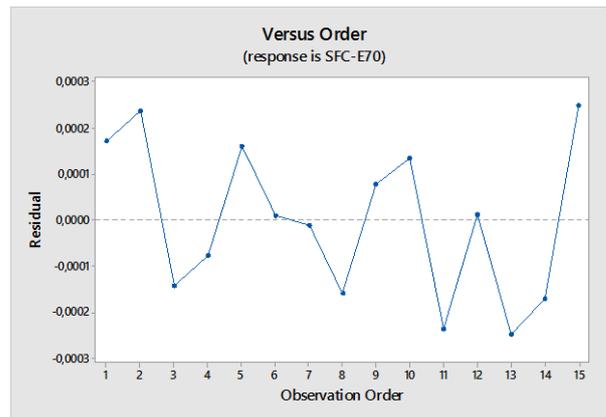
Lampiran 41: Pengujian Asumsi Residual Respon BSFC-E70

a. Uji Independensi



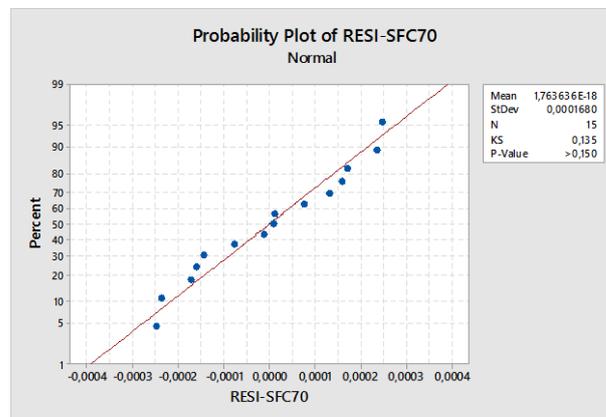
Gambar 41-1: Grafik ACF model pendugaan respon BSFC-E70

b. Uji Independensi



Gambar 41-2: Grafik uji keidentikan residual respon BSFC-E70

c. Uji Normalitas



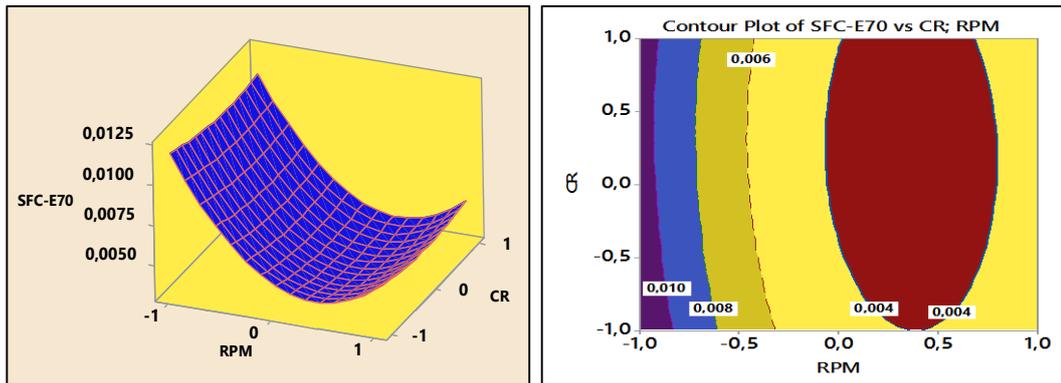
Gambar 41-3: Grafik distribusi normal residual respon BSFC-E70

Lampiran 42: Persamaan Model BSFC-E70

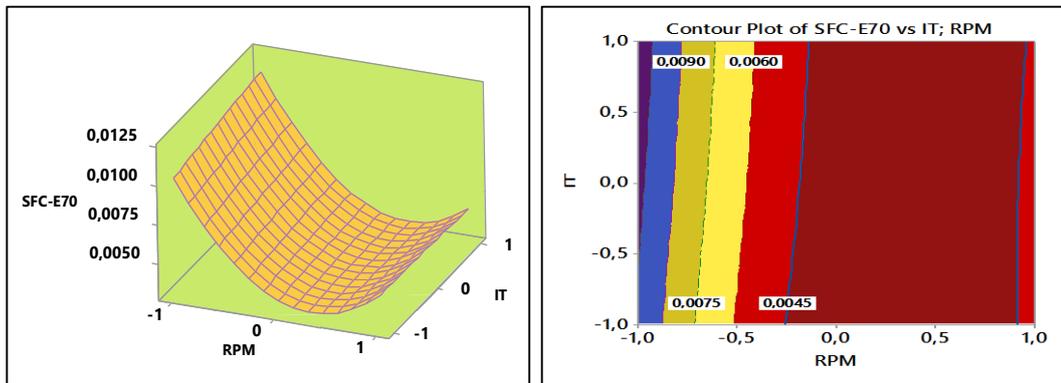
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon BSFC-E70 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$SFC = 0.003818 - (0.000272 * CR) - (0.002993 * RPM) + (0.000506 * CR * CR) + (0.004067 * RPM * RPM)$$

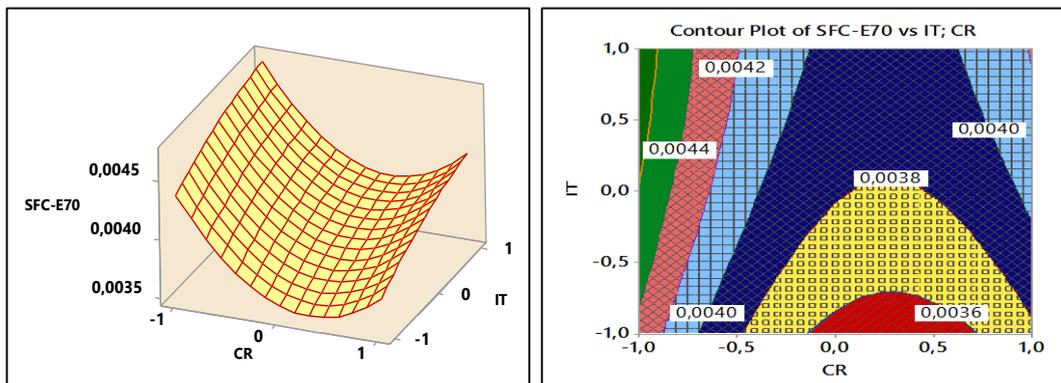
Lampiran 43: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon BSFC-E70



Gambar 43-1: Plot permukaan dan kontur respon BSFC-E70 vs CR; RPM



Gambar 43-2: Plot permukaan dan kontur BSFC-E70 vs IT; RPM



Gambar 43-3 Plot permukaan dan kontur respon BSFC-E70 vs IT; CR

Lampiran 44: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon BSFC-E70

Tabel 44-1: Input model persamaan optimasi respon BSFC-E70

```
Lingo Model - SFC-70

Model:
!BSFC_E70;
[Respon_BSFC_E70]min=(0.003818) - (0.000272*CR) - (0.002993*RPM)
                    + (0.000506*(CR*CR)) + (0.004067*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 44-2: Solusi optimasi respon BSFC-E70

```
Solution Report - SFC-70

Global optimal solution found.
Objective value:                0.3230792E-02
Infeasibilities:                 0.000000
Total solver iterations:         5
Elapsed runtime seconds:         0.09
Model is convex quadratic

Model Class:                      QP

Total variables:                  3
Nonlinear variables:              2
Integer variables:                0

Total constraints:                 7
Nonlinear constraints:             1

Total nonzeros:                   8
Nonlinear nonzeros:               2

Variable      Value      Reduced Cost
CR            0.2687747  0.000000
RPM           0.3679616  0.000000
IT            0.0000000  0.000000
```

Lampiran 45: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi BTE-E70

Tabel 45-1: Analisis varian BTE-E70

Response Surface Regression: BTE-70 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,132245	0,014694	29,63	0,001
Linear	3	0,047410	0,015803	31,87	0,001
CR	1	0,001710	0,001710	3,45	0,122
IT	1	0,000666	0,000666	1,34	0,299
RPM	1	0,045034	0,045034	90,82	0,000
Square	3	0,084474	0,028158	56,79	0,000
CR*CR	1	0,001881	0,001881	3,79	0,109
IT*IT	1	0,000554	0,000554	1,12	0,339
RPM*RPM	1	0,084027	0,084027	169,46	0,000
2-Way Interaction	3	0,000361	0,000120	0,24	0,863
CR*IT	1	0,000089	0,000089	0,18	0,689
CR*RPM	1	0,000003	0,000003	0,01	0,945
IT*RPM	1	0,000269	0,000269	0,54	0,494
Error	5	0,002479	0,000496		
Lack-of-Fit	3	0,001749	0,000583	1,60	0,407
Pure Error	2	0,000730	0,000365		
Total	14	0,134724			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0222677	98,16%	94,85%	78,01%

Tabel 45-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BTE-E70

Response Surface Regression: BTE-E70 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

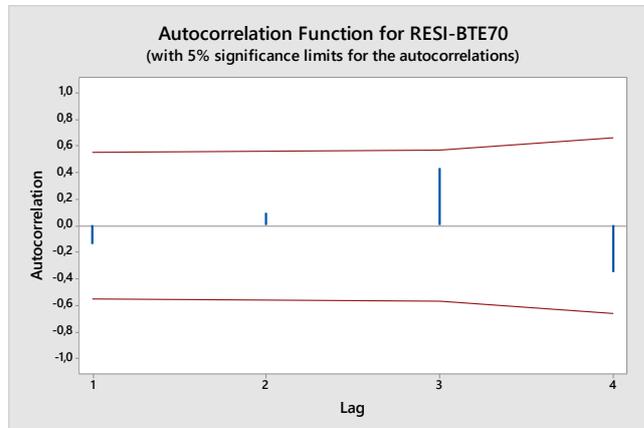
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,3720	0,0129	28,94	0,000	
CR	0,02924	0,01462	0,00787	1,86	0,122	1,00
IT	-0,01825	-0,00912	0,00787	-1,16	0,299	1,00
RPM	0,15006	0,07503	0,00787	9,53	0,000	1,00
CR*CR	-0,0451	-0,0226	0,0116	-1,95	0,109	1,01
IT*IT	-0,0245	-0,0123	0,0116	-1,06	0,339	1,01
RPM*RPM	-0,3017	-0,1509	0,0116	-13,02	0,000	1,01
CR*IT	-0,0094	-0,0047	0,0111	-0,42	0,689	1,00
CR*RPM	0,0016	0,0008	0,0111	0,07	0,945	1,00
IT*RPM	0,0164	0,0082	0,0111	0,74	0,494	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{BTE-70} = & 0,3720 + 0,01462 \text{ CR} - 0,00912 \text{ IT} + 0,07503 \text{ RPM} \\
 & - 0,0226 \text{ CR*CR} - 0,0123 \text{ IT*IT} - 0,1509 \text{ RPM*RPM} \\
 & - 0,0047 \text{ CR*IT} + 0,0008 \text{ CR*RPM} + 0,0082 \text{ IT*RPM}
 \end{aligned}$$

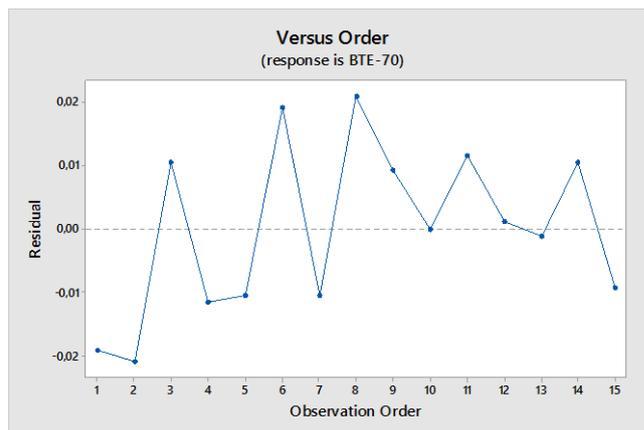
Lampiran 46: Pengujian Asumsi Residual Respon BTE-E70

a. Uji Independensi



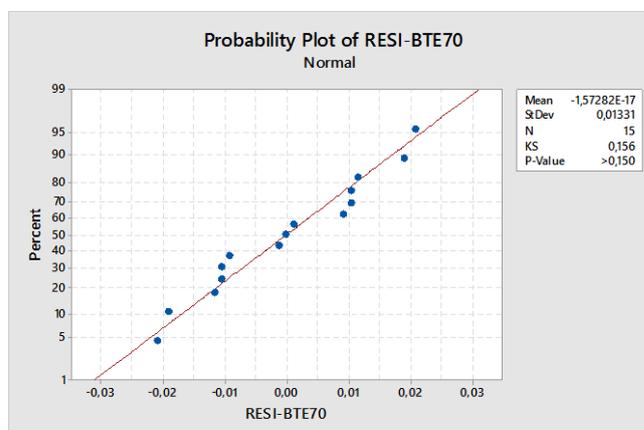
Gambar 46-1: Grafik ACF model pendugaan respon BTE-E70

b. Uji Independensi



Gambar 46-2: Grafik uji keidentikan residual respon BTE-E70

c. Uji Normalitas



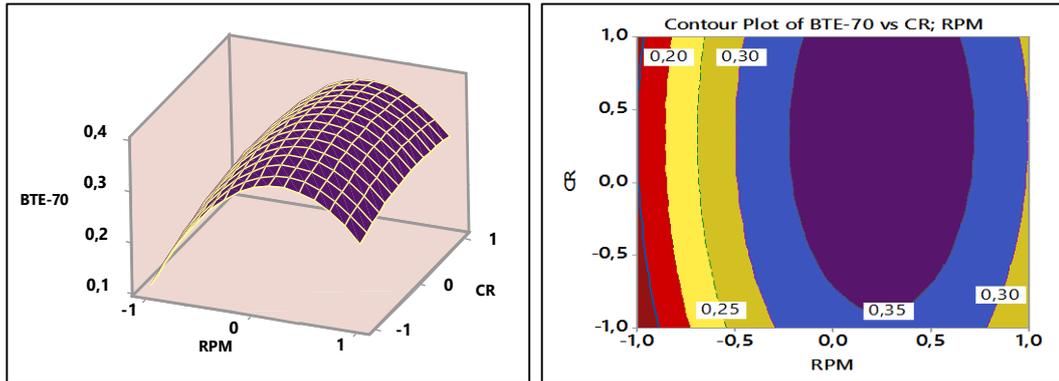
Gambar 46-3: Grafik distribusi normal residual respon BTE-E70

Lampiran 47: Persamaan Model Repon BTE-E70

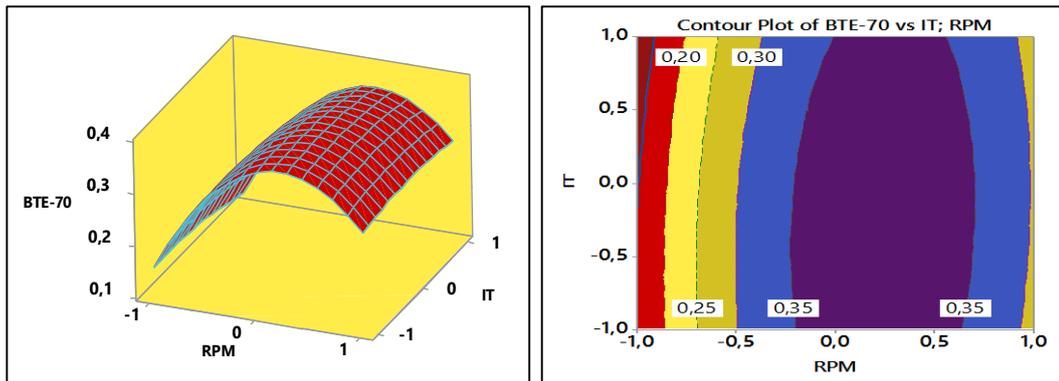
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon BTE-E70 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$BTE - 70 = 0,3720 + 0,07503 RPM - 0,1509 RPM * RPM$$

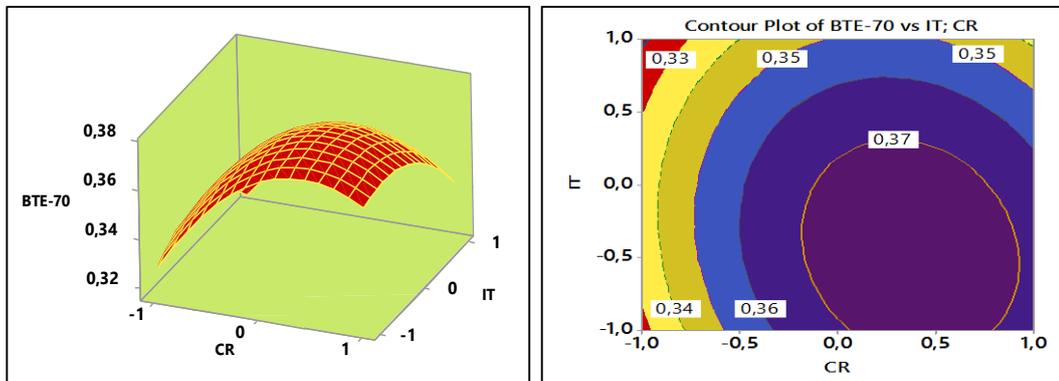
Lampiran 48: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon BTE-E70



Gambar 48-1: Plot permukaan dan kontur respon BTE-E70 vs CR; RPM



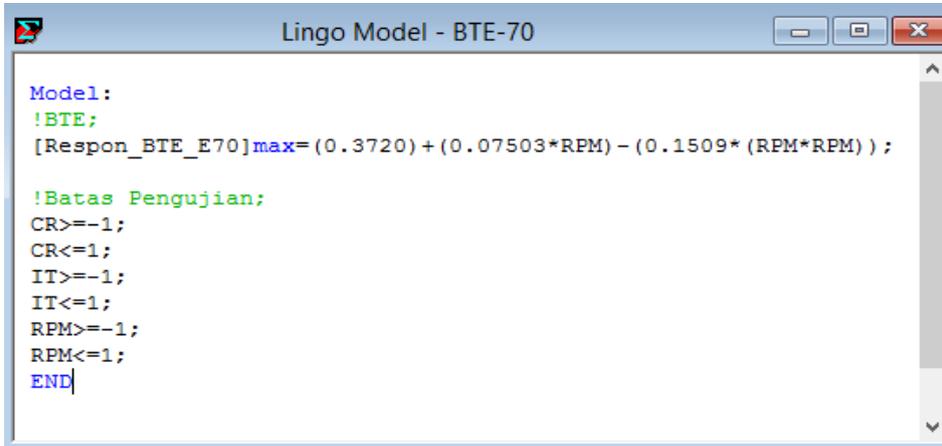
Gambar 48-2: Plot permukaan dan kontur respon BTE-E70 vs IT; RPM



Gambar 48-3: Plot permukaan respon dan kontur BTE-E70 vs IT; CR

Lampiran 49: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon BTE-E70

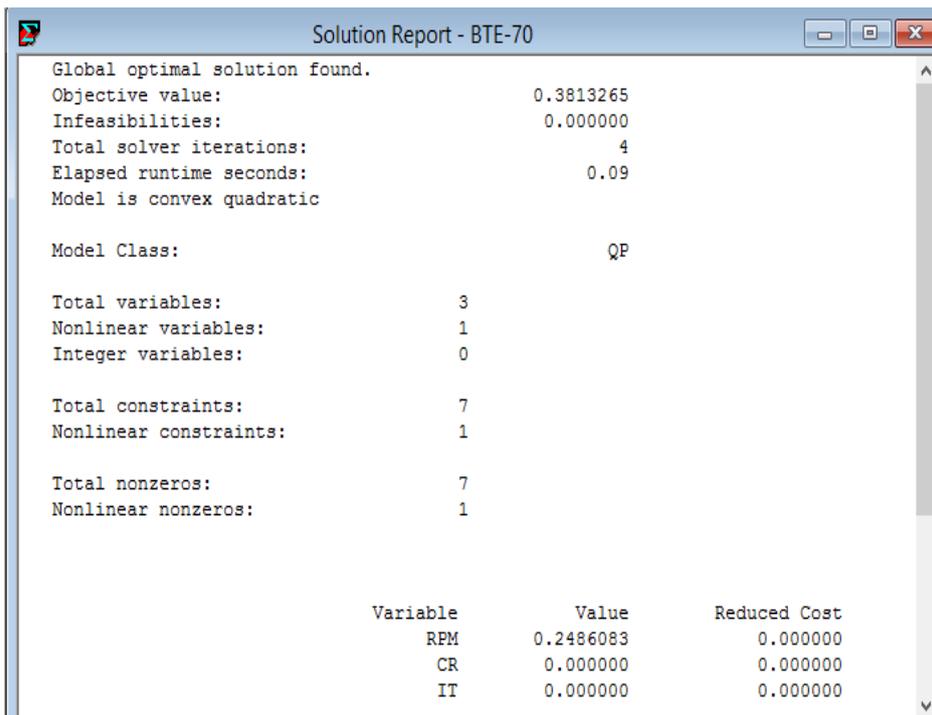
Tabel 49-1: Input model persamaan optimasi respon BTE-E70



```
Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E70]max=(0.3720)+(0.07503*RPM)-(0.1509*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 49-2: Solusi optimasi respon BTE-E70



Global optimal solution found.

Objective value:	0.3813265
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	4
Elapsed runtime seconds:	0.09

Model is convex quadratic

Model Class: QP

Total variables:	3
Nonlinear variables:	1
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	7
Nonlinear nonzeros:	1

Variable	Value	Reduced Cost
RPM	0.2486083	0.000000
CR	0.000000	0.000000
IT	0.000000	0.000000

Lampiran 50: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi CO-E70

Tabel 50-1: Analisis varian CO-E70

Response Surface Regression: CO-E70 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	29,2874	3,2542	20,38	0,002
Linear	3	21,8156	7,2719	45,54	0,000
CR	1	3,1941	3,1941	20,00	0,007
IT	1	0,1535	0,1535	0,96	0,372
RPM	1	18,4680	18,4680	115,64	0,000
Square	3	6,9821	2,3274	14,57	0,007
CR*CR	1	0,0085	0,0085	0,05	0,827
IT*IT	1	0,0797	0,0797	0,50	0,512
RPM*RPM	1	6,7429	6,7429	42,22	0,001
2-Way Interaction	3	0,4898	0,1633	1,02	0,457
CR*IT	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
CR*RPM	1	0,2555	0,2555	1,60	0,262
IT*RPM	1	0,2343	0,2343	1,47	0,280
Error	5	0,7985	0,1597		
Lack-of-Fit	3	0,7334	0,2445	7,52	0,120
Pure Error	2	0,0651	0,0325		
Total	14	30,0859			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,399621	97,35%	92,57%	60,51%

Tabel 50-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk CO-E70

Response Surface Regression: CO-E70 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

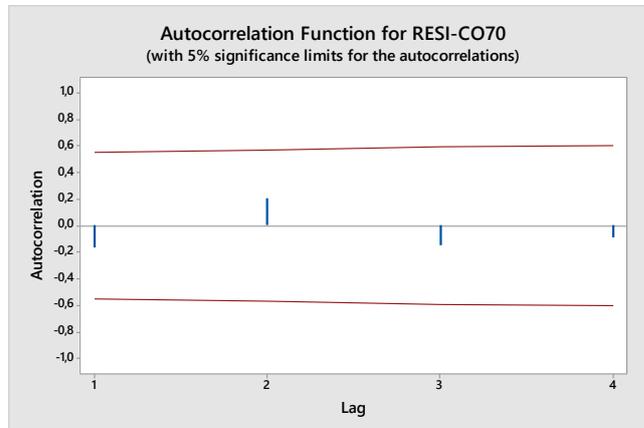
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1,317	0,231	5,71	0,002	
CR	-1,264	-0,632	0,141	-4,47	0,007	1,00
IT	-0,277	-0,138	0,141	-0,98	0,372	1,00
RPM	3,039	1,519	0,141	10,75	0,000	1,00
CR*CR	0,096	0,048	0,208	0,23	0,827	1,01
IT*IT	-0,294	-0,147	0,208	-0,71	0,512	1,01
RPM*RPM	2,703	1,351	0,208	6,50	0,001	1,01
CR*IT	0,000	0,000	0,200	0,00	1,000	1,00
CR*RPM	-0,506	-0,253	0,200	-1,26	0,262	1,00
IT*RPM	-0,484	-0,242	0,200	-1,21	0,280	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{CO-E70} = & 1,317 - 0,632 \text{ CR} - 0,138 \text{ IT} + 1,519 \text{ RPM} + 0,048 \text{ CR*CR} \\ & - 0,147 \text{ IT*IT} + 1,351 \text{ RPM*RPM} + 0,000 \text{ CR*IT} - 0,253 \text{ CR*RPM} \\ & - 0,242 \text{ IT*RPM} \end{aligned}$$

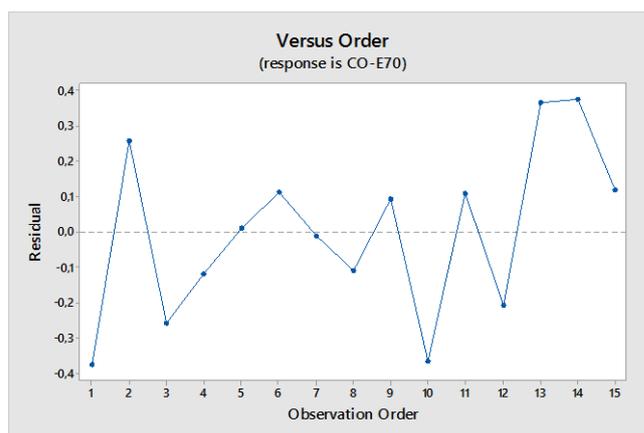
Lampiran 51: Pengujian Asumsi Residual Respon CO-E70

a. Uji Independensi



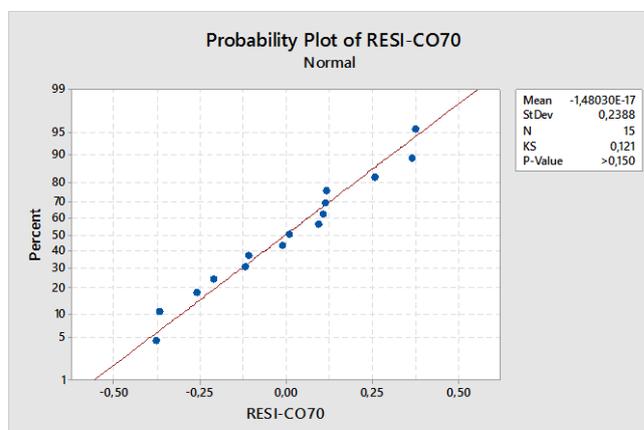
Gambar 51-1: Grafik ACF model pendugaan respon CO-E70

b. Uji Independensi



Gambar 51-2: Grafik uji keidentikan residual respon CO-E70 E70

c. Uji Normalitas



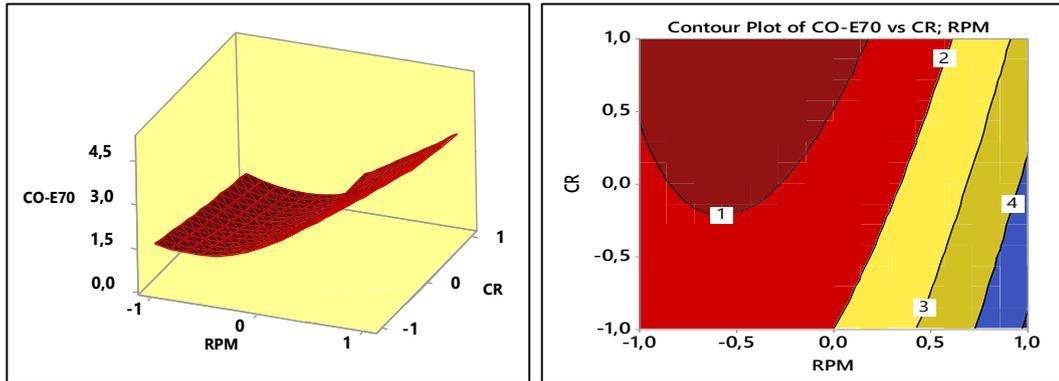
Gambar 51-3: Grafik distribusi normal residual respon CO-E70 E70

Lampiran 52: Persamaan Model Repon CO-E70

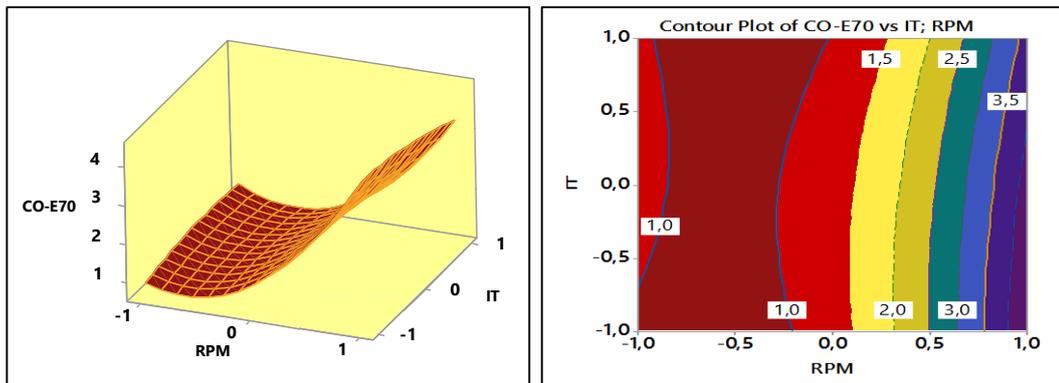
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon CO-E70 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$CO - E70 = 1,317 - 0,632 CR + 1,519 RPM + 1,351 RPM * RPM$$

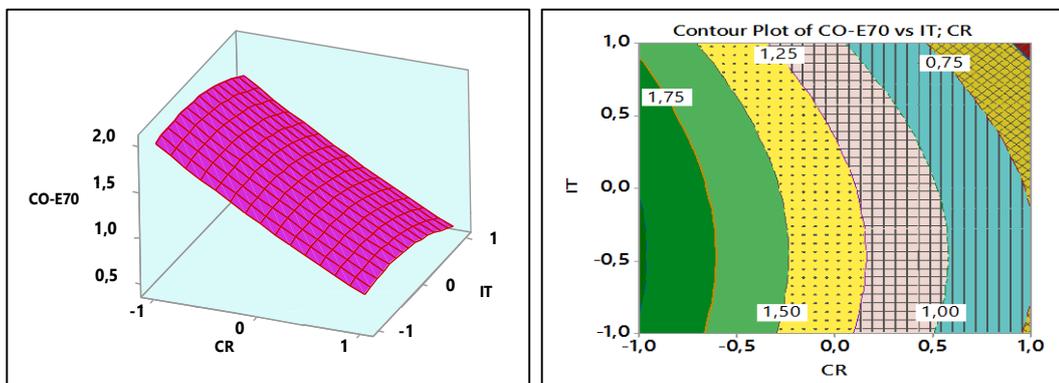
Lampiran 53: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon CO-E70



Gambar 53-1: Plot permukaan dan kontur respon CO-E70 vs CR; RPM



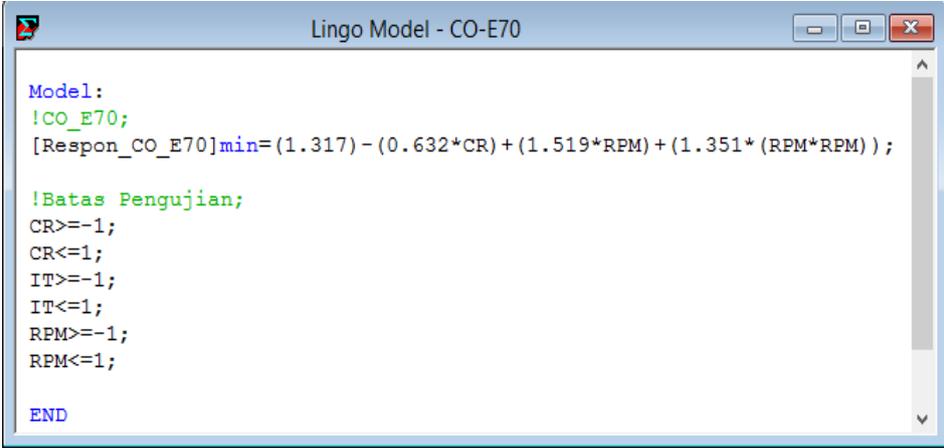
Gambar 53-2: Plot permukaan dan kontur respon CO-E70 vs RPM; IT



Gambar 53-3: Plot kontur respon CO-E70 vs CR; IT

Lampiran 54: Input Sintak Persamaan dan Solusi Optimasi Lokal CO-E70

Tabel 54-1: Input model persamaan optimasi respon CO-E70

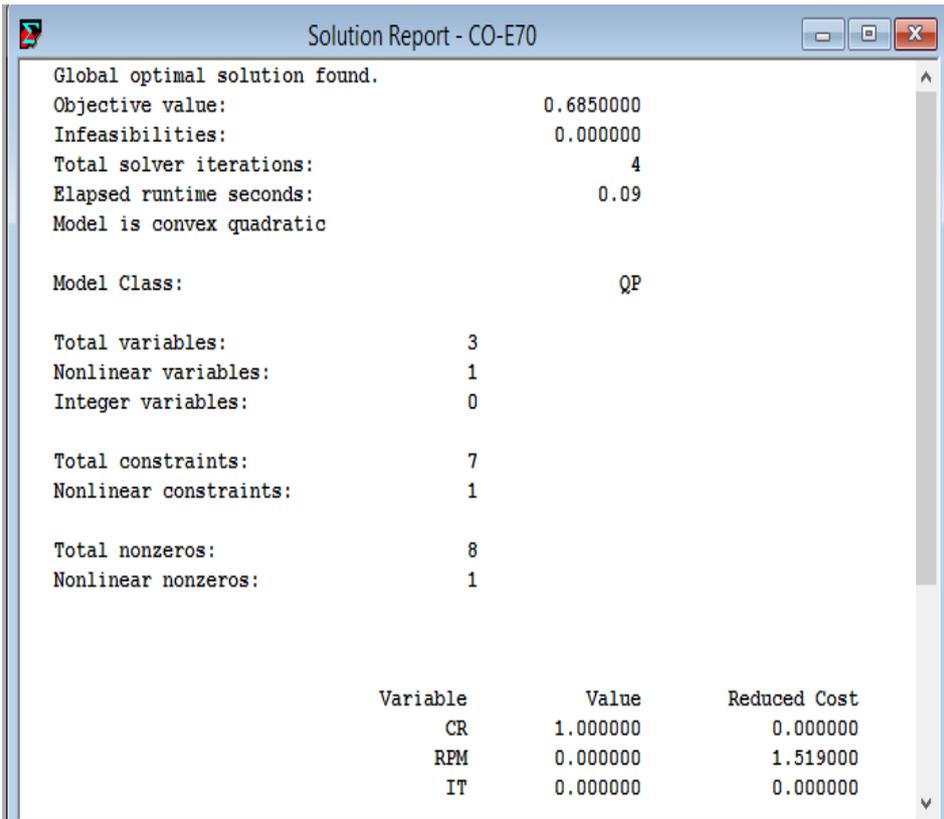


```
Model:
!CO_E70;
[Respon_CO_E70]min=(1.317) - (0.632*CR) + (1.519*RPM) + (1.351*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END
```

Tabel 54-2: Solusi optimasi respon CO-E70



Global optimal solution found.

Objective value:	0.6850000
Infeasibilities:	0.0000000
Total solver iterations:	4
Elapsed runtime seconds:	0.09

Model is convex quadratic

Model Class: QP

Total variables:	3
Nonlinear variables:	1
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	8
Nonlinear nonzeros:	1

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.000000	1.519000
IT	0.000000	0.000000

Lampiran 55: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi HC-E70

Tabel 55-1: Analisis varian HC-E70

Response Surface Regression: HC-E70 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1799,58	199,954	102,54	0,000
Linear	3	699,75	233,250	119,62	0,000
CR	1	66,13	66,125	33,91	0,002
IT	1	21,12	21,125	10,83	0,022
RPM	1	612,50	612,500	314,10	0,000
Square	3	1079,58	359,861	184,54	0,000
CR*CR	1	116,83	116,827	59,91	0,001
IT*IT	1	12,98	12,981	6,66	0,049
RPM*RPM	1	901,44	901,442	462,28	0,000
2-Way Interaction	3	20,25	6,750	3,46	0,107
CR*IT	1	0,25	0,250	0,13	0,735
CR*RPM	1	16,00	16,000	8,21	0,035
IT*RPM	1	4,00	4,000	2,05	0,212
Error	5	9,75	1,950		
Lack-of-Fit	3	7,75	2,583	2,58	0,291
Pure Error	2	2,00	1,000		
Total	14	1809,33			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,39642	99,46%	98,49%	92,90%

Tabel 55-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk HC-E70

Response Surface Regression: HC-E70 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

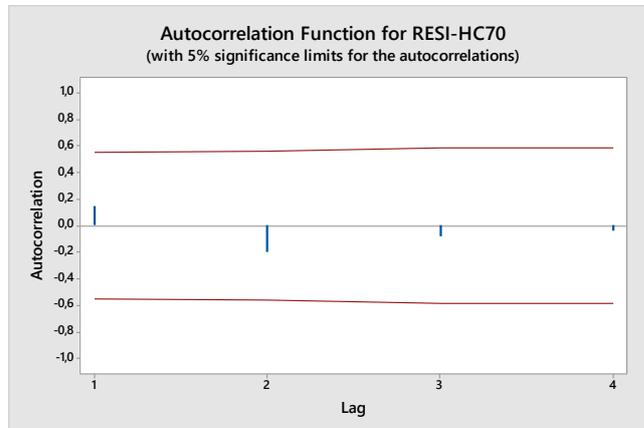
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		74,000	0,806	91,79	0,000	
CR	-5,750	-2,875	0,494	-5,82	0,002	1,00
IT	3,250	1,625	0,494	3,29	0,022	1,00
RPM	17,500	8,750	0,494	17,72	0,000	1,00
CR*CR	-11,250	-5,625	0,727	-7,74	0,001	1,01
IT*IT	3,750	1,875	0,727	2,58	0,049	1,01
RPM*RPM	31,250	15,625	0,727	21,50	0,000	1,01
CR*IT	0,500	0,250	0,698	0,36	0,735	1,00
CR*RPM	4,000	2,000	0,698	2,86	0,035	1,00
IT*RPM	-2,000	-1,000	0,698	-1,43	0,212	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{HC-E70} = & 74,000 - 2,875 \text{ CR} + 1,625 \text{ IT} + 8,750 \text{ RPM} - 5,625 \text{ CR*CR} \\
 & + 1,875 \text{ IT*IT} + 15,625 \text{ RPM*RPM} + 0,250 \text{ CR*IT} + 2,000 \text{ CR*RPM} \\
 & - 1,000 \text{ IT*RPM}
 \end{aligned}$$

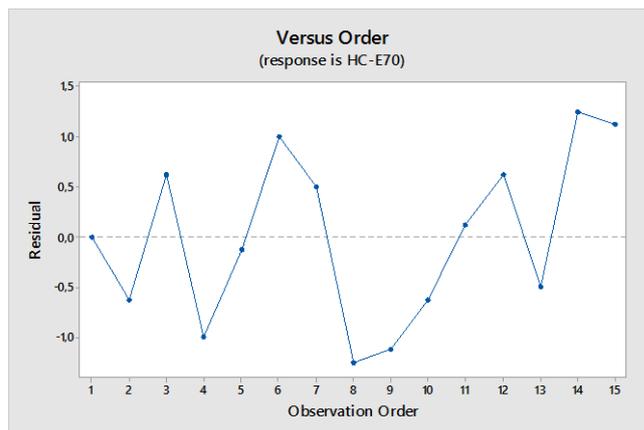
Lampiran 56: Pengujian Asumsi Residual Respon HC-E70

a. Uji Independensi



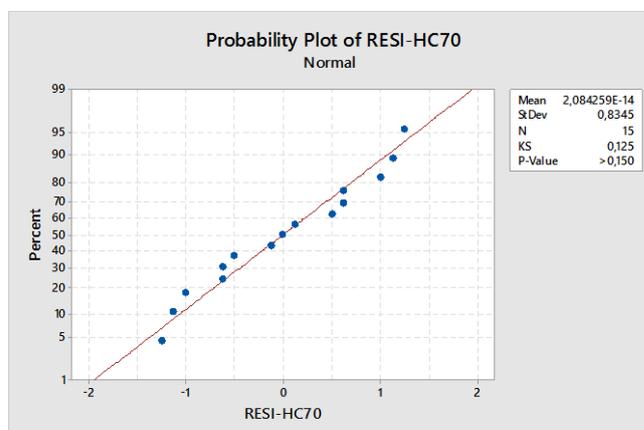
Gambar 56-1: Grafik ACF model pendugaan respon HC-E70

b. Uji Independensi



Gambar 56-2: Grafik uji keidentikan residual respon HC-E70 E70

c. Uji Normalitas



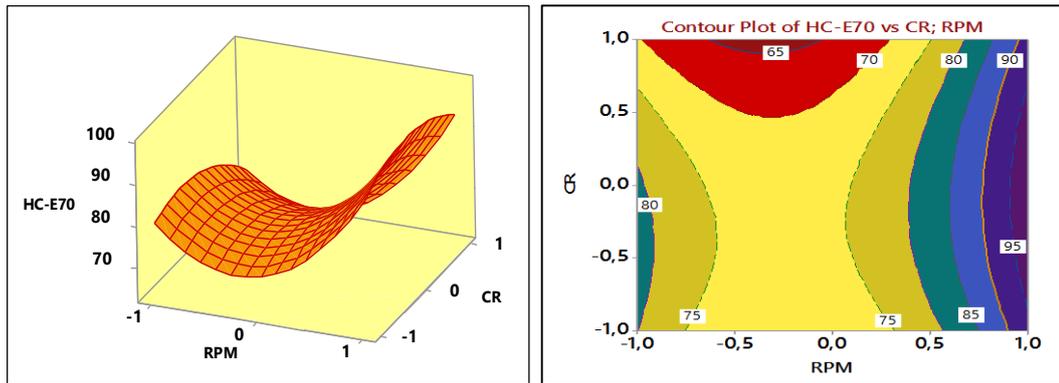
Gambar 56-3: Grafik distribusi normal residual respon HC-E70 E70

Lampiran 57: Persamaan Model Repon HC-E70

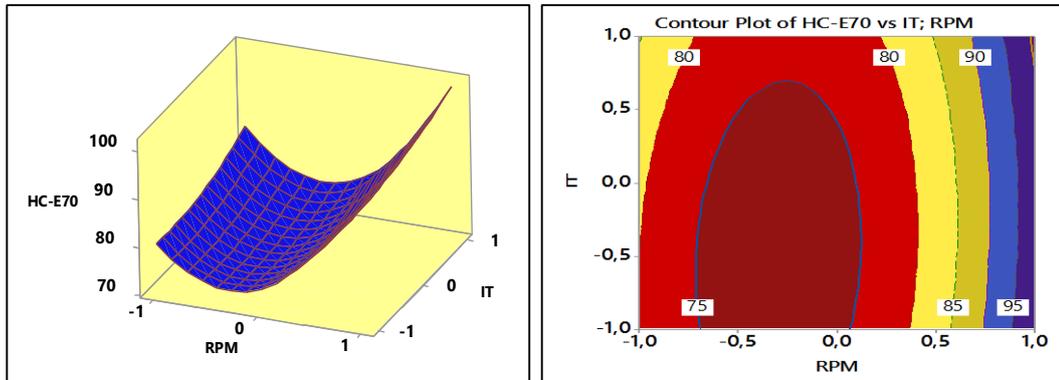
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon HC-E70 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 HC - E70 = & (74.000) - (2.875 * CR) + (1.625 * IT) + (8.750 * RPM) - (5.625 * (CR \\
 & * CR)) + (1.875 * (IT * IT)) + (15.625 * (RPM * RPM)) + (2.000 * (CR \\
 & * RPM))
 \end{aligned}$$

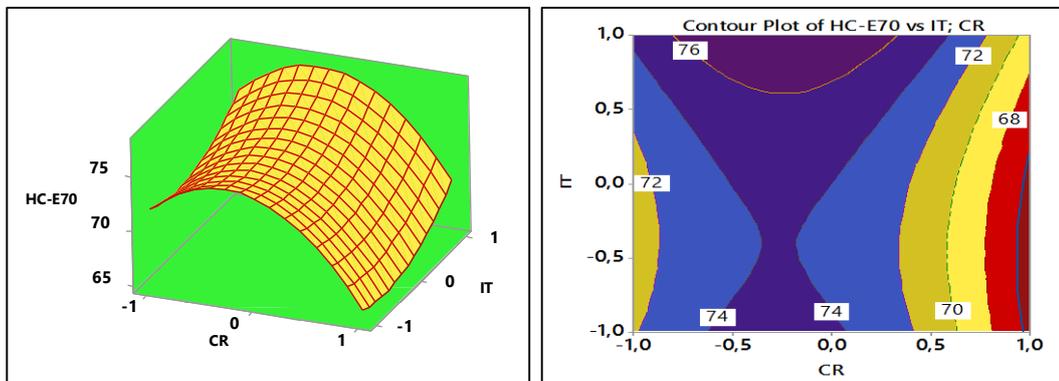
Lampiran 58: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon HC-E70



Gambar 58-1: Plot permukaan dan kontur respon HC-E70 vs CR; RPM



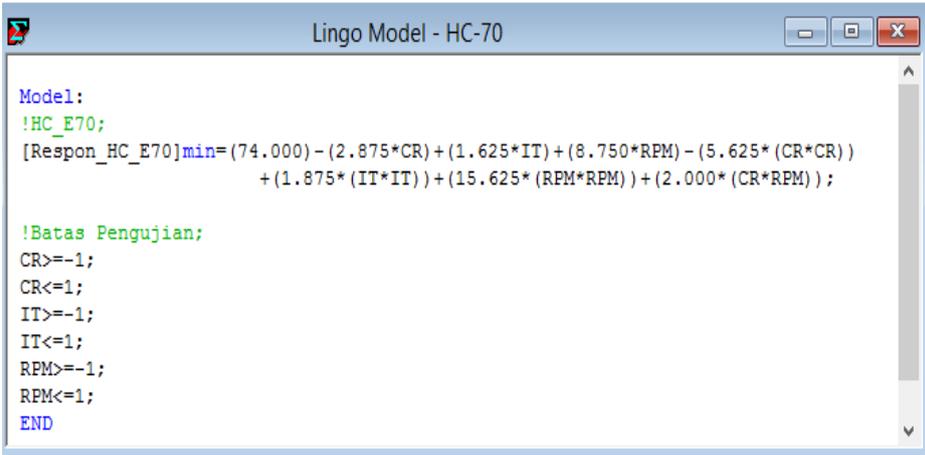
Gambar 58-2: Plot permukaan dan kontur respon HC-E70 vs IT; RPM



Gambar 58-3: Plot permukaan dan kontur respon HC-E70 vs CR; IT

Lampiran 59: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon HC-E70 E

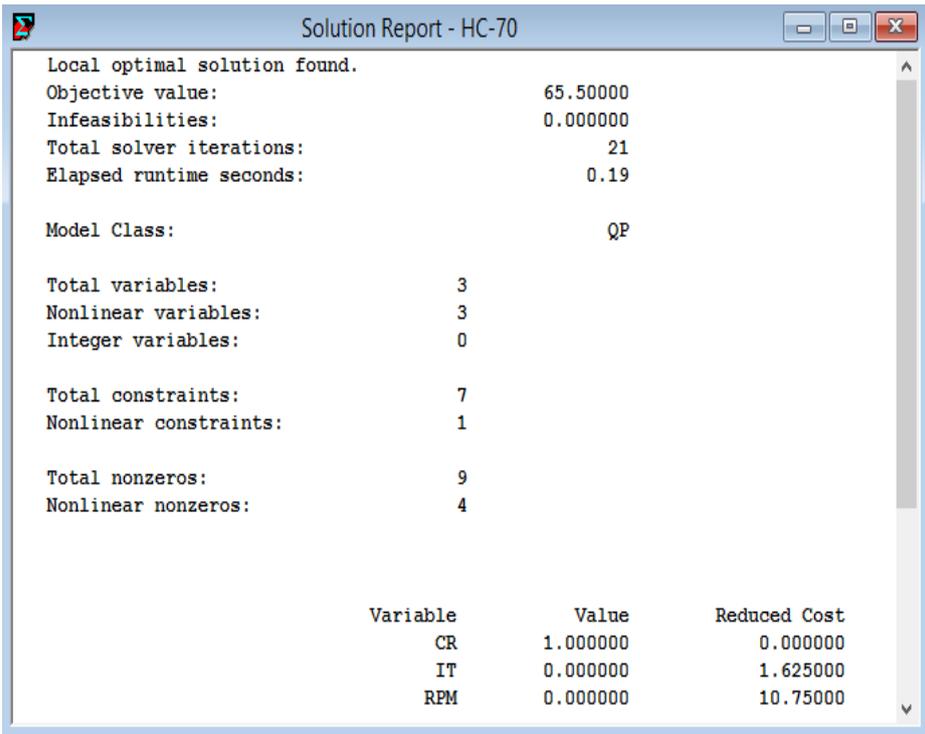
Tabel 59-1: Input model persamaan optimasi respon HC-E70



```
Model:
!HC_E70;
[Respon_HC_E70]min=(74.000)-(2.875*CR)+(1.625*IT)+(8.750*RPM)-(5.625*(CR*CR))
+(1.875*(IT*IT))+(15.625*(RPM*RPM))+(2.000*(CR*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 59-2: Solusi optimasi respon HC-E70



```
Solution Report - HC-70

Local optimal solution found.
Objective value:                65.50000
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:        21
Elapsed runtime seconds:        0.19

Model Class:                    QP

Total variables:                3
Nonlinear variables:            3
Integer variables:              0

Total constraints:              7
Nonlinear constraints:          1

Total nonzeros:                9
Nonlinear nonzeros:            4
```

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
IT	0.000000	1.625000
RPM	0.000000	10.75000

Lampiran 60: Optimasi Single Respon E70 dan Uji Konfirmasi Box Plot E70

1. Nilai Optimasi Lokal Respon E70

Respon	Variabel faktor (kode-sebenarnya)						Optimasi Lokal
	CR		IT		RPM		
Torsi (Nm)	0	13	0,6298	22,5	0,8433	7530	12,91
BSFC (kg/HP.min)	0,2688	12,63	0	20	0,3680	6104	0,003231
BTE (%)	0	12	0	20	0,2486	5746	0,3813
CO (%)	1	13	0	20	0	5000	0,685
HC (ppm)	1	13	0	20	0	5000	65,5

2. Input Sintak Persamaan Model dan Optimasi Single Respon Torsi-E70 Secara Serentak

Tabel 60.1: Sintak Persamaan Model Respon-E70

```

Lingo Model - Optimasi Single Respon E70 Dengan 4 Constraint
Model:
!RESPON TARGET MULTI RESPON;
[Respon_Torsi]max=(11.484)+(3.380*RPM)-(2.004*(RPM*RPM))-(0.745*(CR*RPM));

!RESPON PENGHAMBAT;

[Respon_BSFC_E100](0.003818)-(0.000272*CR)-(0.002993*RPM)
+(0.000506*(CR*CR))+(0.004067*(RPM*RPM))>=0.3230792E-02;

[Respon_BTE_E100](0.3720)+(0.07503*RPM)-(0.1509*(RPM*RPM))<=0.3813265;

[Respon_CO_E100](1.317)-(0.632*CR)+(1.519*RPM)+(1.351*(RPM*RPM))>=0.6850000;

[Respon_HC_E100](74.000)-(2.875*CR)+(1.625*IT)+(8.750*RPM)-(5.625*(CR*CR))
+(1.875*(IT*IT))+(15.625*(RPM*RPM))+(2.000*(CR*RPM))>=65.50000;

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
    
```

Tabel 60.2: Optimasi Respon Torsi dengan Respon Penghambat

```

Solution Report - Optimasi Single Respon E70 Dengan 4 Constraint
Local optimal solution found.
Objective value:                12.90920
Infeasibilities:                 0.000000
Total solver iterations:         9
Elapsed runtime seconds:         0.09

Model Class:                     QP

Total variables:                  3
Nonlinear variables:              3
Integer variables:                0

Total constraints:                11
Nonlinear constraints:            5

Total nonzeros:                  16
Nonlinear nonzeros:              10

Variable      Value      Reduced Cost
RPM           0.8433134  0.000000
CR            0.0000000  0.6282685
IT            1.0000000  0.000000
    
```

3. Sintak Persamaan Respon-E70 dan Solusinya Pada Kondisi Optimasi Torsi

Tabel 60.3: Sintak Persamaan Respon BSFC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Opt-SFC70
Model:
!BSFC_E70;
[Respon_BSFC_E70]min=(0.003818) - (0.000272*CR) - (0.002993*RPM)
                    + (0.000506*(CR*CR)) + (0.004067*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR=0.000000;
IT=1.000000;
RPM=0.8433134;
END
    
```

Tabel 60.4: Solusi Persamaan Respon BSFC Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - Opt-SFC70

Global optimal solution found.
 Objective value: 0.4186322E-02
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 0
 Elapsed runtime seconds: 0.16

Model Class: LP

Total variables: 0
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 1
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 0
 Nonlinear nonzeros: 0

Variable	Value	Reduced Cost
CR	0.000000	0.000000
RPM	0.8433134	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Tabel 60.5: Sintak Persamaan Respon BTE Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Optim-BTE70
Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E70]max=(0.3720) + (0.07503*RPM) - (0.1509*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR=0.000000;
IT=1.000000;
RPM=0.8433134;
END
    
```

Tabel 60.6: Solusi Persamaan Respon BTE Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - Optim-BTE70

Global optimal solution found.
 Objective value: 0.3279571
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 0
 Elapsed runtime seconds: 0.08

Model Class: LP

Total variables: 0
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 1
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 0
 Nonlinear nonzeros: 0

Variable	Value	Reduced Cost
RPM	0.8433134	0.000000
CR	0.000000	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Tabel 60.7: Sintak Persamaan Respon CO Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Optim-CO70
Model:
!CO_E70;
[Respon_CO_E70]min=(1.317) - (0.632*CR) + (1.519*RPM) + (1.351*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR=0.000000;
IT=1.000000;
RPM=0.8433134;
END
    
```

Tabel 60.8 Solusi Persamaan Respon CO Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - Optim-CO70

Global optimal solution found.

Objective value:	3.558794
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	0
Elapsed runtime seconds:	0.08

Model Class: LP

Total variables:	0
Nonlinear variables:	0
Integer variables:	0
Total constraints:	1
Nonlinear constraints:	0
Total nonzeros:	0
Nonlinear nonzeros:	0

Variable	Value	Reduced Cost
CR	0.000000	0.000000
RPM	0.8433134	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Tabel 60.9: Sintak Persamaan Respon HC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Optim-HC70
Model:
!HC_E70;
[Respon_HC_E70]min=(74.000) - (2.875*CR) + (1.625*IT) + (8.750*RPM) - (5.625*(CR*CR)
+ (1.875*(IT*IT)) + (15.625*(RPM*RPM)) + (2.000*(CR*RPM));

!Batas Pengujian;
CR=0.000000;
IT=1.000000;
RPM=0.8433134;
END
    
```

Tabel 60.10: Solusi Persamaan Respon HC Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - Optim-HC70

Global optimal solution found.

Objective value:	95.99114
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	0
Elapsed runtime seconds:	0.08

Model Class: LP

Total variables:	0
Nonlinear variables:	0
Integer variables:	0
Total constraints:	1
Nonlinear constraints:	0
Total nonzeros:	0
Nonlinear nonzeros:	0

Variable	Value	Reduced Cost
CR	0.000000	0.000000
IT	1.000000	0.000000
RPM	0.8433134	0.000000

4. Nilai Repon Penghambat Pada Kondisi Optimasi Torsi

Tabel 60.11: Nilai Respon E70 Pada Kondisi Optimasi Torsi

Variabel Faktor			Variable Respon				
Nama	Koding	Real	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP-min)	BTE (%)	CO (%)	HC (PPM)
CR	0	12.5	12,91	0,004186	0,3280	3,56	95,99
IT	1	24					
RPM	0,8433	7530					

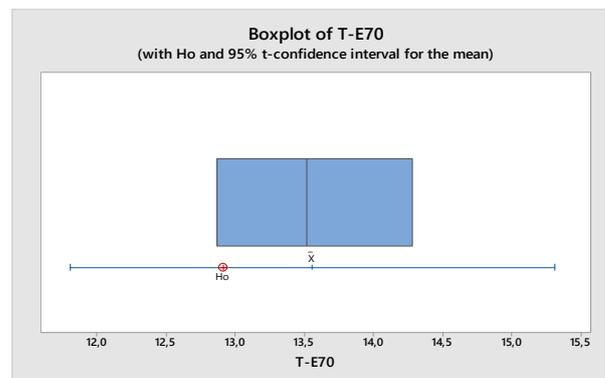
5. Data Pengamatan/Perhitungan Pada Kondisi Optimasi Respon Torsi

Tabel 60.12: Data Pengamatan Hasil Uji Konfirmasi

Variabel Faktor			Variable Respon				
CR	IT	RPM	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP-min)	BTE (%)	CO (%)	HC (PPM)
12,5	24	7530	12,87	0,004373	0,3488	3,35	97
			14,28	0,004076	0,3235	3,22	94
			13,52	0,004274	0,3471	3,57	96

6. Uji Konfirmasi Nilai Optimasi Dengan Uji One Sample-t

a) Pengujian *One Sample-T* Respon Torsi-E70



Gambar 60-1: Diagram boxplot respon Torsi-E70

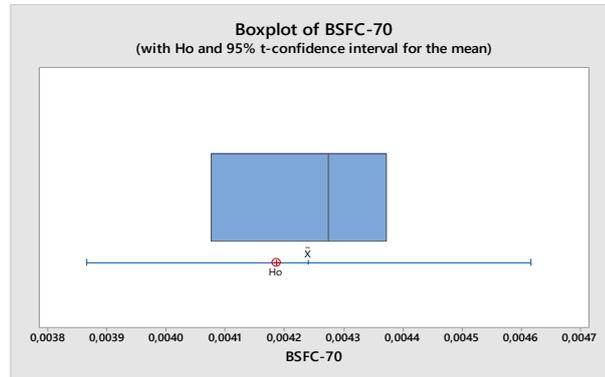
Tabel 60.13: Analisa hipotesa *one sample-t* respon Torsi-E70

One-Sample T: T-E70

Test of $\mu = 12,91$ vs $\neq 12,91$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
T-E70	3	13,557	0,706	0,407	(11,804; 15,310)	1,59	0,253

b) Pengujian *One Sample-T* Respon BSFC-E70

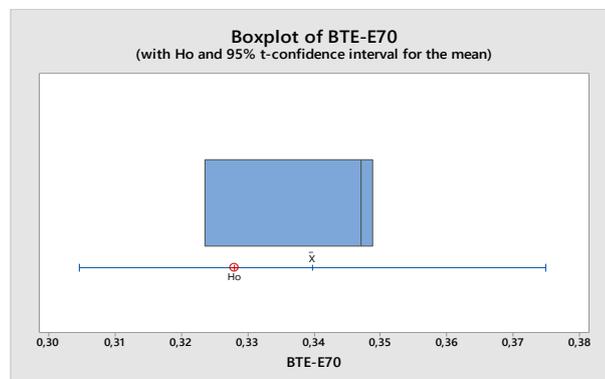


Gambar 60-2: Diagram boxplot respon BSFC-E70

Tabel 60.14: Analisa hipotesa *one sample-t* respon BSFC-E70

One-Sample T: BSFC-70							
Test of $\mu = 0,004186$ vs $\neq 0,004186$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BSFC-70	3	0,004241	0,000151	0,000087	(0,003865; 0,004617)	0,63	0,593

c) Pengujian *One Sample-T* Respon BTE-E70

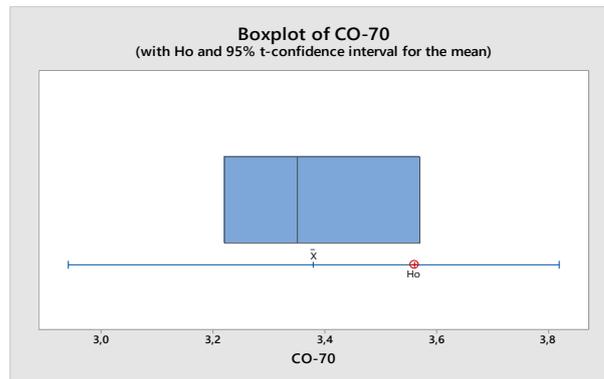


Gambar 60-3: Diagram boxplot respon BTE-E70

Tabel 60.15: Analisa hipotesa *one sample-t* respon BTE-E70

One-Sample T: BTE-E70							
Test of $\mu = 0,328$ vs $\neq 0,328$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BTE-E70	3	0,33980	0,01414	0,00816	(0,30467; 0,37493)	1,45	0,285

d) Pengujian *One Sample-T* Respon CO-E70



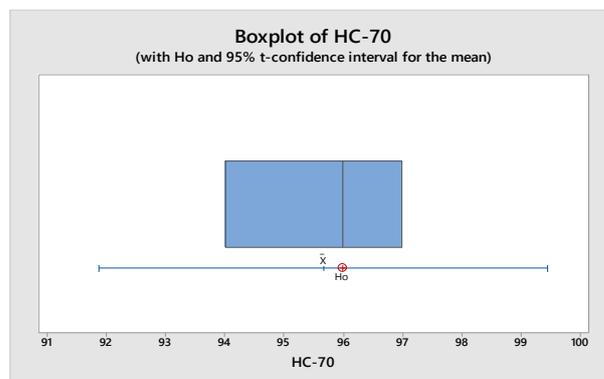
Gambar 60-4: Diagram boxplot respon CO-E70

Tabel 60.16: Analisa hipotesa *one sample-t* respon CO-E70

One-Sample T: CO-70
 Test of $\mu = 3,56$ vs $\neq 3,56$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
CO-70	3	3,380	0,177	0,102	(2,941; 3,819)	-1,76	0,220

e) Pengujian *One Sample-T* Respon HC-E70



Gambar 60-5: Diagram boxplot respon HC-E70

Tabel 60.17: Analisa hipotesa *one sample-t* respon HC-E70

One-Sample T: HC-70
 Test of $\mu = 95,99$ vs $\neq 95,99$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
HC-70	3	95,667	1,528	0,882	(91,872; 99,461)	-0,37	0,749

Lampiran 61: Data Pengamatan/Perhitungan Respon Bahan Bakar E50

Tabel 61-1: Data Pengamatan/Perhitungan Respon Bahan Bakar E50

Run Order	CR	IT	RPM	Torsi	BSFC	BTE	CO	HC
				(Nm)	(kg/HP.min)	(%)	(%)	(ppm)
1	-1	-1	0	12,602	0,177797129	0,447769319	1,640	69
2	1	-1	0	12,641	0,181399257	0,43887776	0,860	65
3	-1	1	0	10,611	0,24208776	0,328856361	1,610	69
4	1	1	0	11,895	0,2212284	0,359863832	0,830	67
5	-1	0	-1	6,306	0,508878592	0,156446156	1,710	76
6	1	0	-1	6,747	0,481788169	0,165242953	0,450	71
7	-1	0	1	14,985	0,203237582	0,39171938	4,990	95
8	1	0	1	16,004	0,199631465	0,398795348	3,310	90
9	0	-1	-1	6,619	0,485263239	0,164059614	1,160	75
10	0	1	-1	5,953	0,583120233	0,136527761	1,120	81
11	0	-1	1	13,720	0,232636504	0,342216713	4,420	93
12	0	1	1	12,268	0,285652705	0,278702418	3,410	96
13	0	0	0	11,650	0,198402141	0,401266332	1,320	69
14	0	0	0	11,650	0,198402141	0,401266332	1,320	69
15	0	0	0	11,650	0,198402141	0,401266332	1,320	69

Lampiran 62: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi Torsi E50

Tabel 62-1: Analisis varian torsi E50

Response Surface Regression: Torsi-E50 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	139,583	15,509	27,61	0,001
Linear	3	126,783	42,261	75,23	0,000
CR	1	0,968	0,968	1,72	0,246
IT	1	2,946	2,946	5,24	0,071
RPM	1	122,868	122,868	218,72	0,000
Square	3	12,174	4,058	7,22	0,029
CR*CR	1	2,537	2,537	4,52	0,087
IT*IT	1	1,083	1,083	1,93	0,224
RPM*RPM	1	7,961	7,961	14,17	0,013
2-Way Interaction	3	0,625	0,208	0,37	0,778
CR*IT	1	0,388	0,388	0,69	0,444
CR*RPM	1	0,084	0,084	0,15	0,716
IT*RPM	1	0,154	0,154	0,27	0,622
Error	5	2,809	0,562		
Lack-of-Fit	3	2,604	0,868	8,48	0,107
Pure Error	2	0,205	0,102		
Total	14	142,391			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,749512	98,03%	94,48%	70,42%

Tabel 62-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk torsi E50

Response Surface Regression: Torsi-E50 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

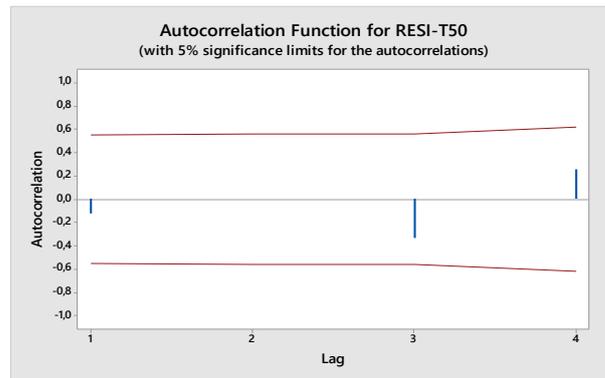
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		11,650	0,433	26,92	0,000	
CR	0,696	0,348	0,265	1,31	0,246	1,00
IT	-1,214	-0,607	0,265	-2,29	0,071	1,00
RPM	7,838	3,919	0,265	14,79	0,000	1,00
CR*CR	1,658	0,829	0,390	2,13	0,087	1,01
IT*IT	-1,083	-0,542	0,390	-1,39	0,224	1,01
RPM*RPM	-2,937	-1,468	0,390	-3,76	0,013	1,01
CR*IT	0,622	0,311	0,375	0,83	0,444	1,00
CR*RPM	0,289	0,145	0,375	0,39	0,716	1,00
IT*RPM	-0,393	-0,196	0,375	-0,52	0,622	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$T-E50 = 11,650 + 0,348 CR - 0,607 IT + 3,919 RPM + 0,829 CR*CR - 0,542 IT*IT - 1,468 RPM*RPM + 0,311 CR*IT + 0,145 CR*RPM - 0,196 IT*RPM$$

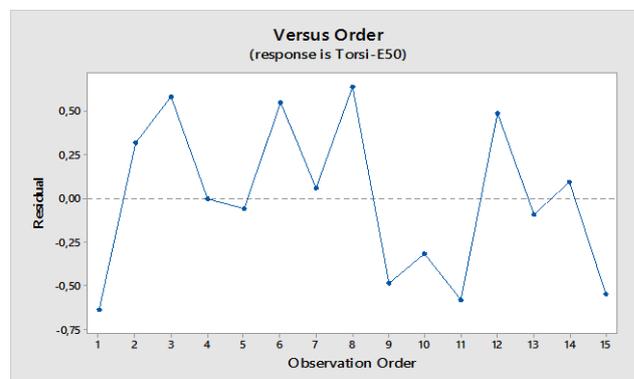
Lampiran 63: Pengujian Asumsi Residual Respon Torsi E50

a. Uji Independensi



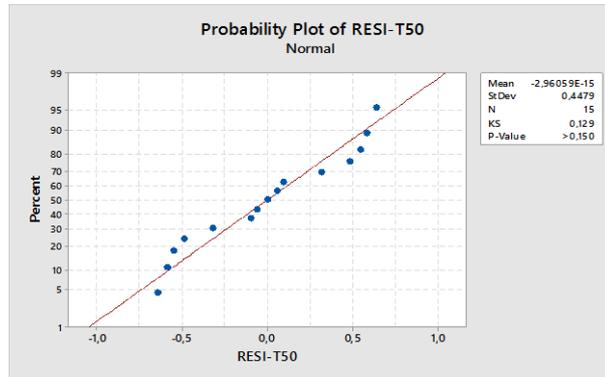
Gambar 63-1: Grafik ACF model pendugaan respon torsi E50

b. Uji Independensi



Gambar 63-2: Grafik uji keidentikan residual respon torsi E50

c. Uji Normalitas



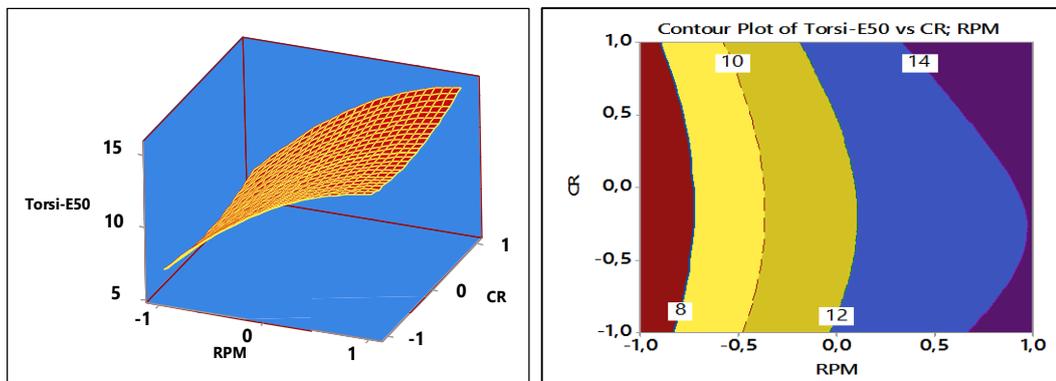
Gambar 63-3: Grafik distribusi normal residual respon torsi E50

Lampiran 64: Persamaan Model Repon Torsi E50

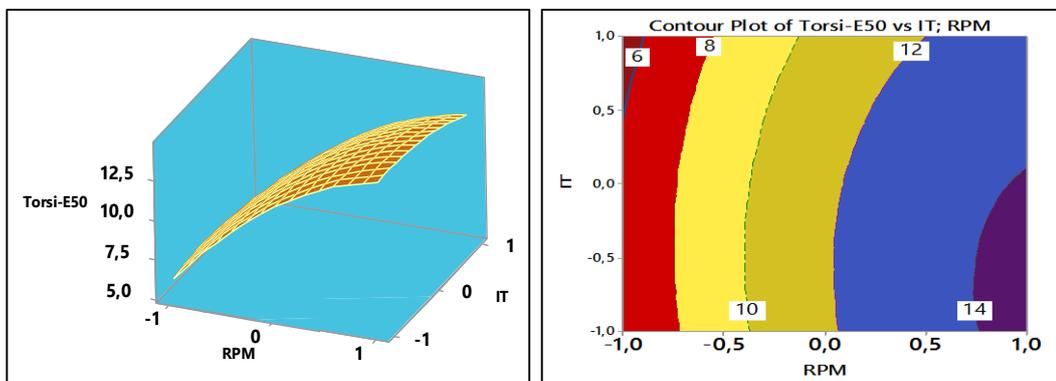
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon Torsi-E50 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$Torsi - E50 = (11.650) + (3.919 * RPM) - (1.468 * (RPM * RPM));$$

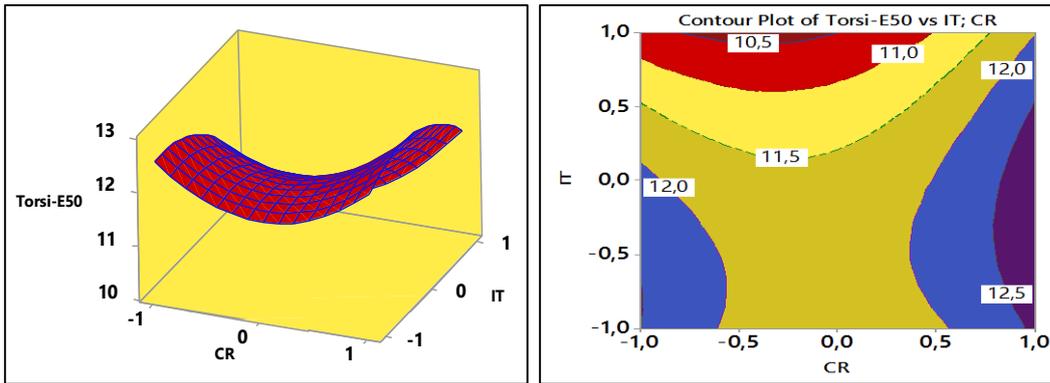
Lampiran 65: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon Torsi E50



Gambar 65-1: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs CR; RPM



Gambar 65-2: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs IT; RPM



Gambar 65-3: Plot permukaan dan kontur respon Torsi vs CR; IT

Lampiran 66: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon Torsi E50

Tabel 66-1: Input model persamaan optimasi respon torsi E50

```

Lingo Model - Torsi-E50
Model:
!TORSI;
[Respon_Torsi70]max=(11.650)+(3.919*RPM)-(1.468*(RPM*RPM));
!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END

```

Tabel 66-2: Solusi optimasi respon torsi E50

Solution Report - Torsi-E50		
Global optimal solution found.		
Objective value:		14.10100
Infeasibilities:		0.000000
Total solver iterations:		4
Elapsed runtime seconds:		0.08
Model is convex quadratic		
Model Class: QP		
Total variables:	3	
Nonlinear variables:	1	
Integer variables:	0	
Total constraints:	7	
Nonlinear constraints:	1	
Total nonzeros:	7	
Nonlinear nonzeros:	1	
	Variable	Value
	RPM	1.000000
	CR	0.000000
	IT	0.000000
		Reduced Cost
	RPM	0.000000
	CR	0.000000
	IT	0.000000

Lampiran 67: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi BSFC E50

Tabel 67-1: Analisis varian BSFC E50

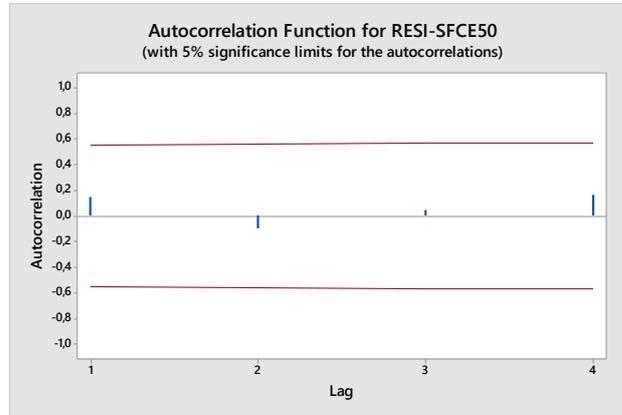
Response Surface Regression: SFC-50 versus CR; IT; RPM					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,000079	0,000009	206,81	0,000
Linear	3	0,000047	0,000016	372,37	0,000
CR	1	0,000000	0,000000	1,89	0,228
IT	1	0,000002	0,000002	53,33	0,001
RPM	1	0,000045	0,000045	1061,89	0,000
Square	3	0,000031	0,000010	246,34	0,000
CR*CR	1	0,000000	0,000000	10,21	0,024
IT*IT	1	0,000001	0,000001	18,66	0,008
RPM*RPM	1	0,000030	0,000030	704,32	0,000
2-Way Interaction	3	0,000000	0,000000	1,73	0,276
CR*IT	1	0,000000	0,000000	0,98	0,367
CR*RPM	1	0,000000	0,000000	0,90	0,385
IT*RPM	1	0,000000	0,000000	3,30	0,129
Error	5	0,000000	0,000000		
Lack-of-Fit	3	0,000000	0,000000	1,09	0,510
Pure Error	2	0,000000	0,000000		
Total	14	0,000079			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0,0002058	99,73%	99,25%	97,11%	

Tabel 67-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BSFC E50

Response Surface Regression: BSFC-E50 versus CR; IT; RPM						
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,003307	0,000119	27,84	0,000	
CR	-0,000200	-0,000100	0,000073	-1,37	0,228	1,00
IT	0,001062	0,000531	0,000073	7,30	0,001	1,00
RPM	-0,004741	-0,002371	0,000073	-32,59	0,000	1,00
CR*CR	-0,000684	-0,000342	0,000107	-3,20	0,024	1,01
IT*IT	0,000925	0,000463	0,000107	4,32	0,008	1,01
RPM*RPM	0,005684	0,002842	0,000107	26,54	0,000	1,01
CR*IT	-0,000204	-0,000102	0,000103	-0,99	0,367	1,00
CR*RPM	0,000196	0,000098	0,000103	0,95	0,385	1,00
IT*RPM	-0,000374	-0,000187	0,000103	-1,82	0,129	1,00
Regression Equation in Uncoded Units						
SFC-50 = 0,003307 - 0,000100 CR + 0,000531 IT - 0,002371 RPM						
- 0,000342 CR*CR + 0,000463 IT*IT + 0,002842 RPM*RPM						
- 0,000102 CR*IT + 0,000098 CR*RPM - 0,000187 IT*RPM						

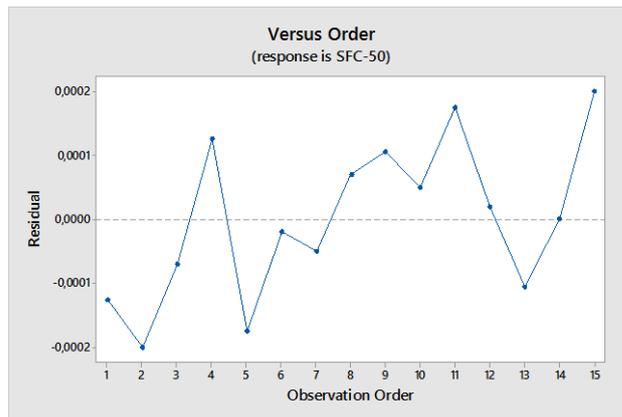
Lampiran 68: Pengujian Asumsi Residual Respon BSFC E50

a. Uji Independensi



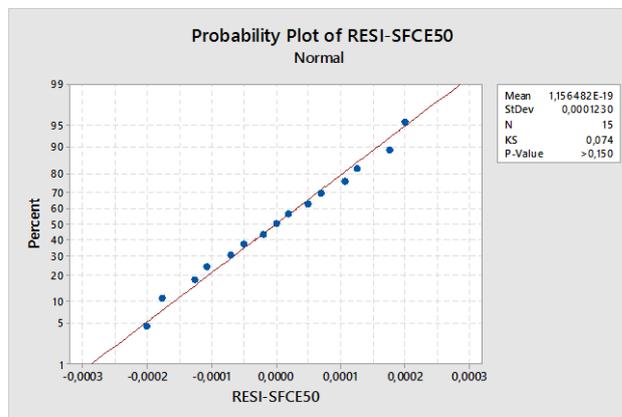
Gambar 68-1: Grafik ACF model pendugaan respon BSFC E50

b. Uji Independensi



Gambar 68-2: Grafik uji keidentikan residual respon BSFC E50

c. Uji Normalitas



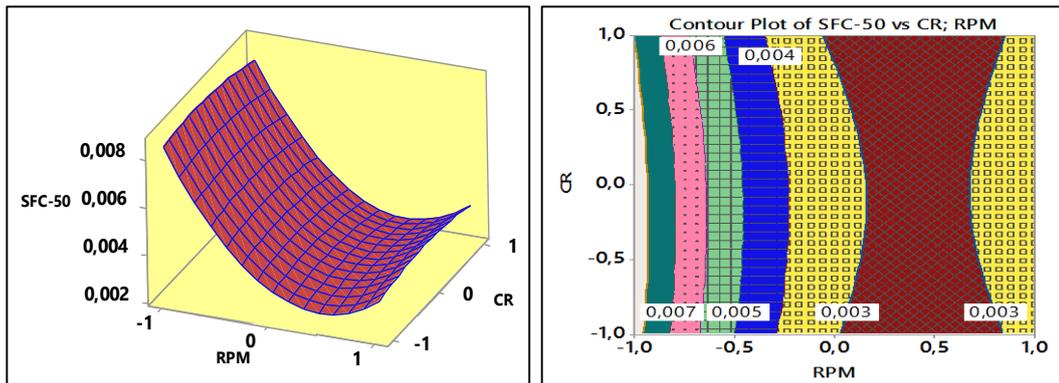
Gambar 68-3: Grafik distribusi normal residual respon BSFC E50

Lampiran 69: Model Persamaan Repon BSFC E50

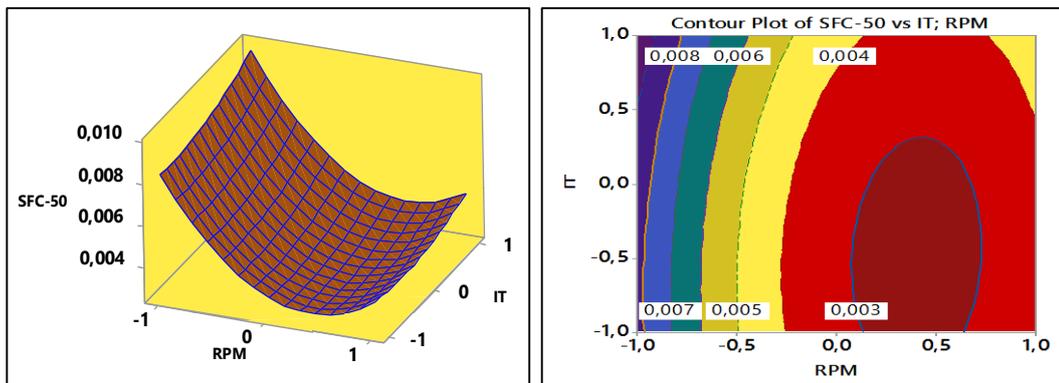
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon BSFC-E50 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$BSFC - 50 = 0,003307 + 0,000531 IT - 0,002371 RPM - 0,000342 CR + 0,000463 IT * IT + 0,002842 RPM * RPM$$

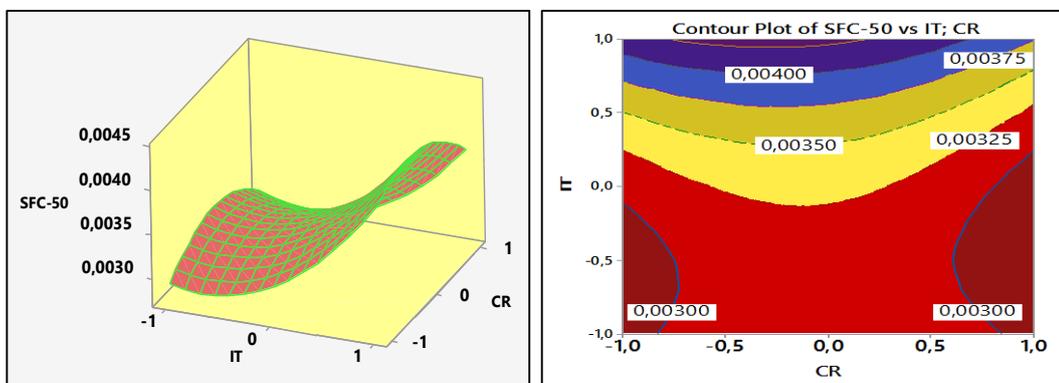
Lampiran 70: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon BSFC E50



Gambar 70-1: Plot permukaan dan kontur BSFC vs CR; RPM



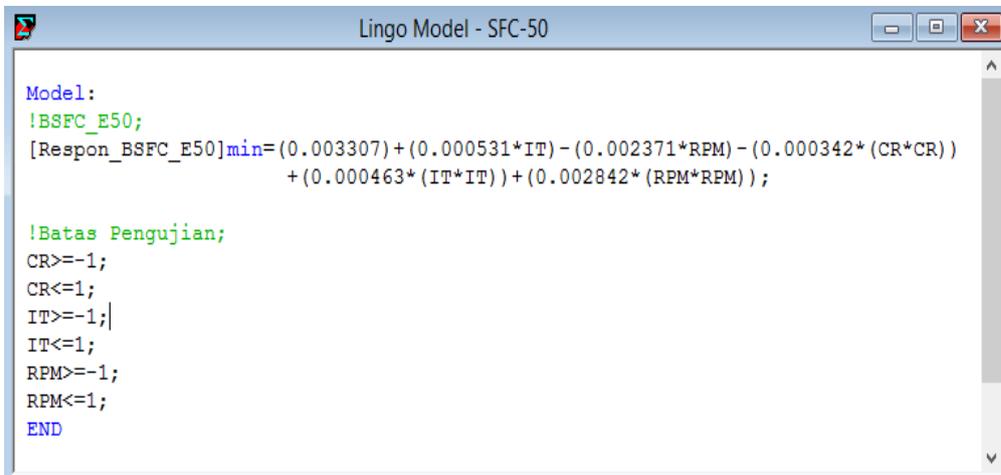
Gambar 70-2: Plot permukaan dan kontur BSFC vs IT; RPM



Gambar 70-3: Plot permukaan dan kontur BSFC vs CR; IT

Lampiran 71: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon BSFC E50

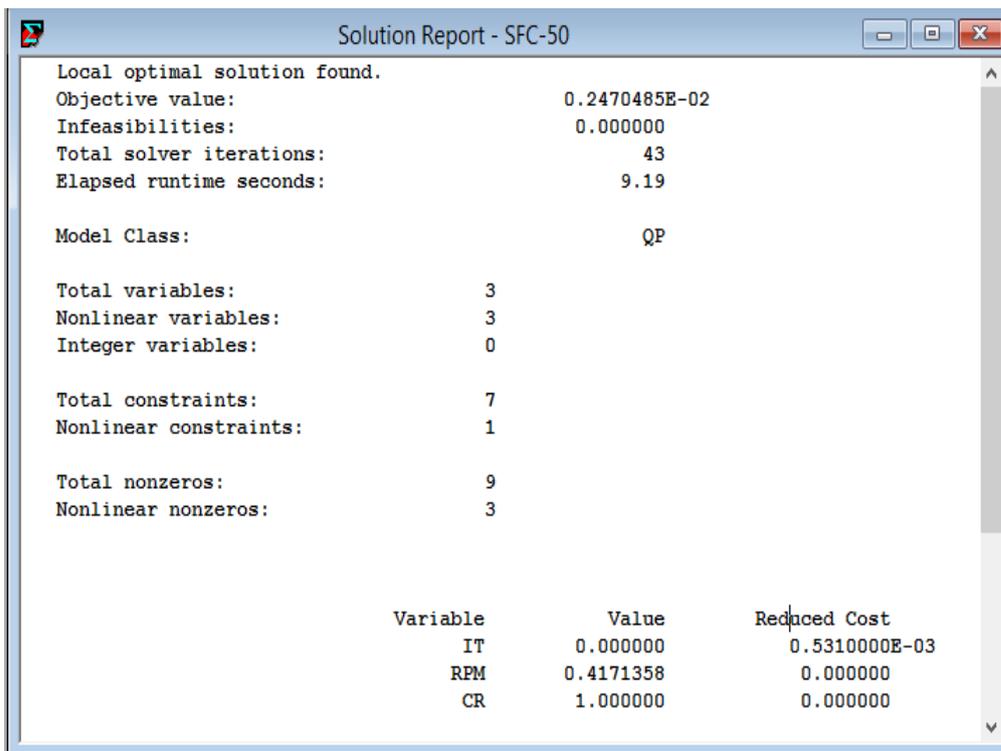
Tabel 71-1: Input model persamaan optimasi respon BSFC E50



```
Model:
!BSFC_E50;
[Respon_BSFC_E50]min=(0.003307)+(0.000531*IT)-(0.002371*RPM)-(0.000342*(CR*CR))
                +(0.000463*(IT*IT))+(0.002842*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;|
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 71-2: Solusi optimasi respon BSFC E50



Local optimal solution found.

Objective value:	0.2470485E-02
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	43
Elapsed runtime seconds:	9.19

Model Class: QP

Total variables:	3
Nonlinear variables:	3
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	9
Nonlinear nonzeros:	3

Variable	Value	Reduced Cost
IT	0.000000	0.5310000E-03
RPM	0.4171358	0.000000
CR	1.000000	0.000000

Lampiran 72: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi BTE E50

Tabel 72-1: Analisis varian BTE E50

Response Surface Regression: BTE-50 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,169967	0,018885	16,00	0,004
Linear	3	0,088465	0,029488	24,99	0,002
CR	1	0,000180	0,000180	0,15	0,712
IT	1	0,010438	0,010438	8,85	0,031
RPM	1	0,077846	0,077846	65,97	0,000
Square	3	0,080780	0,026927	22,82	0,002
CR*CR	1	0,001495	0,001495	1,27	0,311
IT*IT	1	0,002802	0,002802	2,37	0,184
RPM*RPM	1	0,075864	0,075864	64,29	0,000
2-Way Interaction	3	0,000722	0,000241	0,20	0,889
CR*IT	1	0,000398	0,000398	0,34	0,587
CR*RPM	1	0,000001	0,000001	0,00	0,981
IT*RPM	1	0,000324	0,000324	0,27	0,623
Error	5	0,005900	0,001180		
Lack-of-Fit	3	0,004189	0,001396	1,63	0,402
Pure Error	2	0,001711	0,000856		
Total	14	0,175868			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0343518	96,65%	90,61%	59,70%

Tabel 72-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk BTE E50

Response Surface Regression: BTE-E50 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

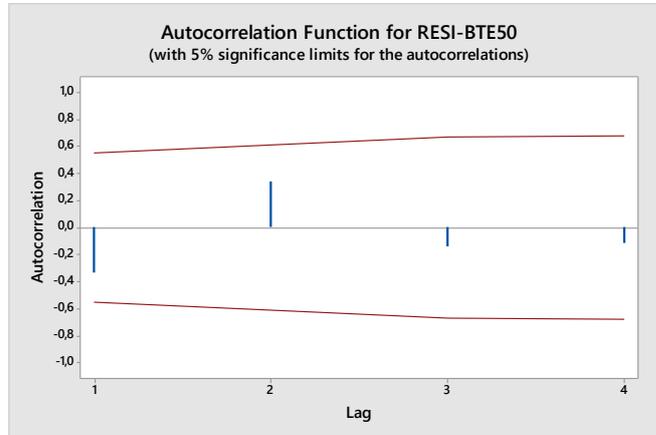
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,4013	0,0198	20,23	0,000	
CR	0,0095	0,0047	0,0121	0,39	0,712	1,00
IT	-0,0722	-0,0361	0,0121	-2,97	0,031	1,00
RPM	0,1973	0,0986	0,0121	8,12	0,000	1,00
CR*CR	0,0402	0,0201	0,0179	1,13	0,311	1,01
IT*IT	-0,0551	-0,0275	0,0179	-1,54	0,184	1,01
RPM*RPM	-0,2867	-0,1433	0,0179	-8,02	0,000	1,01
CR*IT	0,0199	0,0100	0,0172	0,58	0,587	1,00
CR*RPM	-0,0009	-0,0004	0,0172	-0,03	0,981	1,00
IT*RPM	-0,0180	-0,0090	0,0172	-0,52	0,623	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{BTE-50} = 0,4013 + 0,0047 \text{ CR} - 0,0361 \text{ IT} + 0,0986 \text{ RPM} + 0,0201 \text{ CR*CR} - 0,0275 \text{ IT*IT} - 0,1433 \text{ RPM*RPM} + 0,0100 \text{ CR*IT} - 0,0004 \text{ CR*RPM} - 0,0090 \text{ IT*RPM}$$

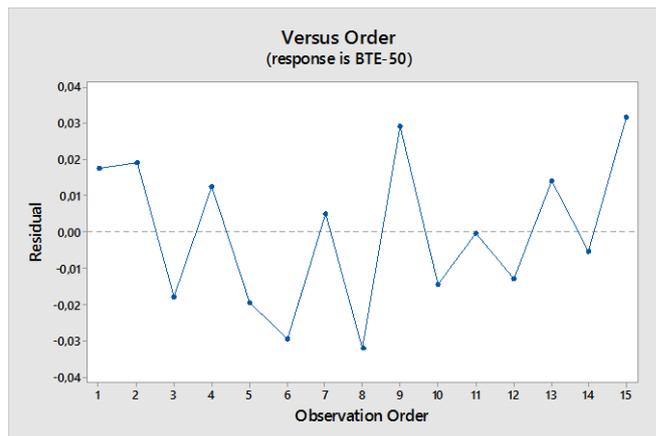
Lampiran 73: Pengujian Asumsi Residual Respon BTE E50

a. Uji Independensi



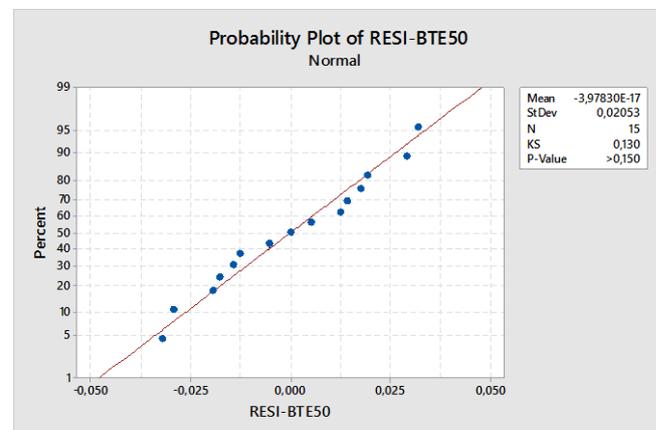
Gambar 73-1: Grafik ACF model pendugaan respon BTE E50

b. Uji Independensi



Gambar 73-2: Grafik uji keidentikan residual respon BTE E50

c. Uji Normalitas



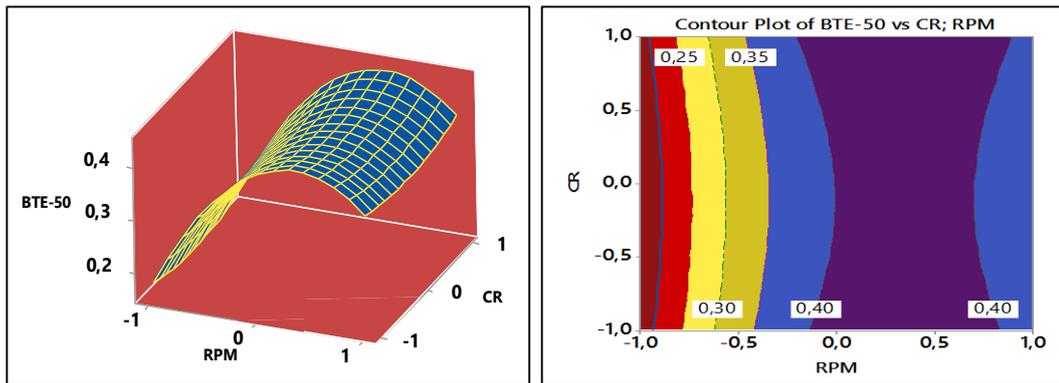
Gambar 73-3: Grafik distribusi normal residual respon BTE E50

Lampiran 74: Persamaan Model Repon BTE E50

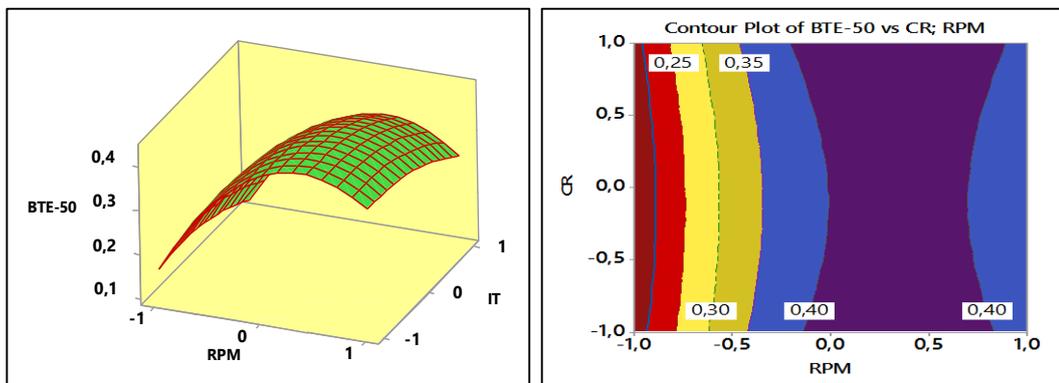
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon BTE-E50 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$BTE - E50 = (0.4013) - (0.0361 * IT) + (0.0986 * RPM) - (0.1433 * (RPM * RPM))$$

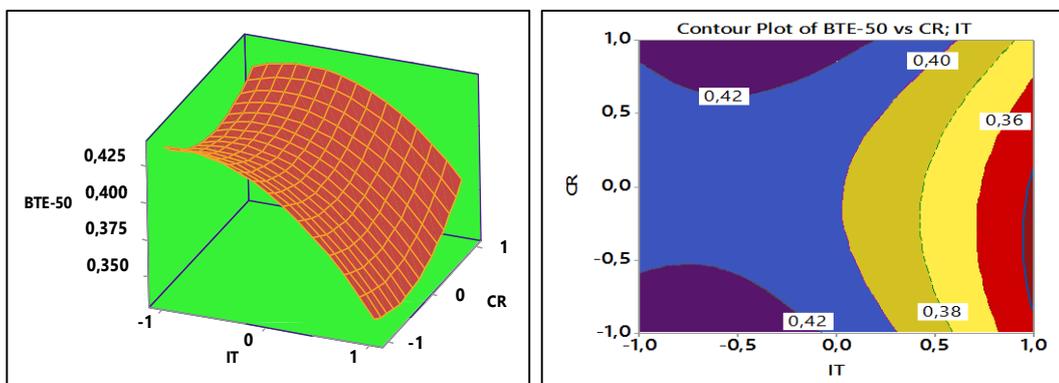
Lampiran 75: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon BTE E50



Gambar 75-1: Plot permukaan dan kontur respon BTE vs CR; RPM



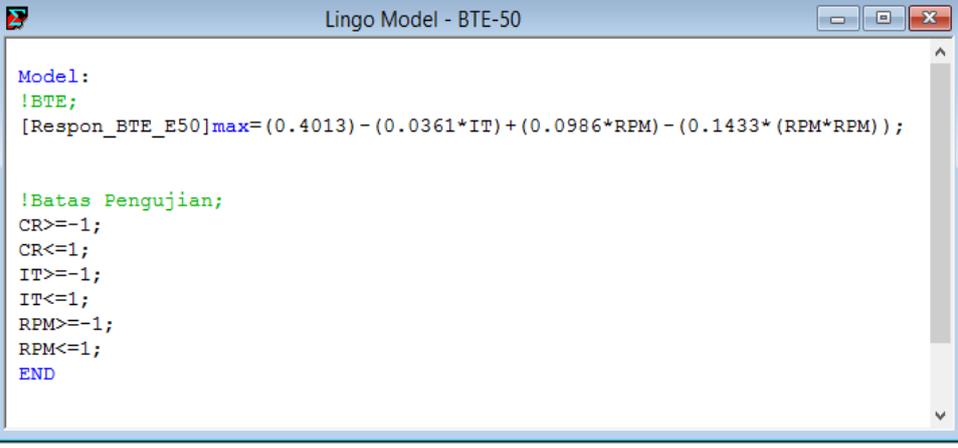
Gambar 75-2: Plot permukaan dan kontur respon BTE vs IT; RPM



Gambar 75-3: Plot permukaan dan kontur respon BTE vs CR; IT

Lampiran 76: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal BTE E50

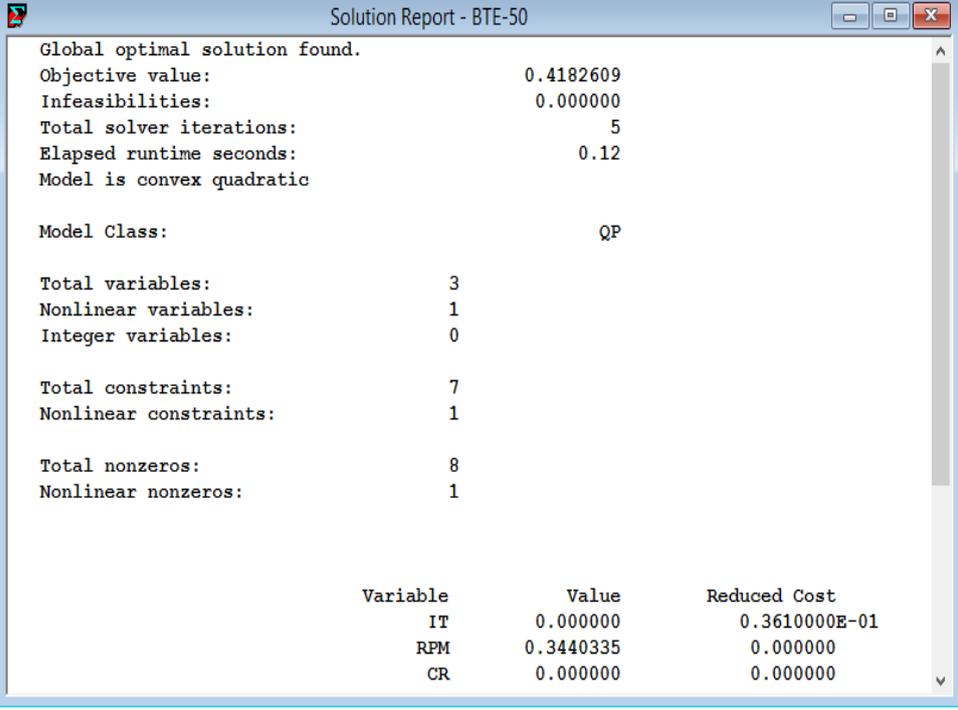
Tabel 76-1: Input model persamaan optimasi respon BTE E50



```
Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E50]max=(0.4013) - (0.0361*IT) + (0.0986*RPM) - (0.1433*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 76-2: Solusi optimasi respon BTE E50



Global optimal solution found.

Objective value:	0.4182609
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	5
Elapsed runtime seconds:	0.12

Model is convex quadratic

Model Class: QP

Total variables:	3
Nonlinear variables:	1
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	8
Nonlinear nonzeros:	1

Variable	Value	Reduced Cost
IT	0.000000	0.3610000E-01
RPM	0.3440335	0.000000
CR	0.000000	0.000000

Lampiran 77: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi CO E50

Tabel 77-1: Analisis varian CO E50

Response Surface Regression: CO-E50 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	26,3819	2,9313	32,64	0,001
Linear	3	19,7673	6,5891	73,36	0,000
CR	1	2,5312	2,5312	28,18	0,003
IT	1	0,1540	0,1540	1,71	0,247
RPM	1	17,0820	17,0820	190,19	0,000
Square	3	6,3353	2,1118	23,51	0,002
CR*CR	1	0,0000	0,0000	0,00	0,994
IT*IT	1	0,0275	0,0275	0,31	0,604
RPM*RPM	1	6,1801	6,1801	68,81	0,000
2-Way Interaction	3	0,2793	0,0931	1,04	0,452
CR*IT	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
CR*RPM	1	0,0441	0,0441	0,49	0,515
IT*RPM	1	0,2352	0,2352	2,62	0,167
Error	5	0,4491	0,0898		
Lack-of-Fit	3	0,4041	0,1347	5,99	0,146
Pure Error	2	0,0450	0,0225		
Total	14	26,8310			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,299692	98,33%	95,31%	75,53%

Tabel 77-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk CO E50

Response Surface Regression: CO-E50 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

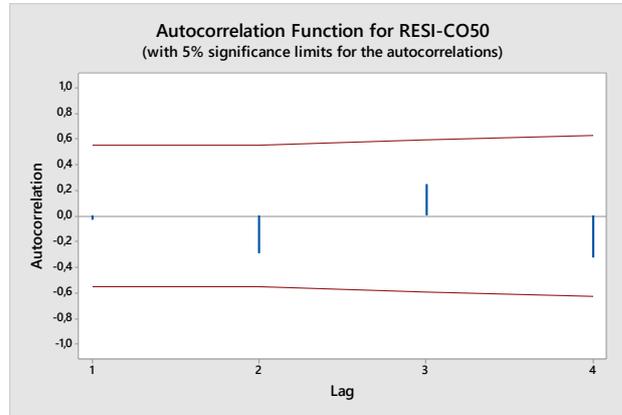
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		1,320	0,173	7,63	0,001	
CR	-1,125	-0,563	0,106	-5,31	0,003	1,00
IT	-0,278	-0,139	0,106	-1,31	0,247	1,00
RPM	2,922	1,461	0,106	13,79	0,000	1,00
CR*CR	0,003	0,001	0,156	0,01	0,994	1,01
IT*IT	-0,172	-0,086	0,156	-0,55	0,604	1,01
RPM*RPM	2,588	1,294	0,156	8,30	0,000	1,01
CR*IT	-0,000	-0,000	0,150	-0,00	1,000	1,00
CR*RPM	-0,210	-0,105	0,150	-0,70	0,515	1,00
IT*RPM	-0,485	-0,242	0,150	-1,62	0,167	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{CO-E50} = & 1,320 - 0,563 \text{ CR} - 0,139 \text{ IT} + 1,461 \text{ RPM} + 0,001 \text{ CR*CR} \\
 & - 0,086 \text{ IT*IT} + 1,294 \text{ RPM*RPM} - 0,000 \text{ CR*IT} - 0,105 \text{ CR*RPM} \\
 & - 0,242 \text{ IT*RPM}
 \end{aligned}$$

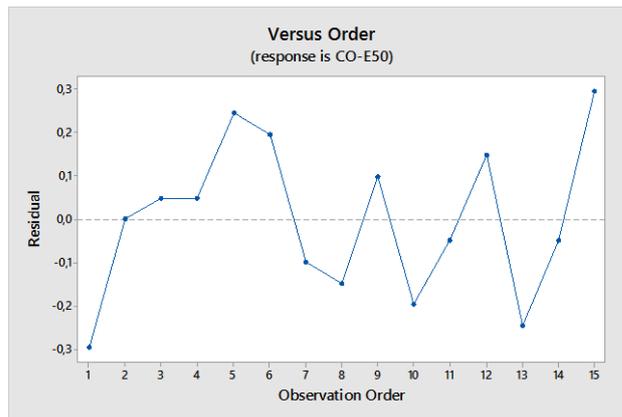
Lampiran 78: Pengujian Asumsi Residual Respon CO E50

a. Uji Independensi



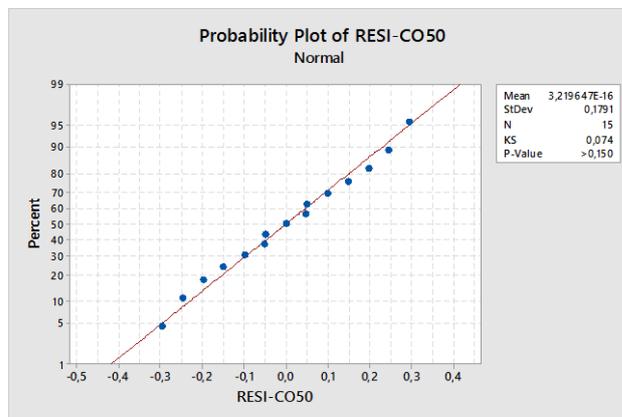
Gambar 78-1: Grafik ACF model pendugaan respon CO E50

b. Uji Independensi



Gambar 78-2: Grafik uji keidentikan residual respon CO E50

c. Uji Normalitas



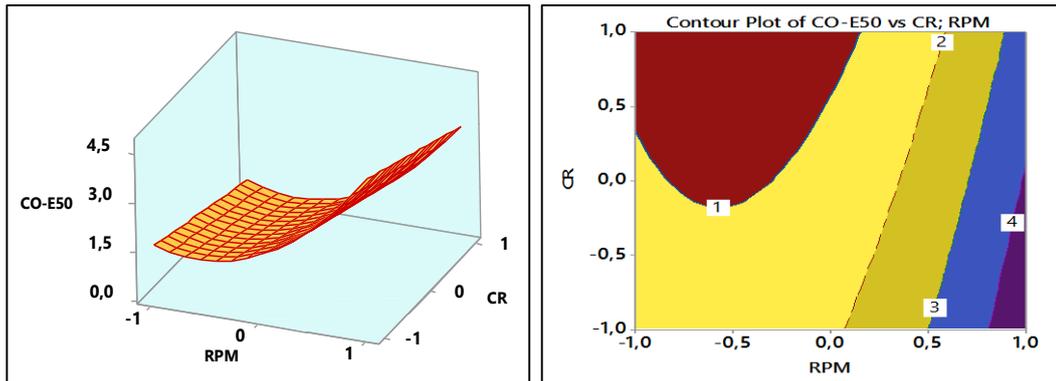
Gambar 78-3: Grafik distribusi normal residual respon CO E50

Lampiran 79: Persamaan Model Repon CO E50

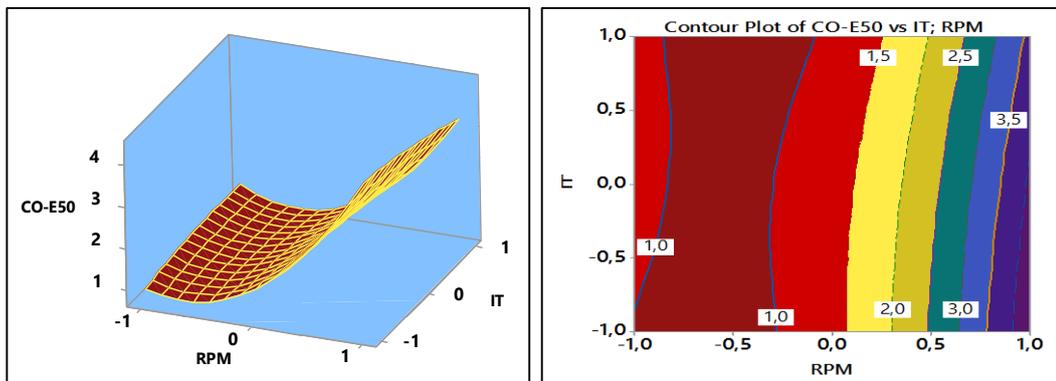
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon CO-E50 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$Respon_CO = (1.320) - (0.563 * CR) + (1.461 * RPM) + (1.294 * (RPM * RPM))$$

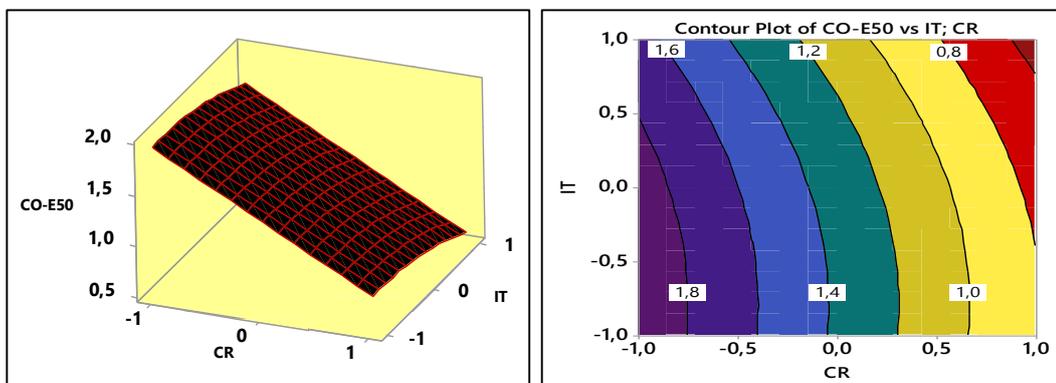
Lampiran 80: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon CO E50



Gambar 80-1: Plot Permukaan dan kontur model repon CO E50 vs CR; RPM



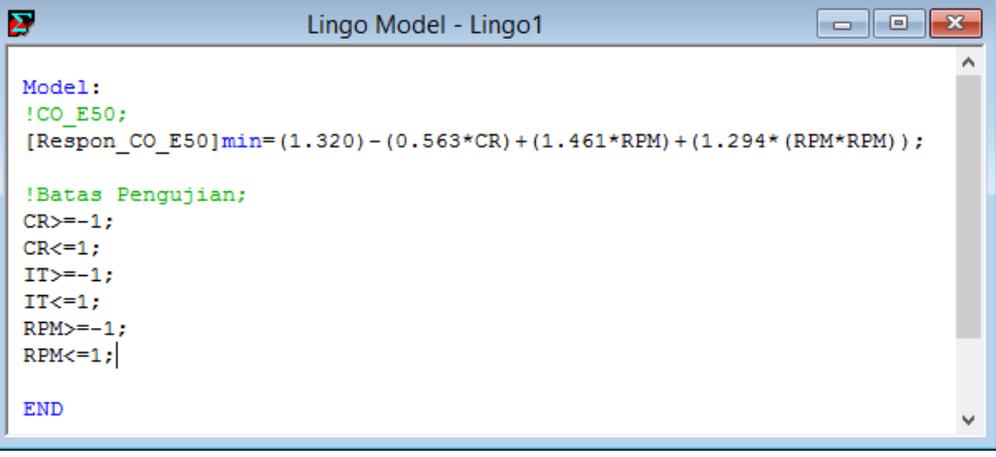
Gambar 80-2: Plot Permukaan dan kontur model repon CO E50 vs IT; RPM



Gambar 80-3: Plot Permukaan dan kontur model repon CO E50 vs CR; IT

Lampiran 81: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon CO E50

Tabel 81-1: Input model persamaan optimasi respon CO E50

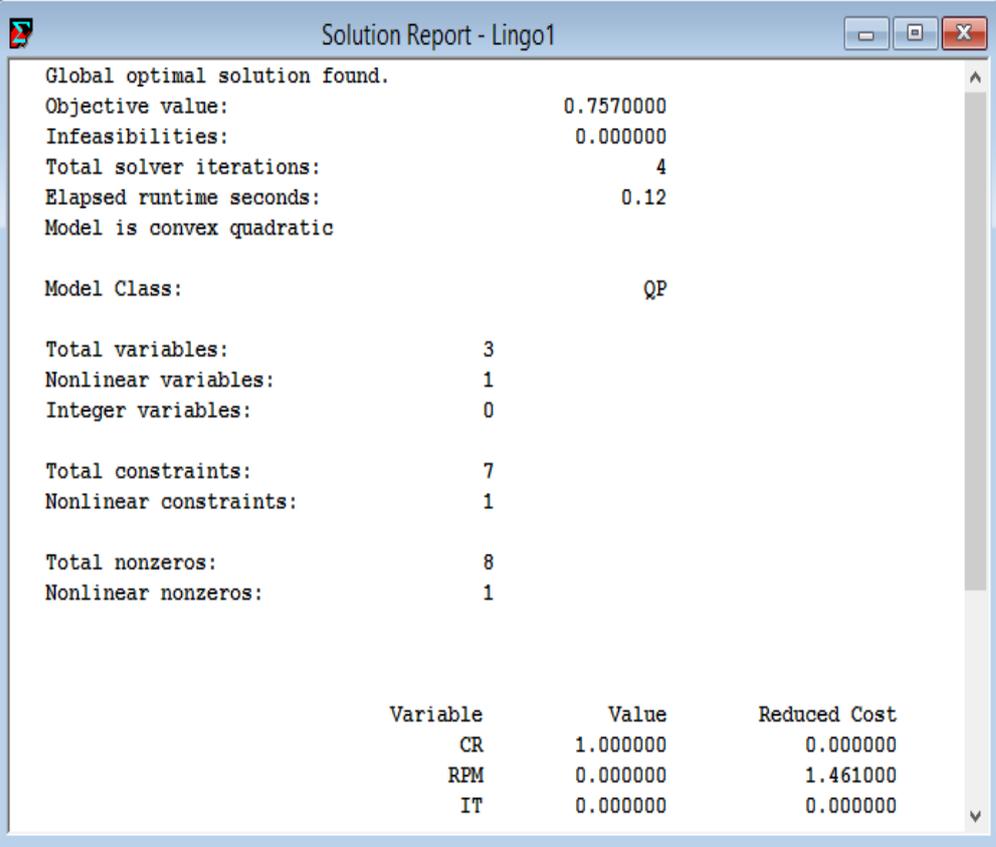


```
Model:
!CO_E50;
[Respon_CO_E50]min=(1.320)-(0.563*CR)+(1.461*RPM)+(1.294*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;

END
```

Tabel 81-2: Solusi optimasi respon CO E50



Global optimal solution found.

Objective value:	0.7570000
Infeasibilities:	0.000000
Total solver iterations:	4
Elapsed runtime seconds:	0.12

Model is convex quadratic

Model Class: QP

Total variables:	3
Nonlinear variables:	1
Integer variables:	0
Total constraints:	7
Nonlinear constraints:	1
Total nonzeros:	8
Nonlinear nonzeros:	1

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.000000	1.461000
IT	0.000000	0.000000

Lampiran 82: Analisis Pendugaan Model Persamaan Regresi HC E50

Tabel 82-1: Analisis varian HC E50

Response Surface Regression: HC-E50 versus CR; IT; RPM

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1719,68	191,076	72,10	0,000
Linear	3	677,25	225,750	85,19	0,000
CR	1	32,00	32,000	12,08	0,018
IT	1	15,12	15,125	5,71	0,062
RPM	1	630,12	630,125	237,78	0,000
Square	3	1039,18	346,394	130,71	0,000
CR*CR	1	20,83	20,827	7,86	0,038
IT*IT	1	2,83	2,827	1,07	0,349
RPM*RPM	1	990,06	990,058	373,61	0,000
2-Way Interaction	3	3,25	1,083	0,41	0,754
CR*IT	1	1,00	1,000	0,38	0,566
CR*RPM	1	0,00	0,000	0,00	1,000
IT*RPM	1	2,25	2,250	0,85	0,399
Error	5	13,25	2,650		
Lack-of-Fit	3	11,25	3,750	3,75	0,218
Pure Error	2	2,00	1,000		
Total	14	1732,93			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,62788	99,24%	97,86%	89,35%

Tabel 82-2: Nilai pendugaan koefisien regresi untuk HC E50

Response Surface Regression: HC-E50 versus CR; IT; RPM

Coded Coefficients

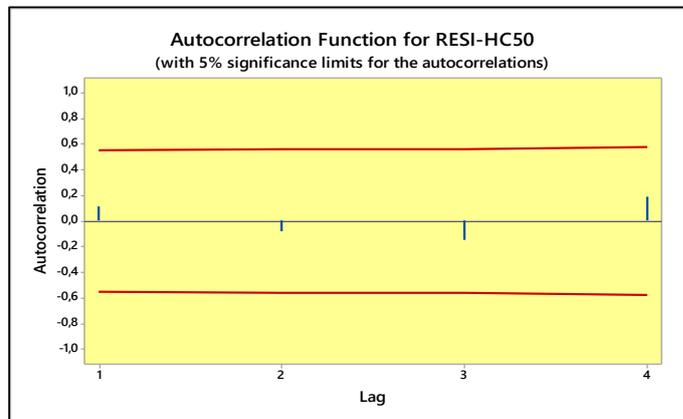
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		69,000	0,940	73,42	0,000	
CR	-4,000	-2,000	0,576	-3,47	0,018	1,00
IT	2,750	1,375	0,576	2,39	0,062	1,00
RPM	17,750	8,875	0,576	15,42	0,000	1,00
CR*CR	-4,750	-2,375	0,847	-2,80	0,038	1,01
IT*IT	1,750	0,875	0,847	1,03	0,349	1,01
RPM*RPM	32,750	16,375	0,847	19,33	0,000	1,01
CR*IT	1,000	0,500	0,814	0,61	0,566	1,00
CR*RPM	-0,000	-0,000	0,814	-0,00	1,000	1,00
IT*RPM	-1,500	-0,750	0,814	-0,92	0,399	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{HC-E50} = 69,000 - 2,000 \text{ CR} + 1,375 \text{ IT} + 8,875 \text{ RPM} - 2,375 \text{ CR*CR} + 0,875 \text{ IT*IT} + 16,375 \text{ RPM*RPM} + 0,500 \text{ CR*IT} - 0,000 \text{ CR*RPM} - 0,750 \text{ IT*RPM}$$

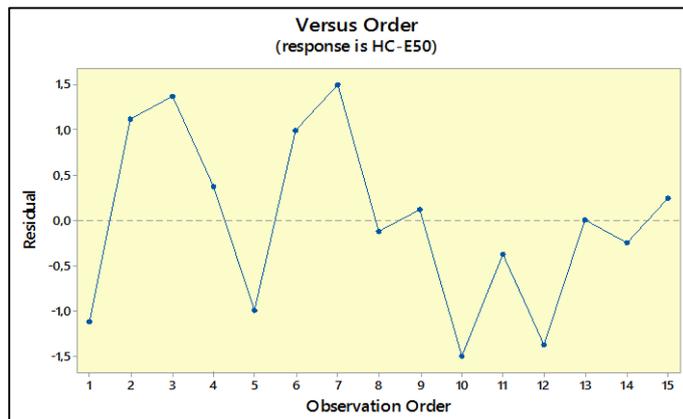
Lampiran 83: Pengujian Asumsi Residual Respon HC E50

a. Uji Independensi



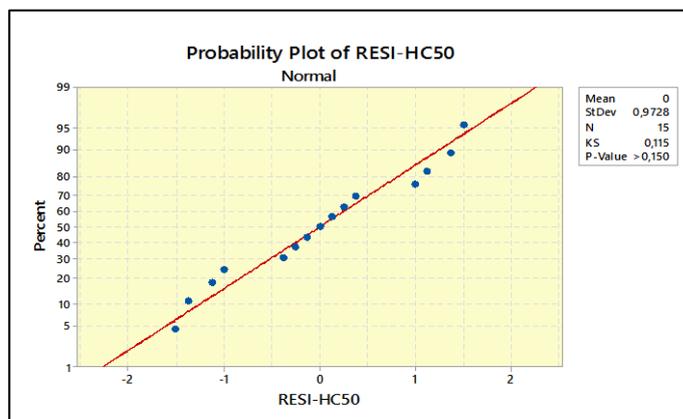
Gambar 83-1: Grafik ACF model pendugaan respon HC E50

b. Uji Independensi



Gambar 83-2: Grafik uji keidentikan residual respon HC E50

c. Uji Normalitas



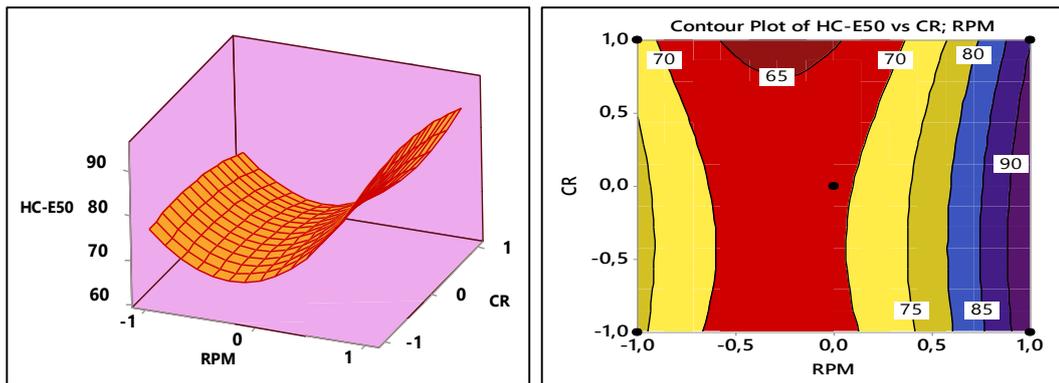
Gambar 83-3: Grafik distribusi normal residual respon HC E50

Lampiran 84: Model Persamaan Repon HC E50

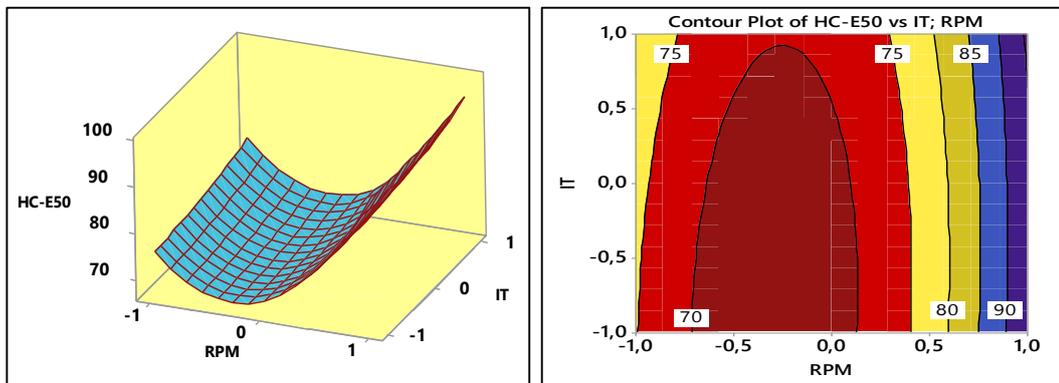
Model persamaan yang signifikan berpengaruh terhadap respon HC-E50 menurut uji statistik adalah sebagai berikut:

$$\text{HC-E50} = (69.000) - (2.000 \cdot \text{CR}) + (8.875 \cdot \text{RPM}) - (2.375 \cdot (\text{CR} \cdot \text{CR})) + (16.375 \cdot (\text{RPM} \cdot \text{RPM})) ;$$

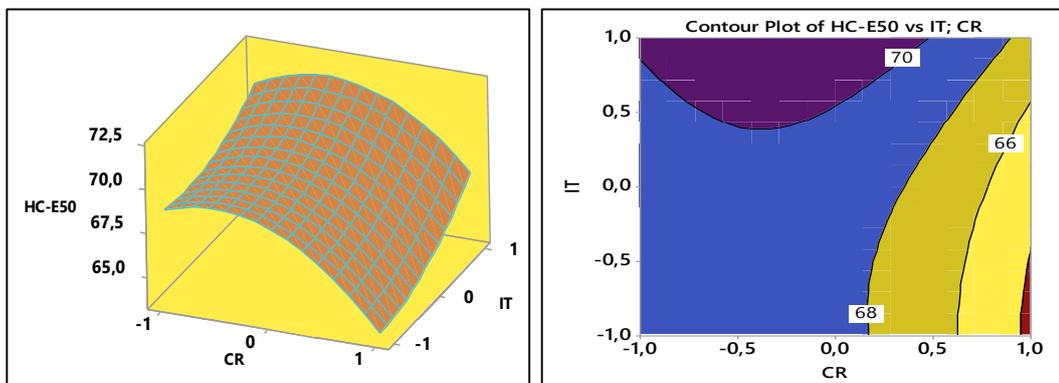
Lampiran 85: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon HC E50



Gambar 85-1: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon HC E50 vs CR; RPM



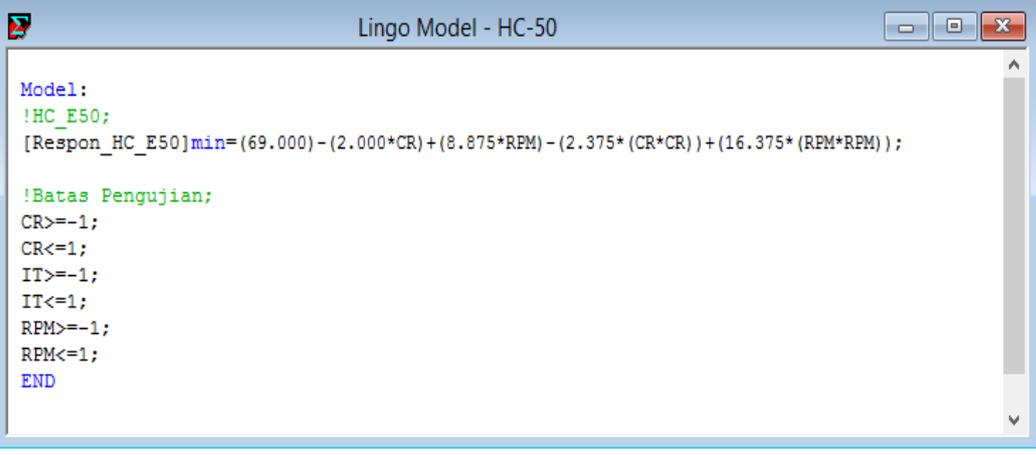
Gambar 85-2: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon HC E50 vs IT; RPM



Gambar 85-3: Plot Permukaan dan Kontur Model Repon HC E50 vs CR; IT

Lampiran 86: Input Sintak Persamaan dan Optimasi Lokal Repon HC E50

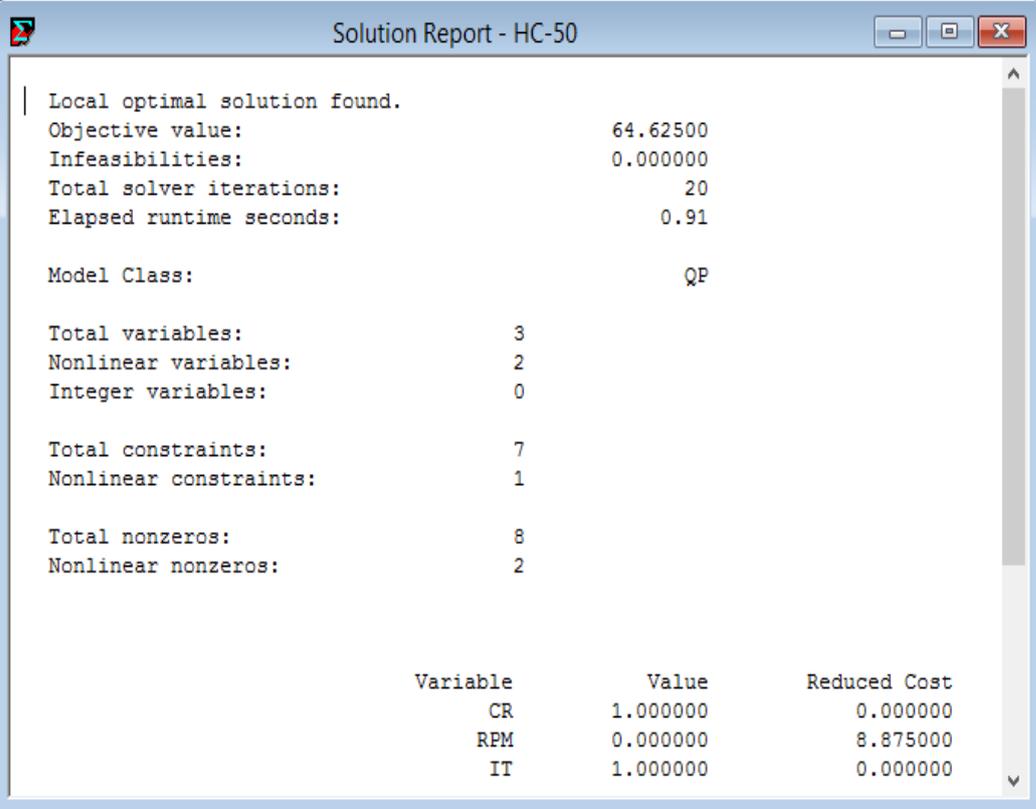
Tabel 86-1: Input model persamaan optimasi respon HC E50



```
Model:
!HC_E50;
[Respon_HC_E50]min=(69.000)-(2.000*CR)+(8.875*RPM)-(2.375*(CR*CR))+(16.375*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
```

Tabel 86-2: Solusi optimasi respon HC E50



```
Local optimal solution found.
Objective value:                64.62500
Infeasibilities:                 0.000000
Total solver iterations:         20
Elapsed runtime seconds:         0.91

Model Class:                     QP

Total variables:                 3
Nonlinear variables:             2
Integer variables:               0

Total constraints:               7
Nonlinear constraints:           1

Total nonzeros:                 8
Nonlinear nonzeros:             2
```

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	0.000000	8.875000
IT	1.000000	0.000000

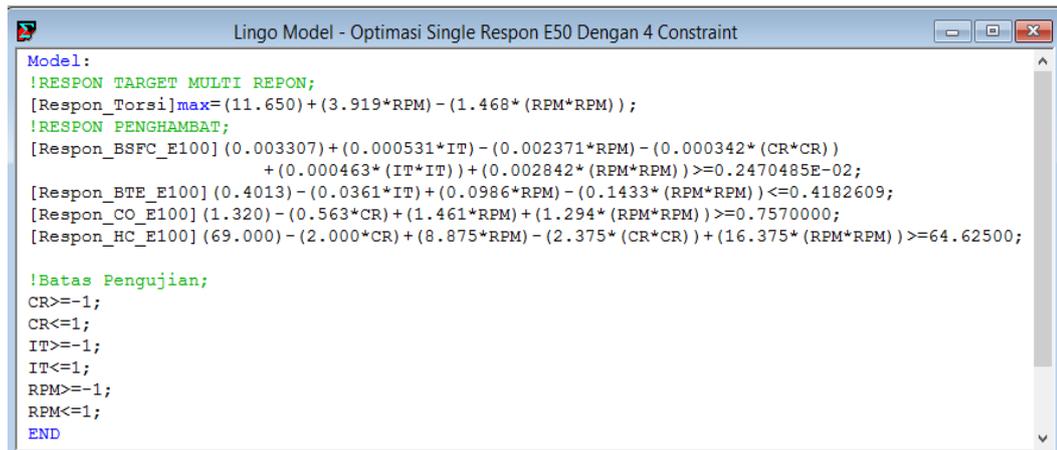
Lampiran 87: Optimasi Single Respon E50 dan Uji Konfirmasi Box Plot E50

1. Nilai Optimasi Lokal Respon E50

Respon	Variabel faktor (kode-sebenarnya)						Nilai Optimasi Lokal
	CR		IT		RPM		
Torsi (Nm)	0	12.5	0	20	1	8000	14,101
BSFC (kg/HP.min)	1	13	0	20	0,4171	6251	0,002470
BTE (%)	0	12.5	0	20	0,3440	6032	41,83
CO (%)	1	13	0	20	0	5000	0,7570
HC (ppm)	1	13	1	24	0	5000	64,63

2. Input Sintak Persamaan Model Respon dan Optimasi Respon-E50 Serentak

Tabel 87.1: Sintak Persamaan Model Respon-E50

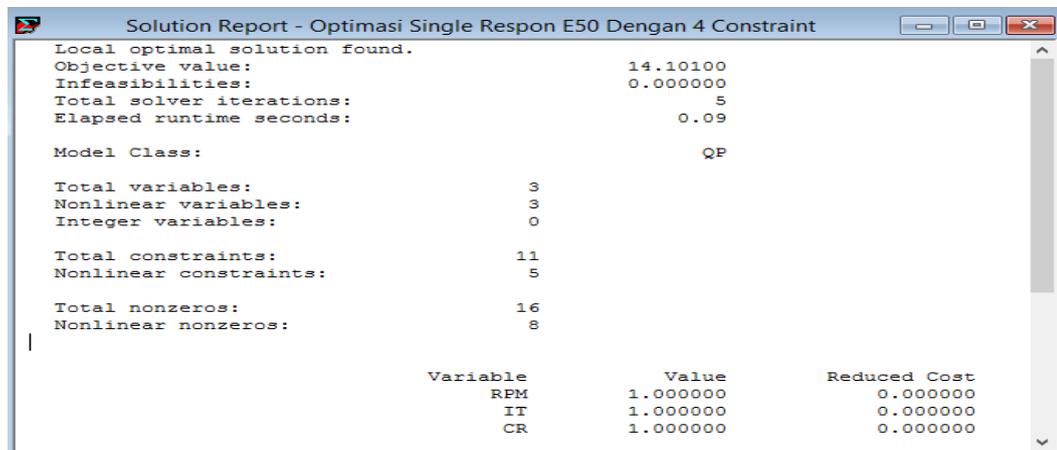


```

Model:
!RESPON TARGET MULTI REPON;
[Respon_Torsi]max=(11.650)+(3.919*RPM)-(1.468*(RPM*RPM));
!RESPON PENGHAMBAT;
[Respon_BSFC_E100](0.003307)+(0.000531*IT)-(0.002371*RPM)-(0.000342*(CR*CR))
+(0.000463*(IT*IT))+(0.002842*(RPM*RPM))>=0.2470485E-02;
[Respon_BTE_E100](0.4013)-(0.0361*IT)+(0.0986*RPM)-(0.1433*(RPM*RPM))<=0.4182609;
[Respon_CO_E100](1.320)-(0.563*CR)+(1.461*RPM)+(1.294*(RPM*RPM))>=0.7570000;
[Respon_HC_E100](69.000)-(2.000*CR)+(8.875*RPM)-(2.375*(CR*CR))+(16.375*(RPM*RPM))>=64.62500;

!Batas Pengujian;
CR>=-1;
CR<=1;
IT>=-1;
IT<=1;
RPM>=-1;
RPM<=1;
END
    
```

Tabel 87.2: Optimasi Respon Torsi dengan Respon Penghambat



```

Solution Report - Optimasi Single Respon E50 Dengan 4 Constraint

Local optimal solution found.
Objective value:                14.10100
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:        5
Elapsed runtime seconds:        0.09

Model Class:                    QP

Total variables:                3
Nonlinear variables:            3
Integer variables:              0

Total constraints:              11
Nonlinear constraints:          5

Total nonzeros:                16
Nonlinear nonzeros:            8

Variable      Value      Reduced Cost
RPM           1.000000   0.000000
IT            1.000000   0.000000
CR            1.000000   0.000000
    
```

3. Sintak Persamaan Respon-E50 dan Solusinya Pada Kondisi Optimasi Torsi

Tabel 87.3: Sintak Persamaan Respon BSFC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Optim-SFC50
Model:
!BSFC_E50;
[Respon_BSFC_E50]min=(0.003307)+(0.000531*IT)-(0.002371*RPM)-(0.000342*(CR*CR))
                +(0.000463*(IT*IT))+(0.002842*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR=1;
IT=1;
RPM=1;
END
    
```

Tabel 87.4: Solusi Persamaan Respon BSFC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Solution Report - Optim-SFC50
Global optimal solution found.
Objective value:                0.4430000E-02
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:        0
Elapsed runtime seconds:        0.08

Model Class:                    LP

Total variables:                0
Nonlinear variables:            0
Integer variables:              0

Total constraints:              1
Nonlinear constraints:          0

Total nonzeros:                0
Nonlinear nonzeros:            0

Variable      Value      Reduced Cost
IT            1.000000    0.000000
RPM           1.000000    0.000000
CR            1.000000    0.000000
    
```

Tabel 87.5: Sintak Persamaan Respon BTE Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - Optim-BTE50
Model:
!BTE;
[Respon_BTE_E50]max=(0.4013)-(0.0361*IT)+(0.0986*RPM)-(0.1433*(RPM*RPM));

!Batas Pengujian;
CR=1;
IT=1;
RPM=1;
END
    
```

Tabel 87.6: Solusi Persamaan Respon BTE Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Solution Report - Optim-BTE50
Global optimal solution found.
Objective value:                0.3205000
Infeasibilities:                0.000000
Total solver iterations:        0
Elapsed runtime seconds:        0.08

Model Class:                    LP

Total variables:                0
Nonlinear variables:            0
Integer variables:              0

Total constraints:              1
Nonlinear constraints:          0

Total nonzeros:                0
Nonlinear nonzeros:            0

Variable      Value      Reduced Cost
IT            1.000000    0.000000
RPM           1.000000    0.000000
CR            1.000000    0.000000
    
```

Tabel 87.7: Sintak Persamaan Respon CO Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - CO-opt-E50
Model:
!CO_E50;
[Respon_CO_E50]min=(1.320) - (0.563*CR) + (1.461*RPM) + (1.294*(RPM*RPM)) ;

!Batas Pengujian;
CR=1;
IT=1;
RPM=1;
END
    
```

Tabel 87.8 Solusi Persamaan Respon CO Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - CO-opt-E50

Global optimal solution found.
 Objective value: 3.512000
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 0
 Elapsed runtime seconds: 0.09

Model Class: LP

Total variables: 0
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 1
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 0
 Nonlinear nonzeros: 0

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	1.000000	0.000000
IT	1.000000	0.000000

Tabel 87.9: Sintak Persamaan Respon HC Pada Kondisi Optimasi Torsi

```

Lingo Model - HC-E50-opt
Model:
!HC_E50;
[Respon_HC_E50]min=(69.000) - (2.000*CR) + (8.875*RPM) - (2.375*(CR*CR)) + (16.375*(RPM*RPM)) ;

!Batas Pengujian;
CR=1;
IT=1;
RPM=1;
END
    
```

Tabel 87.10: Solusi Persamaan Respon HC Pada Kondisi Optimasi Torsi

Solution Report - HC-E50-opt

Global optimal solution found.
 Objective value: 89.87500
 Infeasibilities: 0.000000
 Total solver iterations: 0
 Elapsed runtime seconds: 0.07

Model Class: LP

Total variables: 0
 Nonlinear variables: 0
 Integer variables: 0

Total constraints: 1
 Nonlinear constraints: 0

Total nonzeros: 0
 Nonlinear nonzeros: 0

Variable	Value	Reduced Cost
CR	1.000000	0.000000
RPM	1.000000	0.000000
IT	1.000000	0.000000

4. Nilai Repon Penghambat Pada Kondisi Optimasi Torsi

Tabel 87.11: Nilai Respon E50 Pada Kondisi Optimasi Torsi

Variabel Faktor			Variable Respon				
Nama	Koding	Real	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP-min)	BTE (%)	CO (%)	HC (PPM)
CR	1	13	14,10	0,004430	32,05	3,51	89,88
IT	1	24					
RPM	1	8000					

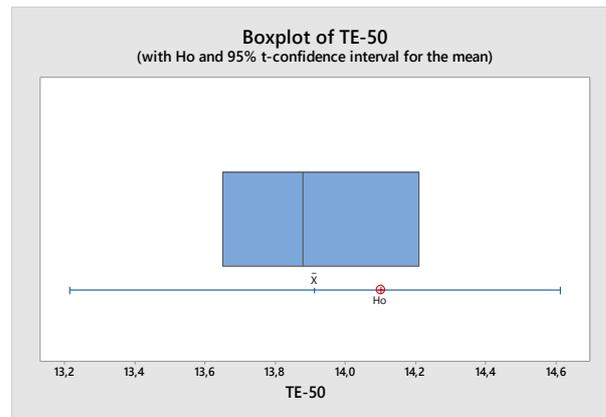
5. Data Pengamatan/Perhitungan Pada Kondisi Optimasi Respon Torsi

Tabel 87.12: Data Pengamatan Uji Konfirmasi

Variabel Faktor			Variable Respon				
CR	IT	RPM	Torsi (Nm)	BSFC (kg/HP-min)	BTE (%)	CO (%)	HC (PPM)
13	24	8000	13,88	0,004443	30,73	3,47	89
			13,65	0,004215	32,40	3,27	92
			14,21	0,004122	30,38	3,50	91

6. Uji Konfirmasi Nilai Optimasi Dengan Uji One Sample-t

a) Pengujian *One Sample-T* Respon Torsi-E50



Gambar 87-1: Diagram boxplot respon Torsi-E50

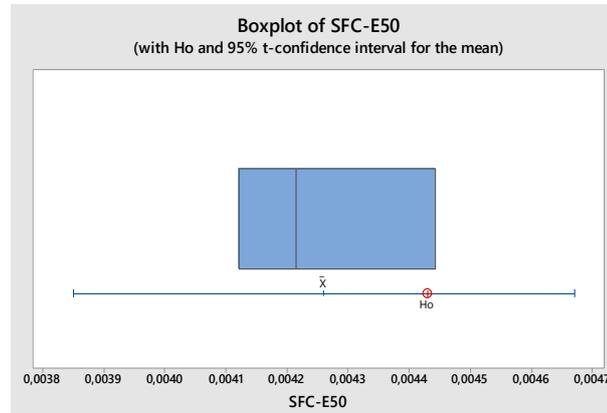
Tabel 87.13: Analisa hipotesa *one sample-t* respon Torsi-E50

One-Sample T: TE-50

Test of $\mu = 14,1$ vs $\neq 14,1$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
TE-50	3	13,913	0,281	0,163	(13,214; 14,613)	-1,15	0,370

b) Pengujian *One Sample-T* Respon BSFC-E50



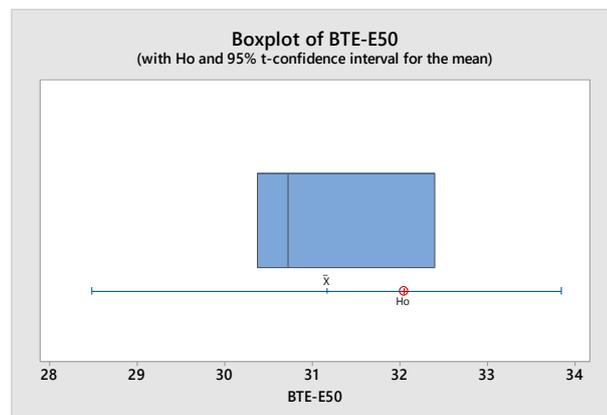
Gambar 87-2: Diagram boxplot respon BSFC-E50

Tabel 87.14: Analisa hipotesa *one sample-t* respon BSFC-E50

One-Sample T: SFC-E50
 Test of $\mu = 0,00443$ vs $\neq 0,00443$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
SFC-E50	3	0,004260	0,000165	0,000095	(0,003850; 0,004670)	-1,78	0,217

c) Pengujian *One Sample-T* Respon BTE-E50



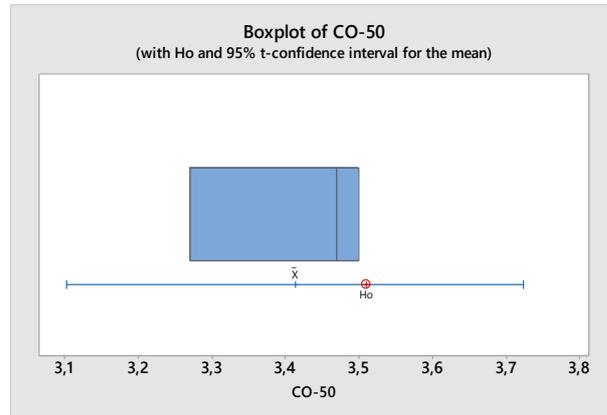
Gambar 87-3: Diagram boxplot respon BTE-E50

Tabel 87.15: Analisa hipotesa *one sample-t* respon BTE-E50

One-Sample T: BTE-E50
 Test of $\mu = 32,05$ vs $\neq 32,05$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BTE-E50	3	31,170	1,079	0,623	(28,488; 33,852)	-1,41	0,293

d) Pengujian *One Sample-T* Respon CO-E50



Gambar 87-4: Diagram boxplot respon CO-E50

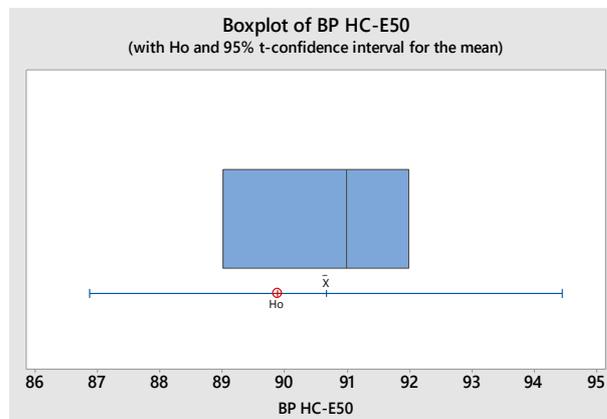
Tabel 87.16: Analisa hipotesa *one sample-t* respon CO-E50

One-Sample T: CO-50

Test of $\mu = 3,51$ vs $\neq 3,51$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
CO-50	3	3,4133	0,1250	0,0722	(3,1027; 3,7239)	-1,34	0,312

e) Pengujian *One Sample-T* Respon HC-E50



Gambar 87-5: Diagram boxplot respon HC-E50

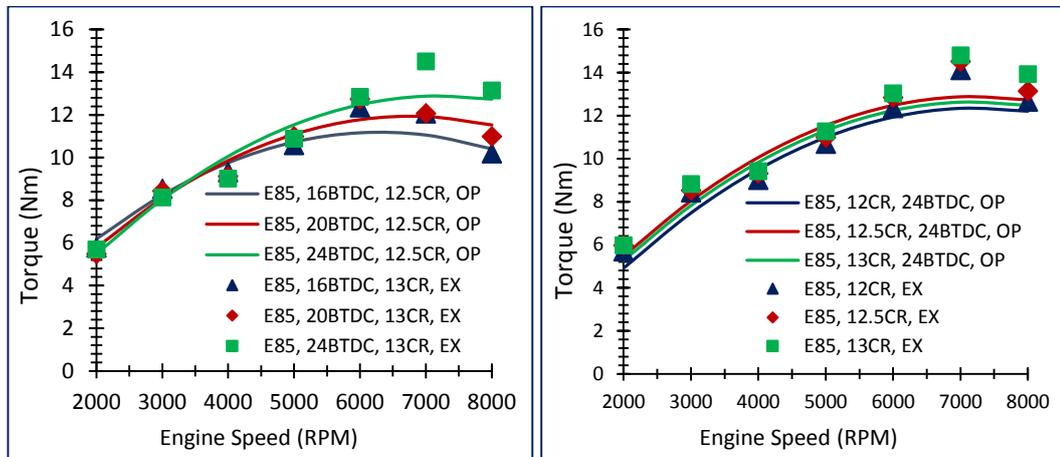
Tabel 87.17: Analisa hipotesa *one sample-t* respon HC-E50

One-Sample T: BP HC-E50

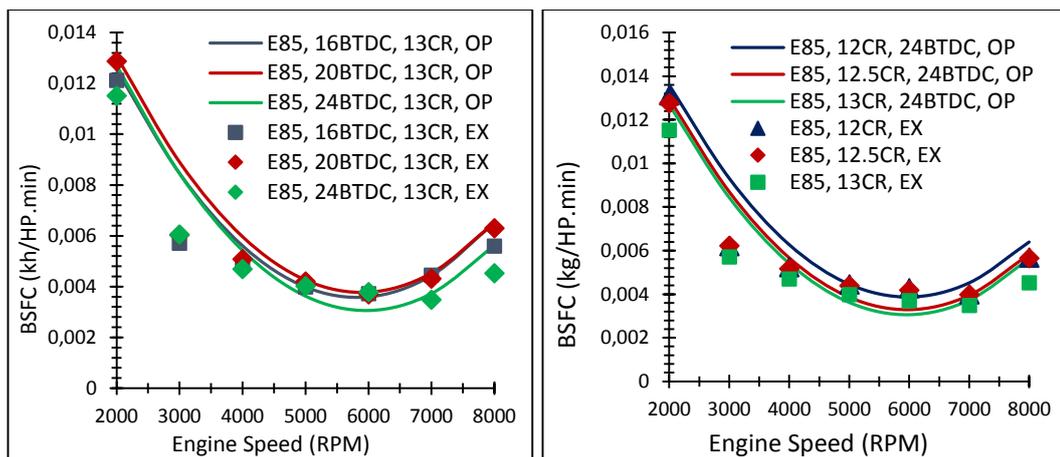
Test of $\mu = 89,88$ vs $\neq 89,88$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
BP HC-E50	3	90,667	1,528	0,882	(86,872; 94,461)	0,89	0,467

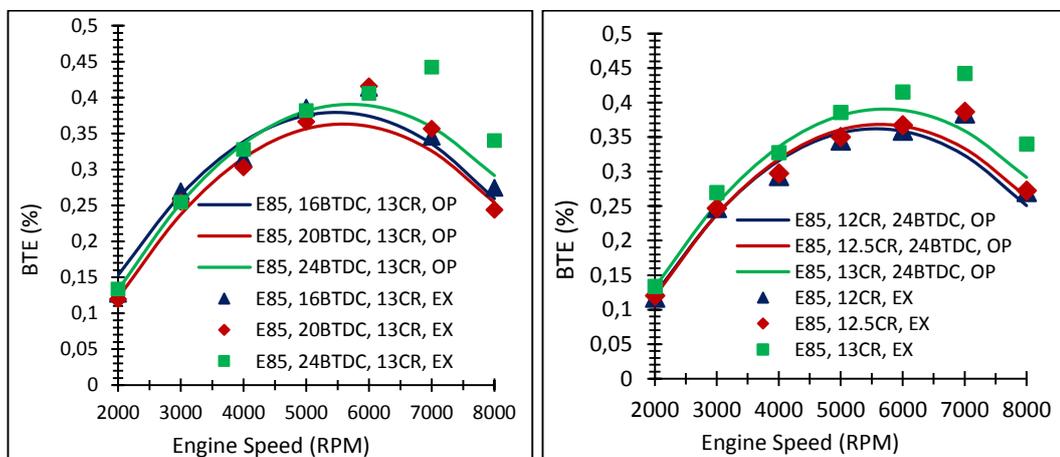
Lampiran 88: Grafik Performansi Mesin SI-PFI dengan Bahan Bakar E85



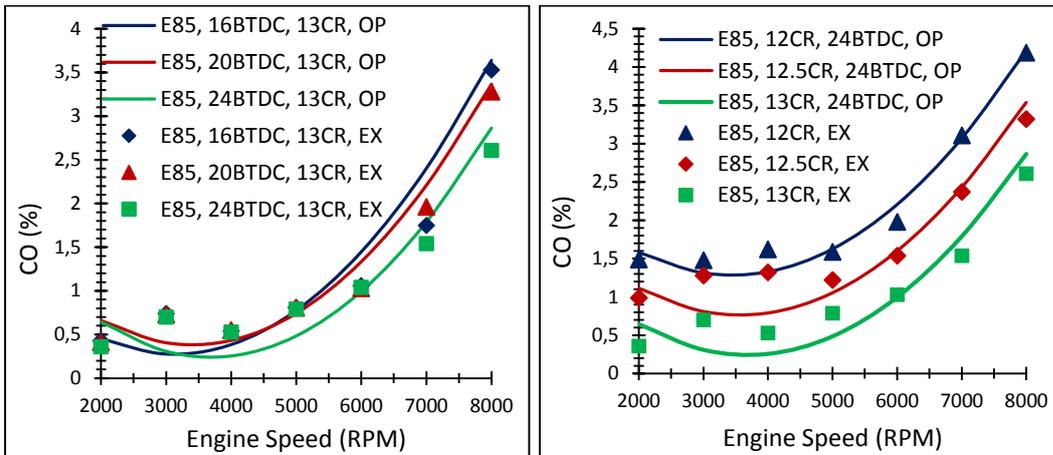
Gambar 88-1: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap Torsi-E85



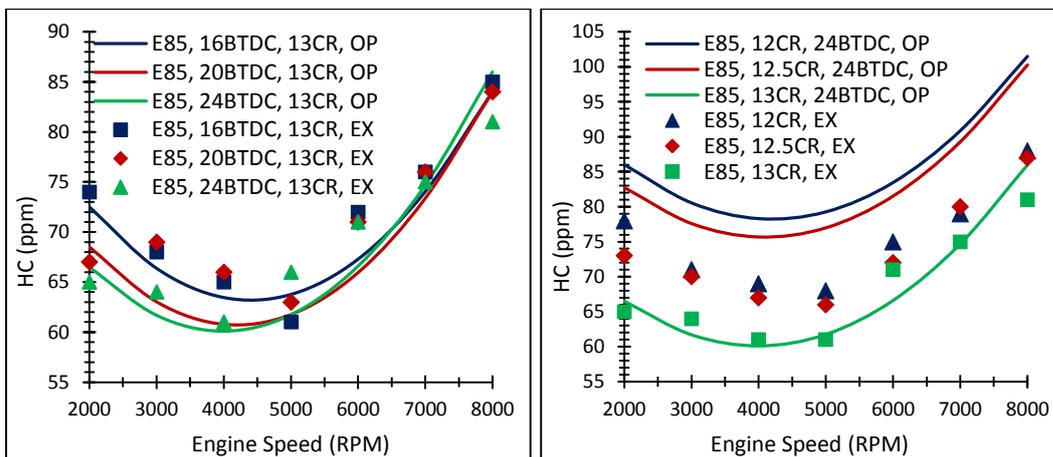
Gambar 88-2: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap BSFC-E85



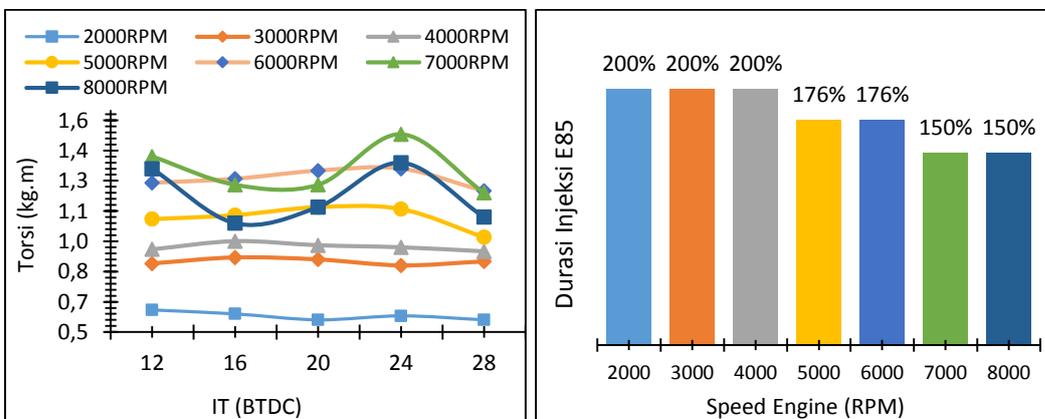
Gambar 88-3: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap BTE-E85



Gambar 88-4: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap emisi CO-E85

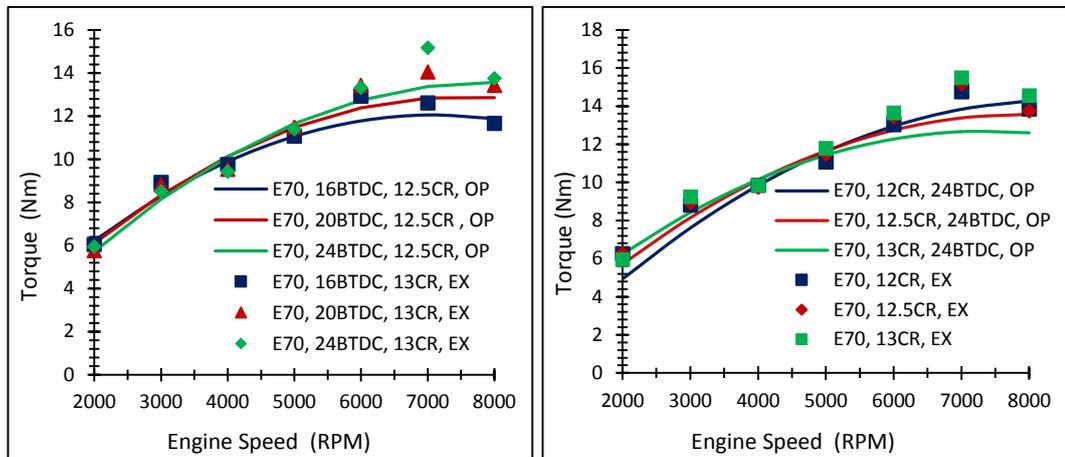


Gambar 88-5: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap emisi HC-E85

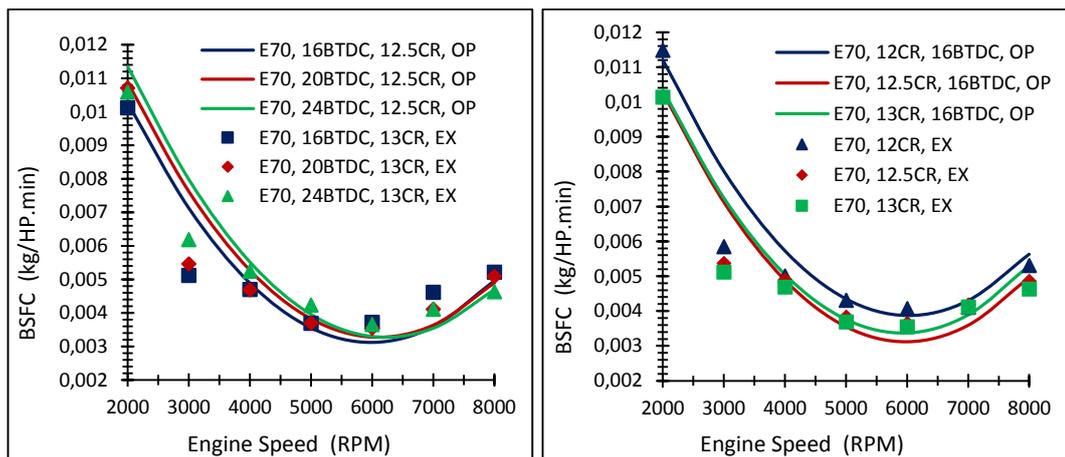


Gambar 88-6: Grafik hubungan Torsi vs IT dan ID vs RPM pada MBT E85

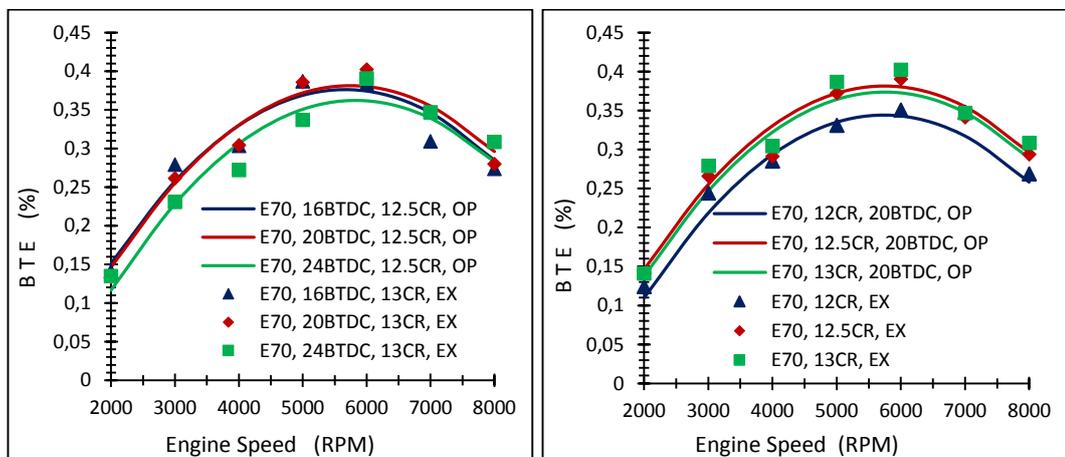
Lampiran 89: Grafik Performansi Mesin SI-PFI dengan Bahan Bakar E70



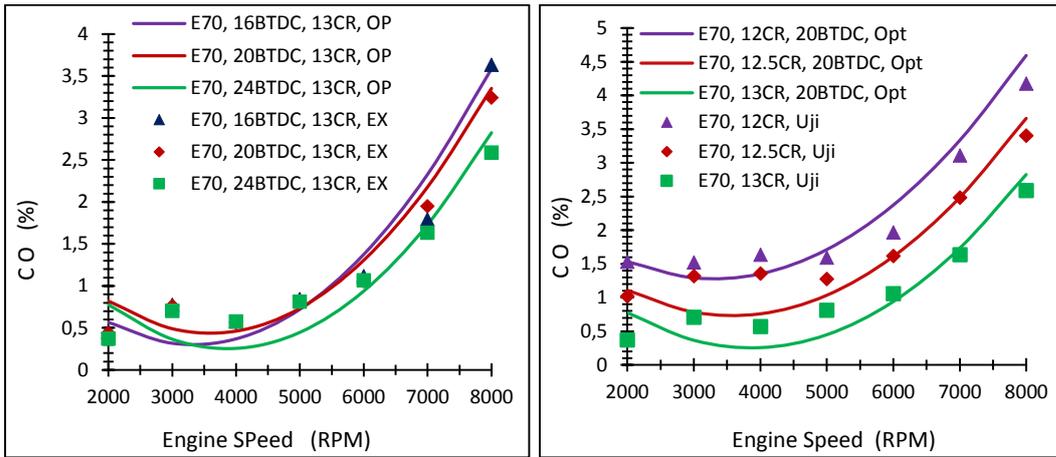
Gambar 89-1: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap Torsi-E70



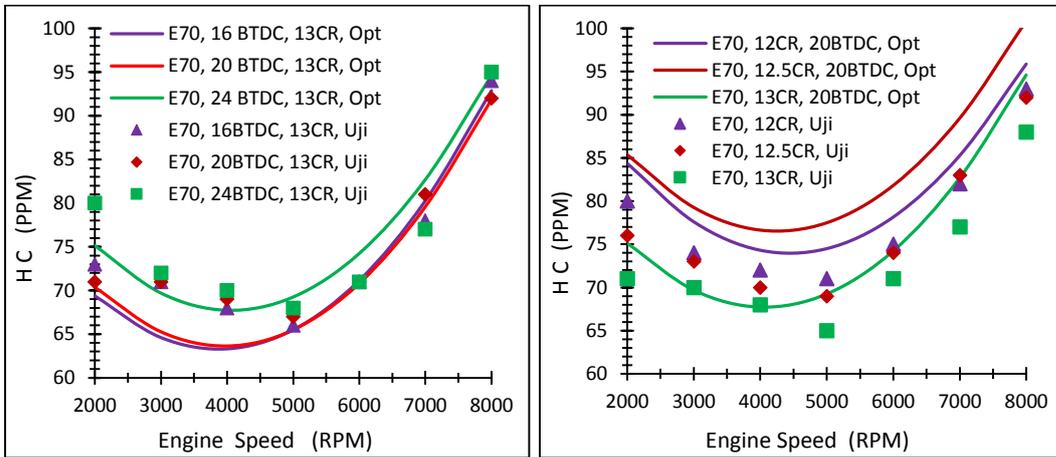
Gambar 89-2: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap BSFC-E70



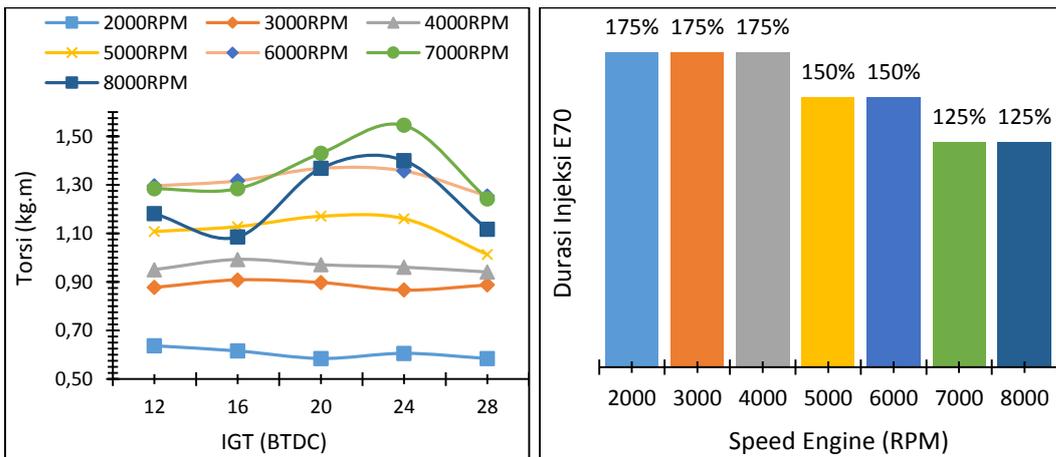
Gambar 89-3: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap BTE-E70



Gambar 89-4: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap Emisi CO-E70

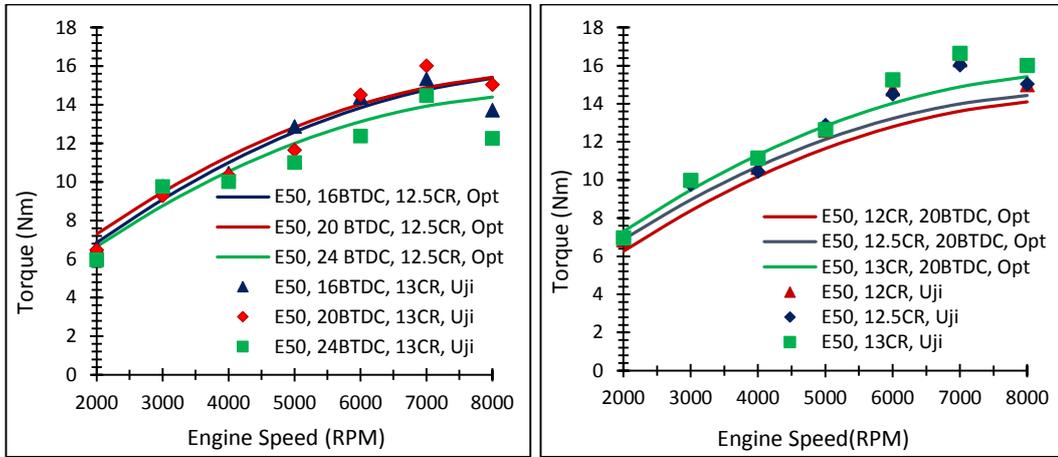


Gambar 89-5: Grafik Performansi Mesin SI-PFI terhadap Emisi HC-E70

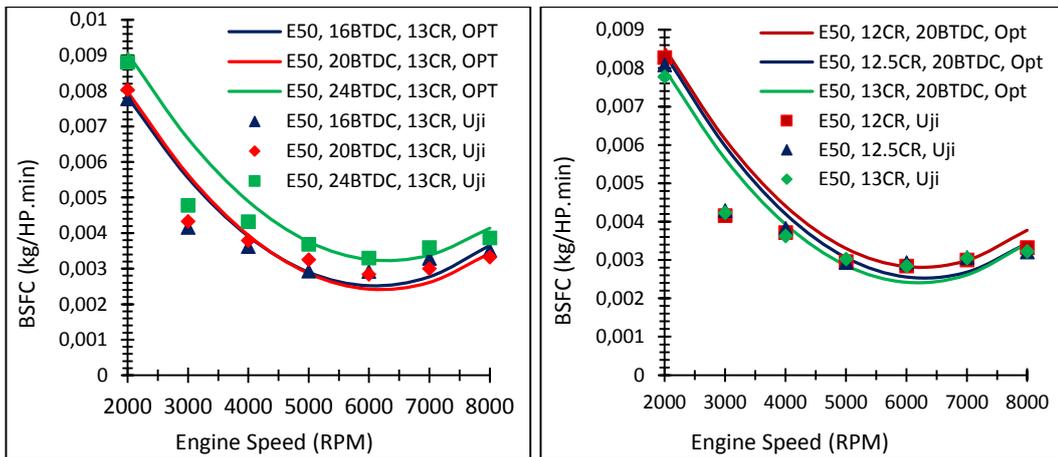


Gambar 89-6: Grafik hubungan Torsi vs IT dan ID vs RPM pada MBT E70

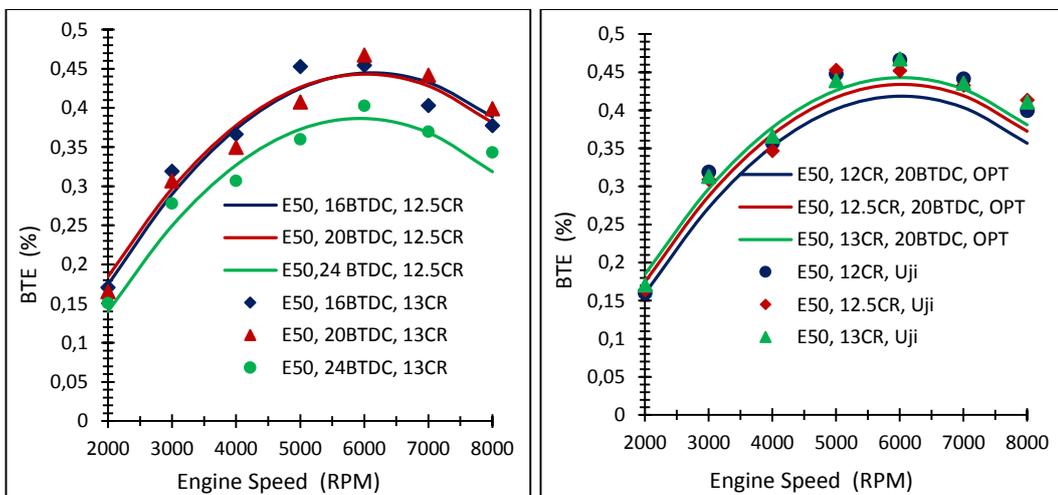
Lampiran 90: Grafik Performansi Mesin SI-PFI dengan Bahan Bakar E50



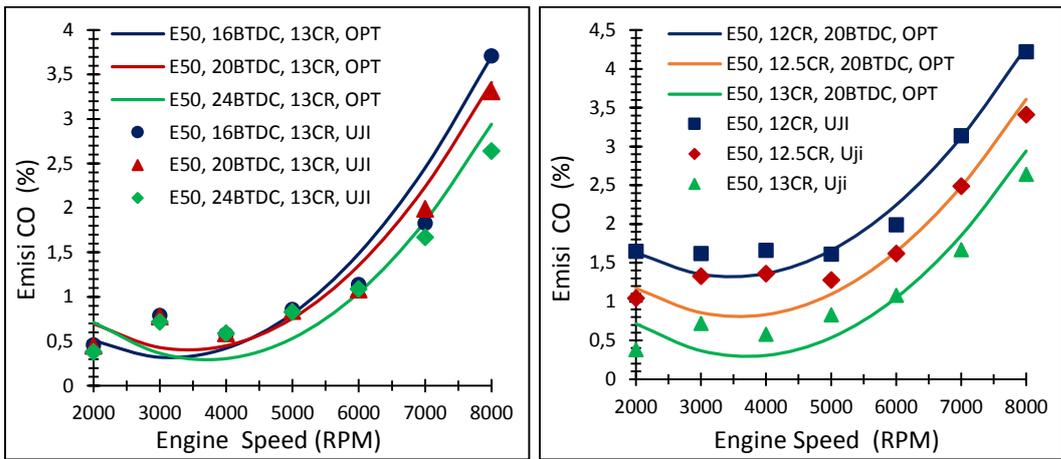
Gambar 90-1: Grafik performansi Mesin terhadap Torsi



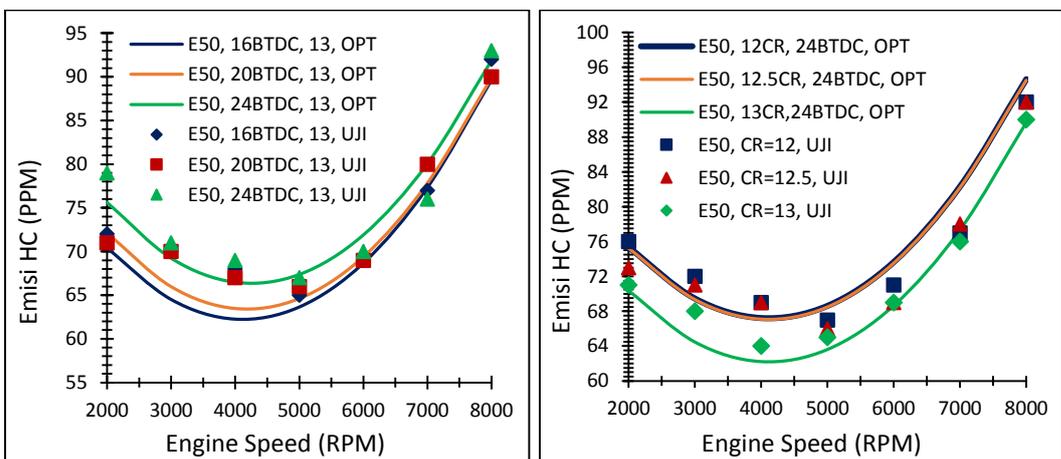
Gambar 90-2: Grafik performansi Mesin terhadap BSFC



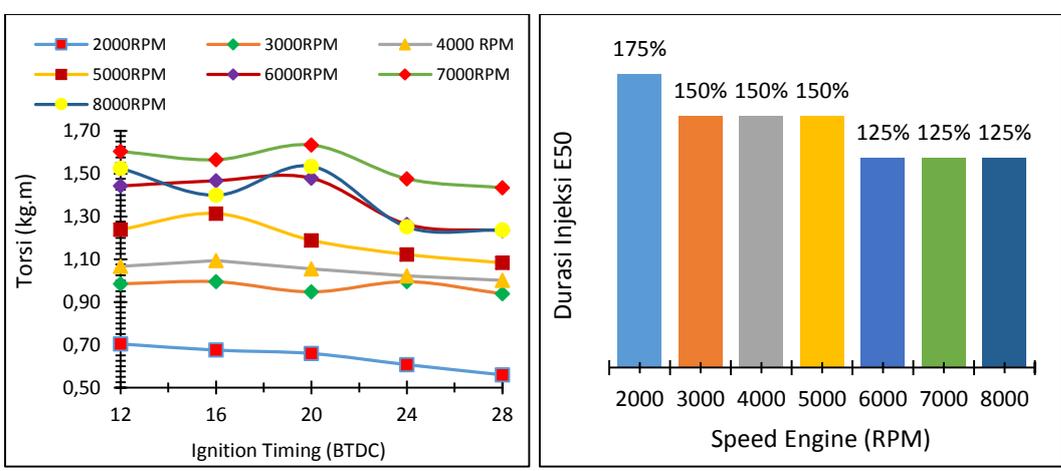
Gambar 90-3: Grafik performansi Mesin terhadap BTE



Gambar 90-4: Grafik performansi Mesin terhadap Emisi CO



Gambar 90-5: Grafik performansi Mesin terhadap emisi HC



Gambar 90-6: Grafik hubungan Torsi vs IT dan ID vs RPM pada MBT E50

PETROLAB SERVICES, PT

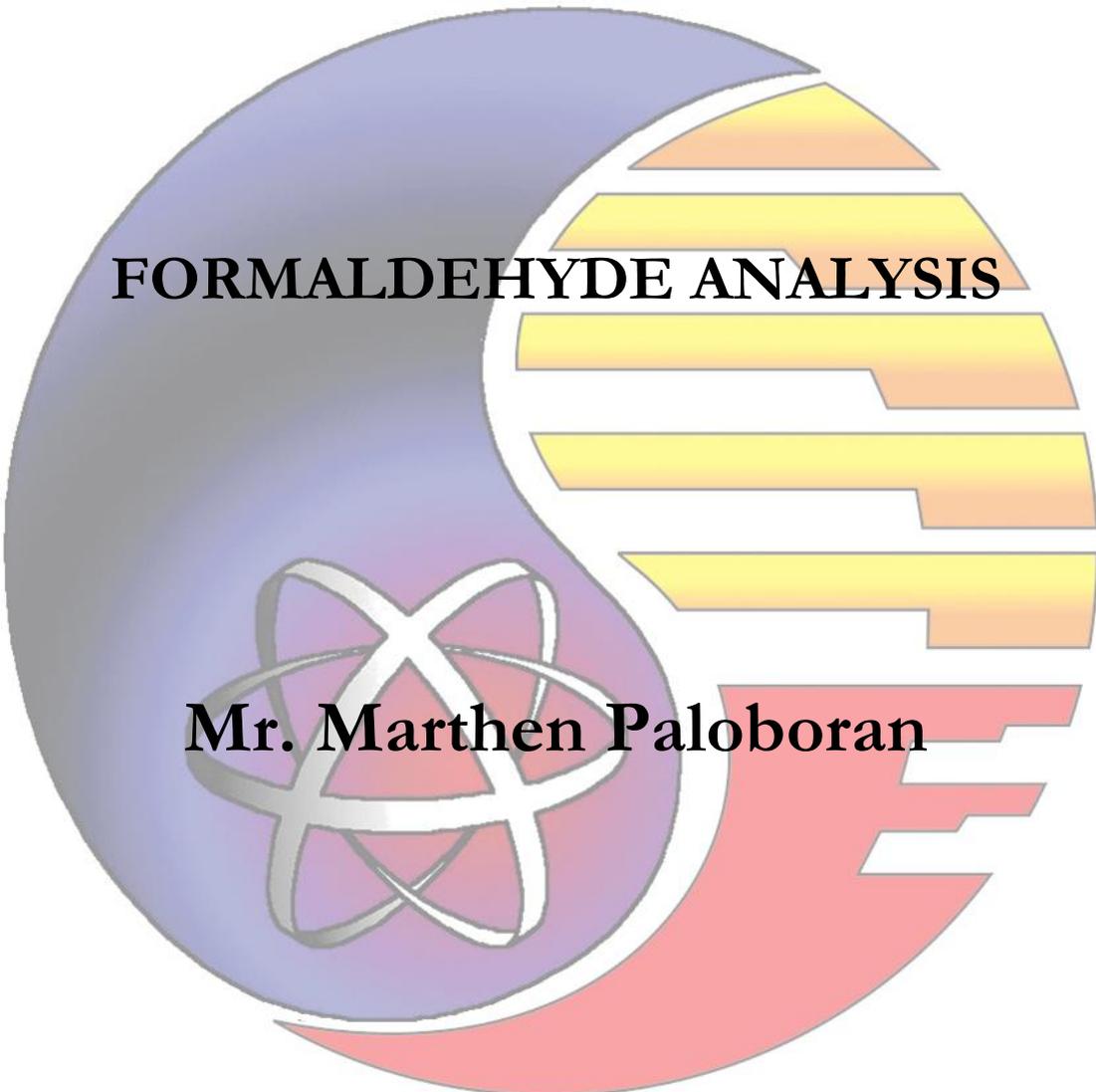
Environmental – Industrial Hygiene – Biomonitoring – Lubricant – Fuel –
Transformer & Powergen – Calibration – Laboratory Service & Consultant

Jalan Pisangan Lama III No. 28 Jakarta Timur 13230
Phone. (021) – 2968 8694 (Hunting) & 471 7001, Fax. (021) – 2968 8693
Email : petrolab@cbn.net.id

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Job Number : ENV – 003/PS–VIII/2017

Lab Number : 00097-00100/ENV/17



FORMALDEHYDE ANALYSIS

Mr. Marthen Paloboran



PT. PETROLAB Services

Jalan Pisangan Lama III No. 28 Jakarta Timur 13230

Phone. (021) – 2968 8694 (Hunting) & 471 7001; Fax. (021) 2968 8693

E-mail : petrolab@cbn.net.id

Service : Regular

REPORT OF ANALYSIS

Nama Pelanggan : **Mr. Marthen Paloboran**

(Customer Name)

Alamat : -

(Address)

Ditujukan Kepada : **Mr. Marthen Paloboran (085343630563)**

(Attention)

Telepon/Faks : -

(Phone/Fax) (email: marthen.paloboran@unm.ac.id)

Untuk Pelanggan : -

(Attention)

Parameter Analisa : **Formaldehyde Analysis**

(Parameter)

Matrik Sampel : *Gases*

(Sample Matrix)

No. Pekerjaan : ENV-003/PS-VIII/2017

(Serial Number)

Tgl. Sampling : 02 Agustus 2017

(Sampling Date)

Tgl. Penerimaan : 07 Agustus 2017

(Received Date)

Tgl. Analisis : 07 - 16 Agustus 2017

(Analysis Date)

Tgl. Laporan : 16 Agustus 2017

(Report Date)

No. Lab : 00097-00100/ENV/17

(Lab. No.)

Kode Sampel : -

(Sample Code)

No.	Kode Sampel	No. Lab	Hasil	Satuan	Metode
1	Motor 150 cc - 7000 RPM (Ethanol 85%)	00097	1.346	mg/m ³	<i>Spectrophotometry UV-VIS</i>
2	Motor 150 cc - 7000 RPM (Ethanol 70%)	00098	1.027		
3	Motor 150 cc - 7000 RPM (Ethanol 50%)	00099	2.070		
4	Motor 150 cc - 7000 RPM (Ethanol 100%)	00100	2.305		

Keterangan :

< = lebih kecil

Manager Teknis,

Anna, S.Si., M.Si.

RK/5.10/01/01/07

Catatan : Pengaduan tidak dilayani setelah 30 hari dari tanggal Report diterbitkan.

Note Complaint not served after 30 days from date of Report published

" Let's Make Your Work Environment Healthy "

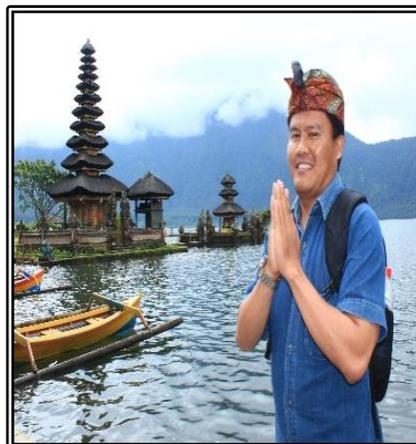
BIOGRAFI PENULIS

I. BIODATA

Nama : Marthen Paloboran
TTL : Pare-Pare, 29 Nopember 1971
Jenis Kelamin : Laki-laki
Alamat Rumah: Perumahan Taman Panciro Indah
Blok V/3 Sungguminasa - Gowa
Instansi Asal : Fakultas Teknik UNM Makassar
Telepom/HP : +6285343630563
e-mail : marthen.paloboran@unm.ac.id
marth.me.unm@gmail.com

Keluarga

- Isteri : Selviany Toyang Pangruruk
- Anak : 1. Thesya Atarezcha Pangruruk (Mhs)
2. Mark Andrew Paloboran (SMA)
3. Justeen Jeane Pangruruk (SMP)



II. RIWAYAT PENDIDIKAN

No	Nama	Jurusan/Prodi/Kekhususan	Lulus
1.	SD Negeri 19 Pare-Pare	-	1984
2.	SMP Katolik Frater Pare-Pare	-	1987
3.	SMA Negeri I Pare-Pare	IPA	1990
4.	Politeknik UNHAS Makassar	Tek. Mesin/Konversi Energi	1995
5.	FT UNHAS Makassar	Tek. Mesin/Konversi Energi	2003
6.	PPs UNHAS Makassar	Tek. Mesin/Konversi Energi	2009

III. RIWAYAT PEKERJAAN DAN AKTIVITAS

No	Nama	Jabatan	Tahun
1.	PT. Bakrie Batualam Nusantara / PT. Grand Marble Nusantara, Cicalengka Bandung Timur / Cigunung Tasikmalaya	Maintenance	1996-1997
2.	PT. Tri Utama Sentana, Makassar	Maintenance	1998
3.	PT. Trakindo Utama, Tembagapura Papua	Maintenance / Mechanic Trainee	1999
4.	PT. Freeport Indonesia / PT. Nusantara Power Service, Portsite – Papua	Maintenance	1999-2000
5.	Jurusan Pendidikan Teknik Mesin FT- UNM Makassar	Laboran	2000
6.	Fakultas Teknik UNM	Keu & Kepeg FT-UNM	2000-2011
7.	Jurusan Pendidikan Teknik Otomotif FT- UNM Makassar	Dosen LB	2009-2011
8.	Jurusan Pendidikan Teknik Otomotif FT- UNM Makassar	Dosen Tetap	Sejak 2011
9.	PT. Natindo, Makassar	Staf Teknik	2004-2014
10.	Departemen Teknik Mesin ITS, Surabaya	Mahasiswa Program Doktor Teknik Mesin	Sejak 2014

IV. PENELITIAN/KARYA ILMIAH SELAMA MENGIKUTI PROGRAM DOKTOR

1. Penelitian Yang Mendapatkan Hibah

No	Nama	SKIM Penelitian / Tahun	Sumber Pendanaan
1.	Pengembangan Model Alternatif Assesmen Berbasis Kinerja Mahasiswa Pada Pembelajaran Fisika Teknik di Perguruan Tinggi (Tahun Pertama)	Penelitian Fundamental / 2014	DRPM Kemenristek-Dikti
2.	Pengembangan Model Alternatif Assesmen Berbasis Kinerja Mahasiswa Pada Pembelajaran Fisika Teknik di Perguruan Tinggi (Tahun Kedua)	Penelitian Fundamental / 2015	DRPM Kemenristek-Dikti
3.	Analisis Kinerja Harian PLTU Tello Makassar Menggunakan Direct/Indirect Method dan Exergy	PNBP / 2016	UNM Makassar
4.	Pengembangan Strategi Pembakaran E50 Pada Mesin SI-PFI Satu Silinder Untuk Meningkatkan Performansi Mesin dan Menurunkan Emisi Pembakaran	Penelitian Disertasi Doktor / 2018	DRPM Kemenristek-Dikti

2. Karya Ilmiah Yang Dipublikasikan di Jurnal Nasional/Internasional Bereputasi

No	Nama	Nama Jurnal / Status	Issue
1.	Performance and Emissions Characteristics of Three Main Types Composition of Gasoline-Ethanol Blended in Spark Ignition Engine	IREME Journal, Italy (Single Submission, Scopus)	Vol. 10, No. 7, Nov 2016, pp. 552-559
2.	Suitable Injection Duration of Pure Ethanol Fuel for Motorcycle at A High Compression Ratio	Dyna Journal, Spain (Single Submission, Scopus)	Vol. 92, No. 5, Sept 2017, pp. 587-592
3.	A Strategy in Adjustment of Combustion Parameters of SI-PFI Engine with Pure Bioethanol Fuelled for a High Performance and Low Emission	WSEAS Transaction Environment & Development, Greece (Single Submission, Scopus)	Vol. 13, 2017, pp. 421-430
4.	Suitable of High Compression Ratio, Injection Duration and Ignition Timing on CB150R Engine for High Performance and Low Emissions with Pure Bioethanol Fuelled	International Journal of Chemistry and Chemical Engineering System, USA (Single Subs, Copernicus)	Vol. 2, 2017, pp. 33-44 http://www.iaras.org/iaras/journals/ijcces
5.	Studi Eksperimental Pengaruh Mapping Waktu Pengapian dan Mapping Durasi Injeksi Serta Rasio Kompresi Terhadap Performansi dan Emisi Gas Buang Engine Honda CB150R Berbahan Bakar E50	Jurnal Teknik Mesin Indonesia, BKSTM Indonesia	Vol. 12, No. 2, Oktober 2017, pp. 81-86

6.	Influence of the compression ratio and duration injection on the performance and emission of flexible fuel Sinjai engine type 150cc fuelled gasoline-bioethanol E70	IPTEK Journal of Engineering, LPPM ITS Surabaya	Vol. 3, No. 3, pp. 19-23
7.	Influence of the compression ratio and ignition timing on the CB150R engine performance with gasoline-bioethanol E85 blended fuel	IPTEK Journal of Engineering, LPPM ITS Surabaya	Vol. 3, No. 3, pp. 24-29

3. Karya Ilmiah Yang Dipublikasikan Dalam Seminar Nasional/Internasional

No	Nama	Nama Seminar	Pelaksana
1.	Analisis Pelaksanaan Assesmen Pembelajaran Fisika Teknik Pada Program Studi Pendidikan di Fakultas Teknik UNM	Semnas Optimalisasi Hasil Penelitian Untuk Pembangunan Berkelanjutan	Lembaga Penelitian UNM, Tanggal 13 Juni 2015 di Makassar
2.	Performance and Emission Characteristics of Three Main Types Composition of Gasoline-Ethanol Blended in Spark Ignition Engine	3rd International Postgraduate Conference on Biotechnology	Departemen Teknik Lingkungan ITS, 24-26 Agustus 2016 di Surabaya
3.	Influence of the compression ratio and ignition timing on the CB150R engine performance with gasoline-bioethanol E85 blended fuel	3rd International Seminar on Science and Technology	Departemen Teknik Kimia ITS, 3 September 2017 di Surabaya
4.	Influence of the compression ratio and duration injection on the performance and emission of flexible fuel Sinjai engine type 150cc fuelled gasoline-bioethanol E70	3rd International Seminar on Science and Technology	Departemen Teknik Kimia ITS, 3 September 2017 di Surabaya