

# **ETANOL MESIN GASOLIN**

***SPARK IGNITION* MENGGUNAKAN  
ZAT ADITIF OKSIGENAT**

**SETIA ABIKUSNA**

**PEMANFAATAN ETANOL DAN ZAT  
ADITIF OKSIGENAT PADA MESIN  
GASOLIN SPARK IGNITION**

## **UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta**

### **Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan fonogram yang telah dilakukan pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# **PEMANFAATAN ETANOL DAN ZAT ADITIF OKSIGENAT PADA MESIN GASOLIN SPARK IGNITION**

Penulis:  
**SETIA ABIKUSNA**



**AZKA PUSTAKA**

**PENERBIT CV AZKA PUSTAKA**

**PEMANFAATAN ETANOL DAN ZAT  
ADITIF OKSIGENAT PADA MESIN  
GASOLIN SPARK IGNITION**

**Penulis:**  
SETIA ABIKUSNA

**Editor:**  
Moh Suardi

ISBN :  
**978-623-5832-94-4**

Design **Cover**  
Zainur Rijal

Layout :  
Safrinal

**PENERBIT. CV. AZKA PUSTAKA**  
Jl. Jendral Sudirman Nagari Lingkuang Aua Kec. Pasaman,  
Kab. Pasaman Barat, Sumatera Barat 26566  
**Email : [penerbitazkapustaka@gmail.com](mailto:penerbitazkapustaka@gmail.com)**  
**Website: [www.penerbitazkapustaka.co.id](http://www.penerbitazkapustaka.co.id)**  
HP/Wa: 081372363617/083182501876

Cetakan Pertama : **November 2021**  
ANGGOTA IKAPI : 031/SBA/21  
Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang.  
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam  
bentuk apapun tanpa izin penerbit

*Isi diluar tanggung jawab penerbit dan percetakan*

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah rabbi'l'alamin, Puji Syukur kepada Allah SWT, yang berkat limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya, Allah memberikan pertolongan dan jalan yang baik sehingga penulis dapat menyelesaikan tulisan ini dengan baik. Semoga dengan adanya tulisan ini dapat dinilai menjadi salah satu ibadah dan bentuk syukur kepada Allah SWT. Sholawat dan salaam kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah membawa ummatnya dari alam jahiliyah menuju alam yang penuh cahaya dan ilmu pengetahuan.

Pemanfaatan etanol di Indonesia untuk menjadi bahan bakar masih tergolong sangat rendah. Namun lain halnya dengan produksi etanol berkadar rendah sebagai jenis minuman yang dikonsumsi masyarakat tertentu, baik yang bersifat tradisional maupun yang berskala industri, banyak dijumpai di Indonesia. Etanol yang dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin biasanya anhydrous etanol dengan konsentrasi

Perkembangan teknologi semakin lama semakin pesat. Setiap tahunnya berbagai penemuan dipublikasikan untuk memajukan kehidupan manusia. Salah satu perkembangan teknologi adalah penemuan internal combustion engine pada tahun 1876. Penggunaan internal combustion engine jenis apapun memerlukan bahan bakar untuk bekerja, dan kendaraan bermotor paling umum menggunakan bensin. Bensin biasa memiliki efisiensi yang rendah dibandingkan bahan bakar lain dengan nilai oktan yang lebih tinggi. Untuk menambah efisiensi bensin di tambahkan zat adiktif yang berfungsi untuk meningkatkan performa bensin secara keseluruhan tanpa menghasilkan gas emisi berbahaya

Kritik dan saran dari pembaca sangat kami butuhkan, untuk memperbaiki penulisan buku berikutnya, semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca, dan khususnya bagi diri kami pribadi.

Jawa Barat, Maret 2022

Penulis

# DAFTAR ISI

Kata Pengantar.....	v
Daftar Isi .....	iv
Daftar Tabel.....	viii
Daftar Gambar .....	ix
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>BAB 2 PENGGUNAAN MOOR OTTO.....</b>	<b>11</b>
A. Penggunaan Etanol Pada Mesin Otto .....	11
B. Pengukuran CCTV .....	17
C. Performa Motor Otto .....	21
<b>BAB 3 SPECIFIC FUEL CONSUMPTION.....</b>	<b>25</b>
A. Heat Release .....	25
B. Polutan Pada Aliran Gas Buang.....	26
C. Etanol .....	31
<b>BAB 4 PEMBUATAN ETANOL SECARA FERMENTASI.....</b>	<b>35</b>
A. Proses Distilasi .....	36
B. Perhitungan Titik Didih dan Titik Embun.....	41
<b>BAB 5 DISTILASI LOW GRADE BIOETANOL.....</b>	<b>59</b>
A. Perancangan <i>Compact Distillator</i> .....	59
B. Laju Distilasi dan Kadar Distilasi.....	66
C. Optimasi <i>Compact Distillator</i> .....	70
D. Laju Distilasi pada <i>Separator</i> dengan Jarak Antar <i>Tray</i> yang Berbeda.....	81
E. Pengujian dengan Variasi Volume Umpan .....	86
<b>BAB 4 CYCLE TO CYCLE VARIATIONS.....</b>	<b>91</b>
A. Tingkat Koreksi Volume Sikloheptanol Terhadap COV .....	98
B. Penambahan <i>Sikloheptanol</i> sebagai Koreksi COV .....	104
C. Tingkat Koreksi Volume Sikloheptanol Terhadap COV .....	107
D. Ignition Timing, Injection Duration, dan Air Fuel Ratio Feed Back Correction .....	111

E. Ignition Timing, Injection Duration, dan Air Fuel Ratio Feed Back Correction .....	112
Daftar Pustaka.....	132

## Daftra Tabel

<b>Tabel 2.1</b> Perbandingan Karakteristik Etanol dengan Gasolin .....	12
<b>Tabel 4.1</b> Konversi Biomassa Menjadi Bioetanol [20].....	36
<b>Tabel 4.2</b> Spesifikasi Sikloheksanol dan Sikloheptanol .....	55
<b>Tabel 5.1</b> Konstanta A, B, C untuk etanol dan air. ....	75
<b>Tabel 5.2</b> Korelasi <i>Reflux</i> -Jumlah Tingkatan Gilliland .....	78

# Daftar Gambar

<b>Gambar 1.1</b> Konsumsi Energi 2005 dan Target Konsumsi Energi 2025 .....	1
<b>Gambar 1.2</b> Grafik <i>Pressure vs. Crank Angle</i> pada Berbagai Variasi <i>Ignition Timing</i> .....	6
<b>Gambar 2.1</b> Kurva <i>Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> .....	16
<b>Gambar 4.1</b> Efek <i>Relatif Volatility</i> pada Konsentrasi Komponen yang Lebih Volatil Dalam Uap .....	39
<b>Gambar 4.2</b> Diagram T-x .....	41
<b>Gambar 4.3</b> Korelasi <i>Reflux-Jumlah Tingkat</i> Gilliland .....	44
<b>Gambar 4.4</b> Skema Distilasi <i>Batch</i> .....	46
<b>Gambar 4.5</b> Jenis-Jenis <i>Tray</i> (a) <i>Tray Bubble-Cap</i> (b) <i>Tray Sieve</i> (c) <i>Tray Dual Flow</i> .....	47
<b>Gambar 4.6</b> Lintasan Uap Melalui <i>Tray Bubble-Cap Tray</i> (a), <i>Sieve Tray</i> (b), <i>Valve Tray</i> (c) .....	48
<b>Gambar 4.7</b> Skematik <i>Tray Aliran-Silang</i> .....	49
<b>Gambar 4.8</b> Diagram Performa <i>Tray Sieve</i> .....	49
<b>Gambar 4.9</b> Susunan Pemilihan Aliran <i>Liquid</i> .....	52
<b>Gambar 4.10</b> Hubungan antara Area <i>Downcomer</i> dengan Panjang <i>Weir</i> Zat Aditif Oksigenat (Sikloheksanol $C_6H_{12}O$ dan Sikloheptanol $C_7H_{14}O$ ) .....	53
<b>Gambar 4.11</b> Penggolongan Alkohol .....	64
<b>Gambar 4.12</b> Oksidasi Alkohol .....	56
<b>Gambar 5.1</b> 3D <i>Evaporator</i> .....	59
<b>Gambar 5.2</b> 2D <i>Evaporator</i> .....	60
<b>Gambar 5.3</b> Instalasi <i>Evaporator</i> .....	60
<b>Gambar 5.4</b> 3D <i>Separator (Sieve Coloum)</i> .....	61
<b>Gambar 5.5</b> 2D <i>Separator (Sieve Coloum)</i> .....	61
<b>Gambar 5.6</b> <i>Separator (Sieve Coloum)</i> .....	62
<b>Gambar 5.7</b> <i>Separator (Sieve Coloum)</i> .....	62
<b>Gambar 5.8</b> 2D <i>Heat Exchanger</i> .....	63
<b>Gambar 5.9</b> <i>Heat Exchanger</i> .....	63
<b>Gambar 5.10</b> <i>Gate Valve</i> .....	64
<b>Gambar 5.11</b> (a) Instalasi <i>Compact Distillator</i> (b) Skema <i>Compact Distillator</i> .....	65
<b>Gambar 5.12</b> Laju Distilasi .....	67
<b>Gambar 5.13</b> Laju Distilasi pada Putaran Rendah .....	68
<b>Gambar 5.15</b> Laju Distilasi pada Putaran Tinggi .....	69
<b>Gambar 5.16</b> Laju Distilasi dan Kadar Distilat .....	69
<b>Gambar 5.17</b> (a) Diagram Fase T-xy (b) Diagram McCabe-Thiele .....	74
<b>Gambar 5.18</b> Nilai K Etanol dan Air .....	75
<b>Gambar 5.19</b> Grafik <i>Reflux Factor vs. Jumlah Tingkat</i> .....	

Aktual .....	79
<b>Gambar 5.20</b> Skema <i>Separator</i> .....	80
<b>Gambar 5.21</b> 3D <i>Separator</i> .....	80
<b>Gambar 5.22</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 70 mm dan Putaran Mesin 1,800 rpm .....	81
<b>Gambar 5.23</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 100 mm dan Putaran Mesin 1,800 rpm .....	81
<b>Gambar 5.24</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 70 mm dan Putaran Mesin 3,600 rpm.....	82
<b>Gambar 5.25</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 100 mmdan Putaran Mesin 3,600 rpm .....	83
<b>Gambar 5.26</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 70 mm dan Putaran Mesin 5,400 rpm .....	83
<b>Gambar 5.27</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 100 mm dan Putaran Mesin 5,400 rpm .....	84
<b>Gambar 5.28</b> Perbandingan Laju Distilasi sebelum <i>Valve</i> Ditutup antara <i>Tray</i> 70 mm dan <i>Tray</i> 100 mm .....	84
<b>Gambar 5.29</b> Perbandingan Laju Distilasi Total antara <i>Tray</i> 70 mm dan <i>Tray</i> 100 mm .....	85
<b>Gambar 5.30</b> Perbandingan Kadar Distilat antara <i>Tray</i> 70 mm dan <i>Tray</i> 100 mm .....	85
<b>Gambar 5.31</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Evaporator</i> dengan Variasi Volume Umpan .....	86
<b>Gambar 5.32</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 1 dengan Variasi Volume Umpan .....	87
<b>Gambar 5.33</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 5 dengan Variasi Volume Umpan .....	87
<b>Gambar 5.34</b> Profil Temperatur Etanol pada <i>Tray</i> 9 dengan Variasi Volume Umpan .....	88
<b>Gambar 5.35</b> Profil Temperatur Etanol pada Kondenser dengan Variasi Volume Umpan .....	88
<b>Gambar 5.36</b> Perbandingan Laju Distilasi sebelum <i>Valve</i> Ditutup dengan Variasi Volume Umpan .....	89
<b>Gambar 5.37</b> Perbandingan Laju Distilasi Total dengan Variasi Volume Umpan .....	89
<b>Gambar 5.38</b> Perbandingan Kadar Distilat dengan Variasi Volume Umpan.....	90
<b>Gambar 6.1</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E0) .....	92
<b>Gambar 6.2</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E5) .....	92
<b>Gambar 6.3</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E10).....	92
<b>Gambar 6.3</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E10) .....	93
<b>Gambar 6.5</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E0) .....	93
<b>Gambar 6.5</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E0) .....	93
<b>Gambar 6.7</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E10) .....	94
<b>Gambar 6.8</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E15) .....	94
<b>Gambar 6.9</b> <i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E0) .....	95

<b>Gambar 6.10</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5) .....	95
<b>Gambar 6.11</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10) .....	95
<b>Gambar 6.12</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15) .....	96
<b>Gambar 6.13</b>	COV pada Setiap Variasi Campuran Bahan Bakar (uncertainty + 0.15) .....	97
<b>Gambar 6.14</b>	<i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E5++) .....	99
<b>Gambar 6.15</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++) .....	100
<b>Gambar 6.16</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++) .....	100
<b>Gambar 6.17</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++) .....	100
<b>Gambar 6.18</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++) .....	101
<b>Gambar 6.19</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++) .....	101
<b>Gambar 6.20</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++) .....	101
<b>Gambar 6.21</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++) .....	102
<b>Gambar 6.22</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++) .....	102
<b>Gambar 6.23</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle pada Campuran Bahan Bakar pada 4,000 rpm .....	103
<b>Gambar 6.24</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle pada Campuran Bahan Bakar pada 6,000 rpm .....	103
<b>Gambar 6.25</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle pada Campuran Bahan Bakar pada 8,500 rpm .....	103
<b>Gambar 6.26</b>	COV pada Setiap Variasi Campuran Bahan Bakar dengan Sikloheksanol (uncertainty + 0.15) .....	104
<b>Gambar 8.27</b>	<i>In Cylinder Pressure vs. Crank Angle</i> (E10 + 0.3% vol/vol) .....	105
<b>Gambar 6.28</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 1.0% vol/vol) .....	105
<b>Gambar 6.29</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 1.3% vol/vol) .....	105
<b>Gambar 6.30</b>	COV pada Setiap Variasi Sikloheksanol pada Campuran E10 (uncertainty + 0.15) .....	106
<b>Gambar 6.31</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++) .....	107
<b>Gambar 6.32</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++) .....	107
<b>Gambar 6.33</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++) .....	108
<b>Gambar 6.34</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++) .....	108
<b>Gambar 6.35</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++) .....	108
<b>Gambar 6.36</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++) .....	109
<b>Gambar 6.37</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++) .....	109
<b>Gambar 6.38</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++) .....	109
<b>Gambar 6.39</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++) .....	110
<b>Gambar 6.40</b>	COV pada Setiap Variasi Campuran Bahan Bakar dengan Sikloheksanol dan Sikloheptanol (uncertainty + 0.15) .....	110
<b>Gambar 6.41</b>	In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 1.3% vol/vol) .....	111
<b>Gambar 6.42</b>	COV pada Setiap Variasi Sikloheptanol pada Campuran E10 (uncertainty + 0.15) .....	112

<b>Gambar 6.43</b> Oksigen Sensor .....	113
<b>Gambar 6.44</b> Air Fuel Ratio .....	114
<b>Gambar 6.45</b> Koreksi Ignition Timing pada E0 .....	115
<b>Gambar 6.46</b> Koreksi Ignition Timing pada E5 .....	115
<b>Gambar 6.47</b> Koreksi Ignition Timing pada E10 .....	115
<b>Gambar 6.48</b> Koreksi Ignition Timing pada E15 .....	116
<b>Gambar 6.49</b> Koreksi Ignition Timing pada E5++ .....	116
<b>Gambar 6.50</b> Koreksi Ignition Timing pada E10++ .....	116
<b>Gambar 6.51</b> Koreksi Ignition Timing pada E15++ .....	117
<b>Gambar 6.52</b> Voltage Sensor Oksigen dan Injection Volume .....	118
<b>Gambar 6.68</b> COV vs. SFC pada Setiap Campuran Bahan Bakar (a) pada 4,000 rpm, (b) pada 6,000 rpm dan (c) pada 8,500 rpm .....	118
<b>Gambar 6.69</b> Heat Release Rate E10++ pada 4,500 rpm (uncertainty + 0.35) .....	120
<b>Gambar 6.70</b> Heat Release Total vs. Crank Angle (uncertainty + 0.35) .....	121
<b>Gambar 6.71</b> Heat Release Total vs. COV .....	122
<b>Gambar 6.72</b> CO vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran (uncertainty + 0.197) .....	124
<b>Gambar 6.73</b> CO <sub>2</sub> vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran (uncertainty + 1.292) .....	125
<b>Gambar 6.74</b> O <sub>2</sub> vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran (uncertainty + 0.173) .....	126
<b>Gambar 6.75</b> COV vs. CO, CO <sub>2</sub> , dan O <sub>2</sub> pada Setiap Campuran Bahan Bakar (a) pada 4,000 rpm, (b) pada 6,000 rpm dan (c) pada 8,500 rpm .....	128
<b>Gambar 6.76</b> HC vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran (uncertainty + 12.737) .....	129
<b>Gambar 6.77</b> COV vs. HC pada Setiap Campuran Bahan Bakar (a) pada 4,000 rpm, (b) pada 6,000 rpm dan (c) pada 8,500 rpm .....	130



# BAB 1

## PENDAHULUAN

---

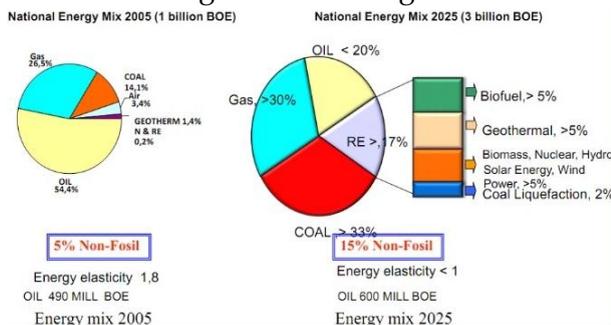
Konsumsi energi final bahan bakar minyak Indonesia terus mengalami peningkatan rata-rata 5 % per tahun, dari tahun 2010 sampai dengan tahun 2014 terus meningkat, sedangkan tahun 2015 mengalami penurunan. Pada tahun 2005 sebagian besar konsumsi energi dipenuhi oleh energi fosil seperti minyak bumi, gas, dan batubara. Konsumsi energi terbesar adalah bahan bakar minyak (bbm) sebesar 54.4 %, diikuti gas bumi 26.5 %, batubara 14.1 %, udara 3.4 %, geothermal 1.4 % dan sisanya adalah energi terbarukan sebesar 0.2 % Kondisi ini menunjukkan bahwa Indonesia masih sangat tergantung pada sumber energi tak terbarukan padahal jumlahnya semakin menipis. Saat ini Indonesia telah melewati masa puncak produksi minyak (sekitar akhir 1970-an melalui *primary recovery*) dan sedang berjuang keras untuk menahan penurunan produksi alami melalui *secondary* dan *tertiary recovery*. Sejak tahun 2004, Indonesia menjadi negara *net importer* minyak bumi. Konsekuensinya, fluktuasi harga dan ketersediaan pasokan minyak dunia mempengaruhi ketahanan energi Indonesia.

Untuk mengatasi hal tersebut maka perlu dikembangkan energi lain pengganti bahan bakar minyak yang bersifat terbarukan, ramah lingkungan, dan berasal dari alam. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial dikembangkan di Indonesia sebagai pengganti bbm adalah bioetanol ( $C_2H_5OH$ ) Bioetanol merupakan produk turunan biomassa yang diperoleh dari fermentasi tanaman yang mengandung pati. Pemerintah mendorong penggunaan energi baru terbarukan seperti

biomassa dengan mengeluarkan Peraturan Presiden No.5 Tahun 2006, dimana Pemerintah menargetkan energi baru terbarukan sebesar 17 % dari energi primer nasional pada tahun 2025. Dan pada Tahun 2014 dengan Peraturan Presiden No. 79 target energi baru terbarukan menjadi 23 %, sedangkan gas bumi 22 %, minyak bumi 25 %, dan batu bara 30 %.

**Gambar 1.1**

**Konsumsi Energi 2005 dan Target Konsumsi Energi 2025**



Pada perkembangannya etanol sebagai bahan bakar sudah digunakan di Brazil sejak tahun 1970 baik dengan komposisi campuran E20-E25 (*anhydrous*) atau E100 (*hydrous*), penggunaan etanol tersebut pada mesin *flex fuel*, tentunya dengan spesifikasi mesin yang berbeda dengan mesin bensin pada umumnya. Penggunaan bahan bakar etanol ini telah berhasil menekan emisi CO<sub>2</sub> di Brazil pada kurun waktu tahun 1997 sampai tahun 2010 Secara teknis, penggunaan etanol harus memperhatikan beberapa hal seperti kompatibilitas/kesesuaian dengan bahan logam (korosi), kompatibilitas/kesesuaian dengan bahan plastik atau karet (kerugian secara kimiawi), konsumsi bahan bakar tinggi (kandungan energi rendah), kehilangan *driveability* (perubahan rasio udara / bahan bakar), kondisi *cold start engine* (tekanan uap rendah) khusus untuk daerah yang temperaturnya sangat rendah (bahkan di bawah 0 °C).

Kondisi-kondisi tersebut di atas semuanya sangat tergantung pada volume etanol yang dicampur dengan gasolin, spesifikasi dan kualitas bahan bakar etanol, serta teknologi dari

mesin itu sendiri. Pada tahun 2009, diperkenalkan kendaraan fleksibel pertama yang juga diproduksi di Brazil untuk mengantisipasi kondisi *cold start engine*. Kendaraan ini memiliki pemanas listrik yang terintegrasi dengan injektor untuk menghangatkan etanol (bila diperlukan), sehingga start awal mesin bisa sempurna terutama pada temperatur rendah.

Beberapa teknologi yang digunakan pada *flex fuel engine* diantaranya adalah pada mesin dibuat rasio kompresi yang lebih tinggi, katup dibuat lebih tahan terhadap korosi. Geometri *intake manifold* dioptimalkan agar temperatur ideal dapat segera tercapai pada kondisi temperatur yang lebih rendah. Sistem bahan bakarnya terbuat dari plastik dan logam yang tahan untuk gasolin dan juga etanol. *Catalytic converter* digunakan dengan tipe dan bahan logam yang disesuaikan. Permukaan *exhaust manifold* harus tahan terhadap oksidasi. Dimensinya juga sudah mempertimbangkan tingkat air yang tinggi di dalam pipa. Pada sistem pengapiannya, *ignition timing* dibuat berbeda untuk setiap bahan bakar yang digunakan.

Busi juga disetting agar nilai panasnya dapat optimal. Oleh karena etanol tidak dapat menguap pada temperatur rendah, maka diperlukan sebuah tangki kecil untuk membantu *start* mesin pada kondisi dingin (*cold start engine*). Tangki tambahan ini tidak diperlukan sampai campuran E85. ECU dan sistem kelistrikan dilengkapi untuk menentukan rasio etanol dalam bahan bakar, dan menghitung jumlah injeksi bahan bakar, serta menentukan *ignition timing*.

Elemen material *filter* bahan bakar yang digunakan diatur porositasnya. *Pressure regulator* dibuat agar dapat menaikkan tekanan bahan bakar, permukaan bagian dalamnya dibuat agar tahan terhadap korosi. Injektor bahan bakar harus tahan terhadap korosi. Lambda sensor akan menentukan rasio udara/bahan bakar untuk setiap kemungkinan campuran. Dan yang terakhir adalah pada pompa bahan bakar dibuat agar dapat menyediakan bahan bakar dalam tekanan yang lebih

tinggi, dan komponen internalnya juga harus tahan korosi

Penelitian secara eksperimen telah dilakukan untuk mengevaluasi efek kinerja etanol dan gasolin, emisi, dan pembakaran bahan bakar pada *flek fuel engine* saat beroperasi dengan campuran udara-bahan bakar kurus ( $\lambda$  0.9 - 1.6). Parameter pembakaran seperti durasi pembakaran, penundaan pengapian, temperatur dan tekanan dalam silinder, dan tingkat *heat release* dianalisa dan digunakan untuk memahami perilaku konsumsi bahan bakar dan emisi mode pembakaran kurus dibandingkan dengan kondisi stoikiometri. Hasil eksperimen menunjukkan terjadi ketidakstabilan pembakaran setelah  $\lambda$  1.4. Hal ini menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar. Ketidakstabilan juga dikarenakan penurunan temperatur pembakaran, dengan *heat release* yang tinggi dan temperatur di ruang bakar yang rendah pada campuran yang kurus. Secara umum etanol menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih besar [6], disamping itu penggunaan etanol juga dapat memperbaiki emisi yang dihasilkan, berbanding lurus dengan tingkat percepatan kendaraan tersebut

Selain pada mesin yang dikhususkan untuk bahan bakar etanol, penelitian pemanfaatan etanol juga dilakukan pada mesin SI komersial (mesin gasolin) 4 silinder, diantaranya untuk menguji tingkat campuran yang optimal pada campuran bahan bakar gasolin etanol untuk memaksimalkan efisiensi *brake thermal*. Pada penelitian tersebut performa mesin seperti *brake torque* dan *brake specific fuel consumption* juga diuji dengan rasio campuran antara gasolin (oktan 87.5) dan 99.5 % etanol (E10, E20, E30, E40, E50, E60, E70, E85, dan E100).

Pengujian ini dilakukan pada kecepatan mesin dan pembukaan *throttle* yang berbeda, tetapi rasio konstan. AFR dan *ignition timing* juga disesuaikan untuk menaikkan *torque* mesin. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa rasio pencampuran gasolin etanol yang tepat dapat meningkatkan *torque* mesin, terutama pada kecepatan mesin rendah. E40 dan E50

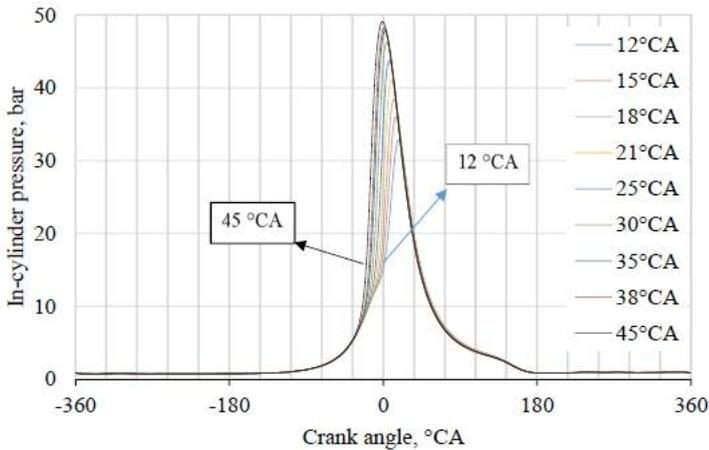
menghasilkan efisiensi *brake thermal* maksimum pada 58 - 73 % WOT dan 2,000 - 2,500 rpm. E20 - E40 menghasilkan MBT tertinggi pada 70 - 100 % WOT dan 1,000 - 4,000 rpm Eksperimen secara komparatif juga dilakukan pada injeksi *port* mesin gasolin dengan bahan bakar *hydrous* etanol gasolin (E10W), etanol gasolin (E10) dan gasolin murni (E0). Menurut hasil eksperimen, dibandingkan dengan E0, E10W menunjukkan tekanan dalam silinder dan emisi NO<sub>x</sub> yang lebih tinggi pada beban tinggi.

Namun, pada beban rendah kondisi HC, CO dan CO<sub>2</sub> berkurang secara signifikan. E10W juga menghasilkan sedikit HC dan CO, sementara emisi CO<sub>2</sub> tidak signifikan terpengaruh. Dibandingkan dengan E10, E10W menunjukkan tekanan silinder dan tingkat *heat release* yang lebih tinggi. Sebagai tambahan, penurunan emisi NO<sub>x</sub> diamati untuk E10W dari 5 nm ke 100 nm, sedangkan HC, CO, dan CO<sub>2</sub> yang sedikit lebih tinggi pada kondisi beban rendah dan menengah. Dari hasil, dapat disimpulkan bahwa bahan bakar E10W dapat dianggap sebagai bahan bakar alternatif yang potensial yang dapat diaplikasikan pada mesin bensin

Alirija Kaleli melakukan eksperimen untuk meminimalisasi variasi siklik pada mesin SI, dengan mengendalikan *ignition timing* untuk keseluruhan siklus secara berturut-turut. Sebuah model stokastik dilakukan antara *ignition timing* dan tekanan maksimum silinder dengan menggunakan teknik identifikasi sistem. Tekanan maksimum silinder dari siklus berikutnya diperkirakan dengan model ini. Kontrol algoritma yang dihasilkan dari LabView dan diinstal ke *Field Programmable Gate Array* (FPGA) *chassis*. Hasil pengujian, tekanan maksimum silinder siklus berikutnya dapat diprediksi cukup baik, dan *ignition timing* dapat diatur untuk menjaga tekanan maksimum silinder yang diinginkan untuk mengurangi variasi siklik. Pada percobaan *ignition timing* yang tetap, COVP<sub>max</sub> dan COV<sub>mep</sub> adalah 3.764 dan 0.677 %, sedangkan hasilnya menurun menjadi 3.208 dan 0.533 % ketika GMV *controller* diterapkan.

**Gambar 1.2**

Grafik *Pressure vs. Crank Angle* pada Berbagai Variasi *Ignition Timing* [10]



K. Sen melakukan simulasi untuk meneliti *cycle-to-cycle variations* (CCV) *heat release* pada mesin SI berbahan bakar campuran gasolin etanol. Rasio campuran diubah dari 0.7 - 0.9 dan 1.0 dari campuran kurus ke campuran stoikiometri. Etanol ditambahkan secara proporsional 5 - 25 %. Simulasi ini dilakukan untuk menghitung koefisien variasi (COV) *heat release* pada setiap penambahan volume etanol. Dari nilai COV, ditemukan bahwa pada rasio campuran tetap CCV *heat release* menurun pada setiap penambahan etanol.

Selain itu ditemukan bahwa pada campuran dengan volume etanol tetap, CCV meningkat pada campuran yang lebih kurus. Ketika campuran mendekati stoikiometri, penurunan CCV tidak sensitif terhadap perubahan volume etanol. Selain itu pula, hasil COV menunjukkan bahwa pada volume etanol tetap, CCV menurun sesuai dengan peningkatan rasio campuran, dan kenaikan ini terjadi khusus pada campuran kurus.

Hasil analisis *wavelet* menunjukkan bahwa CCV *heat release* pada mesin SI berbahan bakar campuran gasolin etanol sangat dinamis yang terdiri dari fluktuasi *intermitten* frekuensi

tinggi dan osilasi frekuensi rendah. Untuk mesin gasolin (tanpa penambahan etanol), CCV berkurang sesuai perubahan komposisi campuran, dari campuran kurus ke campuran stoikiometri. Pada rasio campuran tetap, CCV dapat dikurangi dengan mencampur gasolin dengan etanol. Penambahan etanol pada gasolin diharapkan dapat meningkatkan performa mesin (IMEP,  $COV_{IMEP}$  dan menurunkan emisi). Untuk campuran E50 kinerja yang lebih baik akan diperoleh apabila di awal penguapan selama injeksi dan *spray* yang kompak dengan penetrasi yang lebih tinggi terutama pada 100 bar, yang menghindari pembentukan deposit cair pada piston dan polutan di knalpot. Sementara itu, untuk E85 karakteristik penguapan *spray* lebih lambat karena kurang homogen dan pengurangan *flame* propagasi pada fase akhir propagasi. Hal ini memungkinkan pembakaran yang lebih cepat dan lebih efisien pada kandungan gasolin yang lebih tinggi.

Selain yang sudah dijelaskan sebelumnya, campuran gasolin etanol sebagai bahan bakar juga dapat mempengaruhi sifat fisik-kimia bahan bakar tersebut seperti volatilitas (tekanan uap dan sifat distilasi), *heating value*, dan *water solubility*. Karena etanol memiliki afinitas tinggi terhadap air, di mana kelarutan air yang tinggi dalam campuran bahan bakar gasolin etanol dipengaruhi oleh karakter etanol yang bersifat polar. Kelarutan air dalam campuran gasolin etanol dipengaruhi oleh: temperatur, volume etanol, komposisi hidrokarbon dari basis gasolin (kandungan aromatik atau olefin), serta kandungan dari oksigenat lain (*co-solvent*) [25]. Sifat polar ini bukan masalah untuk pembakaran apabila hanya dengan menggunakan etanol murni karena sepenuhnya bercampur dengan air, tetapi beberapa masalah dapat muncul ketika campuran gasolin etanol digunakan. Pemisahan fase dapat terjadi dalam campuran ini karena gasolin dan etanol tidak dapat bercampur secara homogen. Masalah ini dapat dicegah dengan menggunakan

pelarut bersama semi-polar (penyempurna kelarutan), salah satunya adalah sikloheksanol [25].

Sikloheksanol sebagai campuran bahan bakar sudah digunakan oleh Yuvarajan Devarajan [26] pada mesin diesel pada jurnalnya: '*Emission and combustion profile study of unmodified research engine propelled with neat biofuels*'. Sikloheksanol sebagai aditif bahan bakar dalam berbagai fraksi volume 10, 20, dan 30 vol %. Hasil percobaan diperoleh bahwa dengan meningkatnya fraksi sikloheksanol, pembakaran menjadi lebih halus.

Penambahan sikloheksanol memiliki pengaruh positif terhadap berbagai sifat fisik dan kimia biodiesel. Tekanan dalam silinder relatif rendah untuk mesin diesel dengan campuran sikloheksanol dan biodiesel bila dibandingkan dengan hanya menggunakan biodiesel saja. Ini karena periode penundaan pengapian yang lebih pendek. Tingkat *heat release* biodiesel adalah yang tertinggi di antara semua bahan bakar. Emisi HC keseluruhan dari BD70COH30 adalah 12.19 % lebih rendah dari BD100 dan 16.34 % lebih rendah dari diesel. Emisi CO<sub>2</sub> keseluruhan dari BD70COH30 adalah 13.91 % lebih tinggi dari BD100 dan 19.5 % lebih tinggi dari diesel. Emisi NO<sub>x</sub> keseluruhan dari BD70COH30 adalah 5.31 % lebih rendah dari BD100 di semua operasi beban mesin. Emisi CO keseluruhan dari sikloheksanol yang dicampur dengan biodiesel 30 % vol (BD70COH30) adalah 17 % lebih rendah dari BD100 dan 21.8 % lebih rendah dari diesel. Berdasarkan hasil penelitian ini, biodiesel yang dicampur sikloheksanol dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang potensial untuk mesin diesel yang belum dimodifikasi karena menghasilkan emisi yang lebih rendah.

Berbeda dengan pemanfaatan etanol di Indonesia untuk menjadi bahan bakar masih tergolong sangat rendah. Namun lain halnya dengan produksi etanol berkadar rendah sebagai jenis minuman yang dikonsumsi masyarakat tertentu, baik yang

bersifat tradisional maupun yang berskala industri, banyak dijumpai di Indonesia. Etanol yang dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin biasanya *anhydrous* etanol dengan konsentrasi > 99.5 % (*fuel grade*). Jika digunakan sepenuhnya sebagai bahan bakar maka diperlukan modifikasi mesin, namun jika dicampur dengan gasolin maka modifikasi mesin tidak diperlukan [23]. *Anhydrous* etanol yang digunakan memiliki kandungan air sangat sedikit bahkan dapat dikatakan murni sehingga apabila dicampur langsung dengan gasolin, bisa langsung masuk ruang bakar. Sedangkan *hydrous* etanol yang konsentrasinya rendah dan masih terdapat kandungan air di dalamnya (4.9 % - 5 %) sehingga tidak bisa secara langsung dicampur dengan gasolin.

Untuk dijadikan sebagai campuran dengan gasolin kandungan airnya maksimum 7.4 %. Oleh karenanya diperlukan teknologi sederhana yang dapat mengakomodasi etanol kadar rendah (*low grade*) yang diproduksi masyarakat untuk dirubah menjadi etanol kadar tinggi (*high grade*) dan hasilnya dapat langsung diterapkan sebagai bahan bakar campuran pada mesin. *Hydrous* etanol memiliki karakteristik yang sedikit berbeda dibandingkan dengan *anhydrous* etanol [28]. Oktan lebih rendah, *heating value* lebih rendah, *latent heat of vaporization* lebih tinggi, kemudian juga kandungan oksigennya lebih tinggi. Namun nilai-nilai pasti untuk tiap karakteristik bergantung pada kadar campuran dan kadar air yang terkandung sehingga dibutuhkan pengujian tersendiri dari *hydrous* etanol tersebut.

*High grade* etanol sebagai hasil distilasi dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar pada mesin gasolin dan diuji pemanfaatannya terhadap performa dan emisi. Sebagai salah satu komponen yang dapat mempengaruhi performa dan emisi adalah variasi siklik yang terjadi, apabila variasi siklik terlalu besar akibatnya sangat berpengaruh terhadap fluktuasi *torque* yang pada akhirnya dapat menurunkan *driveability* dari mesin tersebut. Oleh karenanya penelitian ini dilanjutkan dengan

memperbaiki variasi siklik (CCV) dengan penambahan zat aditif oksigenat dengan keuntungan karakteristiknya.



# BAB 2

## PENGUNAAN MOOR OTTO

---

### A. Penggunaan Etanol Pada Mesin Otto

Beberapa karakteristik internal etanol menyebabkan penggunaan etanol pada mesin Otto lebih baik dari pada gasolin. Etanol memiliki angka *research octane* 108.6 dan *motor octane* 89.7. Angka tersebut (terutama *research octane*) melampaui nilai maksimal yang mungkin dicapai oleh gasolin (pun setelah ditambahkan aditif tertentu pada gasolin). Beberapa sifat etanol berbeda secara signifikan dari hidrokarbon gasolin seperti karakter polar yaitu afinitas tinggi terhadap air, tidak seperti hidrokarbon, etanol sangat larut dengan air.

Karena itu etanol secara signifikan meningkatkan kelarutan air dalam bahan bakar hidrokarbon. Hal ini sangat bermanfaat dan diinginkan (misalnya pencegahan pembekuan sistem bahan bakar), namun kemampuan untuk menjaga air dalam keadaan larut dalam campuran gasolin etanol sangat dipengaruhi oleh temperatur. Penurunan temperatur bahan bakar di bawah level tertentu menyebabkan pemisahan fase air. Hal ini menghasilkan degradasi kualitas gasolin yang signifikan, bagian dari kandungan oksigen menghilang, nilai oktan turun dan volatilitas berubah. Dengan demikian penggunaan campuran gasolin etanol dapat menyebabkan masalah. Berikut tabel perbandingan karakteristik etanol dengan gasolin secara umum.

**Tabel 2.1**

## Perbandingan Karakteristik Etanol dengan Gasolin

<i>Characteristics</i>	<b>Etanol</b>	<b>Gasolin</b>
<i>Chemical formula</i>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>6</sub> -C <sub>12</sub>
<i>Relative molecular mass</i>	46	95-120
<i>Density (kg/L)</i>	0.79	0.700-0.750
<i>Boiling point (oC)</i>	78.4	25-215
<i>Flash point (oC)</i>	13	-40
<i>Latent heat of vaporization (kJ/kg)</i>	840	373
<i>Stoichiometric heat of vaporation (kJ/kg)</i>	93.9	25.8
<i>Stoichiometric air-fuel ratio</i>	8.95	14.7
<i>Auto-ignition temperature (oC)</i>	363	300-400
LCV (MJ/kg)	26.9	42.9
<i>Lower heating value (kJ/kg)</i>	27,000	44,000
<i>Mixture heating value (kJ/m3)</i>	3,593	3,750
RON	108	88
<i>Laminar flame speed (m/s)</i>	0.5	0.38

Angka oktan pada bahan bakar mesin Otto menunjukkan kemampuannya menghindari terbakarnya campuran udara-bahan bakar sebelum waktunya (*self ignition*). Terbakarnya campuran udara-bahan bakar di dalam mesin Otto sebelum waktunya akan menimbulkan fenomena ketuk (*knocking*) yang berpotensi menurunkan daya mesin, bahkan bisa menimbulkan kerusakan serius pada komponen mesin. Selama ini, fenomena ketuk membatasi penggunaan rasio kompresi yang tinggi pada *gasoline engine*. Tingginya angka oktan pada etanol memungkinkan penggunaan rasio kompresi yang tinggi pada mesin Otto. Korelasi antara efisiensi dengan rasio kompresi berimplikasi pada fakta bahwa mesin Otto berbahan bakar etanol (sebagian atau seluruhnya) memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar gasolin [13].

Etanol memiliki satu molekul OH dalam susunan molekulnya. Oksigen yang *inheren* di dalam molekul etanol tersebut membantu menyempurnakan pembakaran antara campuran udara-bahan bakar di dalam silinder. Ditambah

dengan rentang keterbakaran (*flammability*) yang lebar, yakni 4.3 - 19 vol dibandingkan dengan gasolin yang memiliki rentang keterbakaran 1.4 - 7.6 vol pembakaran campuran udara-bahan bakar etanol menjadi lebih baik, ini dipercaya sebagai faktor penyebab relatif rendahnya emisi CO dibandingkan dengan pembakaran udara-gasolin. Etanol juga memiliki panas laten penguapannya (725.4 kJ/L) lebih tinggi dari pada gasolin (223.2 kJ/L), sehingga memberikan asupan suhu yang lebih rendah pada *intake manifold* dan meningkatkan efisiensi volumetriknya.

Seperti diketahui, panas laten adalah jumlah panas yang diperlukan untuk merubah satuan massa cairan menjadi uap pada tempertur yang diberikan, yang didefinisikan dengan formula:

$$\lambda = KT (v' - v) \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

Dimana:

- $\lambda$  = Panas laten penguapan yang dinyatakan dalam satuan kilo kalori.
- $v'$  dan  $v$  = Volume cairan dan uap pada  $t^0$  dan atau pada tekanan  $p$ .
- $T$  = Temperatur absolut =  $t \text{ } ^\circ\text{C} + 273$ .
- $K$  = Koefisien yang bergantung pada satuan sistem yang digunakan.

Untuk hidrokarbon murni, perubahan dari cairan ke uap dapat dilakukan pada tekanan dan temperatur tetap. Sedangkan untuk bahan bakar yang merupakan campuran, perubahan dari cairan ke uap dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan tekanan konstan tetapi temperatur berubah (yang paling sering dilakukan) atau dengan temperatur konstan dan tekanan berubah. Panas laten penguapan dapat mendinginkan udara masuk dan karenanya meningkatkan kepadatan sehingga dapat mempengaruhi efisiensi volumetrik bahan bakar, yang pada akhirnya memberikan pengaruh kepada nilai-nilai efektif maksimal

tekanan pembakaran. Pada kenyataannya jumlah campuran bahan bakar yang masuk ke dalam silinder berbanding terbalik dengan temperatur, di mana dengan semakin rendahnya temperatur, bertambah tinggi panas laten penguapan bahan bakarnya

Panas penguapan (*heat of vaporization*) etanol juga tinggi, yakni 842 kJ/kg. Tingginya panas penguapan ini menyebabkan energi yang dipergunakan untuk menguapkan etanol lebih besar dibandingkan gasolin. Konsekuensi lanjut dari hal tersebut adalah temperatur puncak di dalam silinder akan lebih rendah pada pembakaran etanol dibandingkan dengan gasolin.

Rendahnya emisi NO, yang dalam kondisi atmosfer akan membentuk NO<sub>2</sub> yang bersifat racun, dipercaya sebagai akibat relatif rendahnya temperatur puncak pembakaran etanol di dalam silinder. Pada rasio kompresi 7, penurunan emisi NO<sub>x</sub> tersebut bisa mencapai 33 % dibandingkan terhadap emisi NO<sub>x</sub> yang dihasilkan pembakaran gasolin pada rasio kompresi yang sama [15]. Dari susunan molekulnya, etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) memiliki rantai karbon yang lebih pendek dibandingkan gasolin (memiliki rantai C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> dengan perbandingan antara atom H dan C adalah 2:1. Pendeknya rantai atom karbon pada etanol menyebabkan emisi HC pada pembakaran etanol relatif lebih rendah dibandingkan dengan gasolin, yakni berselisih hingga 130 ppm.

Dari paparan di atas, terlihat bahwa penggunaan etanol (sebagian atau seluruhnya) pada mesin Otto, positif menyebabkan kenaikan efisiensi mesin dan turunnya emisi CO, NO<sub>x</sub>, dan HC dibandingkan dengan penggunaan gasolin. Namun perlu dicatat bahwa emisi aldehid lebih tinggi pada penggunaan etanol, meski bahaya emisi aldehid terhadap lingkungan adalah lebih rendah daripada berbagai emisi gasolin. Selain itu, pada prinsipnya emisi CO<sub>2</sub> yang

dihasilkan pada pembakaran etanol juga akan dipergunakan oleh tumbuhan penghasil etanol tersebut. Sehingga berbeda dengan bahan bakar fosil, pembakaran etanol tidak menciptakan sejumlah CO<sub>2</sub> baru ke lingkungan.

Etanol murni akan bereaksi dengan karet dan plastik. Oleh karena itu, etanol murni hanya bisa digunakan pada mesin yang telah dimodifikasi. Dianjurkan untuk menggunakan karet fluorokarbon sebagai pengganti komponen karet pada mesin Otto konvensional. Selain itu, molekul etanol yang bersifat polar akan sulit bercampur secara sempurna dengan gasolin yang relatif non-polar, terutama dalam kondisi cair.

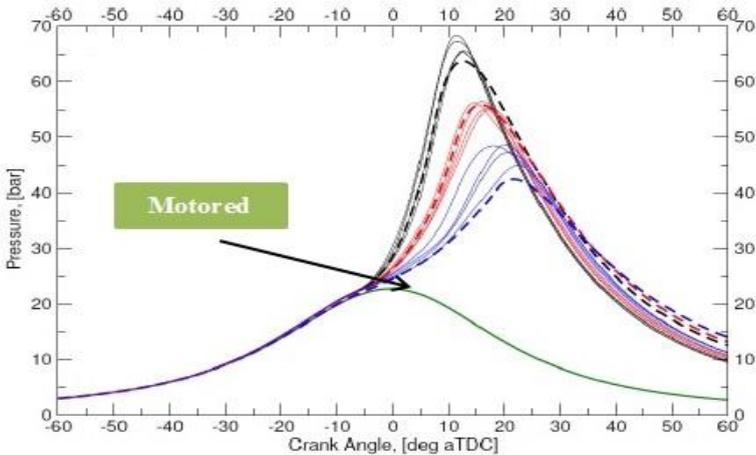
Proses pembakaran dimulai sebelum akhir langkah kompresi dengan percikan api dari busi. Kemudian, proses ini terus berlanjut dari awal langkah usaha dan berakhir setelah titik dalam siklus di mana puncak tekanan silinder terjadi. Jika *ignition timing* vs sudut engkol terlambat, maka meskipun piston bergerak selama langkah kompresi dan langkah usaha, tekanan selama siklus akan berkurang. Selain itu, ada risiko pembakaran terjadi sebelum katup buang membuka di akhir langkah usaha, dan ini mungkin menyebabkan katup buang terlalu panas. Sebaliknya, jika *ignition timing* terlalu dini, akan menyebabkan kenaikan tekanan sebelum akhir langkah kompresi dan daya output mesin akan berkurang. Dengan demikian, peningkatan kerja selama langkah kompresi lebih besar dari peningkatan kerja yang dilakukan pada piston selama langkah usaha. Juga, dengan *ignition timing* yang lebih awal tekanan puncak dan temperatur mungkin dapat menyebabkan *knocking*.

CCV dapat didefinisikan sebagai proses pembakaran yang tidak bisa diulang dari keseluruhan siklus yang terjadi [16]. Ini berarti bahwa ketika mesin *internal combustion* beroperasi, setiap pembakaran yang terjadi dalam silinder

selalu berbeda pada proses pembakarannya, dan hal ini memberikan efek penting pada mesin tersebut.

**Gambar 2.1**

Kurva *Cylinder Pressure vs. Crank Angle* [17]



Gambar 2.1 menunjukkan kurva tekanan silinder terhadap putaran sudut engkol dalam 5 siklus berturut-turut pada campuran stoikiometri, putaran mesin 1,000 rpm dan dengan *ignition timing*  $10^0$  sebelum titik mati atas (TDC). Seperti pada gambar bahwa tekanan maksimum untuk setiap siklus berbeda. Tekanan maksimum juga terjadi pada titik yang sedikit berbeda di setiap siklusnya. Alasan terjadinya adalah bahwa ada kemungkinan bahan bakar di silinder tidak terbakar pada tingkat yang sama.

CCV dalam proses pembakaran merupakan hal yang penting karena ada dua alasan. Pertama, karena *ignition timing* optimum diatur untuk "rata-rata siklus", apabila lebih cepat dari rata-rata siklus akan lebih efektif dari *advance ignition timing* dan apabila lebih lambat dari rata-rata siklus mengakibatkan keterlambatan *timing* nya, sehingga akan mengakibatkan kehilangan daya dan efisiensi. Kedua, hal ini adalah variasi siklik yang ekstrim yang membatasi operasi mesin. Siklus pembakaran yang cepat dengan *advance ignition*

*timing* kemungkinan akan menyebabkan *knocking*. Dengan demikian, siklus pembakaran yang cepat sangat memperhitungkan nilai oktan bahan bakar dan rasio kompresi. Sedangkan siklus pembakaran yang lambat, dimana *ignition timing* nya relatif lebih mundur dari nilai optimumnya, akan memungkinkan proses pembakarannya tidak lengkap. Sehingga siklus ini mengatur batas campuran kurus mesin atau membatasi jumlah *exhaust gas* yang di *recycle* (digunakan untuk kontrol emisi NO).

Disebabkan karena CCV, *ignition timing* dan rasio campuran udara dan bahan bakar harus selalu dikondisikan, yang belum tentu akan menghasilkan proses pembakaran yang optimal. Tekanan silinder yang bervariasi telah terbukti ada korelasinya dengan *brake torque*, yang secara langsung berhubungan dengan kenyamanan kendaraan. Pengurangan variasi siklik dalam pembakaran dan pengaturan tekanan dalam silinder sampai batas tertentu dapat membantu tingkat penggunaan bahan bakar dan emisi. Jika variasi siklik pembakaran dapat dikendalikan sehingga semua pembakaran dalam siklus menjadi baik, penghematan bahan bakar mungkin dapat dirasakan. Manfaat lain yang sangat penting yang berasal dari kontrol variasi siklik adalah mesin dapat ditingkatkan kestabilannya, terutama pada transmisi automatic dengan *lock up converter* ataupun pada transmisi manual, yang meredam variasi *torque* mesin. Kekasaran mesin juga mungkin dapat dikurangi.

## **B. Pengukuran CCV**

Secara umum, empat pengukuran CCV telah digunakan

1. *Exhaust gas*
2. *Flame*
3. *Combustion*
4. *Pressure*

Membahas tentang pengukuran karakteristik CCV, artinya secara umum membahas tentang beberapa pengukuran yang digunakan untuk mengetahui efek beberapa faktor pada CCV terhadap mesin. Oleh karena itu, sebagai dasar perbandingan, baik untuk mesin yang sama pada titik operasi yang berbeda atau untuk mesin yang berbeda pada titik operasi yang sama.

Parameter *exhaust gas* tidak banyak digunakan untuk mengkarakterisasi CCV, tetapi lebih sering digunakan untuk mendapatkan informasi tentang berbagai faktor yang mempengaruhi CCV. Parameter *flame front* telah diteliti secara rinci oleh beberapa peneliti tersebut adalah model pertumbuhan *flame kernel*, dan berfungsi dalam memeriksa penyebab CCV. Namun, variasi dalam *flame front* selalu dibandingkan dengan variasi tekanan atau *indicated mean effective pressure* (IMEP). Meskipun parameter *flame front* dipandang sebagai penyebab CCV, dan CCV sendiri banyak disebabkan oleh parameter lainnya, maka parameter *flame front* tidak terlalu dianggap sebagai penyebab CCV.

Parameter *combustion* meliputi beberapa faktor seperti tingkat maksimum *heat release*, *ignition delay*, *burn duration*, dan lain-lain. Parameter ini berhubungan dengan tekanan. Meskipun demikian, *heat release rate* atau *mass fraction burned* belum ditemukan untuk digunakan mengukur CCV. *Burn duration* menginformasikan variasi pembakaran yang terjadi yang dipengaruhi oleh *ignition delay* tetapi tidak banyak digunakan.

*Pressure* adalah parameter utama yang digunakan untuk mengukur CCV. Parameter tekanan ini merupakan data yang dibutuhkan yang dapat dengan mudah diukur dengan *pressure transducer*. Dengan asumsi data yang diperoleh yang cukup akurat, parameter berikut dapat digunakan untuk mengukur CCV:

1. Tekanan puncak dalam silinder ( $P_{max}$ ), dan sudut engkol saat  $P_{max}$ ,  $\theta_{P_{max}}$
2. *Rate* maksimum kenaikan tekanan,  $(dP/d\theta)_{max}$ , dan sudut engkol saat *rate* maksimum terjadi,  $(\theta_{(dP/d\theta)_{max}})$
3. IMEP individual siklus.

Meskipun mesin bekerja pada kondisi *steady state*, variasi tekanan selama proses pembakaran dapat terjadi terutama karena variasi dalam *flame development rate* dan durasi pembakaran siklus secara berturut-turut. Apabila pada beberapa siklus pembakaran terjadi pada kondisi yang optimal, hal itu mungkin terjadi lebih cepat atau lebih lambat untuk beberapa siklus lainnya. Siklus pembakaran yang lebih cepat memiliki nilai tekanan maksimum dalam silinder ( $P_{max}$ ) dibandingkan siklus yang lebih lambat, dan sudut engkol di mana tekanan puncak  $\theta_{P_{max}}$  terjadi mendekati ke TDC. Sebaliknya, apabila tingkat pembakaran menurun,  $P_{max}$  akan menurun juga tetapi  $\theta_{P_{max}}$  akan meningkat.

Keuntungan menggunakan tekanan puncak untuk mengukur CCV, selain kemudahan pengukuran, adalah bahwa tekanan puncak merespon variasi dalam fase pembakaran secara bertahap. Variasi tekanan puncak juga merespon variasi siklik pada laju pembakaran puncak. Namun puncaknya tekanan dipengaruhi oleh variasi pengisian silinder, dan harus diperhatikan dalam menghubungkan variasi siklik pada tekanan puncak hingga perambatan nyala bahwa sudut tekanan puncak tidak tergantung pada variasi pengisian dan hanya bergantung pada laju pembakaran massa, asalkan mesin beroperasi di wilayah linier gambar 2.1. Kondisi ini adalah tingkat kenaikan tekanan maksimum dan sudut di mana kenaikan tekanan terjadi. Tetapi kondisi lain juga harus dipertimbangkan karena biasanya terjadi *noise* pada sinyal tekanan.

Proses pembakaran sangat mempengaruhi CCV, dari berbagai ulasan [16], ada banyak faktor yang mempengaruhi, di mana penyebab umum yang lebih luas yang dapat mempengaruhi seperti faktor-faktor berikut ini:

1. Komposisi campuran: termasuk rasio udara-bahan bakar, jenis bahan bakar, campuran *inhomogeneity*, dan *residual fraction*
2. Faktor fisik: geometri ruang bakar dan rasio kompresi
3. Pengisian silinder
4. Faktor pengapian, yang selanjutnya dapat dibagi menjadi:
  - a. *ignition system* seperti jenis sistem, *spark igniter*, *ignition timing*, dan karakteristik *discharge*
  - b. *spark plug* seperti bentuk elektroda, orientasi elektroda, dan jumlah dan lokasi busi
5. Aliran di dalam silinder: intensitas dan skala turbulensi, rata-rata aliran pada celah busi, dan pola aliran secara keseluruhan, dan
6. Efek siklus sebelumnya.

Efek dari kontrol *ignition timing* untuk siklus yang berturut-turut pada variasi siklik diamati dengan menggunakan *varians* dan koefisien dari *varians*. IMEP dan Pmax merupakan parameter penting dan umum digunakan sebagai ukuran variasi siklik. Perlu diperhatikan bahwa Pmax juga merupakan sinyal umpan balik dalam sistem kontrol *loop* tertutup.

Tekanan pembakaran silinder merupakan indikator penting dari variasi siklik, yang diukur setiap siklus pada setiap putaran sudut engkol. Beberapa parameter penting terkait dengan tekanan silinder adalah; tekanan puncak dalam selinder (Pmax), dan sudut engkol di mana tekanan puncak terjadi (CA Pmax), dan *Indicated Mean Effective Pressure* (IMEP) dari satu siklus. Performa mesin yaitu daya

dan *torque* sangat tergantung pada IMEP, dan variasi dalam IMEP dapat menyebabkan fluktuasi *torque*.

Pmax adalah ukuran tingkat kenaikan tekanan karena pembakaran. Jika pembakaran lebih cepat, tingkat kenaikan tekanan yang lebih tinggi dapat terjadi. Pmax yang ditunjukkan bergantung pada perubahan dalam fase pembakaran dan tingkat pembakaran. Besarnya variasi tergantung pada apakah pembakaran lebih cepat atau lebih lambat. Pembakaran lebih cepat akan menghasilkan Pmax yang lebih tinggi. Pmax akan cenderung terjadi lebih dekat ke TDC, sedangkan siklus pembakaran yang lebih lambat akan memiliki Pmax yang lebih rendah dan CA Pmax akan menjauh dari TDC.

Koefisien variasi dari tekanan rata-rata efektif ( $COV_{IMEP}$ ) adalah yang paling sering dan secara luas digunakan untuk mengevaluasi CCV.  $COV_{IMEP}$  didefinisikan sebagai standar deviasi dalam IMEP dibagi dengan IMEP rata-rata dan biasanya dinyatakan dalam persen sebagai berikut:  $COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{imep} \times 100$  (2)

*Indicated Mean Effective Pressure* (IMEP) mudah dihitung dan menggambarkan ukuran hasil kerja dari siklus mesin. IMEP didefinisikan sebagai berikut:  $imep = \frac{W_c}{V_d}$  (3) di mana  $V_d$  adalah volume langkah mesin dan  $V_c$  adalah kerja yang dihasilkan dari setiap siklus mesin, yang didefinisikan sebagai berikut:  $W_c = \oint PdV$  (4)

## C. Performa Motor Otto

### 1. Brake Horse Power

Performa dari mesin dapat diketahui dari nilai *Brake Horse Power* (BHP), dimana BHP adalah suatu parameter untuk menghitung nilai tenaga yang dihasilkan dari suatu mesin yang diukur dari poros mesin. Daya ini merupakan daya yang dihasilkan mesin kepada beban-

beban, misal: inersia mobil, gesekan udara, dan lain-lain. Nilai BHP lebih sedikit dari pada daya yang dibangkitkan oleh gas pembakaran di dalam silinder, hal ini dikarenakan terjadinya gesekan mekanik dan beban-beban tambahan, misal: pompa oli, kompresor AC, dan lain-lain. Salah satu cara untuk mengukur BHP adalah dengan alat dynamometer. Dynamometer mengukur *torque* (T) yang dihasilkan oleh mesin pada putaran tertentu. Daya (tenaga) yang dihasilkan kemudian dapat dihitung dengan persamaan:  $BHP = 2. \pi. n. T$  (5)

dimana:

n adalah putaran mesin (rpm)

T adalah *torque* mesin (N.m)

## 2. *Torque*

*Torque* adalah kemampuan mesin untuk menggerakkan atau memindahkan mobil/motor dari kondisi diam hingga berjalan. *Torque* berkaitan dengan akselerasi. Pada saat kita merasakan tubuh kita terhempas ke belakang saat berakselerasi, menunjukkan besarnya angka *torque* pada mesin tersebut. Rumus *torque* adalah sebagai berikut:  $T = F. L$  (6)

dimana:

F adalah gaya yang bekerja (N)

L adalah panjang lengan (m)

## 3. *Specific Fuel Consumption (SFC)*

*Specific fuel consumption* (SFC) adalah parameter yang biasa digunakan pada motor pembakaran dalam untuk menggambarkan pemakaian bahan bakar. SFC didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran massa bahan bakar terhadap daya yang dihasilkan (output). Dapat pula dikatakan bahwa SFC menyatakan seberapa efisien bahan bakar yang disuplai ke mesin untuk dijadikan daya output. Nilai SFC yang rendah mengindikasikan pemakaian bahan bakar yang irit, oleh

sebab itu, nilai SFC yang rendah sangat diinginkan untuk mencapai efisiensi bahan bakar.  $SFC = \frac{m}{BHP}$  (7)

dimana:

m adalah laju aliran massa bahan bakar (kg/s)

BHP adalah *brake horse power* (watt)



# BAB 3

## SPECIFIC FUEL CONSUMPTION

### A. Heat Release

*Heat release rate* pada dasarnya adalah nilai kalor yang dilepaskan per satuan waktu pada suatu sampel akibat adanya reaksi eksotermik setelah energi aktivasinya terlewati. *Heat release rate* ini merupakan variabel penting untuk menggambarkan hasil pembakaran.

Saat menganalisa mesin pembakaran dalam, tekanan silinder selalu menjadi diagnostik eksperimen yang penting karena hubungannya langsung dengan pembakaran dan proses yang menghasilkan kerja. Tekanan silinder mencerminkan proses pembakaran yang melibatkan kerja piston yang dihasilkan oleh gas (karena perubahan dalam volume silinder), perpindahan panas ke dinding ruang bakar serta aliran massa dalam dan keluar dari celah-celah antara piston, ring piston, dan *liner* silinder. Jadi, untuk mengetahui hasil yang akurat bagaimana proses pembakaran menyebar melalui ruang pembakaran dan masing-masing proses ini, harus terkait dengan tekanan silinder [16].

Tekanan silinder ( $p$ ) diperoleh sesuai dengan posisi sudut poros engkol ( $\theta$ ) yang digunakan untuk menghitung *heat release rate* ( $dQ/d\theta$ ) sesuai dengan hukum pertama Termodinamika berdasarkan asumsi proses polytropic sebagai berikut:

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{n}{n-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{n-1} p \frac{dP}{d\theta} \quad (8)$$

di mana  $V$  adalah volume ruang bakar dan  $n$  adalah indeks polytropik. Indeks polytropik  $n$  dapat dihitung berdasarkan tekanan silinder dan volume ruang bakar melalui asumsi proses polytropic  $pV^n = \text{konstan}$ , pada langkah usaha di mana pelepasan panas terjadi.

## **B. Polutan Pada Aliran Gas Buang**

Bahan pencemar (polutan) yang berasal dari kendaraan bermotor dibedakan menjadi polutan primer dan sekunder. Polutan primer seperti karbon monoksida (CO), sulfur oksida ( $\text{SO}_x$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) dan hidrokarbon (HC) langsung dibuang ke udara bebas dan mempertahankan bentuknya seperti pada saat pembuangan. Polutan sekunder seperti ozon ( $\text{O}_2$ ) adalah polutan yang terbentuk di atmosfer melalui reaksi fotokimia, hidrolisis atau oksidasi.

### **1. Karbon Monoksida (CO)**

CO selalu terdapat di dalam gas buang pada saat proses penguraian dan hanya ada pada *muffler*. CO merupakan produk dari pembakaran yang tidak tuntas yang disebabkan karena tidak seimbangnya jumlah udara pada rasio udara bahan bakar (AFR) atau waktu penyelesaian pembakaran yang tidak tepat. Pada campuran kaya, konsentrasi CO akan meningkat dikarenakan pembakaran yang tidak sempurna untuk menghasilkan  $\text{CO}_2$ . Pada beberapa hasil, konsentrasi CO yang terukur lebih besar dari konsentrasi keseimbangan. Hal ini mengindikasikan bahwa terjadi pembentukan yang tidak sempurna pada langkah ekspansi.

CO dapat diubah dengan mudah menjadi  $\text{CO}_2$  dengan bantuan sedikit oksigen dan panas. Saat mesin bekerja dengan AFR yang tepat, emisi CO pada ujung knalpot berkisar 0.5 % sampai 1 % untuk mesin yang dilengkapi dengan sistem injeksi, atau sekitar 2.5 % untuk mesin yang masih menggunakan karburator. Dengan

bantuan *air injection system* atau *catalytic converter* (CC) pada mobil, maka CO dapat dibuat serendah mungkin mendekati 0 %. Namun pada kenyataannya kadar CO akan selalu terdapat pada gas buang walaupun pada campuran yang kurus sekalipun.

Apabila AFR sedikit saja lebih kaya dari angka idealnya (AFR ideal =  $\lambda = 1.0$ ) maka emisi CO akan naik secara drastis. Jadi tingginya angka CO menunjukkan bahwa AFR terlalu kaya dan ini bisa disebabkan antara lain karena masalah di *fuel injection system* seperti *fuel pressure* yang terlalu tinggi, sensor temperatur mesin yang tidak normal, *air filter* yang kotor, *positif crankcase ventilation* (PCV) yang tidak normal, karburator yang kotor atau setelahnya yang tidak tepat.

Persentase CO pada gas buang meningkat pada saat *idle* dan menurun seiring dengan bertambahnya kecepatan dan pada saat kecepatan konstan. Pada saat perlambatan dimana terjadi penutupan *throttle* yang menyebabkan berkurangnya suplai oksigen ke mesin akan mengakibatkan tingginya kadar CO yang dihasilkan.

## 2. Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Konsentrasi CO<sub>2</sub> menunjukkan secara langsung status proses pembakaran di ruang bakar. Semakin tinggi maka semakin baik. Saat AFR berada di angka ideal, emisi CO<sub>2</sub> berkisar antara 12 % sampai 15 %. Apabila AFR terlalu kurus atau terlalu kaya, maka emisi CO<sub>2</sub> akan turun secara drastis. Apabila CO<sub>2</sub> berada dibawah 12 %, maka kita harus melihat emisi lainnya yang menunjukkan apakah AFR terlalu kaya atau terlalu kurus.

Perlu diingat bahwa sumber dari CO<sub>2</sub> ini hanya ruang bakar dan CC. Apabila CO<sub>2</sub> terlalu rendah tapi CO dan HC normal, menunjukkan adanya kebocoran *exhaust pipe*.

### 3. Oksigen (O<sub>2</sub>)

Konsentrasi dari oksigen di gas buang kendaraan berbanding terbalik dengan konsentrasi CO<sub>2</sub>. Untuk mendapatkan proses pembakaran yang sempurna, maka kadar oksigen yang masuk ke ruang bakar harus mencukupi untuk setiap molekul HC. Untuk mengurangi emisi HC, maka dibutuhkan sedikit tambahan udara atau oksigen untuk memastikan bahwa semua molekul bensin dapat “bertemu” dengan molekul oksigen untuk bereaksi dengan sempurna. Ini berarti AFR 14.7:1 ( $\lambda = 1.0$ ) sebenarnya merupakan kondisi yang sedikit kurus. Inilah yang menyebabkan oksigen dalam gas buang akan berkisar antara 0.5 % sampai 1 %. Pada mesin yang dilengkapi dengan CC, kondisi ini akan baik karena membantu fungsi CC untuk mengubah CO dan HC menjadi CO<sub>2</sub>.

Mesin tetap dapat bekerja dengan baik walaupun AFR terlalu kurus bahkan hingga AFR mencapai 16:1. Tapi dalam kondisi seperti ini akan timbul efek lain seperti mesin cenderung *knocking*, temperatur mesin bertambah dan emisi senyawa NO<sub>x</sub> juga akan meningkat drastis.

Normalnya konsentrasi oksigen di gas buang adalah sekitar 1.2 % atau lebih kecil bahkan mungkin 0 %. Tapi kita harus berhati-hati apabila konsentrasi oksigen mencapai 0 %. Ini menunjukkan bahwa semua oksigen dapat terpakai semua dalam proses pembakaran dan ini dapat berarti bahwa AFR cenderung kaya. Dalam kondisi demikian, rendahnya konsentrasi oksigen akan berbarengan dengan tingginya emisi CO. Apabila konsentrasi oksigen tinggi dapat berarti AFR terlalu kurus tapi juga dapat menunjukkan beberapa hal lain. Apabila dibarengi dengan tingginya CO dan HC, maka pada mesin yang dilengkapi dengan CC berarti CC mengalami kerusakan. Untuk mesin yang tidak dilengkapi dengan

CC, bila oksigen terlalu tinggi dan lainnya rendah berarti ada kebocoran di *exhaust system*.

#### 4. Hidrokarbon (HC)

Emisi HC yang tidak terbakar berkaitan langsung dengan pembakaran yang tidak sempurna. Jadi setiap HC yang terdapat di gas buang kendaraan menunjukkan adanya bahan bakar yang tidak terbakar dan terbuang bersama sisa pembakaran. Apabila senyawa HC terbakar sempurna (bereaksi dengan oksigen) maka hasil reaksi pembakaran tersebut adalah karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O). Bentuk emisi HC dipengaruhi oleh banyak variabel disain dan operasi. Salah satunya dapat disebabkan karena penyalaan yang tidak stabil (*misfire*). Oksidasi dari hidrokarbon merupakan proses rantai dengan hasil lanjutan berupa aldehyd. Beberapa jenis aldehyd bersifat stabil dan keluar bersama gas buang. Sumber utama dari pembentukan HC adalah *wall quenching* yang diamati pada saat api menjalar ke arah dinding, terdapat lapisan tipis yang tidak terjadi reaksi kimia kecuali terjadinya pemecahan bahan bakar. Lapisan tipis ini mengandung HC yang tidak terbakar atau disebut juga *quench distance*.

Besarnya *quench distance* ini bervariasi antara 0.008 sampai 0.038 cm yang dipengaruhi oleh temperatur campuran, tekanan, AFR, temperatur permukaan dinding dan endapan pembakaran. Besarnya konsentrasi HC di dalam gas buang sama dengan besar konsentrasi CO, yaitu tinggi pada saat campuran kaya dan berkurang pada titik temperatur tertinggi.

Untuk mesin yang tidak dilengkapi dengan CC, emisi HC yang dapat ditoleransi adalah 500 ppm dan untuk mesin yang dilengkapi dengan CC, emisi HC yang dapat ditoleransi adalah 50 ppm. Emisi HC ini dapat ditekan dengan cara memberikan tambahan panas dan oksigen di luar ruang bakar untuk menuntaskan proses

pembakaran. Proses injeksi oksigen tepat setelah *exhaust port* akan menekan emisi HC secara drastis. Saat ini, beberapa mesin sudah dilengkapi dengan *electronic air injection reaction pump* yang langsung bekerja saat *cold-start* untuk menurunkan emisi HC sesaat sebelum CC mencapai temperatur kerja ideal.

Apabila emisi HC tinggi, menunjukkan ada 3 kemungkinan penyebabnya yaitu CC yang tidak berfungsi, AFR yang tidak tepat (terlalu kaya) atau bahan bakar tidak terbakar dengan sempurna di ruang bakar. Apabila mesin dilengkapi dengan CC, maka harus dilakukan pengujian terlebih dahulu terhadap CC dengan cara mengukur perbedaan temperatur antara *inlet* CC dan *outlet* nya. Seharusnya temperatur di *outlet* akan lebih tinggi minimal 10 % dari pada *inlet* nya.

Apabila CC bekerja dengan normal tapi HC tetap tinggi, maka hal ini menunjukkan gejala bahwa AFR yang tidak tepat atau terjadi *misfire*. AFR yang terlalu kaya akan menyebabkan emisi HC menjadi tinggi. Ini biasanya disebabkan antara lain kebocoran *fuel pressure regulator*, setelan karburator tidak tepat (tipe karburator), *filter* udara yang tersumbat, sensor temperatur mesin yang tidak normal dan sebagainya yang dapat membuat AFR terlalu kaya. *Injector* yang kotor atau *fuel pressure* yang terlalu rendah dapat membuat butiran gasolin menjadi terlalu besar untuk terbakar dengan sempurna dan ini juga akan membuat emisi HC menjadi tinggi. Apapun alasannya, AFR yang terlalu kaya juga akan membuat emisi CO menjadi tinggi dan bahkan menyebabkan *outlet* dari CC mengalami *overheat*, tetapi CO dan HC yang tinggi juga bisa disebabkan oleh bocornya pelumas ke ruang bakar.

Penyebab *misfire* antara lain adalah pengapian yang tidak baik, waktu pengapian yang terlalu mundur, kebocoran udara di sekitar *intake manifold* atau *mechanical*

*problem* yang menyebabkan angka kompresi mesin rendah. Untuk mesin yang dilengkapi dengan sistem *electronic fuel injection* (EFI) dan CC, gejala *misfire* ini harus segera diatasi karena apabila didiamkan, *engine control unit* (ECU) akan terus menerus berusaha membuat AFR menjadi kaya karena membaca bahwa masih ada oksigen yang tidak terbakar. Akibatnya CC akan mengalami *overheat*.

### C. Etanol

Etanol ( $C_2H_5OH$ ) disebut juga dengan etil alkohol adalah larutan kimia yang diproduksi dari fermentasi tanaman yang mengandung pati seperti ubi kayu, ubi jalar, jagung, dan sagu, yang merupakan tanaman pangan yang banyak ditanam hampir di seluruh wilayah Indonesia, sehingga jenis tanaman tersebut merupakan tanaman yang potensial untuk dikembangkan sebagai sumber bahan baku pembuatan bioetanol.

Secara umum bioetanol atau etanol dapat digunakan sebagai bahan baku industri turunan alkohol, campuran untuk minuman, bahan dasar industri farmasi, campuran bahan bakar untuk kendaraan. Mengingat pemanfaatan etanol beraneka ragam, sehingga *grade* etanol yang dimanfaatkan harus berbeda sesuai dengan penggunaannya. Untuk etanol yang mempunyai *grade* 90 - 96.5 % vol dapat digunakan pada industri, sedangkan etanol yang mempunyai *grade* 96 - 99.5 % vol dapat digunakan sebagai bahan dasar industri farmasi. Lain halnya dengan besarnya *grade* etanol yang bisa dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar untuk kendaraan, kadar alkoholnya mempunyai *grade* sebesar 99.5 - 100 % vol.

Produksi etanol dengan bahan baku tanaman yang mengandung pati atau karbohidrat, dilakukan melalui proses konversi karbohidrat menjadi gula (glukosa) larut air. Glukosa dapat dibuat dari pati-patian, proses pembuatannya

dapat dibedakan berdasarkan zat pembantu yang dipergunakan, yaitu hidrolisis asam dan hidrolisis enzim. Berdasarkan kedua jenis hidrolisis tersebut, saat ini hidrolisis enzim lebih banyak dikembangkan, sedangkan hidrolisis asam (misalnya dengan asam sulfat) kurang dapat berkembang. Dalam proses konversi, karbohidrat menjadi gula (glukosa) larut air dilakukan dengan penambahan air dan enzim, kemudian dilakukan proses peragian atau fermentasi gula menjadi etanol dengan menambahkan *yeast* atau ragi. Reaksi yang terjadi pada proses produksi etanol secara sederhana disajikan pada reaksi berikut :  $H_2O + (C_6H_{10}O_5)_n \rightarrow n C_6H_{12}O_6$   $(C_6H_{12}O_6)_n \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$

Selain etanol dapat diproduksi dari bahan baku tanaman yang mengandung pati atau karbohidrat, juga dapat diproduksi dari bahan tanaman yang mengandung selulosa, namun dengan adanya lignin mengakibatkan proses penggulaannya menjadi lebih sulit, sehingga pembuatan etanol dari selulosa tidak direkomendasikan. Meskipun teknik produksi etanol merupakan teknik yang sudah lama diketahui, namun etanol untuk bahan bakar kendaraan memerlukan etanol dengan karakteristik tertentu dan saat ini mengenai proses produksi etanol tersebut masih diperlukan penelitian lebih lanjut.

Di dalam perdagangan kualitas etanol dikenal dengan beberapa tingkatan [19], yaitu:

**a. Etanol (Alkohol) Teknis (96.5 °GL)**

Digunakan terutama untuk kepentingan industri sebagai bahan pelarut organik, bahan baku maupun bahan antara produksi berbagai senyawa organik lainnya. Alkohol teknis biasanya terdenaturasi memakai  $\frac{1}{2}$  -1 % piridin dan diberi warna memakai 0.0005 % metal violet.

**b. Etanol (Alkohol) Murni (96.0 - 96.5 °GL)**

Digunakan terutama untuk kepentingan farmasi dan konsumsi misal untuk minuman keras.

**c. Etanol (Alkohol) Absolut ( 99.7 – 99.8 °GL)**

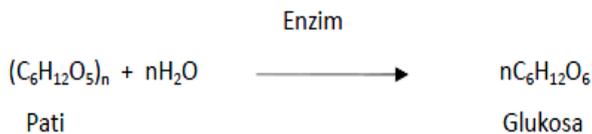
Digunakan dalam pembuatan sejumlah besar obat-obatan dan juga sebagai bahan pelarut atau sebagai bahan dalam pembuatan senyawa-senyawa lain dalam skala laboratorium. Alkohol jenis ini disebut *fuel grade* etanol (FGE) atau *anhydrous* etanol yaitu etanol yang bebas air atau hanya mengandung air minimal. Alkohol absolut terdenaturasi digunakan sebagai bahan bakar kendaraan bermotor.



# BAB 4

## PEMBUATAN ETANOL SECARA FERMENTASI

Proses fermentasi dimaksudkan untuk mengubah glukosa menjadi etanol dengan menggunakan *yeast*. Alkohol yang diperoleh dari proses fermentasi ini biasanya alkohol dengan kadar 8 - 10 % volume. Bahan baku untuk pembuatan etanol secara fermentasi ini dapat berasal dari pati, selulosa dan juga bahan-bahan yang mengandung gula. Reaksi pembuatan etanol dengan fermentasi sebagai berikut:



Bahan Baku yang sering digunakan untuk pembuatan etanol dikelompokkan menjadi tiga kelompok, yaitu:

1. Bahan bergula (*surgary materials*):  
Tebu dan sisa produknya (molase, bagase), gula bit, tapioca, kentang manis, sorghum manis, dan sebagainya.
2. Bahan-bahan berpati (*starchy materials*):  
Tapioka, maizena, barley, gandum, padi, kentang, jagung dan ubi kayu.
3. Bahan - bahan *lignosellulosa* (*lignosellulosic materials*):  
Sumber *selulosa* dan *lignoselulosa* berasal dari limbah pertanian dan kayu. Dari berbagai bahan baku tersebut

akan dipilih bahan baku yang paling efisien untuk dibuat etanol. Salah satu pertimbangan yang sering digunakan adalah besarnya konversi biomassa menjadi etanol seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.1

**Tabel 4.1**  
Konversi Biomassa Menjadi Bioetanol [20]

Sumber	Berat (kg)	Kandungan Pati (kg)	Jumlah Bioetanol (liter)	Perbandingan Hasil
Ubi Kayu	1.000	240 -300	166,5	6,5 : 1
Ubi Jalar	1.000	150 - 200	125	8 : 1
Jagung	1.000	600 - 700	400	2,5 : 1
Sagu	1.000	120 - 160	90	12 : 1
Tetes Tebu	1.000	450 - 520	250	4 : 1
Tebu	1.000	110	67	15 : 1

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa bahan baku yang memiliki efisiensi tertinggi adalah jagung, kemudian disusul dengan tetes tebu dan ubi kayu, sedangkan tebu memiliki efisiensi paling rendah. Biaya pengolahan etanol dari jagung atau bahan berpati biasanya relatif mahal karena membutuhkan proses dan peralatan tambahan sebelum proses fermentasi.

## A. Proses Distilasi

Secara sederhana distilasi adalah proses pemisahan bahan cairan berdasarkan perbedaan titik didihnya. Distilasi etanol berarti memisahkan etanol dengan air. Air mendidih pada temperatur 100 °C. Pada temperatur ini air yang berada pada bentuk atau fase cair akan berubah menjadi uap atau fase gas. Bila terus dipanaskan temperatur air tidak akan naik (asal tekanan sama). Air akan terus berubah jadi uap dan lama kelamaan habis. Etanol mendidih pada tempeartur 79 °C. Seperti halnya air, etanol berubah dari cair menjadi uap.

Ada perbedaan temperatur cukup besar dan ini dijadikan dasar untuk memisahkan etanol dari air.

Jadi prinsip kerja distilasi etanol sebagai berikut pertama cairan etanol dan air dipanaskan sampai temperatur titik didih etanol dengan alat evaporasi, kurang lebih 79 °C, tapi biasanya pada temperatur 80-81 °C. Etanol akan menguap dan melewati kondenser (*heat exchanger*), temperatur uap etanol diturunkan sampai di bawah titik didihnya. Etanol akan berubah lagi dari fase gas ke fase cair. Selanjutnya etanol yang sudah mencair ditampung di tabung penampungan.

Dalam proses ini pengaturan temperatur adalah bagian paling penting. Kalau kita bisa mempertahankan temperatur pada titik didih etanol, kadar etanol yang diperoleh akan semakin tinggi. Meskipun kita sudah mempertahankan temperatur sebaik mungkin. Uap air akan selalu terbawa, ada sedikit air yang ikut menguap. Ini yang menyebabkan distilasi tidak bisa menghilangkan semua air. Kadar maksimal yang bisa diperoleh sekitar 95 %. Sisa air yang 5 % bisa dihilangkan dengan proses dehidrasi.

#### **a. *Evaporator***

*Evaporator* adalah alat penukar kalor yang digunakan untuk menguapkan dua jenis fluida cair yang berbeda seperti etanol dengan air murni. Dalam proses distilasi, *evaporator* memiliki peranan penting dalam memisahkan dua fluida cair yang berbeda titik didihnya. Fluida dengan titik didih lebih rendah akan menguap lebih awal dan uap tersebut kemudian disalurkan ke kondenser. Dalam kondenser ini suhu panas uap diturunkan temperaturnya hingga fluida berubah kembali menjadi fase cair. Fase cair yang terbentuk akan memiliki konsentrasi lebih tinggi karena air murni dengan titik didih lebih tinggi belum menguap. Apabila air murni ikut menguap maka konsentrasi fluida etanol menjadi rendah.

## **b. Separator**

*Separator* merupakan alat untuk memisahkan fluida yang tidak saling larut karena perbedaan densitasnya. Pada umumnya dalam distilasi *separator* bukanlah komponen utama, namun dapat ditambahkan dalam proses distilasi guna mendapatkan kadar pemurnian yang lebih baik. Dalam penelitian ini distilasi yang dipakai adalah dengan metode gravitasi atau laju aliran vertikal.

Dalam keadaan murni air memiliki titik didih  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sedangkan etanol  $78.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ketika campuran air dan etanol dididihkan, maka etanol akan menguap lebih dahulu dari pada air. Etanol yang telah menjadi uap akan melewati *separator*, air yang densitasnya lebih tinggi ( $1\text{ kg/L}$ ) dibandingkan dengan etanol ( $0.785\text{ kg/L}$ ) akan berada di bawah. Jaring - jaring yang terpasang pada *separator* akan menghambat partikel air lewat. Sehingga nantinya kadar etanol hasil distilasi menjadi lebih tinggi.

## **c. Heat Exchanger**

*Heat Exchanger* memiliki fungsi seperti alat penukar panas (kondenser), yaitu untuk memindahkan panas etanol dengan fase uap sehingga fase etanol menjadi fase cair kembali.

## **d. Keseimbangan Uap Liquid**

Sulit mendiskusikan distilasi tanpa menunjukan beberapa implikasi keseimbangan uap-liquid (*Vapor Liquid Equilibrium/VLE*) pada disain distilasi. Prinsip-prinsip keseimbangan uap liquid harus dimengerti oleh praktisi-praktisi distilasi. Data-data termodinamika yang dapat diandalkan sangat penting untuk disain yang akurat atau analisa kolom distilasi.

Untuk suatu campuran biner, tekanan dan temperatur menentukan komposisi keseimbangan uap-liquid.

e. *Nilai K dan Relative Volatility*

Nilai-K adalah sebuah ukuran kecenderungan suatu komponen *i* menguap. Jika nilai-K tinggi, komponen cenderung berkonsentrasi dalam uap; jika rendah, komponen cenderung berkonsentrasi dalam cair. Nilai-K adalah sebuah fungsi temperatur, tekanan, dan komposisi. *Relative volatility* komponen *i* dan *j* didefinisikan sebagai

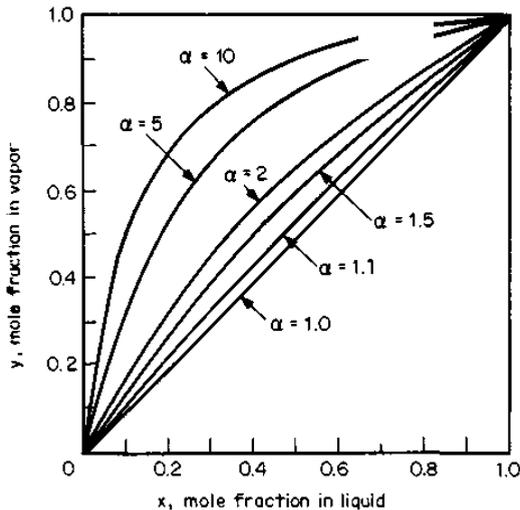
$$\alpha_{ij} = \frac{\text{Nilai-K komponen } i}{\text{Nilai-K komponen } j} \quad (9)$$

Distilasi adalah teknik memisahkan komponen-komponen menurut *relative volatility*. *Relative volatility* adalah sebuah ukuran kemudahan pemisahan. Definisi ini membuat *relative volatility* sebagai rasio antara kecenderungan menguap dari dua komponen. Untuk sistem biner, *relative volatility* didefinisikan menjadi

$$\alpha_{1,2} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{y_1(1-x_1)}{x_1(1-y_1)} \quad (10)$$

**Gambar 4.1**

Efek *Relatif Volatility* pada Konsentrasi Komponen yang Lebih Volatil Dalam Uap [21]  
(a)



Sebuah sistem yang ideal adalah jika uap mentaati hukum gas ideal dan liquid mentaati hukum Raoult. Sebuah larutan ideal mentaati hukum Raoult, yang menyatakan tekanan parsial sebuah komponen di dalam larutan sama dengan produk fraksi molnya.

$$K_i = \frac{P_i^{sat}(T \text{ only})}{P} \quad (11)$$

$$y_i = K_i x_i \quad (12)$$

Diagram fase digunakan untuk menjelaskan sistem-sistem biner dengan memplot dua dari tiga variabel-komposisi, temperatur, dan tekanan pada nilai konstan. Plot yang paling sering digunakan adalah plot T-x dan plot x-y. Ketika titik uap dan titik embun dapat dihitung untuk komponen-komponen campuran, kurva-kurva cair satu rasi dan uap satu rasi dapat diplot pada diagram T-x.

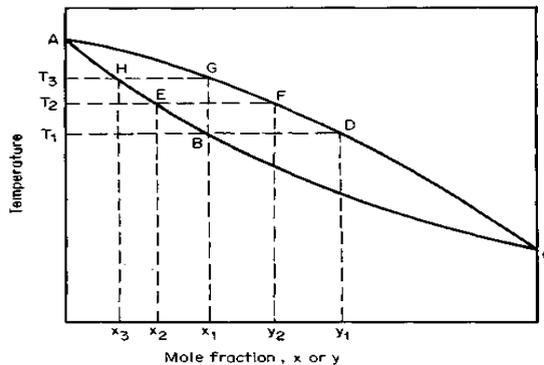
#### f. Diagram Fase

Diagram fase digunakan untuk menjelaskan sistem biner dengan memplot dua dari tiga variabel - komposisi, temperatur, dan tekanan, pada nilai yang tetap salah satu variabel tersebut. Plot diagram fase yang paling sering digunakan adalah plot T-x dan plot x-y. Kurva ABC menunjukkan hubungan komposisi-temperatur untuk *liquid* jenuh. Pada temperatur T1 dan komposisi *liquid* x1, titik B adalah kondisi dimana *liquid* siap untuk mulai menguap. Titik B adalah titik didih.

Ketika *liquid* mulai menguap pada temperatur T1 (titik B), uap pertama terbentuk memiliki komposisi y1 dan oleh karena itu pada titik embunnya. Ketika temperatur meningkat lagi, lebih banyak komponen yang lebih berat menguap. Kuantitas uap yang terbentuk meningkat, tapi fraksi mol komponen yang ringan menurun dalam uap dan *liquid*. Pada temperatur T2, komposisi *liquid* adalah x2 dan komposisi uap adalah y2. Temperatur meningkat lagi menjadi T3 akan menguapkan semua sisa *liquid*. Komposisi

uap sekarang menjadi  $x_1$ , *liquid* yang diuapkan memiliki komposisi  $x_3$ . *Liquid* selalu berjalan sepanjang kurva titik didihnya (BEH) sementara uap selalu berjalan sepanjang kurva titik embunnya (DFG). Oleh karena itu, di dalam distilasi, *liquid* titik didih selalu dalam kesetimbangan dengan uap titik embun. Ketika titik didih dan titik embun telah dapat dihitung untuk komponen-komponen campuran, kurva-kurva *liquid* dan uap jenuh dapat diplot seperti pada gambar 2.3. Dari data-data ini, nilai  $x$  dan  $y$  bisa didapatkan untuk sejumlah temperatur dan digunakan untuk membuat diagram  $x$ - $y$ . Dengan cara yang sama, perhitungan titik didih menghasilkan komposisi kesetimbangan uap, memberikan nilai  $x$  dan  $y$ .

**Gambar 4.2**  
Diagram T-x



## B. Perhitungan Titik Didih dan Titik Embun

Untuk memperkirakan jumlah tingkatan, temperatur kondenser dan *reboiler*, diperlukan perhitungan titik didih dan titik embun. Sebuah *liquid* jenuh adalah pada titik didihnya (peningkatan temperatur akan menyebabkan terbentuknya uap), dan sebuah uap jenuh adalah pada titik embunnya (penurunan temperatur akan menyebabkan terbentuknya *liquid*). Titik didih dan titik embun dapat

dihitung dari pengetahuan kesetimbangan uap-liquid sebuah sistem.

Titik didih sebuah campuran dihitung dari:  
 $\sum_{i=1}^c K_i x_i = 1.0$  (13) Titik embun sebuah campuran dihitung

dari:  $\sum_{i=1}^c \frac{y_i}{K_i} = 1.0$  (14)

Metode perhitungan pada temperatur konstan adalah sebagai berikut:

1. Menentukan temperatur
2. Menghitung nilai K
3. Menghitung jumlah  $K_i x_i$  untuk perhitungan titik didih. Jika lebih kecil dari satu, tingkatkan temperatur. Jika lebih besar dari satu, turunkan temperatur. Ulangi langkah 2 dan 3 sampai *convergen*.

Proses disain kolom menentukan separasi, tekanan kolom, *reflux*, jumlah tingkatan, dan titik umpan. Kolom distilasi dioptimasi selama proses disain, dan lebih banyak lagi saat operasi. Kolom yang tidak mempunyai produk sampingan terikat dengan dua persamaan: kesetimbangan massa dan kesetimbangan komponen, yaitu

$$F = B + D \quad (15)$$

$$Fz = Bx_B + Dx_D \quad (16)$$

F adalah laju umpan, B adalah laju bawah, dan D adalah laju distilat. Komposisi umpan, bawah, dan distilasi secara berturut-turu adalah  $z$ ,  $x_B$ , dan  $x_D$ . Proses disain berjalan di dalam langkah-langkah di bawah ini:

1. Menentukan separasi. Jika komposisi produk atau keperluan aliran produk tidak didefinisikan, tentukan dengan optimasi kesetimbangan material dan energi.
2. Tentukan tekanan kolom.
3. Menentukan *reflux* minimum dan jumlah tingkatan minimum.
4. Mencari tingkatan umpan optimum.

5. Memilih tiga rasio aktual dari *reflux* minimum. Untuk masing-masing, hitung jumlah tingkatan dan ukuran kolom. Tentukan yang paling ekonomis.

Perhitungan untuk mendapatkan nilai *reflux* dan jumlah tingkatan menggunakan metode *shortcut*. Jumlah tingkatan minimum diberikan oleh persamaan Fenske.  $N_{min} = \ln S / \ln (\alpha_{LK/HK})_{av}$  (17)  $S$  adalah nilai separasi,  $(\alpha_{LK/HK})_{av}$  adalah rata-rata *relative volatility* komponen yang ringan (etanol) terhadap komponen yang berat (air).

Dimana  $S$  diberikan oleh persamaan di bawah ini

$$\ln S = \ln \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_B \right] \quad (18)$$

$(x_{LK}/x_{HK})_D$  adalah perbandingan komposisi *liquid* komponen yang ringan (etanol) dengan komposisi *liquid* komponen yang berat (air) pada distilat. Sedangkan  $(x_{HK}/x_{LK})_B$  adalah perbandingan komposisi *liquid* komponen yang berat (air) dengan komposisi *liquid* komponen ringan (etanol).  $(\alpha_{LK/HK})_{av}$  biasanya didapat dari pendekatan di bawah ini:

1. Evaluasi  $\alpha_{av}$  pada  $T_{av} = (T_{top} + T_{bot})/2$
2.  $\alpha_{av} = (\alpha_{top} + \alpha_{bot})/2$
3.  $\alpha_{av} = \alpha$  pada temperatur umpan *tray*
4.  $\alpha_{av} = \sqrt{\alpha_{top}\alpha_{bot}}$
5.  $\alpha_{av} = \sqrt[3]{\alpha_{top}\alpha_{min}\alpha_{bot}}$

Sebuah kriteria untuk menguji perkiraan *relative volatility* diusulkan pada pertidaksamaan di bawah ini.

$$\frac{\alpha_{atas} - \alpha_{bawah}}{\alpha_{atas} + \alpha_{bawah}} \leq 0,1 \ln \frac{\alpha_{atas} + \alpha_{bawah}}{2} \quad (19)$$

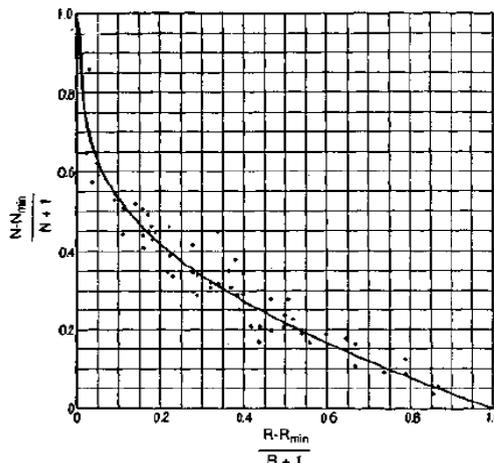
Jika pertidaksamaan di atas dipenuhi, *relative volatility* dapat dianggap konstan pada seluruh kolom, dan perkiraan yang lebih sederhana seperti 2 atau 4 dapat digunakan.

Untuk mencari *reflux* minimum digunakan metode Underwood [21]. Metode ini menyelesaikan persamaan-persamaan di mana berhubungan dengan komposisi umpan, kondisi thermal umpan, dan *relative volatility* pada temperatur

rata-rata kolom untuk *factor*  $\theta$  dimana secara numerik berada di antara *relative volatility* komponen-komponen. Faktor ini disubstitusikan di dalam persamaan kedua di mana menghubungkan *reflux* minimum dengan *relative volatility* dan komposisi distilat. Metode ini mengasumsikan *relative volatility* konstan pada temperatur rata-rata kolom dan aliran molar konstan. Metode Underwood paling banyak digunakan untuk menentukan *reflux* minimum.

Hubungan *reflux*-tingkatan yang paling populer adalah oleh Gilliland. Akurasi persamaan Gilliland untuk perhitungan *shortcut* biasanya memuaskan. Kurva tunggal di dalam korelasi Gilliland lebih mudah untuk dikomputerisasi. Plot mengkorelasi *reflux* dan jumlah tingkatan dengan  $X = \frac{R-R_{min}}{R+1}$  (20)  $Y = \frac{N-N_{min}}{N+1}$  (21) R adalah *reflux ratio*, dan N adalah jumlah tingkatan. Ketika  $R=R_{min}$ ,  $X=0$ , dan Y mendekati kesatuan. Ketika  $N=N_{min}$ ,  $Y=0$ , dan X mendekati kesatuan. Maka dari itu kurva membentang dari koordinat (0.1) pada *reflux* minimum ke (1.0) pada *reflux* total.

**Gambar 4.3**  
Korelasi *Reflux*-Jumlah Tingkatan Gilliland [21]



Di dalam distilasi *batch*, campuran yang didistilasi adalah sejumlah *batch* dan distilasi dijalankan sampai produk

yang diinginkan tercapai. Distilasi *batch* secara khusus digunakan:

1. Di mana komposisi-komposisi material yang dipisahkan bervariasi dengan kisaran yang luas.
2. Di mana pemisahan hanya diperlukan tidak sering, seperti operasi *pilot-plant*.
3. Di mana material-material yang dipisahkan dihasilkan dalam jumlah yang relatif kecil, seperti di dalam fasilitas komersial berskala kecil.
4. Di mana produk utama mengandung hanya sejumlah kecil ketidakmurnian.

Distilasi *batch* adalah sebuah proses keadaan tak-tunak (*unsteady state*), komposisi di dalam penyuling (bawah) bervariasi saat *batch* didistilasi. Pemilihan *batch* masih melibatkan evaluasi performa dari sistem distilasi yang ada untuk menentukan apakah performanya dapat diterima.

Sistem-sistem distilasi *batch* yang ada adalah sebagai berikut:

#### 1. Distilasi sederhana

Di dalam distilasi sederhana, uap meninggalkan penyuling ke dalam kondenser total, dan *liquid* meninggalkan kondenser ke dalam penampungan produk. Tidak ada *reflux* yang kembali ke dalam penyuling. Uap pertama yang meninggalkan penyuling lebih kaya dalam komponen yang lebih ringan dari pada *liquid* karena penyuling bertindak sebagai tingkatan pemisahan teoritis tunggal. Saat proses berlanjut, material sisa di dalam penyuling menjadi lebih sedikit komponen ringannya, jadi uap yang meninggalkan penyuling semakin banyak mengandung komponen yang lebih berat.

#### 2. Reflux *ratio* konstan

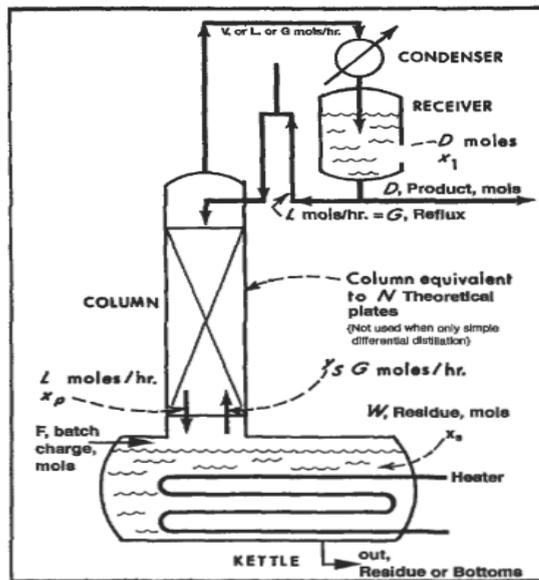
Distilasi *batch* dengan *reflux ratio* konstan menyerupai distilasi sederhana di mana komposisi distilat dan penyuling bervariasi seiring waktu. Distilat mula-

mula mengandung konsentrasi komponen ringan tertinggi, dan komposisi distilat selanjutnya menjadi lebih berat seiring berjalannya distilasi. Akan tetapi, karena interaksi antara *reflux liquid* menurun melewati kolom dan uap meningkat melewati kolom, laju perubahan komposisi distilat jauh lebih lambat.

### 3. Variasi *reflux ratio*

Dengan secara kontinyu merubah *reflux ratio* selama distilasi, konsentrasi distilat yang konstan dapat dicapai. Laju penguapan juga konstan, tetapi *reflux ratio* meningkat, jumlah *liquid* yang kembali ke kolom meningkat. Maka dari itu, rasio  $L/V$  meningkat sejalan dengan proses distilasi.

**Gambar 4.4**  
Skema Distilasi Batch [22]



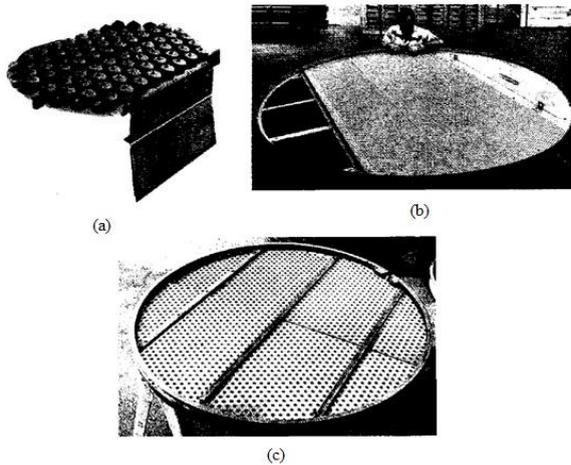
Disain perangkat keras dilanjutkan di dalam dua fase yaitu dasar dan detail. Fase dasar menentukan diameter kolom, jenis tray, area tray, tray spacing, jumlah laluan, dan fitur-fitur downcomer dan tray lainnya. Fase ini akan dikuatkan lagi di dalam fase detail.

Fase dasar menentukan keperluan peralatan utama, sementara fase detil merekayasa yang lebih baik. Fase dasar memiliki dampak utama pada *cost* kolom, tetapi sedikit mempengaruhi pada pencapaian operasi yang bebas masalah. Tugas itu dilakukan pada fase detil, dimana memiliki dampak yang kecil pada *cost* kolom tetapi memiliki dampak utama dalam pencapaian operasi yang bebas masalah.

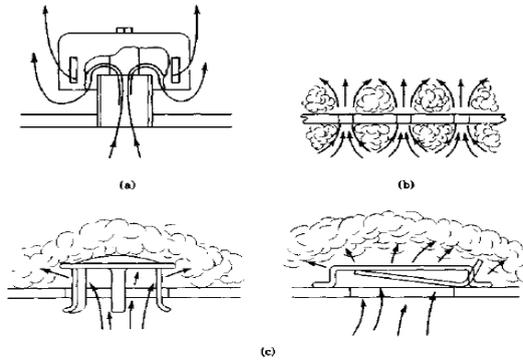
Jenis *tray* pada umumnya adalah *bubble-cap tray*, *sieve tray*, *dual-flow tray*, dan *valve tray*. *Sieve tray* dan *valve tray* memiliki kapasitas, efisiensi, *entrainment*, dan jatuh tekanan yang sebanding. *Tray Bubble-cap* memiliki kapasitas dan efisiensi lebih rendah, sementara *entrainment* dan jatuh tekanan lebih tinggi daripada *tray sieve* dan *tray valve*. *Tray dual-flow* menunjukkan kapasitas yang lebih baik tetapi efisiensi paling rendah dibandingkan jenis *tray* lainnya. *Cost tray bubble-cap* adalah yang paling tinggi. *Tray sieve* adalah yang paling murah, tapi *tray valve* hanya sedikit lebih mahal.

#### Gambar 4.5

Jenis-Jenis Tray (a) *Tray Bubble-Cap* (b) *Tray Sieve*  
(c) *Tray Dual Flow* [22]



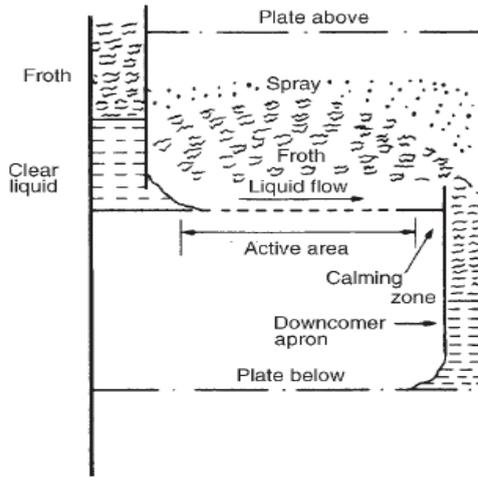
**Gambar 4.6**  
 Lintasan Uap Melalui *Tray Bubble-Cap Tray*  
 (a), *Sieve Tray* (b), *Valve Tray* (c)



Pemeliharaan, kecenderungan kotor, dan efek-efek korosi adalah yang paling sedikit di dalam *tray sieve*, walaupun hal-hal tersebut tidak terlalu besar untuk *tray valve*. Pada umumnya, *tray bubble-cap* dan *tray dual-flow* digunakan untuk aplikasi tertentu. Untuk kebanyakan aplikasi lainnya, baik *sieve* maupun *valve tray* merupakan pilihan terbaik.

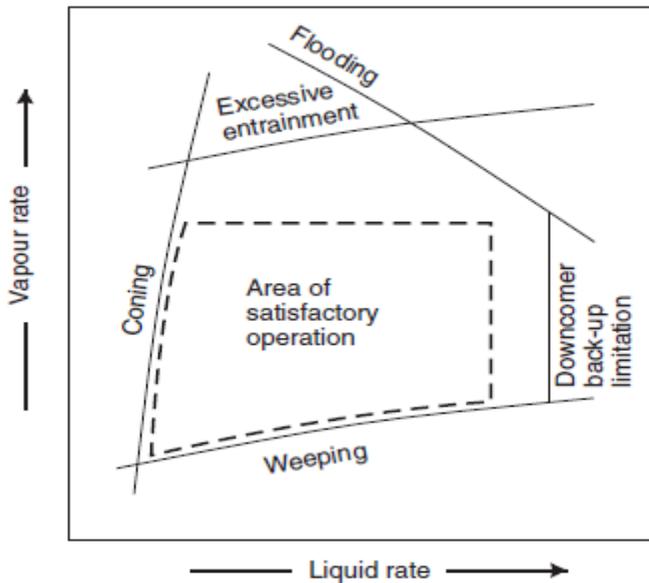
*Tray* aliran-silang merupakan jenis kontaktor *tray* paling umum yang digunakan di dalam distilasi. Di dalam *tray* aliran-silang *liquid* mengalir melewati pelat dan uap mengalir ke atas melalui pelat. Susunan umum ditunjukkan pada gambar 2.8. *Liquid* yang mengalir ditransfer dari pelat ke pelat melalui saluran vertikal yang dinamakan *downcomer*. Genangan *liquid* ditahan di atas pelat oleh *outlet weir*. Jenis-jenis *tray* lainnya yang digunakan tidak memiliki *downcomer* (non *tray* aliran-silang), *liquid* mengucur ke bawah kolom melalui bukaan lebar di dalam pelat. Jenis ini digunakan untuk tujuan-tujuan tertentu, khususnya ketika jatuh tekanan yang rendah dibutuhkan.

**Gambar 4.7**  
 Skematik *Tray Aliran-Silang* [22]



Gambar 4.7 adalah diagram performa *tray sieve* pada umumnya. Operasi yang memuaskan hanya akan dicapai melalui kisaran batas-batas laju aliran uap dan *liquid*.

**Gambar 4.8**  
 Diagram Performa *Tray Sieve* [21]



Batas atas ke aliran uap ditentukan dengan kondisi *flooding*. Pada *flooding* terdapat penurunan yang tajam pada efisiensi *tray* dan meningkat pada jatuh tekanan. *Flooding* disebabkan baik oleh pemindahan *liquid* berlebihan ke *tray* berikutnya oleh *entrainment*, atau oleh *liquid back up* di dalam *downcomer*.

Batas bawah aliran uap ditentukan oleh kondisi *weeping*. *Weeping* terjadi ketika aliran uap tidak cukup menjaga level *liquid* pada *tray*. *Coning* terjadi pada laju *liquid* rendah dan istilah yang diberikan kepada kondisi di mana uap menekan kembali *liquid* dari lubang dan jet ke atas, dengan kontak *liquid* yang sedikit.

Area-area yang digunakan untuk mendefinisikan kecepatan *tray* adalah sebagai berikut:

1. Area penampang total,  $A_T$ : area penampang bagian dalam dari menara kosong (tanpa *downcomer* atau *tray*).
2. Area net,  $A_N$ : area penampang total  $A_T$  dikurangi area di atas *downcomer*. Area net mewakili area tersedia terkecil untuk aliran uap di dalam jarak antar *tray*.
3. Area *bubbling*,  $A_B$ : area penampang total  $A_T$  dikurangi area total *downcomer*, area tutup *downcomer*, dan area yang tidak berlubang lainnya. Area *bubbling* mewakili area tersedia untuk aliran uap dekat dengan lantai *tray*.
4. Area lubang,  $A_h$ : area total dari lubang-lubang pada *tray*. Area lubang merupakan area terkecil yang tersedia untuk lintasan uap.
5. Area lubang fraksional,  $A_f$ : rasio area lubang  $A_h$  dengan area *bubbling*  $A_B$ .

Estimasi ukuran kolom keseluruhan dapat dibuat ketika jumlah aktual tingkatan yang dibutuhkan untuk separasi telah diketahui. Tinggi keseluruhan kolom akan bergantung pada jarak *tray*. Jarak-jarak *tray* yang biasanya digunakan adalah dari 0.15 m sampai 1 m. Jarak yang terpilih akan bergantung kepada diameter kolom dan kondisi operasi.

Jarak yang dekat digunakan dengan diameter kolom kecil, dimana ruang atas dibatasi. Untuk kolom diameter di atas 1 m, jarak *tray* 0.3 sampai 0.6 m normalnya digunakan, dan 0.5 m dapat diambil sebagai estimasi awal. Ini akan direvisi, ketika disain *tray* detil dibuat.

Faktor utama yang menentukan diameter kolom adalah laju aliran uap. Kecepatan uap harus di bawah kecepatan yang akan menyebabkan *liquid entrainment* berlebihan atau jatuh tekanan yang besar. Persamaan di bawah yang berdasarkan atas persamaan Souders dan Brown, dapat digunakan untuk estimasi kecepatan *superficial uap* yang diijinkan.  $u_v = (-0.17 \text{ } l t^2 + 0.27 l t - 0.047) \left[ \frac{(\rho_L - \rho_v)}{\rho_v} \right]^{1/2}$  (22)  $u_v$  adalah kecepatan maksimum uap yang diijinkan,  $l_t$  adalah jarak antar *tray*, sedangkan  $\rho_L$  dan  $\rho_v$  adalah massa jenis *liquid* dan uap.

Diameter kolom,  $D_c$ , dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini.  $D_c = \sqrt{\frac{4V_w}{\pi \rho_v u_v}}$  (23) Di mana  $V_w$  adalah laju uap maksimum.

Syarat-syarat dasar tingkatan kontak pelat meliputi menyediakan kontak uap-*liquid* yang bagus untuk perpindahan massa yang baik, memiliki area dan jarak yang cukup untuk menjaga *entrainment* dan jatuh tekanan di dalam batas-batas yang dapat diterima, dan memiliki area *downcomer* yang cukup untuk *liquid* mengalir dengan bebas dari pelat ke pelat. Disain pelat atau *tray* merupakan kombinasi teori dan praktek. Metode-metode disain menggunakan korelasi semi-empiris yang diturunkan dari penelitian fundamental dikombinasikan dengan pengalaman praktek yang didapatkan dari operasi kolom-kolom operasi.

Kondisi *flooding* memperbaiki batas atas kecepatan uap. Kecepatan uap yang tinggi dibutuhkan untuk efisiensi *tray* yang tinggi, dan kecepatan normalnya antara 70 %

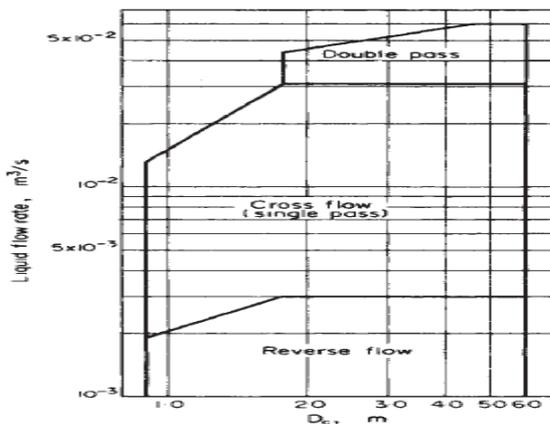
sampai 90 % yang akan menyebabkan *flooding*. Untuk disain, nilai 80 % sampai 85 % kecepatan *flooding* sebaiknya digunakan. Estimasi konservatif kecepatan uap pada *flooding* bisa dibuat dengan korelasi *Fair*. Korelasi meningkatkan pada hipotesa bahwa energi kinetik fase gas sendiri adalah penting dan meliputi efek-efek tambahan laju *liquid* dan tegangan permukaan, begitu juga densitas kedua fase dan laju uap. Hal ini disatukan di dalam sebuah parameter kapasitas yang didefinisikan sebagai:  $c \equiv u_{N,flood} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^{0,2} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}\right)^{0,5}$  (24) Dan

parameter aliran diberikan oleh persamaan  $F_{LV} = \frac{L}{V} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{0,5} \left(\frac{M_V}{M_L}\right)^{1,5}$  (25) Faktor *flooding* adalah sebagai berikut

$$F_{flood} = c \left(\frac{A_n}{A}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{0,2} \sqrt{\rho_L - \rho_V} \quad (26)$$

Pilihan jenis pelat (*reverse*, *single*, atau *multiple pass*) akan bergantung kepada laju aliran *liquid* dan diameter kolom.

**Gambar 4.9**  
Susunan Pemilihan Aliran *Liquid*



Tinggi *weir* menentukan volume *liquid* pada pelat dan ini adalah faktor penting dalam menentukan efisiensi pelat. Sebuah *weir* yang tinggi akan meningkatkan efisiensi pelat tetapi mengorbankan jatuh tekanan pelat yang lebih besar.

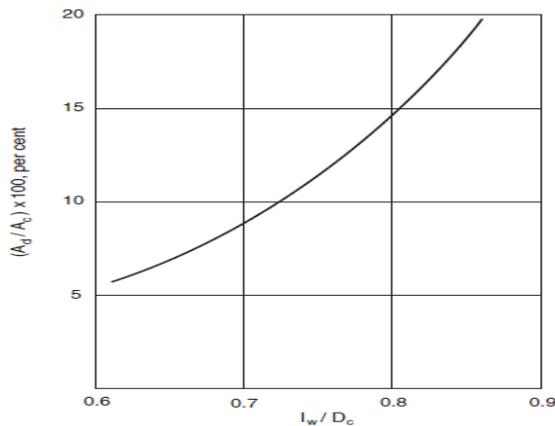
Untuk kolom yang beroperasi di atas tekanan atmosfer tinggi *weir* normalnya antara 40 mm sampai 90 mm; 40 mm sampai 50 mm direkomendasikan. Untuk operasi vakum tinggi *weir* lebih kecil digunakan untuk mengurangi jatuh tekanan; 6 mm sampai 12 mm direkomendasikan.

Dengan *downcomer* yang terdiri dari beberapa bagian, panjang *weir* memperbaiki area *downcomer*. Panjang *weir* normalnya antara 0.6 sampai 0.85 diameter kolom. Nilai mula-mula yang baik digunakan adalah 0.77, setara dengan 12 % area *downcomer*.

Hubungan antara panjang *weir* dan area *downcomer* dapat dilihat pada gambar 2.11 untuk pelat *double-pass* lebar *downcomer* tengah normalnya 200 mm - 250 mm. Ukuran-ukuran lubang bervariasi dari 2.5 mm sampai 12 mm.

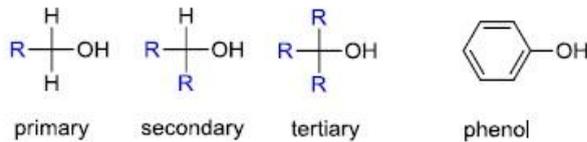
**Gambar 4.10**

Hubungan antara Area *Downcomer* dengan Panjang *Weir* Zat Aditif Oksigenat (Sikloheksanol  $C_6H_{12}O$  dan Sikloheptanol  $C_7H_{14}O$ )



Alkohol digolongkan ke dalam alkohol primer ( $1^0$ ), sekunder ( $2^0$ ), dan tersier ( $3^0$ ), bergantung apakah satu, dua, atau tiga gugus organik yang berhubungan dengan atom karbon pembawa hidroksil.

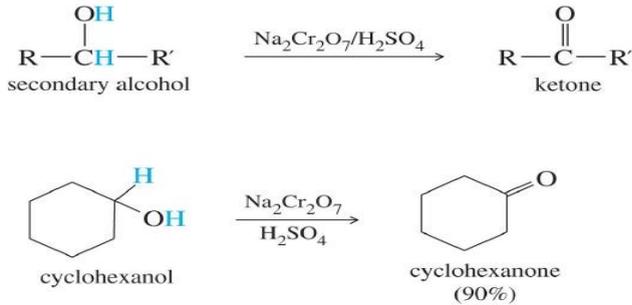
**Gambar 4.11**  
Penggolongan Alkohol



Ikatan O-H terpolarisasi oleh tingginya elektromagnetivitas atom oksigen. Polarisasi ini menempatkan muatan positif parsial pada atom hidrogen dan muatan negative parsial pada atom oksigen. Karena ukurannya yang kecil dan muatannya yang positif parsial, atom hidrogen dapat berhubungan dengan dua atom elektronegatif seperti oksigen. Dua atau lebih molekul alkohol dengan demikian secara lemah terikat satu dengan lainnya melalui ikatan hidrogen.

Alkohol dengan sekurang-kurangnya satu hidrogen melekat pada karbon pembawa hidroksil dapat dioksidasi menjadi senyawa karbonil. Alkohol primer menghasilkan aldehida, yang dapat dioksidasi lebih lanjut menjadi asam karboksilat. Alkohol sekunder menghasilkan keton. Sewaktu alkohol dioksidasi menjadi aldehida atau keton dan kemudian menjadi asam karboksilat, jumlah ikatan di antara atom karbon reaktif dan atom oksigen meningkat dari satu menjadi dua dan menjadi tiga. Dengan kata lain, bilangan oksidasi karbon itu naik sewaktu bergerak dari alkohol menjadi aldehida atau keton, lalu menjadi asam karboksilat. Alkohol tersier karena tidak memiliki atom hidrogen pada karbon pembawa hidroksil, tidak menjalani jenis oksidasi ini.

**Gambar 4.12**  
Oksidasi Alkohol



Alkohol berbobot molekul lebih rendah dengan mudah dapat menggantikan molekul air dalam jejaring ikatan hidrogen. Ini mengakibatkan alkohol rendah dapat bercampur sempurna dengan air. Akan tetapi, semakin panjang rantai organik (sikloheksanol rantai C6 dan sikloheptanol rantai C7) alkohol semakin bersifat seperti hidrokarbon, sehingga kelarutannya dalam air (*water solubility*) menurun, atau semakin panjang rantai C, alkohol tersebut semakin bersifat non polar [24].

Sikloheksanol adalah alkohol yang terdiri dari sikloheksana yang mengandung substituen hidroksi tunggal, termasuk ke dalam alkohol sekunder, salah satu fungsinya adalah sebagai pelarut, diproduksi secara industri dari fenol melalui hidrogenasi dengan adanya katalis Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, serta diproduksi dari sikloheksana melalui oksidasi dengan oksigen molekuler *nanocrystals* (katalis).

**Tabel 4.2**  
Spesifikasi Sikloheksanol dan Sikloheptanol

<i>Spesifications</i>	<b>Sikloheksanol</b>	<b>Sikloheptanol</b>
<i>Chemical Formula</i>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O
<i>Molar mass</i>	100.161 g/mol	114.188 g/mol
<i>Density</i>	0.9624 at 20 °C	0.948 at 20 °C
<i>Melting point</i>	25.93 °C	2 °C

<i>Boiling point</i>	161.84 °C	185 °C
<i>Flash point</i>	67.8 °C	71 °C
<i>Heat of Combustion</i>	-3.722 MJ/mol	-4441 kJ/mol
<i>Heat of Vaporization</i>	14.82 kcal/mol at 25 °C	48.7 kJ/mol
<i>RON</i>	109.6	109.6
<i>Water Solubility</i>	42.000 mg/L at 10 °C	Insoluble
<i>Solubilities</i>	3.6 % (wt/wt) at 20 °C	Insoluble
<i>Vapor Pressure</i>	0.657 mmHg at 25 °C	0.24 at 25 °C

Selain etanol, ada beberapa oksigenat lain yang dapat dicampur menjadi pelarut bersama gasolin. Namun, kandungan oksigen dalam campuran harus dijaga di bawah batas 2,7% berat. *Co-solvent* dapat dicampur dengan tujuan

1. Kelarutan air yang lebih baik dalam campuran gasolin-etanol
2. Menurunkan suhu pemisahan fasa
3. Menurunkan jumlah etanol yang dapat diatasi ke fase air
4. Tekanan uap yang lebih baik dari gasolin.

Oksigenat yang digunakan sebagai pelarut bersama dalam campuran etanol gasolin harus memenuhi:

1. Kesesuaian yang baik dengan semua komponen gasoline
2. Kelarutan dalam air, yang harus serendah mungkin
3. Pembentukan azeotrop minimum dengan hidrokarbon, titik didih rendah dari azeotrope dapat berdampak pada peningkatan tekanan uap gasolin etanol yang dicampur
4. Semua oksigenat tersebut tidak kompatibel dengan metanol, di sisi lain sangat perspektif bisa beberapa eter.

Sering direkomendasikan dalam literatur terutama *co-solvent* berikut

1. Alkohol yang lebih tinggi bercabang (TBA, IBA, IPA) biasanya dalam perbandingan 1: 1 dengan etanol
2. Alkohol alifatik yang lebih tinggi (sikloheksanol, decanol)
3. Eter (DIPE, TAME, MTBE)
4. Beberapa hidrokarbon aromatik.

Hingga saat ini telah digunakan beberapa zat aditif oksigenat seperti *Tetra Ethyl Lead* (TEL), *Methyl Tert Buthyl Ether* (MTBE), dan lain sebagainya yang memiliki dampak buruk terhadap lingkungan karena sifatnya toksik, mengandung timbal, dan mudah menguap. Sebaliknya yang diperlukan adalah yang mempunyai sifat tidak beracun, ramah lingkungan, *biodegradable*.



# BAB 5

## DISTILASI LOW GRADE BIOETANOL

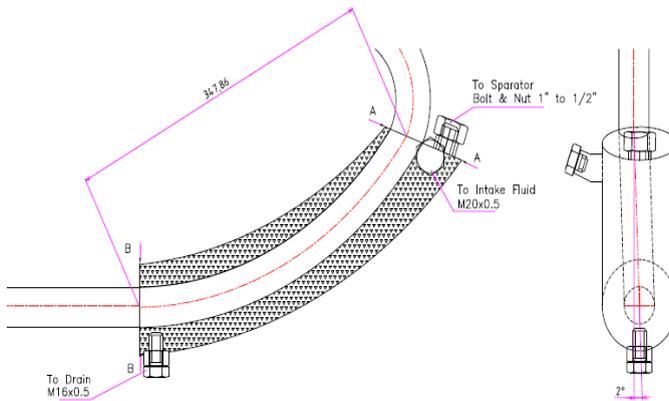
### A. Perancangan Compact Distillator

*Evaporator* berfungsi sebagai wadah uap atau sama halnya dengan boiler pada pembangkit listrik tenaga uap, peran dari *evaporator* adalah untuk menampung distilat yang terdiri dari etanol dan air dalam kadar yang ditentukan dan nantinya akan menerima panas dari batang *muffler* sampai distilat berubah fase menjadi uap, kemudian diteruskan ke *separator*. Perancangan *evaporator* menggunakan *stainless steel* karena mengingat potensi korosif bagian dalam *evaporator* yang tinggi akibat kondisi bagian dalam yang sulit dipantau dan cenderung lembab.

**Gambar 5.1**  
3D *Evaporator*



**Gambar 5.2**  
*2D Evaporator*



Spesifikasi *evaporator*:

1. Dimensi tabung dalam:  $\text{Ø } 88,9 \text{ mm}$
2. Dimensi tabung luar:  $\text{Ø } 90,2 \text{ mm}$
3. Jumlah pipa  $\text{Ø } 14 \text{ mm}$ : 2 buah
4. Jumlah *shock* lurus  $1/4''$ : 1 buah
5. Jumlah *L-Bow*  $1/2''$ : 1 buah
6. Kapasitas kolom: 1.4 liter
7. Material utama: *Stainless Steel 316L*

**Gambar 5.3**  
*Instalasi Evaporator*

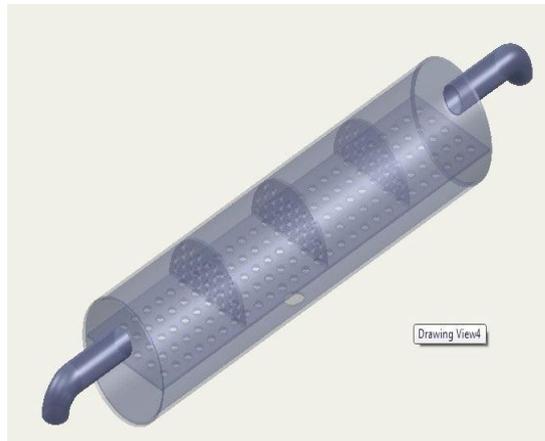


## 1. Perancangan Separator

Separator ini fungsinya sama dengan kolom distilasi di mana di dalamnya terdapat *perforate* yang berfungsi memisahkan air dengan etanol. Etanol akan diteruskan ke *heat exchanger*, sementara air akan menabrak *perforate* dan jatuh ke bawah untuk kemudian di *drain* (ditampung di penampungan).

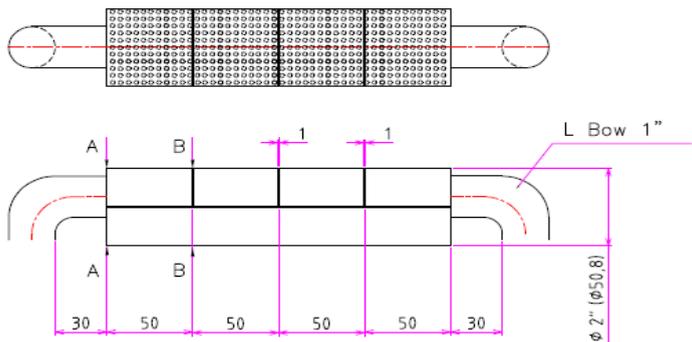
**Gambar 5.4**

3D Separator (Sieve Coloum)



**Gambar 5.5**

2D Separator (Sieve Coloum)



Spesifikasi separator:

- Dimensi tabung dalam:  $\phi 50,5$  mm
- Dimensi tabung luar:  $\phi 50,8$  mm

- c. Panjang: 200 mm
- d. Jumlah *L-Bow* 1/2": 2 buah
- e. Plat *Perforate* #4 SS316 Material utama: *Stainless Steel*

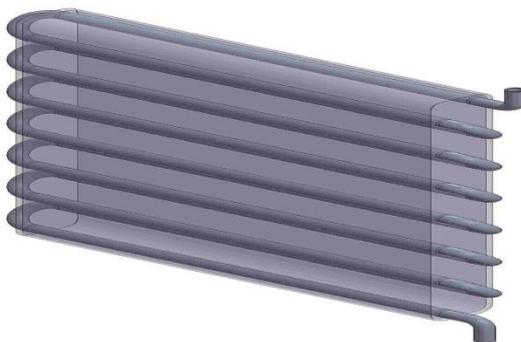
**Gambar 5.6**  
*Separator (Sieve Coloum)*



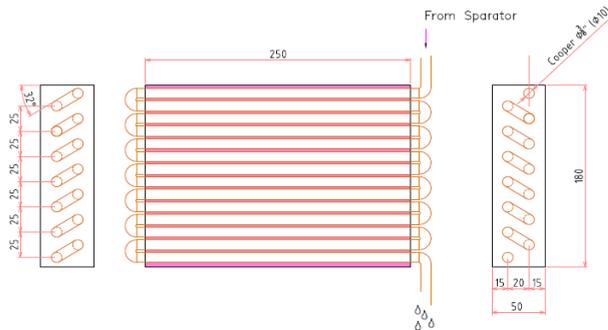
## 2. Perancangan *Heat Exchanger*

*Heat Exchanger* berfungsi untuk mengkondensasi uap yang keluar dari kolom distilasi. Tipe *heat exchanger* yang dipakai adalah tipe *Fin and Tube* dengan fluida pendingin udara. Material yang dipakai ada dua yaitu tembaga untuk *tube*, dan alumunium untuk dinding sirip *heat exchanger*. Tembaga digunakan pada *tube* agar menghasilkan perpindahan panas yang baik antara uap etanol dengan fluida pendingin. Fluida pendingin yang dipakai adalah udara. Udara pendingin berasal dari lingkungan sekitar *heat exchanger* yang disirkulasikan secara konveksi paksa atau alamiah.

**Gambar 5.7**  
*Separator (Sieve Coloum)*



**Gambar 5.8**  
*2D Heat Exchanger*



Spesifikasi *heat exchanger*:

- Lebar: 140 mm
- Tinggi: 180 mm
- Jumlah *L-Bow* 1/2": 2 buah
- Material *Fin*: Alumunium
- Material pipa: tembaga 3/8"
- Material *Tube*: Alumunium

**Gambar 5.9**  
*Heat Exchanger*



### 3. Gate Valve

*Gate valve* pada dasarnya digunakan untuk menutup laju aliran fluida dengan kuat. *Valve* jenis ini biasanya digunakan pada alat-alat penetasan sumur minyak (*surface well testing*) seperti *flowhead*, *crismast tree*, dan *choke manifold*. *Gate valve* tidak boleh digunakan untuk mengontrol atau menekan laju aliran fluida dengan cara membuka setengah atau seperempat posisi *gate*. Jadi posisi *gate* pada *valve* ini harus terbuka penuh atau tertutup penuh. Jika posisi *gate* setengah membuka maka laju aliran fluida dapat mengikis sudut-sudut *gate*, yang dapat menyebabkan erosi dan pada akhirnya *valve* tidak dapat bekerja secara sempurna.

**Gambar 5.10**

*Gate Valve*



Spesifikasi *Gate Valve*:

- a. Sistem: Manual
- b. Media: Air/uap
- c. Material: *Stainless Steel*
- d. Ukuran: 1/2"
- e. Aplikasi temperatur: -20°C~232°C~350°C

### 4. Instalasi *Compact Distillator*

Skema pemasangan *evaporator*, *separator*, *heat*

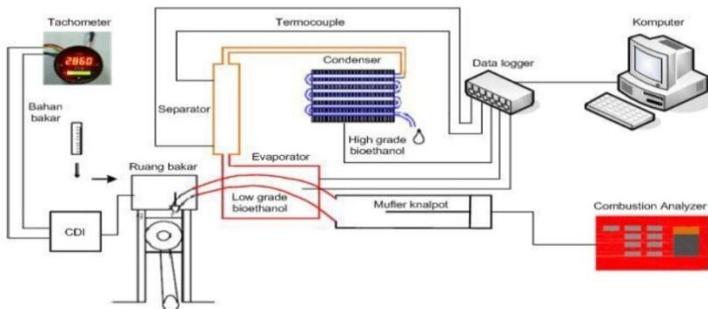
exchanger, dan *gate valve* menjadi satu rangkaian *compact distillator* sederhana ditunjukkan pada gambar di bawah ini.

**Gambar 5.11**

(a) Instalasi *Compact Distillator* (b) Skema *Compact Distillator*



(a)



(b)

a. Gas buang yang melewati knalpot akan digunakan untuk memanaskan unit *evaporator* yang sudah terisi oleh bahan distilat dengan kadar etanol rendah (*low grade*).

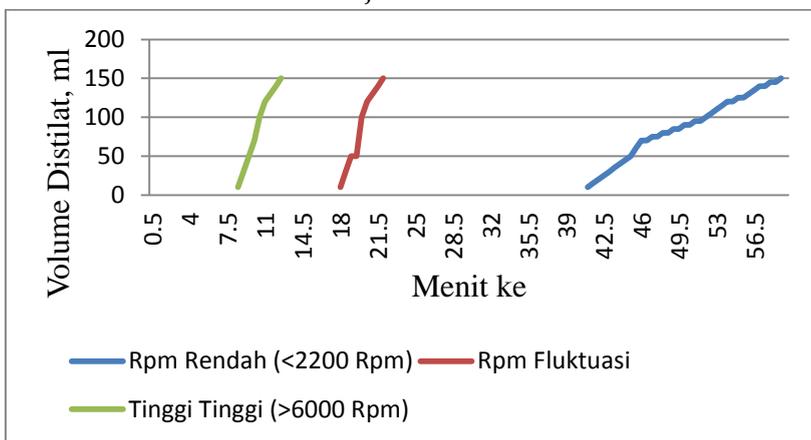
- b. Karena adanya panas dari gas buang hasil pembakaran maka terjadi perpindahan panas pada permukaan knalpot ke ruang *evaporator*. Akibatnya dalam *evaporator* akan merubah fase etanol menjadi uap.
- c. Ketika panas sudah mencapai 80 °C yang terlihat pada alat temperatur kontrol yang terhubung pada probe di *evaporator*, *choke* pada *handle* sebelah kiri ditarik ke bawah guna menutup aliran panas gas buang ke ruang *evaporator* dengan *gate valve*. Aliran panas gas buang akan mengalir ke saluran cabang atau *bypass*. Akibatnya panas dari *evaporator* dapat ditahan dan tidak naik secara signifikan.
- d. Uap dari bahan distilat dengan kadar etanol tinggi akan mengalir menuju separator, dengan mekanisme di dalam separator uap air yang ikut menguap akan terpisah dengan uap etanol.
- e. Uap etanol dari hasil distilasi ini akan mengalir ke heat exchanger. Uap etanol akan diubah menjadi cair kembali, cairan inilah yang akan menjadi bahan bakar tambahan dengan nilai kadar etanol lebih tinggi (*high grade*).

## **B. Laju Distilasi dan Kadar Distilat**

Dari gambar 4.12 di bawah dapat dilihat bahwa pada putaran mesin tinggi (> 6,000 rpm) mampu menghasilkan laju distilasi yang paling cepat dan pada putaran rendah membutuhkan waktu lama untuk menghasilkan distilat. Dari data diperoleh bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mendistilasi *low grade* etanol menjadi *high grade* etanol dan laju volume distilasinya sebanding lurus dengan putaran mesin yang digunakan untuk melakukan pengujian alat *compact distillator*. Ini menunjukkan di mana panas gas buang yang digunakan untuk sumber energi distilasi dipengaruhi oleh putaran mesin. Semakin tinggi putaran mesin maka

temperatur di knalpot juga akan semakin tinggi dan dampaknya akan semakin cepat menguapkan *low grade* etanol yang ada di *evaporator*. Kenaikan temperatur yang terlampau tinggi dari gas buang tidak diharapkan, karena akan mempengaruhi penguapan distilat yang semakin cepat dan kadar air pada distilat juga akan ikut menguap dan nantinya akan berpengaruh pada kadar *high grade* etanol yang dihasilkan.

**Gambar 5.12**  
Laju Distilasi

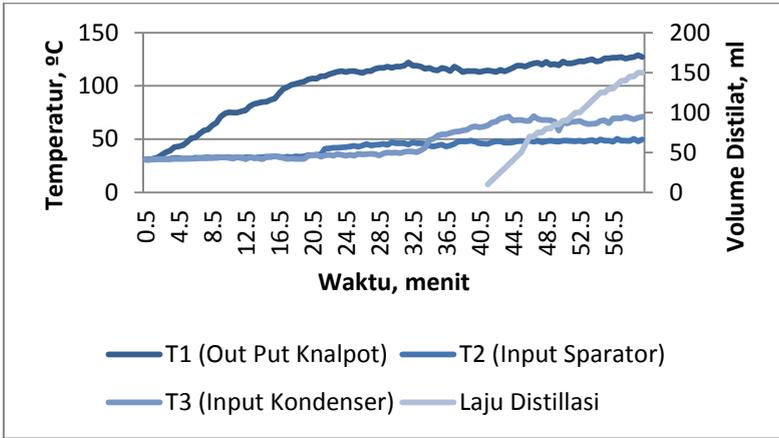


Adapun pengambilan temperatur dengan thermocouple dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

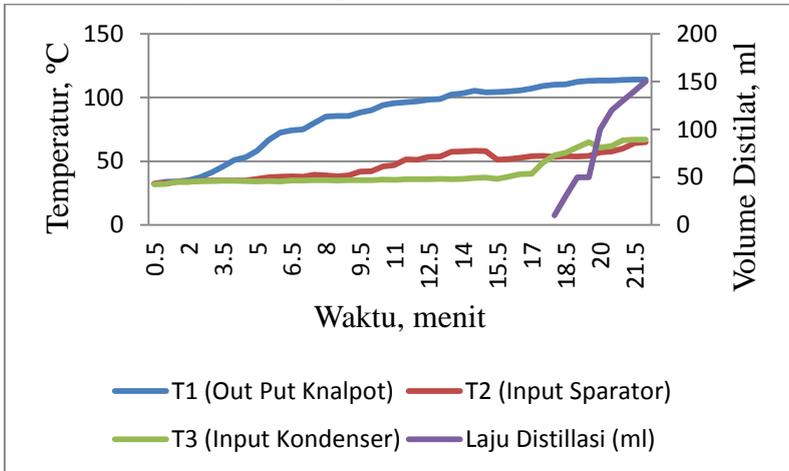
1. T1 : Temperatur di permukaan knalpot sebagai sumber panas *distillator*.
2. T2 : Temperatur pada input *separator*.
3. T3 : Temperatur pada input *heat exchanger*.

Berikut adalah gambar yang dihasilkan dari pengambilan data dengan pengukuran temperatur pada beberapa titik *compact distillator* pada saat putaran rendah dengan mendistilasi etanol kadar 30 % (*low grade*) pada *compact distillator*.

**Gambar 5.13**  
Laju Distilasi pada Putaran Rendah

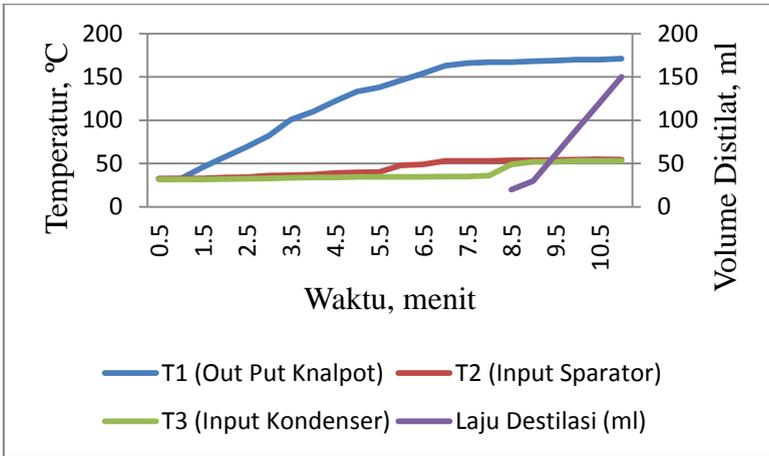


**Gambar 5.14**  
Laju Distilasi pada Putaran Fluktuatif



**Gambar 5.15**

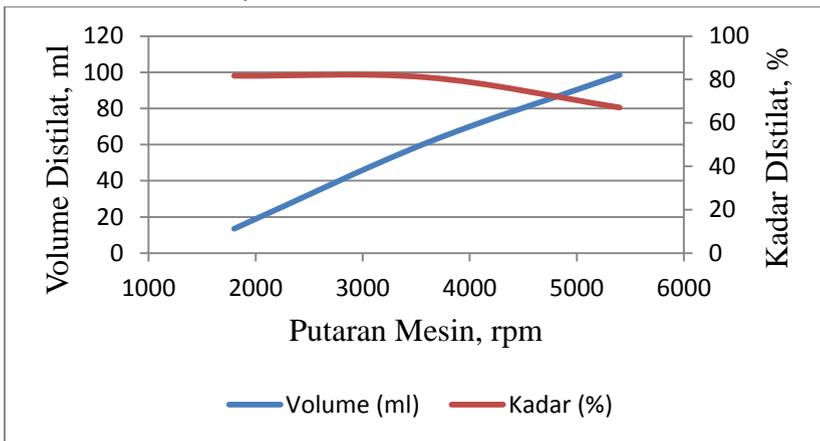
Laju Distilasi pada Putaran Tinggi



Etanol yang dihasilkan dari proses distilasi yang dilakukan secara mandiri selama 1 jam untuk masing-masing putaran mesin pada alat *compact distillator* yang dipasang pada mesin uji seperti pada gambar 5.16.

**Gambar 5.16**

Laju Distilasi dan Kadar Distilat



Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa laju distilasi yang dihasilkan berbeda setiap kondisi putaran mesin, begitu juga dengan kandungan distilat yang dihasilkan sangat dipengaruhi pula oleh putaran mesin. Pada putaran mesin

1,800 rpm, *high grade* etanol yang dihasilkan sekitar 13.5 ml, dengan kandungan distilat sekitar 81.71 %. Pada putaran mesin 3,600 rpm, distilat yang dihasilkan sekitar 61 ml dengan kandungan distilat sekitar 80.98 %, dan pada putaran mesin 5,400 rpm, distilat yang dihasilkan sekitar 98.5 ml, dengan kandungan distilatnya menjadi sekitar 67.09 %.

Nilai rata-rata konsentrasi etanol dari tiap putaran, di mana konsentrasi etanol paling tinggi dicapai oleh putaran rendah dengan persentasi sebesar 81.71 %, pada putaran mesin rendah menghasilkan konsentrasi etanol yang lebih tinggi disebabkan karena pada putaran rendah air yang didistilasi fasenya sepenuhnya belum berubah, sedangkan etanol sudah berubah fase sehingga sebagian besar yang dihasilkan pada *compact distillator* adalah etanol. Hal ini disebabkan karena gas buang yang dihasilkan pada putaran rendah relatif konstan sehingga panas yang ditimbulkan pada knalpot juga relatif mengalami kenaikan secara perlahan yang kemudian akan sangat berpengaruh terhadap bahan yang akan didistilasi pada *compact distillator*. Sedangkan pada putaran fluktuatif dan putaran tinggi kadarnya relatif rendah dikarenakan air yang terdistilasi sudah ada yang berubah fasenya dan terdistilasi bersama etanol sehingga menghasilkan kadar yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan oleh kenaikan temperatur pada gas buang yang signifikan karena pembakaran di dalam ruang bakar.

### C. Optimasi Compact Distillator

Tujuan optimasi *compact distillator* yaitu untuk menghasilkan konsentrasi etanol 95 %. Langkah awal adalah mengetahui kondisi kesetimbangan uap-*liquid* di dalam kolom distilasi. Dengan mengetahui kondisi tersebut diharapkan dapat mengetahui komposisi uap-*liquid* baik komponen yang ringan (etanol) maupun yang berat (air), nilai K masing-masing komponen, serta *relative volatility*

komponen yang ringan terhadap komponen yang berat. Variabel atau nilai-nilai tersebut kemudian ditunjukkan di dalam diagram fase.

Kemudian dihitung komposisi kesetimbangan material di dalam umpan, bawah, dan distilat. Kondisi konsentrasi di dalam umpan sudah ditentukan yaitu konsentrasi etanol 30 % volume. serta menentukan konsentrasi etanol di dalam distilat yaitu 95 % volume. Kesetimbangan material sangat penting untuk menentukan separasi pada proses perhitungan selanjutnya. Dengan menggunakan persamaan Fenske dan metode Underwood [21], didapatkan nilai jumlah tingkatan minimum ( $N_{min}$ ) dan *reflux ratio* minimum ( $R_{min}$ ). Setelah itu akan dilakukan variasi variabel input untuk mendapatkan jumlah tingkatan aktual yang bisa digunakan di dalam operasi kolom distilasi.

Setelah disain proses selesai, dilanjutkan dengan mendisain *tray* pada kolom. Jenis *tray* yang digunakan adalah *tray sieve* karena beberapa alasan antara lain kapasitas yang besar, efisiensi yang tinggi, biaya yang relatif murah, efek korosi yang rendah, dan fabrikasi yang relatif mudah. Disain *tray* memperhitungkan batas-batas kapasitas untuk menjaga stabilitas operasi kolom distilasi sehingga kondisi-kondisi *weeping*, *entrainment*, dan *flooding* dapat dihindari. Variasi variabel input dilakukan untuk menganalisa sensitifitas performa proses distilasi akibat variasi tersebut sehingga didapatkan disain *compact distillator* baru yang optimal. Perhitungan perpindahan panas dilakukan untuk menentukan spesifikasi *reboiler* dan *condenser* agar sesuai dengan tujuan.

### **1. Kesetimbangan Uap-Liquid**

Sifat-sifat fisik antara dua komponen yang dimasukkan ke dalam proses distilasi harus diketahui sebelum mengetahui kondisi kesetimbangan uap-liquid

antara dua komponen tersebut. Di bawah ini adalah sifat-sifat fisik tersebut.

Etanol

Berat Molekular	= 46 g/mol
Titik Didih	= 78.4 °C
Titik Leleh	= -114.1 °C
Gravitasi spesifik @60 °F	= 0.796
Sifat-sifat Kritis:	
Temperatur Kritis	= 513.92 K
Tekanan Kritis	= 61.48 bar
Volume Kritis	= 0.167 m <sup>3</sup> /kmol
Sifat-sifat Liquid:	
Densitas @ 25 °C	= 787 kg/m <sup>3</sup>
Viscositas, μ (cP)	

$$\mu(cP) = \frac{K}{\left(\frac{T}{100}\right)^c}$$

Dimana K= 485 ; c =5,54 ; T dalam K

Sifat-sifat Uap:

Kapasitas panas uap, Cp (J/mol.K)

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$$

Dimana A= 9.014 ; B=0.2141; C= -8.39 e-5; D=1.373 e-9

Tekanan uap

$$\ln(P^{sat}[bar]) = A - \frac{B}{T[K] + C}$$

Dimana A=12.2917 ; B=3803.98 ; C= -41.68 ; T dalam K

Air

Berat Molekular	= 18 g/mol
Titik Didih	= 100 °C
Titik Leleh	= 0 °C
Gravitasi spesifik @60 °F	= 1
Sifat-sifat Kritis:	
Temperatur Kritis	= 647.35 K
Tekanan Kritis	= 221.182 bar

Volume Kritis = 0.063 m<sup>3</sup>/kmol

Sifat-sifat Liquid:

Densitas @ 25 °C = 1,000 kg/m<sup>3</sup>

Viskositas,  $\mu$  (cP)

$$\mu(cP) = \frac{K}{\left(\frac{T}{100}\right)^c}$$

Dimana K= 538 ; c=5.78 ; T dalam K

Sifat-sifat Uap:

Kapasitas Panas Uap, Cp (J/mol.K)

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$$

Dimana A= 32.24 ; B=0.01924; C= 1.055 e-5; D= -3.596 e-9

Tekanan uap

$$\ln(P^{sat}[bar]) = A - \frac{B}{T[K] + C}$$

Dimana A=11.6834 ; B=3816.44 ; C= -46.13 ; T dalam K

Persamaan Antoine digunakan untuk menghitung tekanan uap pada kondisi saturasi [22]. Setelah didapat tekanan uap saturasi dari masing-masing komponen, komposisi fraksi mol uap-liquid komponen etanol dan air dapat diketahui.

$$\ln(P^{sat}[bar]) = A - \frac{B}{T[K] + C}$$

**Tabel 5.1**

Konstanta A, B, C untuk etanol dan air.

Formula	Nama	A	B	C	Tmin	Tmax
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Etanol	12.2917	3803.98	-41.68	270	369
H <sub>2</sub> O	Air	11.6834	3816.44	-46.13	284	441

$$y_e P + y_w P = P = x_e P_e^{sat} + (1 - x_e) P_w^{sat}$$

$$y_e = \frac{x_e P_e^{sat}}{x_e P_e^{sat} + (1 - x_e) P_w^{sat}}$$

$y_e$  = fraksi mol uap etanol

$y_w$  = fraksi mol uap air

$x_e$  = fraksi mol liquid etanol

$P$  = Tekanan uap (1 atm)

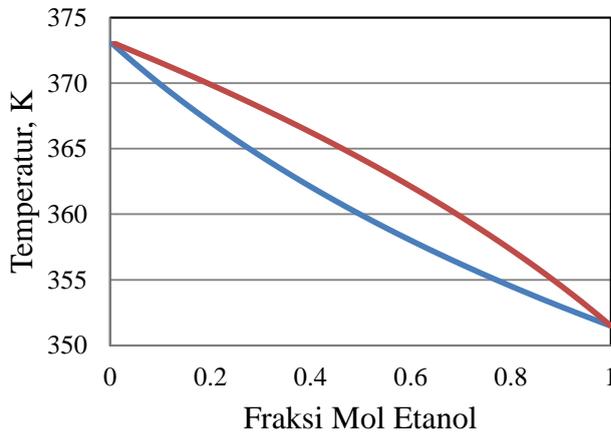
$p_e^{sat}$  = Tekanan uap saturasi etanol

$p_w^{sat}$  = Tekanan uap saturasi air

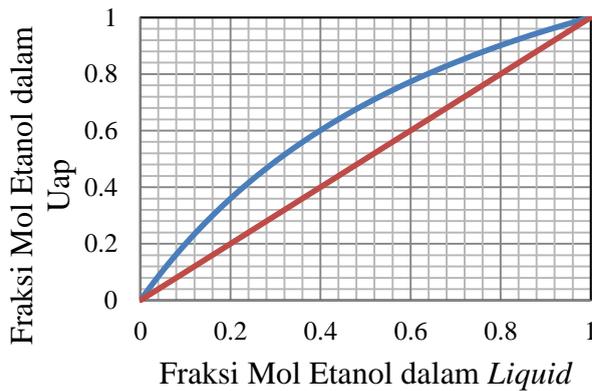
Diagram fase T-xy dan diagram McCabe-Thiele dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

**Gambar 5.17**

(a) Diagram Fase T-xy (b) Diagram McCabe-Thiele



(a)



(b)

Nilai-K adalah sebuah ukuran kecenderungan suatu komponen  $i$  menguap, dan merupakan perbandingan antara komposisi uap dengan komposisi *liquid* suatu komponen. Nilai-K adalah sebuah fungsi temperatur, tekanan, dan komposisi. Di dalam sistem distilasi ini, etanol lebih mudah menguap dibandingkan dengan air. Dari definisi *relative volatility* dapat diartikan bahwa *relative volatility* adalah perbandingan antara nilai K etanol dengan nilai K air. Nilai K untuk setiap komponen  $i$ ,

$$K_i = \frac{y_i}{x_i}$$

Relative *volatility* antara etanol dengan air,

$$\alpha_{e,w} = \frac{K_e}{K_w}$$

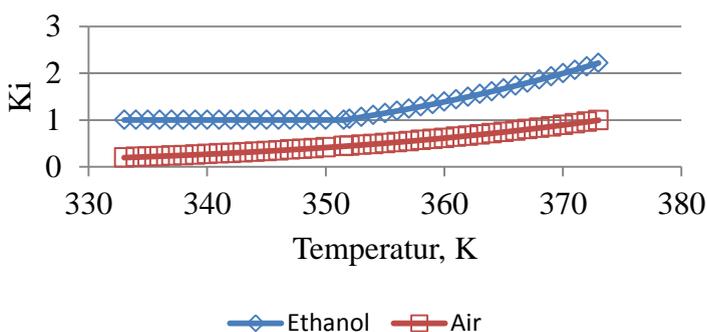
$K_e$  = nilai K etanol

$K_w$  = nilai K air

**Gambar 5.18**

Nilai K Etanol dan Air

**Nilai K pada 1.01325 Bar**



## 2. Separasi, Jumlah Tingkatan Minimum, *Reflux Ratio* Minimum

Untuk memperkirakan titik didih dan titik embun, kita mengasumsikan bahwa tidak ada yang lebih

berat dari pada air yang terdapat di bagian atas kolom, dan tidak ada yang lebih ringan dari pada etanol yang terdapat di bagian bawah kolom.

	d	xd	b	xb
Etanol	5.747	0.854572	0.4657	0.010001
Air	0.978	0.145428	46.1	0.989999
	6.725		46.5657	

Perhitungan titik embun, atas kolom

	xd	coba 360 K		coba 355K	
		Ki	yi/Ki	Ki	yi/Ki
Etanol	0.854572	1.38869	0.61538	1.147584	0.744671
Air	0.145428	0.6132	0.237162	0.503637	0.288755
		$\Sigma yi/Ki$	0.852542	$\Sigma yi/Ki$	1.033426
		temp terlalu tinggi		Cukup dekat	

Perhitungan titik didih, umpan

	xf	coba 350 K		coba 373 K		coba 369 K	
		Ki	xiKi	Ki	xiKi	Ki	xiKi
Etanol	0.1166	1.000505	0.116659	2.219429	0.258785	1.928888	0.224908
Air	0.8834	0.410979	0.363059	0.99454	0.878577	0.860601	0.760255
		$\Sigma xiKi$	0.479718	$\Sigma xiKi$	1.137362	$\Sigma xiKi$	0.985163
		terlalu rendah		terlalu tinggi		sesuai	

Kisaran temperatur dari bawah ke atas kolom diperkirakan adalah 369 K ke 355 K. Dapat ditentukan bahwa temperatur pada kondisi umpan di dalam *evaporator* adalah 369 K dan temperatur pada kondisi distilat adalah 355 K. Jumlah tingkatan minimum diberikan oleh persamaan Fenske [21].

$$N_{min} = \ln S / \ln (\alpha_{LK/HK})_{av}$$

Di mana separasi, S diberikan oleh persamaan di bawah ini

$$\ln S = \ln \left[ \left( \frac{x_{LK}}{x_{HK}} \right)_D \left( \frac{x_{HK}}{x_{LK}} \right)_B \right]$$

$$\ln S = \ln \left[ \left( \frac{0,85}{0,15} \right) \left( \frac{0,99}{0,01} \right) \right] = 6,3297$$

Hitung *relative volatility* rata-rata,  $\alpha_{av}$  menurut persamaan-persamaan di bawah ini

1.  $T_{av} = 362 \text{ K}$     $\alpha_{av} = 2.26$     $N_{min} = 6.3297 / \ln 2.26 = 7.76$
2.  $\alpha_{av} = (2.24 + 2.28) / 2 = 2.26$     $N_{min} = 6.3297 / \ln 2.26 = 7.76$
3.  $\alpha_{av} = \alpha$  at tray umpan temperature,  $N_{min} = 6.3297 / \ln 2.24 = 7.85$
4.  $\alpha_{av} = \sqrt{\alpha_{top} \alpha_{bot}} = \sqrt{2.24 \times 2.28} = 2.26$ ,    $N_{min} = 6.3297 / \ln 2.26 = 7.76$
5.  $\alpha_{av} = \sqrt[N]{\alpha} = 2.26$     $N_{min} = 6.3297 / \ln 2.26 = 7.76$

Untuk mencari *reflux* minimum menggunakan metode Underwood. Metode ini menyelesaikan persamaan-persamaan di mana *berhubungan* dengan komposisi umpan, kondisi termal umpan, dan *relative volatility* pada temperatur rata-rata kolom untuk faktor  $\theta$ . Metode ini mengasumsikan *relative volatility* konstan pada temperatur rata-rata kolom dan aliran molar konstan. Kondisi umpan semua dalam fase *liquid*. Karena umpan dalam kondisi *liquid*,  $1 - q = 0$

Untuk mendapatkan *relative volatility*, gunakan air (*heavy key*) sebagai referensi sehingga  $\alpha_{HK} = 1$ . Untuk semua komponen lainnya j

$$\alpha_j = K_j / K_{HK}$$

			$\alpha z / (\alpha - \theta)$				
			<i>Trial</i> 1	<i>Trial</i> 2	<i>Trial</i> 3		
Komponen	$\alpha$	$z$	$\theta =$	$\theta =$	$\theta =$	XD	$\alpha \cdot XD / \alpha - \theta$
			1.98				
Etanol	2.26	0.1166	0.941			0.8546	6.897843
Air	1	0.8834	-0.901			0.1454	-0.14837
			0.040				6.749476
			OK				

$$R_{min} = \left(\frac{L}{D}\right)_{min} = 6.7495 - 1 = 5.7495$$

Hubungan *reflux*-tingkatan yang paling populer adalah oleh Gilliland. Akurasi persamaan Gilliland untuk perhitungan metode *shortcut* biasanya memuaskan. Plot mengkorelasi *reflux* dan tingkatan dengan

$$X = \frac{R - R_{min}}{R + 1}$$

$$Y = \frac{N - N_{min}}{N + 1}$$

Variasi *reflux ratio* akan mempengaruhi jumlah tingkatan aktual yang dipakai di dalam sistem distilasi. Selain itu juga variasi *reflux ratio* akan menentukan jumlah laju *liquid* (L) dan laju uap (V) di seluruh kolom. Dengan memperhitungkan keterbatasan dimensi pada unit sepeda motor, perlu diperhitungkan jumlah tingkatan aktual yang diaplikasikan. Ketika *reflux ratio* sama dengan *reflux ratio* minimum, jumlah tingkatan yang sesuai dengan pemurnian etanol yang diinginkan adalah jumlah tingkatan yang paling besar. Dapat dilihat dari tabel 4.2, jumlah tingkatan (N) untuk kondisi tersebut adalah 20.

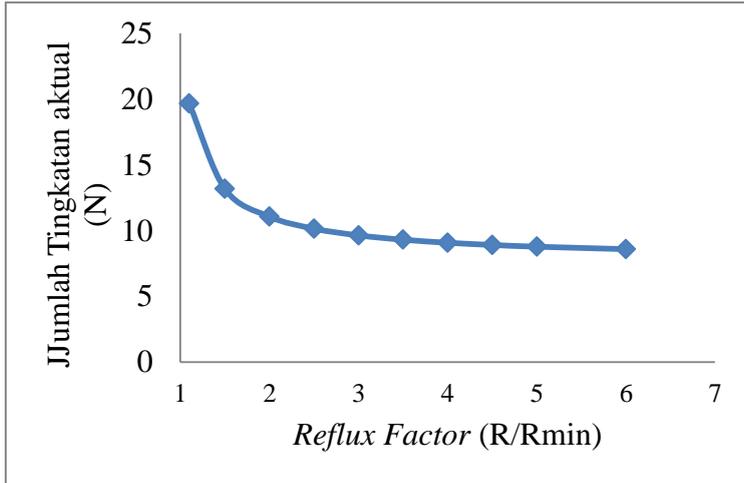
**Tabel 5.2**

Korelasi *Reflux*-Jumlah Tingkatan Gilliland

Rmin	R	Nmin	N	R/Rmin
5.7495	6.32445	7.76	19.66255924	1.1
5.7495	8.62425	7.76	13.17228925	1.5
5.7495	11.499	7.76	11.05403389	2
5.7495	14.37375	7.76	10.14414355	2.5
5.7495	17.2485	7.76	9.632566515	3
5.7495	20.12325	7.76	9.303319148	3.5
5.7495	22.998	7.76	9.073208331	4
5.7495	25.87275	7.76	8.903136591	4.5
5.7495	28.7475	7.76	8.772236993	5

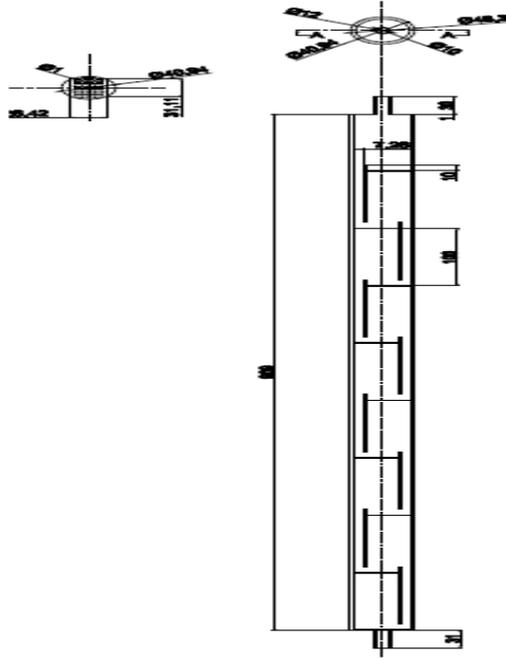
**Gambar 5.19**

Grafik *Reflux Factor vs. Jumlah Tingkatan Aktual*



Dapat dilihat dari gambar 5.19 bahwa jumlah tingkatan sangat sensitif ketika *reflux factor* ( $R/R_{min}$ ) turun dari 1 sampai 1.5. Untuk *reflux factor* yang lebih tinggi, jumlah tingkatan menjadi hampir konstan. Pada penjelasan sebelumnya ditentukan jarak antara tray sebesar 100 mm dengan memperhitungkan keterbatasan dimensi pada unit sepeda motor, ditentukan *reflux factor* ( $R/R_{min}$ ) sebesar 4 sehingga didapatkan jumlah tingkatan aktual sebesar 9.

**Gambar 5.20**  
Skema *Separator*



**Gambar 5.21**  
3D *Separator*

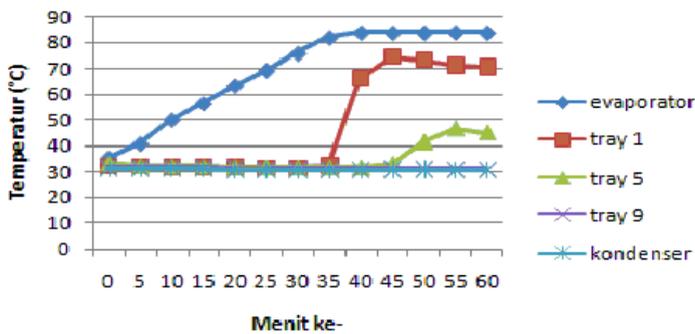


#### D. Laju Distilasi pada *Separator* dengan Jarak Antar *Tray* yang Berbeda

Profil temperatur etanol dalam *compact distillator* dengan jarak antara *tray* 70 mm (*separator A*) dan *tray* 100 mm (*separator B*) pada variasi putaran mesin 1,800 rpm, 3,600 rpm dan 5,400 rpm dapat dilihat pada gambar 4.24 sampai dengan gambar 4.25. Putaran mesin berhubungan dengan kapasitas panas yang dihasilkan tiap satuan waktu, semakin tinggi putaran mesin berarti semakin besar pula kapasitas panas yang dihasilkan.

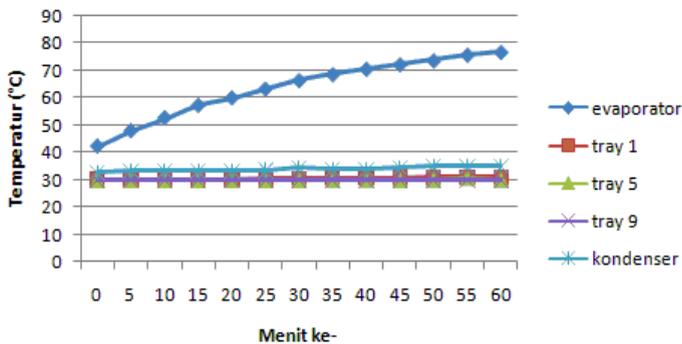
**Gambar 5.22**

Profil Temperatur Etanol pada *Ttray* 70 mm dan Putaran Mesin 1,800 rpm



**Gambar 5.23**

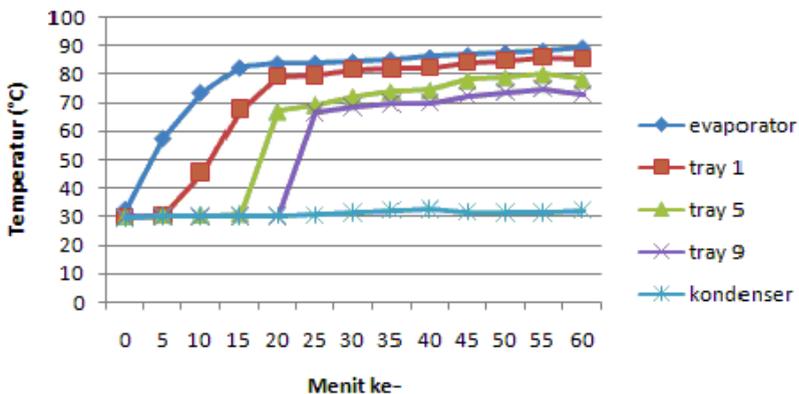
Profil Temperatur Etanol pada *Tray* 100 mm dan Putaran Mesin 1,800 rpm



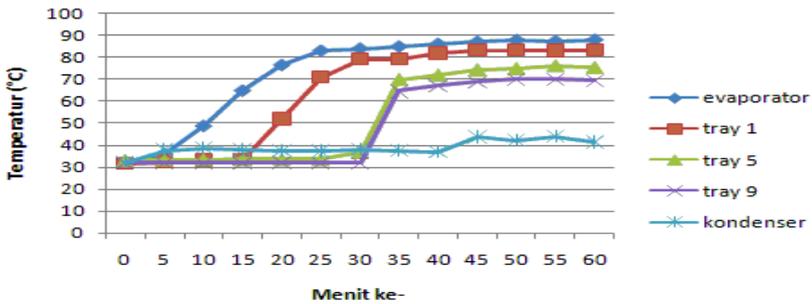
Pada gambar 4.24 dan 4.25 di atas terlihat bahwa pada putaran mesin 1,800 rpm temperatur *separator* A lebih cepat panas dibanding *separator* B. Pada satu jam pertama temperatur di *tray* 1 dan *tray* 5 sudah mulai naik pada *separator* A sedangkan pada *separator* B belum ada kenaikan temperatur. Pada *separator* A maupun *separator* B sampai dengan menit ke 60 di *tray* 9 belum ada kenaikan temperatur. Sehingga uap yang terbentuk pada *evaporator* akan mengembun dan kembali ke *evaporator*. Temperatur pada *evaporator* keduanya telah mencapai di atas 80 °C atau di atas titik didih etanol (78,4 °C) namun demikian kapasitas panas yang dihasilkan putaran mesin 1,800 rpm belum mampu untuk menguapkan etanol di dalam *evaporator* hingga sampai dengan *tray* 9. Oleh karena itu pada *separator* A dan *separator* B belum dihasilkan distilat.

**Gambar 5.24**

Profil Temperatur Etanol pada *Tray* 70 mm dan Putaran Mesin 3,600 rpm

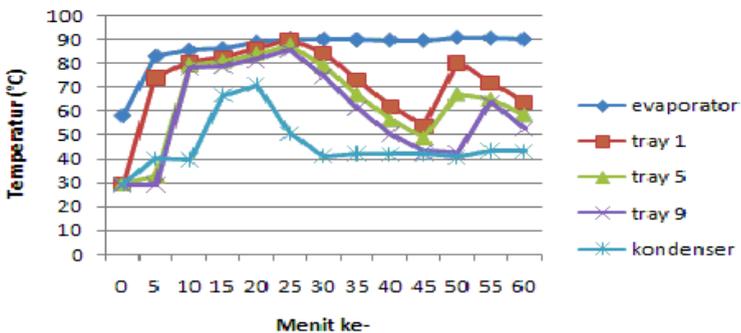


**Gambar 5.25**  
 Profil Temperatur Etanol pada *Tray* 100 mmdan  
 Putaran Mesin 3,600 rpm

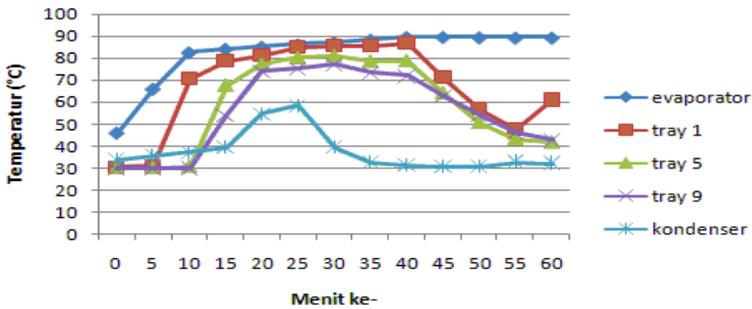


Pada putaran mesin 3,600 rpm seperti ditunjukkan oleh gambar 4.26 dan 4.27, pada menit ke-35 temperatur pada separator A dan B baik di *evaporator*, *tray 1*, *tray 5* dan *tray 9* telah mengalami kenaikan. Temperatur *evaporator* naik mendekati 90 °C dan kemudian relatif konstan. Hal ini dapat dimengerti pada temperatur konstan tersebut panas yang diserap *evaporator* dari gas buang digunakan untuk menguapkan etanol. Jika dibandingkan antara *separator A* dan *separator B*, kenaikan temperatur lebih cepat dicapai oleh *separator A* sehingga lebih cepat pula menghasilkan distilat etanol.

**Gambar 5.26**  
 Profil Temperatur Etanol pada *Tray* 70 mm  
 dan Putaran Mesin 5,400 rpm

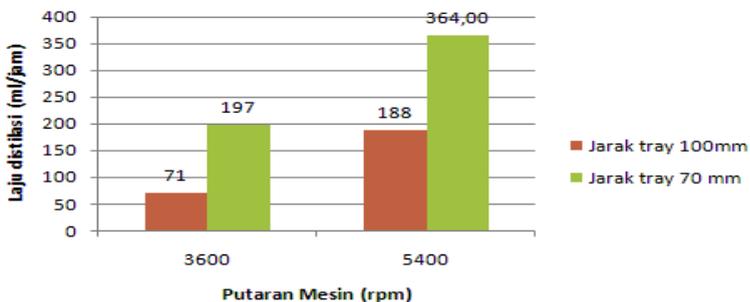


**Gambar 5.27**  
 Profil Temperatur Etanol pada Tray 100 mm  
 dan Putaran Mesin 5,400 rpm

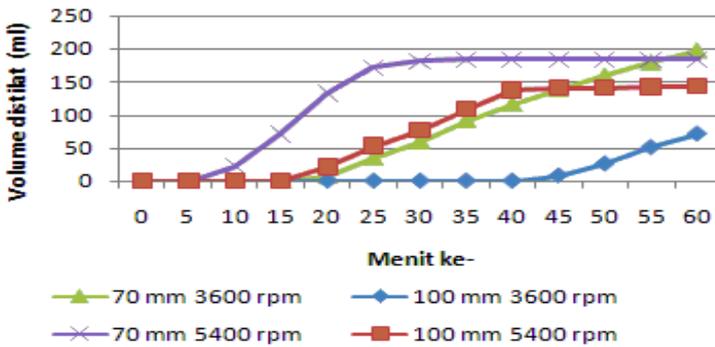


Pada gambar 4.28 dan 4.29 di atas, temperatur pada komponen *compact destillator* lebih cepat mengalami kenaikan. Temperatur pada *evaporator* mencapai 90 °C dengan cepat. Pada pengujian ini, temperatur *evaporator* dikontrol agar tetap terjaga dibawah 90 °C karena dikhawatirkan air ikut menguap bersama etanol. Oleh karenanya pada gambar terlihat temperatur pada *tray 1*, *tray 5*, *tray 9* dan *heat exchanger* (kondenser) mengalami penurunan setelah *valve* ditutup. Temperatur pada *separator A* lebih cepat mengalami kenaikan dibanding pada *separator B* dikarenakan dimensi *separator A* lebih pendek sehingga perpindahan panas menjadi lebih cepat dan tekanan yang dihambat juga kecil.

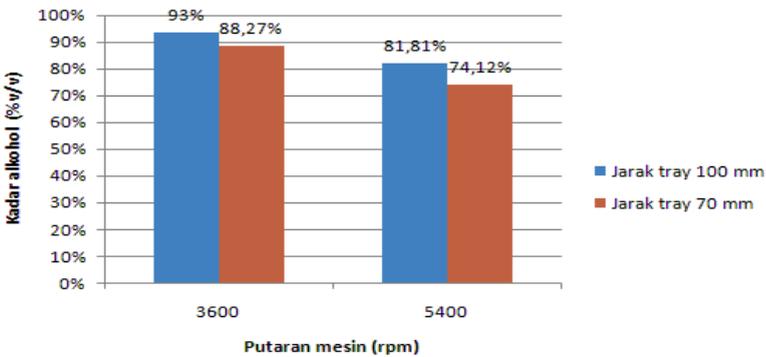
**Gambar 5.28**  
 Perbandingan Laju Distilasi sebelum Valve Ditutup  
 antara Tray 70 mm dan Tray 100 mm



**Gambar 5.29**  
Perbandingan Laju Distilasi Total antara *Tray* 70 mm dan *Tray* 100 mm



**Gambar 5.30**  
Perbandingan Kadar Distilat antara *Tray* 70 mm dan *Tray* 100 mm



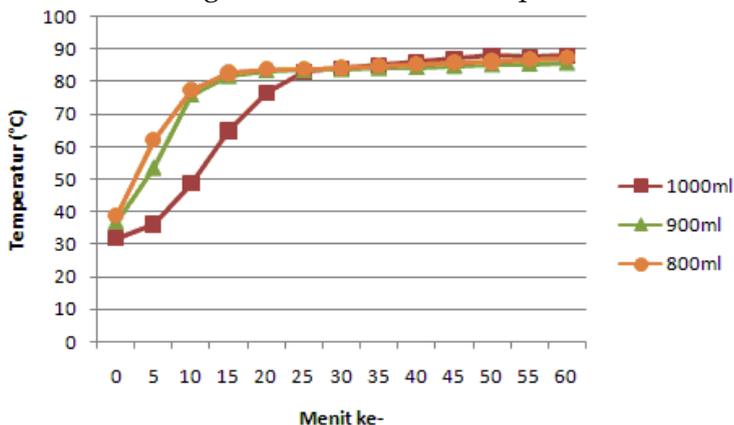
Pada gambar 4.30 menunjukkan laju distilasi sebelum *valve* gas buang ditutup, sedangkan pada gambar 4.31 laju distilasi total selama satu jam eksperimen dengan penutupan *valve*. Penutupan *valve* mengakibatkan laju distilasi berhenti sehingga volume distilat tetap seperti terlihat pada gambar 4.31. Berdasarkan pada gambar 4.30 dan 4.31, laju distilasi *separator A* lebih cepat dibanding *separator B*. Pada putaran mesin yang lebih tinggi, laju distilasi lebih cepat dibanding pada putaran mesin rendah. Laju distilasi maksimum dengan penutupan *valve* adalah 197 ml/jam pada pengujian *separator*

A dan putaran mesin 3,600 rpm. Sedangkan laju distilasi sebelum penutupan *valve* maksimum terjadi pada pengujian *separator A* dan putaran mesin 5,400 rpm sebesar 364 ml/jam. *Separator B* menghasilkan distilat etanol dengan kadar yang lebih tinggi dibanding *separator A*. Putaran mesin yang lebih tinggi menurunkan kadar etanol distilat baik pada *separator A* maupun pada *separator B* seperti ditunjukkan oleh gambar 4.32.

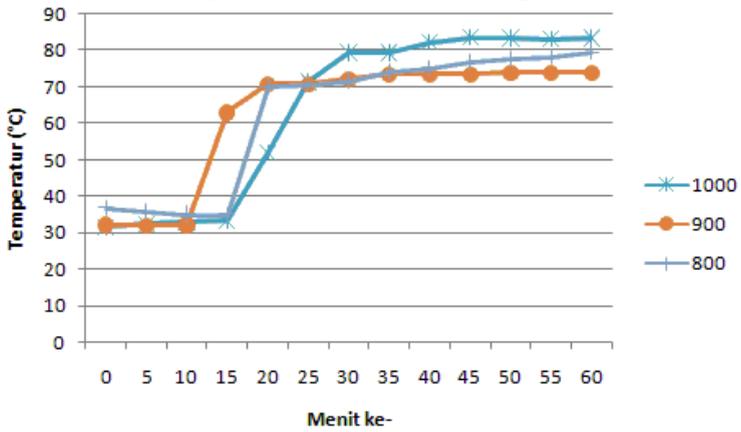
### E. Pengujian dengan Variasi Volume Umpan

Pengujian kerja *compact distillator* dilanjutkan dengan memvariasikan volume umpan *low grade* etanol yang akan didistilasi. Gambar 4.33 sampai dengan gambar 4.37 menunjukkan profil temperatur dengan variasi volume umpan 800 ml, 900 ml dan 1,000 ml pada putaran mesin 3,600 rpm.

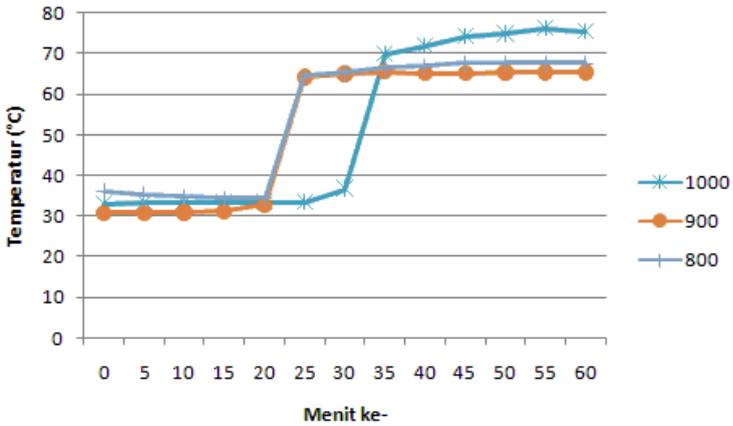
**Gambar 5.31**  
 Profil Temperatur Etanol pada *Evaporator*  
 dengan Variasi Volume Umpan



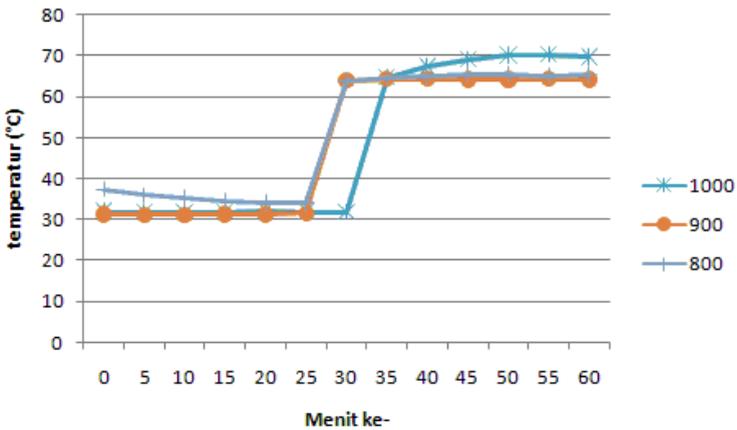
**Gambar 5.32**  
 Profil Temperatur Etanol pada *Tray 1*  
 dengan Variasi Volume Umpan



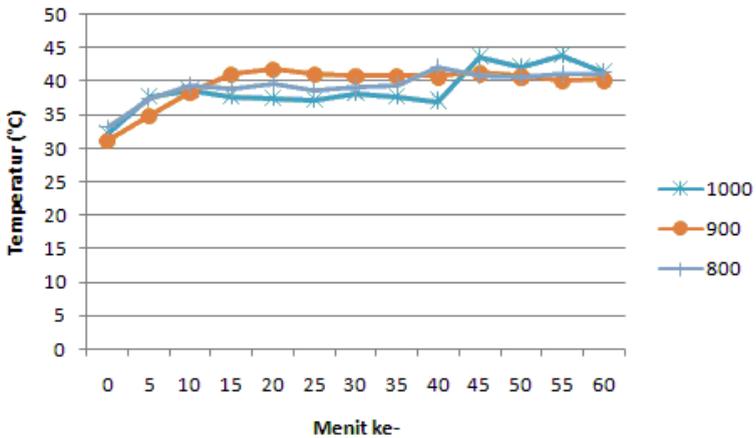
**Gambar 5.33**  
 Profil Temperatur Etanol pada *Tray 5*  
 dengan Variasi Volume Umpan



**Gambar 5.34**  
 Profil Temperatur Etanol pada Tray 9  
 dengan Variasi Volume Umpan



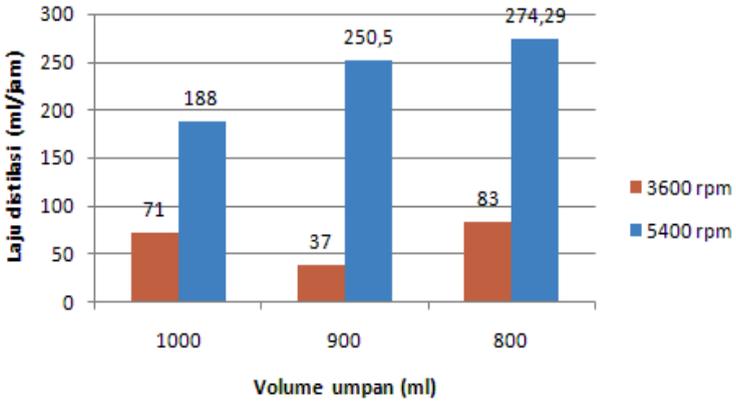
**Gambar 5.35**  
 Profil Temperatur Etanol pada Kondenser  
 dengan Variasi Volume Umpan



Seperti pada gambar 4.33 sampai dengan gambar 4.37 terlihat bahwa volume umpan yang lebih sedikit terlihat lebih cepat panas. Temperatur dengan volume umpan lebih banyak menghasilkan temperatur yang sedikit lebih tinggi pada tray 1, tray 5 dan tray 9.

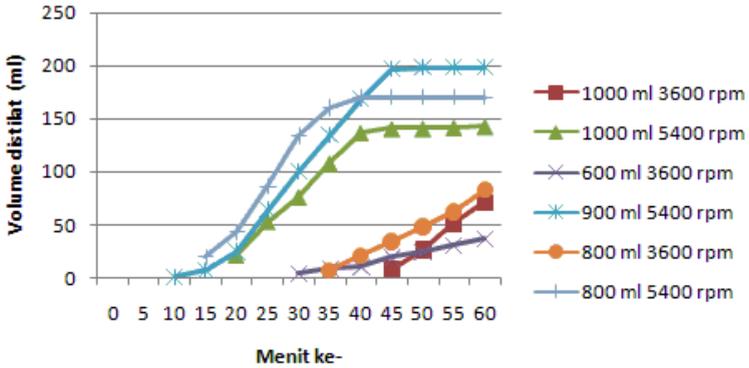
**Gambar 5.36**

Perbandingan Laju Distilasi sebelum *Valve* Ditutup dengan Variasi Volume Umpan

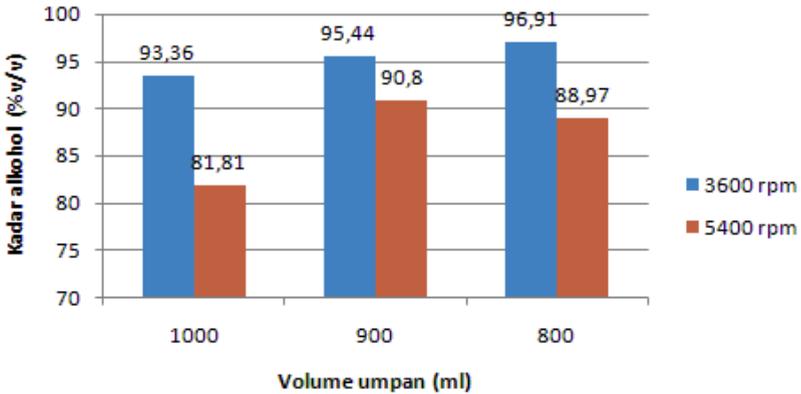


**Gambar 5.37**

Perbandingan Laju Distilasi Total dengan Variasi Volume Umpan



**Gambar 5.38**  
Perbandingan Kadar Distilat dengan  
Variasi Volume Umpan



Laju distilasi meningkat untuk volume umpan yang semakin sedikit seperti terlihat pada gambar 4.38 dan 4.39. Jumlah volume umpan yang semakin sedikit maka temperaturnya lebih cepat panas sehingga etanol dalam *evaporator* lebih cepat menguap. Pada putaran mesin 5,400 rpm laju distilasi juga ditentukan oleh waktu buka tutup *valve* sehingga laju distilasi terlihat naik turun. Kadar distilat ditunjukkan pada gambar 4.40 di mana volume umpan semakin sedikit kecenderungan kadar etanolnya semakin tinggi. Jika dilihat profil temperatur pada gambar 4.33 sampai dengan gambar 4.37, volume umpan yang lebih tinggi mengakibatkan temperaturnya lebih tinggi juga. Kadar distilat maksimum sebesar 96.91 % terjadi saat putaran mesin 3,600 rpm dengan volume umpan 800 ml.



# BAB 6

## CYCLE TO CYCLE VARIATIONS

---

*Cycle to cycle variations* (CCV) pembakaran pada mesin *Spark Ignition* (SI) adalah subjek penting yang telah dipelajari secara luas karena membatasi rentang operasi mesin. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengamati penyebab variasi siklik dalam proses pembakaran, mengarah ke variasi siklik dalam kinerja *output* mesin. Variasi siklik dapat diamati dan dikarakterisasi dari tekanan pembakaran dalam silinder yang diukur secara eksperimen.

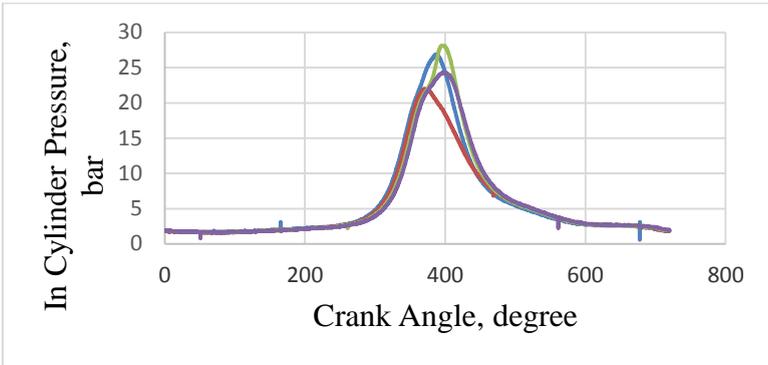
Tekanan silinder yang dihasilkan dari pembakaran mesin yang dilakukan dari putaran 4,000 rpm, 6,000 rpm, dan 8,500 rpm untuk setiap campuran bahan bakar dari E0, E5, E10, dan E15, dapat dilihat hasilnya pada gambar 5.1 sd 5.12 di bawah ini. Setiap campuran bahan bakar menghasilkan tekanan pembakaran yang berbeda-beda pada setiap siklusnya.

Pada putaran 4,000 rpm:

Apabila dilihat dari grafik pada putaran 4,000 rpm variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi pada campuran E5 dengan tekanan pembakarannya mencapai hampir 50 bar, dibandingkan dengan campuran E0 sendiri, dengan tekanan pembakaran yang hanya berkisar 25 bar.

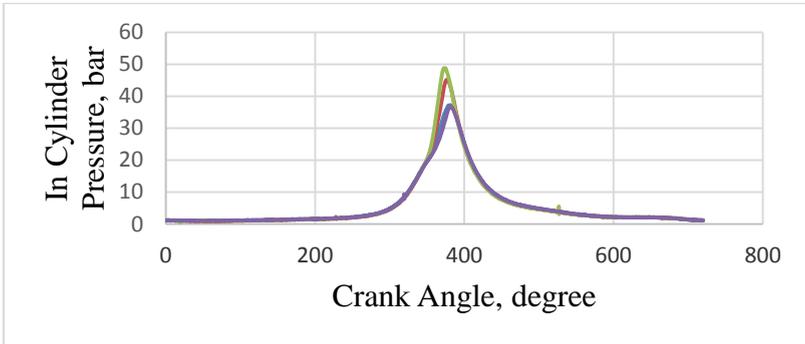
**Gambar 6.1**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E0)*



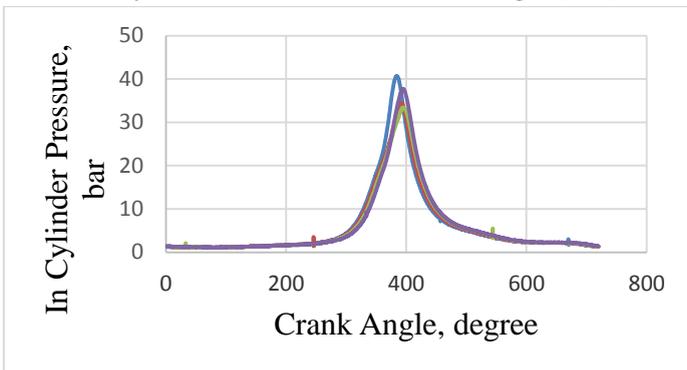
**Gambar 6.2**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5)*



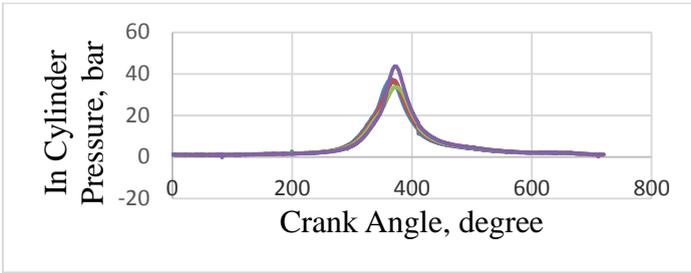
**Gambar 6.3**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10)*



**Gambar 6.3**

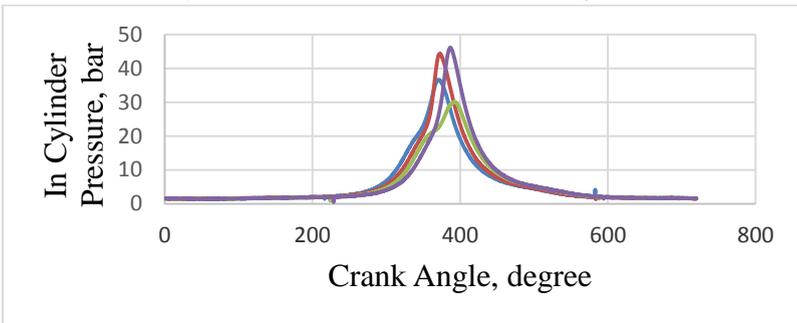
*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10)*



Pada putaran 6,000 rpm variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi pada campuran E5 dengan tekanan pembakaran mencapai 55 bar, dibandingkan dengan campuran E0 dengan tekanan pembakaran sekitar 45 bar.

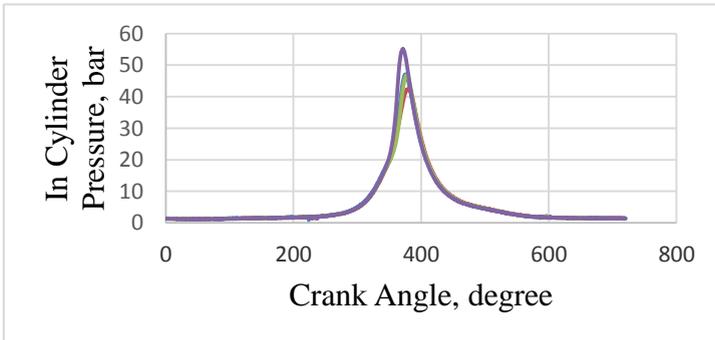
**Gambar 6.5**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E0)*



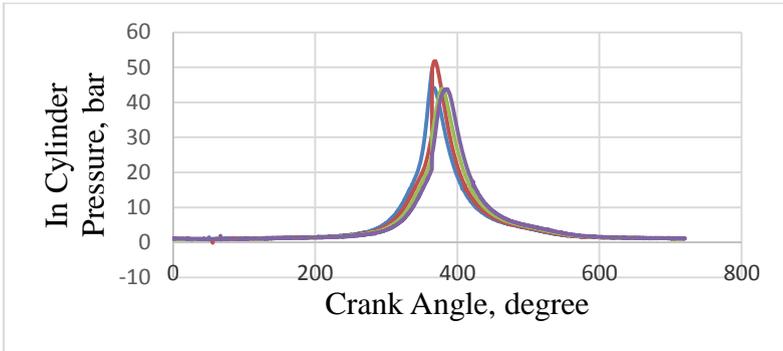
**Gambar 6.5**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E0)*



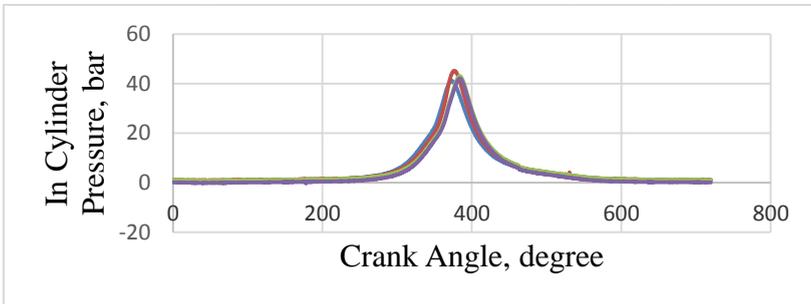
**Gambar 6.7**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10)*



**Gambar 6.8**

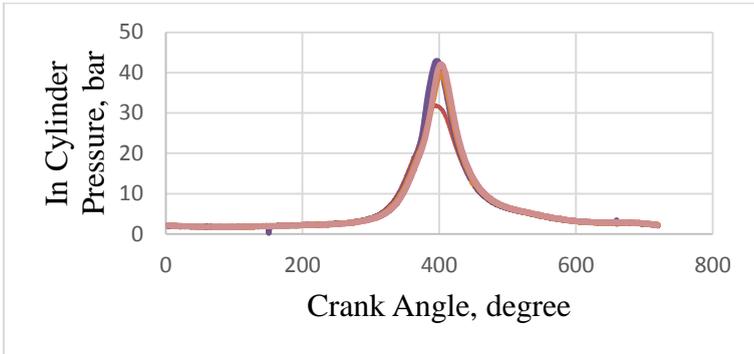
*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15)*



Pada putaran 8,500 rpm variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit juga terjadi pada campuran E5 dengan tekanan pembakaran mencapai 50 bar, dibandingkan dengan campuran E0 dengan tekanan pembakaran sekitar 42 bar (*uncertainty*  $\pm 0.15$ ).

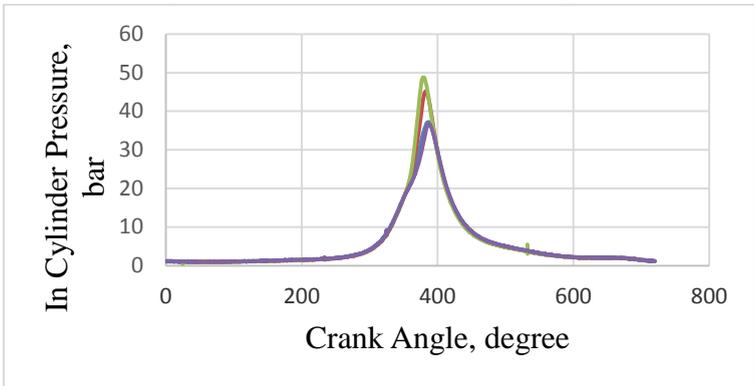
**Gambar 6.9**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E0)*



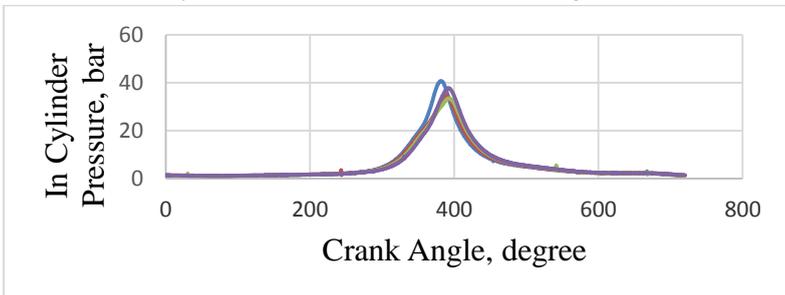
**Gambar 6.10**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5)*



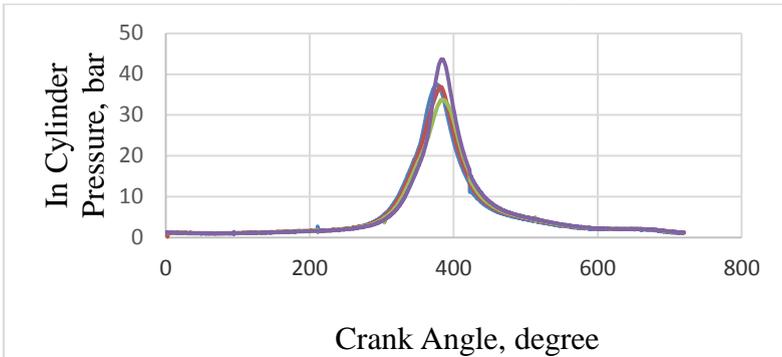
**Gambar 6.11**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10)*



**Gambar 6.12**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15)



Efek menguntungkan dari etanol sebagai bahan bakar adalah formasi *hydrogen bridge* nya mengandung lebih banyak oksigen (34.7 % berat) yang memungkinkan pembakaran lebih sempurna, dan panas laten penguapannya (725.4 kJ/L) lebih tinggi dari pada gasolin (223.2 kJ/L), sehingga memberikan asupan suhu yang lebih rendah pada *intake manifold* dan meningkatkan efisiensi volumetriknya.

Pada putaran mesin yang lebih tinggi pembakaran yang terjadi lebih cepat seiring dengan kecepatan waktu pengapiannya, waktu yang tersedia cukup singkat untuk menyelesaikan pembakaran dalam satu siklusnya, dimana dalam hal ini kecepatan rambatan api sangat diperlukan. Etanol memiliki *laminar flame speed* yang lebih tinggi (0.42 m/s) sehingga kecepatan rambatan api juga meningkat, dan kemungkinan juga dapat menurunkan *engine knock*, selain akibat dari tingginya nilai oktan pada etanol.

Jika diperhatikan pada grafik campuran bahan bakar dari E0 sampai dengan E15, grafik tekanan silinder pada E5 yang paling optimum, variasi sikliknya paling sedikit di setiap variasi putaran mesin, tetapi memang ada perbedaan tekanan silinder maksimum yang dihasilkan. Lain halnya dengan pada campuran E0, E10, dan E15 di setiap variasi putaran mesinnya,

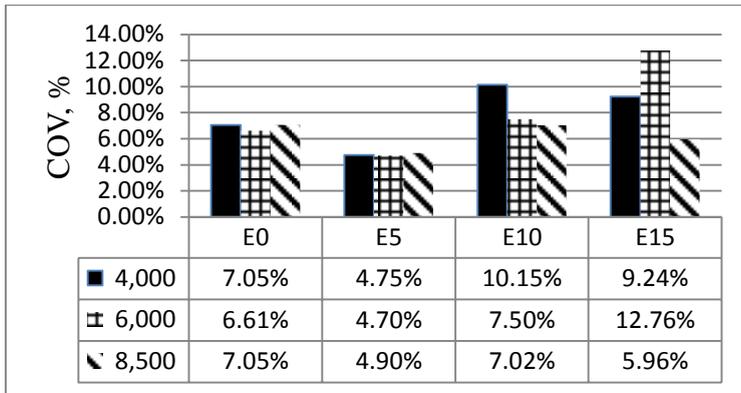
di mana terjadi perbedaan siklus pembakaran dari satu siklus ke siklus berikutnya. Penambahan 5% etanol pada gasolin mampu menurunkan tekanan uap 9.8 kPa (20%), dimana pengaruh tekanan uap bahan bakar terhadap kondisi mesin adalah saat bekerjanya mesin pada temperatur lingkungan rendah, temperatur lingkungan yang panas dan tinggi, dan saat akselerasi mesin. Apabila pembakaran terjadi lebih awal hal ini dapat menyebabkan tekanan silinder maksimum juga terjadi pada sudut poros engkol yang lebih mendekati TDC, seperti pada penjelasan sebelumnya bahwa jika pembakaran terjadi terlalu dini, akan menyebabkan kenaikan tekanan sebelum akhir langkah kompresi dan daya output mesin akan berkurang. Dengan demikian, peningkatan kerja selama langkah kompresi lebih besar dari peningkatan kerja yang dilakukan pada piston selama langkah usaha. Juga, dengan pembakaran yang lebih awal tekanan puncak dan temperatur mungkin dapat menyebabkan *knocking*. Sebaliknya jika *ignition timing* vs sudut engkol terlambat, maka meskipun piston bergerak selama langkah kompresi dan langkah usaha, tekanan selama siklus akan berkurang. Selain itu, ada risiko pembakaran terjadi sebelum katup buang membuka di akhir langkah usaha, dan ini mungkin menyebabkan katup buang terlalu panas.

Koefisien variasi tekanan rata-rata efektif ( $COV_{IMEP}$ ) banyak digunakan untuk mengevaluasi variasi siklus ke siklus (CCV).  $COV_{IMEP}$  adalah parameter yang paling umum diterima untuk menganalisis CCV.  $COV_{IMEP}$  seperti didefinisikan pada persamaan (2).

Berikut ini adalah COV yang dihasilkan untuk setiap campuran bahan bakar yang diukur pada kondisi putaran mesin 4,000 rpm, 6,000 rpm, dan 8,500 rpm.

**Gambar 6.13**

COV pada Setiap Variasi Campuran Bahan Bakar  
(uncertainty + 0.15)



Dari hasil grafik di atas, diperoleh bahwa campuran E5 pada kondisi putaran mesin menghasilkan COV yang paling rendah jika dibandingkan campuran bahan bakar lainnya termasuk jika dibandingkan dengan campuran E0 sekalipun. COV E5 yang paling rendah ini sesuai dengan variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

### A. Penambahan Sikloheksanol sebagai Koreksi COV

Etanol memiliki afinitas tinggi terhadap air karena mengandung sejumlah air di dalamnya. Hal ini tidak menjadi masalah jika hanya menggunakan etanol sebagai bahan bakar karena sepenuhnya bercampur dengan air, di mana etanol memiliki sifat polar yang mudah larut dengan air, tetapi beberapa masalah serius dapat muncul ketika campuran gasolin-etanol digunakan. Pemisahan fase dapat terjadi dalam campuran ini karena gasolin dan etanol tidak dapat bercampur sepenuhnya secara homogen [25]. Masalah ini dapat dicegah dengan menggunakan pelarut yang bersifat semi-polar (penyempurnaan kelarutan).

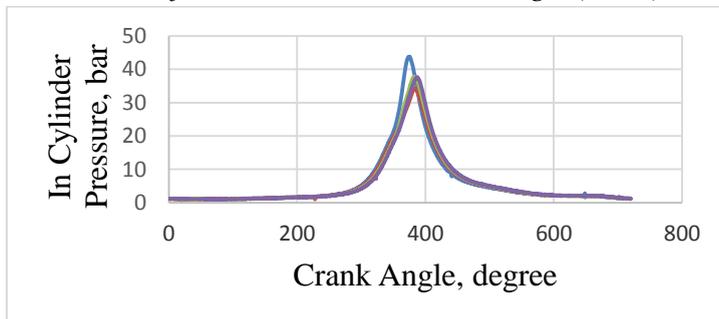
Zat aditif oksigenat yang ditambahkan pada setiap campuran bahan bakar E5, E10, dan E15 adalah sikloheksanol dengan volume 5 % vol/vol. Sikloheksanol termasuk golongan alkohol sekunder ( $C_6H_{12}O$ ), merupakan senyawa organik siklik dengan karbon C-6 dan adanya gugus OH (alkohol). Dengan bertambah panjangnya rantai karbon, dan dengan adanya gugus OH tersebut, pengaruh gugus hidroksil yang polar terhadap sifat molekul cenderung menurun, oleh karenanya sikloheksanol ini bersifat semi polar [24]. Hal ini menjadi pengikat antara gasolin dan etanol sehingga campuran keduanya dapat menjadi lebih homogen.

Tekanan silinder yang dihasilkan dari pembakaran mesin yang dilakukan dari putaran 4,000 rpm, 6,000 rpm, dan 8,500 rpm untuk setiap campuran bahan bakar dari E5, E10, dan E15, dengan penambahan zat aditif oksigenat sikloheksanol, dapat dilihat hasilnya pada gambar 5.14 sd 5.22 di bawah ini. Pada putaran 4,000 rpm:

Setiap campuran bahan bakar menghasilkan tekanan pembakaran yang berbeda-beda juga pada setiap siklusnya seperti sebelum dicampur dengan sikloheksanol. Apabila dilihat dari grafik pada putaran 4,000 rpm variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi pada campuran E5++ dengan tekanan pembakarannya mencapai hampir 45 bar.

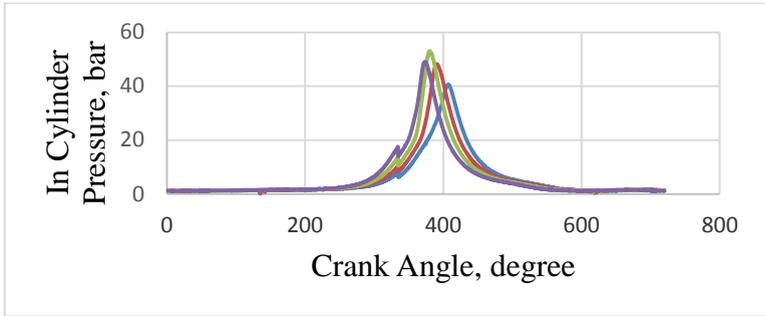
**Gambar 6.14**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++)*



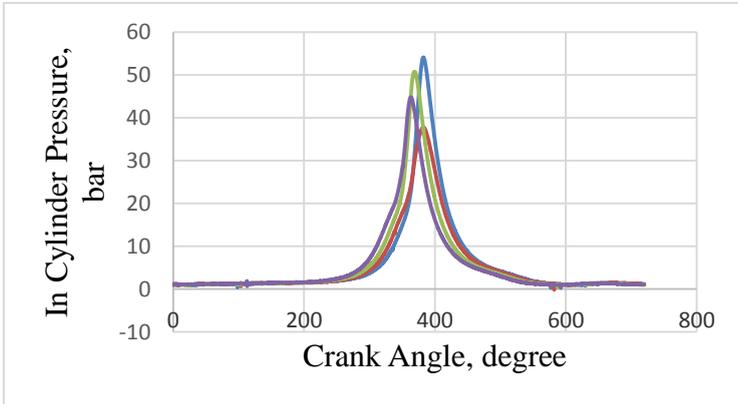
**Gambar 6.15**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++)



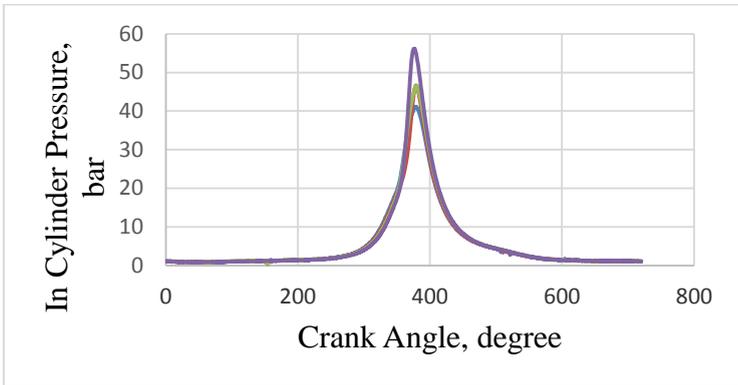
**Gambar 6.16**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++)



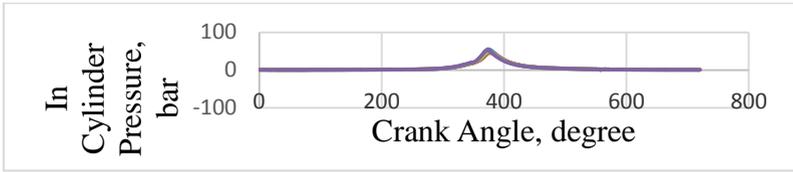
**Gambar 6.17**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++)



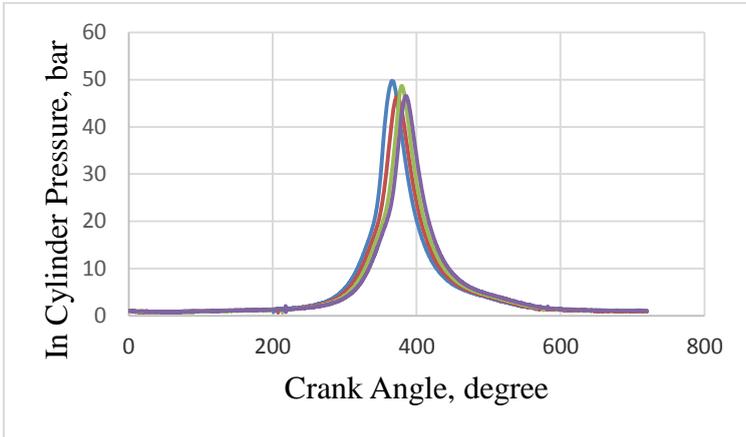
**Gambar 6.18**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++)



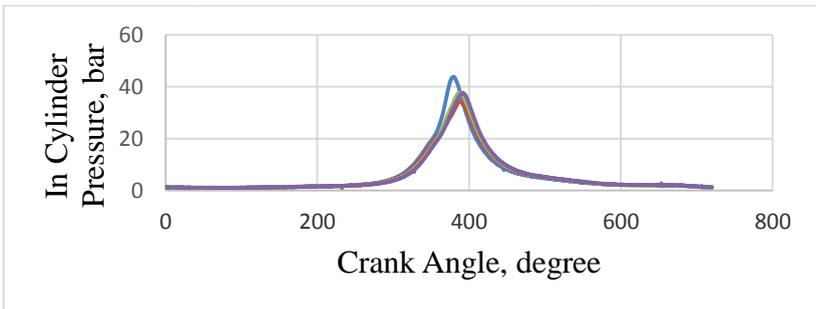
**Gambar 6.19**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++)



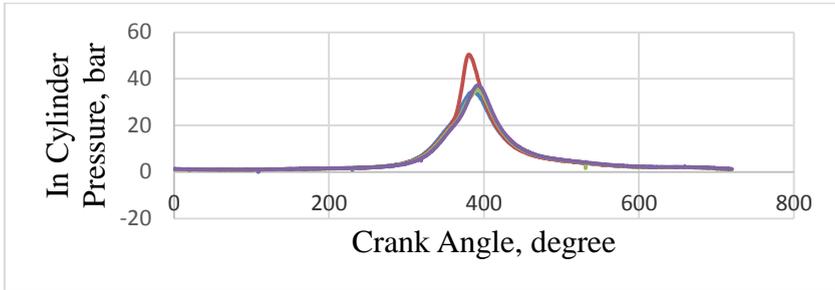
**Gambar 6.20**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++)



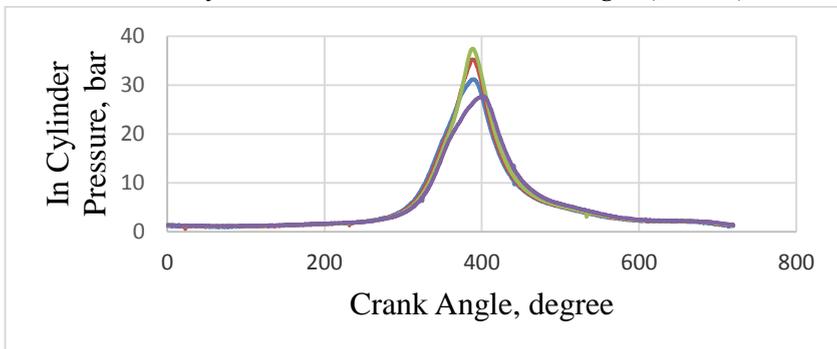
**Gambar 6.21**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++)



**Gambar 6.22**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++)

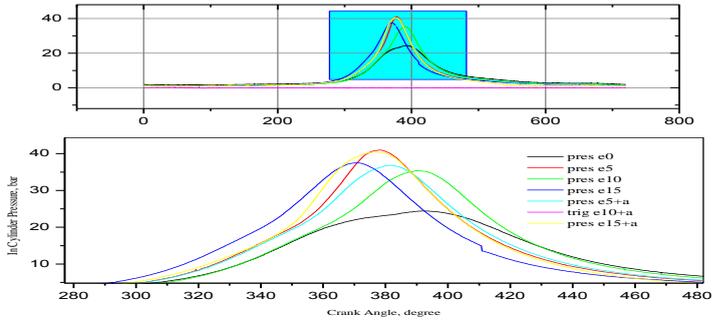


Pada putaran 6,000 rpm variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi pada campuran E5++ dengan tekanan pembakaran mencapai 57 bar. Tetapi pada putaran 8,500 rpm variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi pada campuran E10++ dengan tekanan pembakaran mencapai 50 bar (*uncertainty*  $\pm 0.15$ ).

Secara keseluruhan variasi tekanan pembakaran yang terjadi pada setiap campuran bahan bakar pada setiap kondisi putaran mesin adalah seperti gambar 5.23 sd 5.25 di bawah ini.

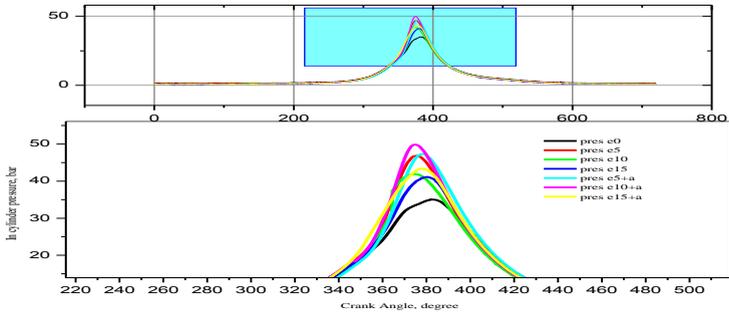
**Gambar 6.23**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle pada Campuran Bahan Bakar pada 4,000 rpm



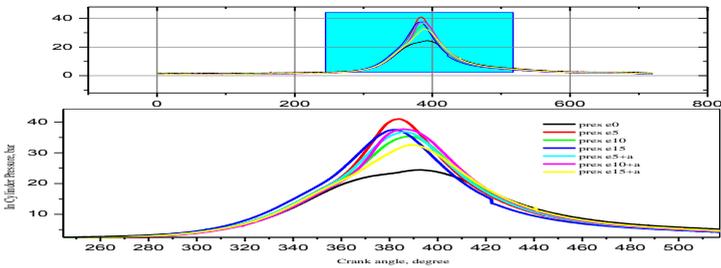
**Gambar 6.24**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle pada Campuran Bahan Bakar pada 6,000 rpm



**Gambar 6.25**

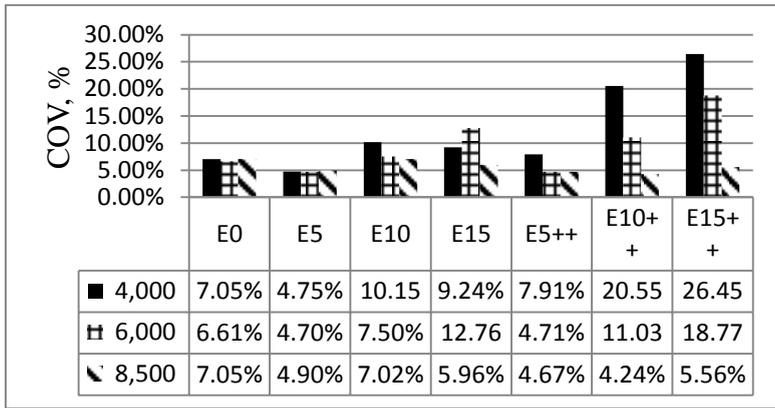
In Cylinder Pressure vs. Crank Angle pada Campuran Bahan Bakar pada 8,500 rpm



Dari gambar di atas, diperoleh bahwa campuran E10++ menghasilkan COV yang paling rendah pada putaran mesin 8,500 rpm, jika dibandingkan campuran bahan bakar lainnya. COV E10++ yang paling rendah ini sesuai dengan variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi.

**Gambar 6.26**

26 COV pada Setiap Variasi Campuran Bahan Bakar dengan Sikloheksanol (uncertainty + 0.15)



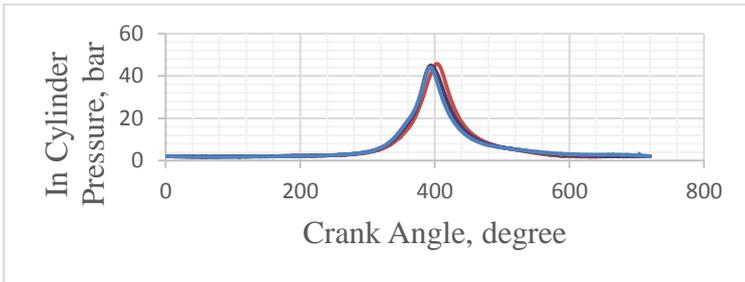
## B. Tingkat Koreksi Volume Sikloheksanol Terhadap COV

Pada pengujian sebelumnya diperoleh campuran E10++ dengan COV paling optimum yaitu 4.24 % dengan volume sikloheksanol 5 % vol/vol. Hal ini memperjelas hipotesa bahwa pada campuran bahan bakar gasolin dan etanol E10++ diperoleh hasil COV yang terkecil, tetapi penambahan volume sikloheksanol dapat menjadi variabel untuk mengoreksi nilai COV. Oleh karenanya pada pengujian selanjutnya adalah dengan memvariasikan volume sikloheksanol ke campuran tersebut dengan variasi volume 0.3 % vol/vol, 1.0 % vol/vol, dan 1.3 % vol/vol masih pada kondisi putaran mesin 8,500 rpm.

Gambar di bawah ini adalah variasi tekanan pembakaran pada E10++ dengan variasi volume sikloheksanol.

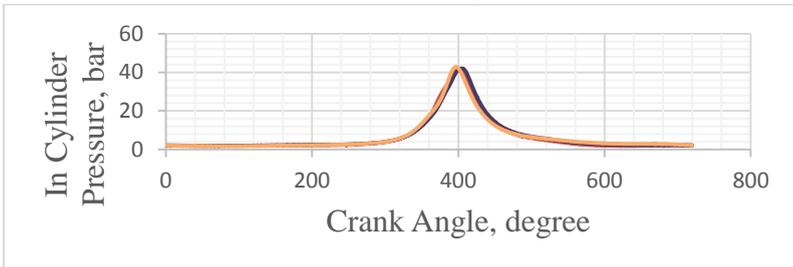
**Gambar 8.27**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 0.3% vol/vol)*



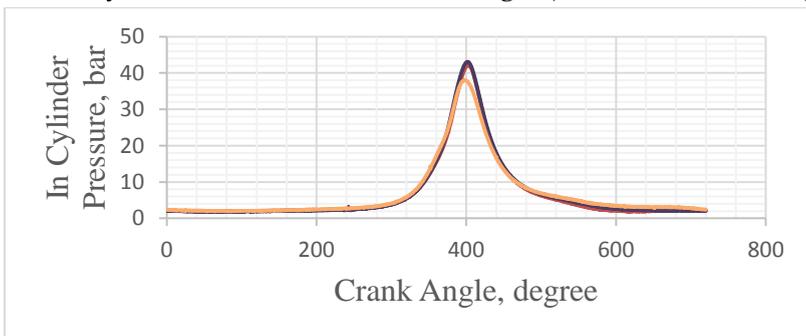
**Gambar 6.28**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 1.0% vol/vol)*



**Gambar 6.29**

*In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 1.3% vol/vol)*

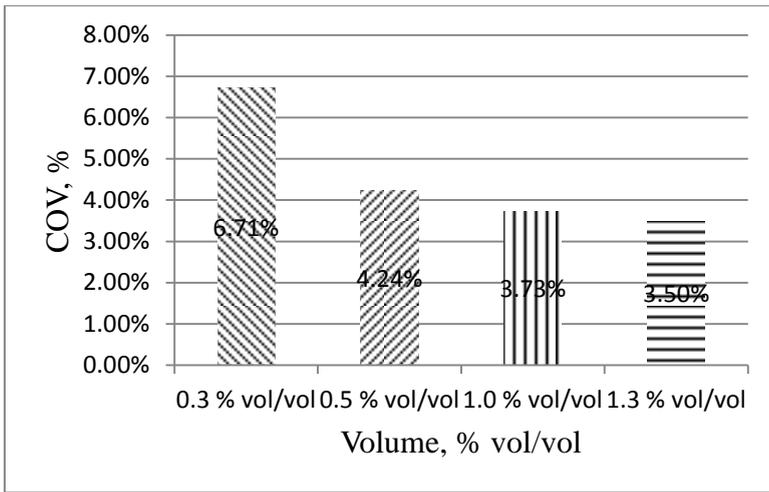


Dari hasil gambar di atas, dapat dilihat bahwa variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi pada campuran E10++ dengan sikloheksanol 1.3 % vol/vol di mana hal ini dapat menghasilkan COV yang paling rendah

dibandingkan dengan penambahan volume sikloheksanol variasi lainnya. Hasil COV keseluruhan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

**Gambar 6.30**

COV pada Setiap Variasi Sikloheksanol pada Campuran E10  
(uncertainty + 0.15)



Pada gambar 6.30 di atas dapat dilihat adalah penambahan volume zat oksigenat sikloheksanol dapat mempengaruhi COV tekanan pembakaran, dimana penambahan dengan volume 1.3 % vol/vol pada campuran E10 menghasilkan COV yang paling kecil dibandingkan pada penambahan volume 0.3 % vol/vol. Salah satu penyebabnya adalah sifat semi polar dari sikloheksanol sehingga bisa mengikat lebih banyak etanol dan gasolin yang menyebabkan campuran bahan bakar tersebut semakin homogen dan pada akhirnya dapat mempengaruhi hasil pembakaran campuran tersebut.

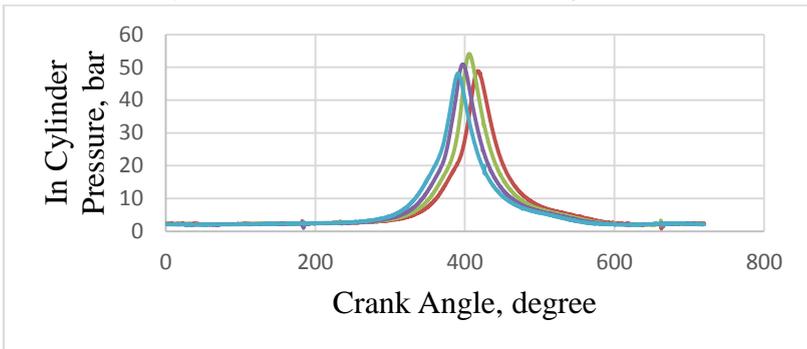
Hasil COV yang kecil mengindikasikan bahwa fluktuasi tekanan pembakaran antar siklus relatif kecil, kondisi ini yang mengakibatkan problem fluktuasi *torque* berkurang sehingga operasional mesin lebih stabil.

### C. Penambahan Sikloheptanol sebagai Koreksi COV

Selain zat aditif oksigenat sikloheksanol, pengujian juga dilanjutkan dengan zat aditif oksigenat sikloheptanol yang juga ditambahkan pada setiap campuran bahan bakar E5, E10, dan E15 dengan volume 5 % vol/vol. Sikloheptanol ( $C_7H_{14}O$ ), merupakan senyawa organik siklik dengan karbon C-7. Sama halnya dengan sikloheksanol yang memiliki karbon C-6, dengan bertambah panjangnya rantai karbon, dan dengan adanya gugus OH tersebut, pengaruh gugus hidroksil yang polar terhadap sifat molekul cenderung menurun, oleh karenanya sikloheptanol ini juga bersifat semakin semi polar [24]. Hal ini menjadi pengikat antara gasolin dan etanol sehingga campuran keduanya dapat menjadi lebih homogen. Pada putaran 4,000 rpm:

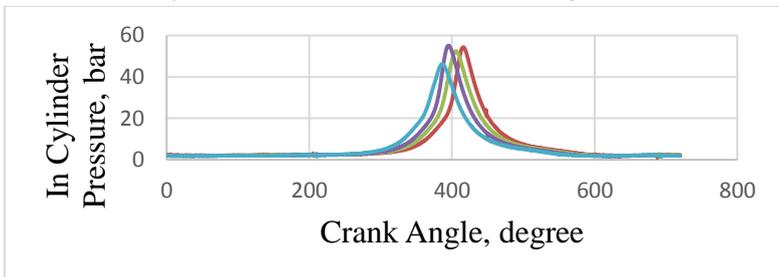
**Gambar 6.31**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++)



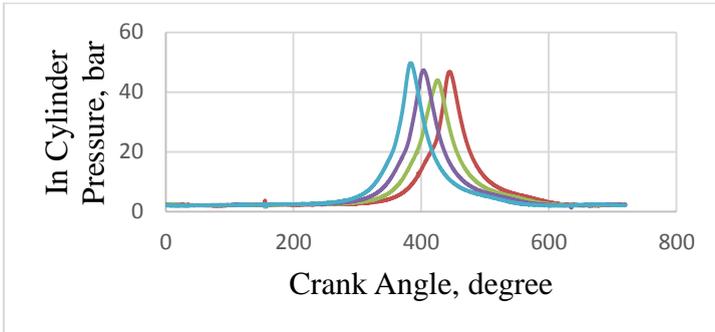
**Gambar 6.32**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++)



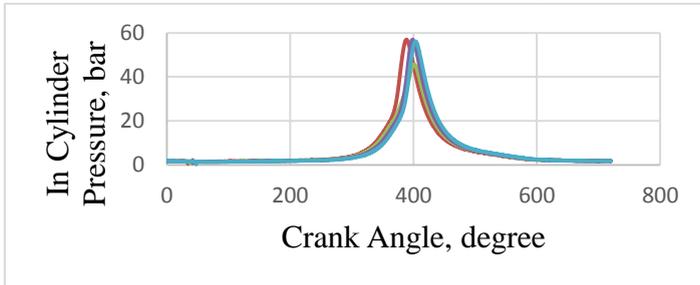
**Gambar 6.33**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++)



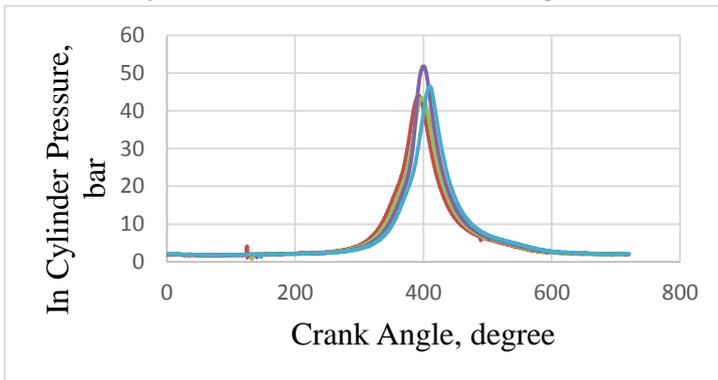
**Gambar 6.34**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++)



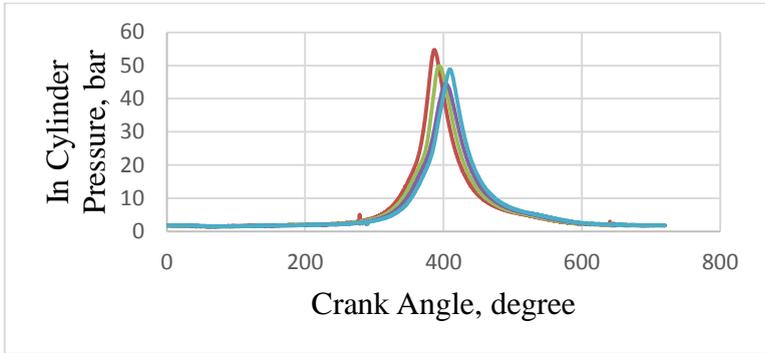
**Gambar 6.35**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++)



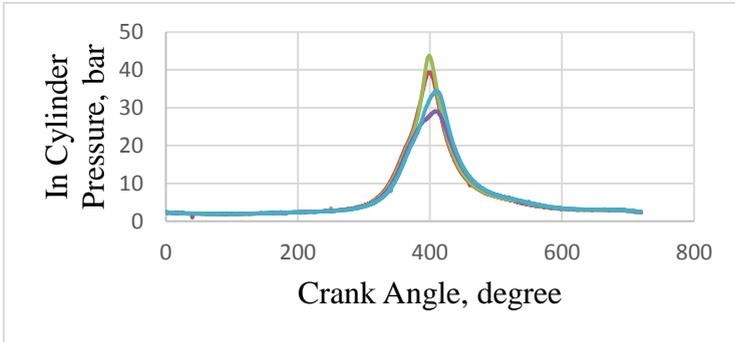
**Gambar 6.36**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++)



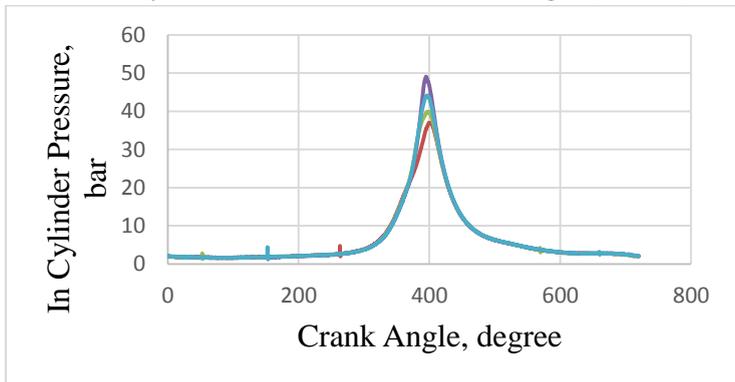
**Gambar 6.37**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E5++)

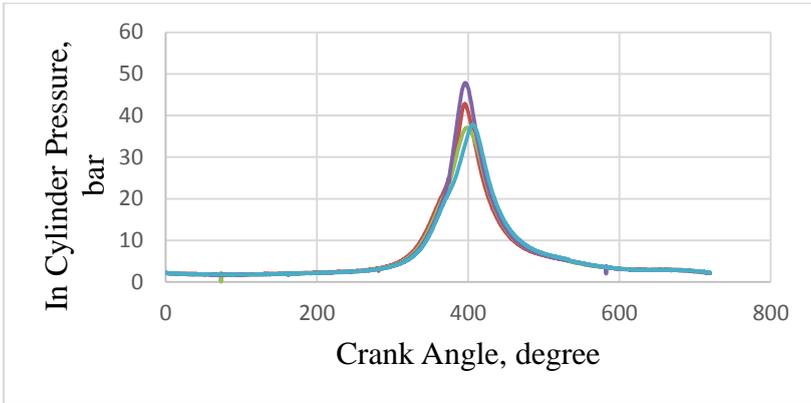


**Gambar 6.38**

In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10++)

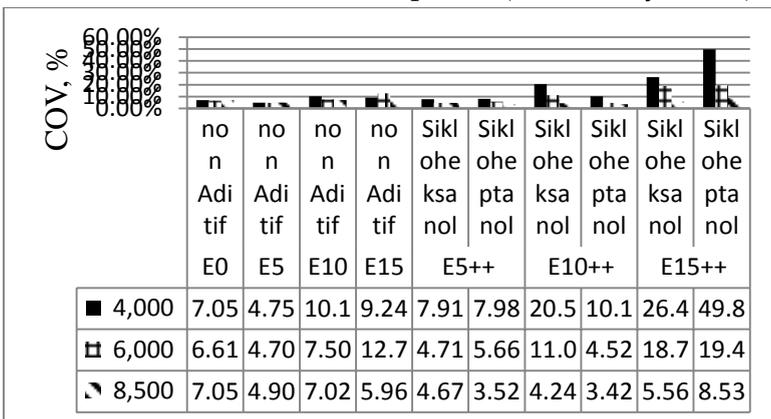


**Gambar 6.39**  
In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E15++)



Dari gambar 6.31 sd 6.39 di atas, diperoleh bahwa campuran E10++ dengan aditif oksigenat cycleheptanol menghasilkan COV yang paling rendah yaitu 3.42 % pada putaran mesin 8,500 rpm, jika dibandingkan campuran bahan bakar lainnya. COV E10++ yang paling rendah ini sesuai dengan variasi tekanan pembakaran yang paling sedikit terjadi.

**Gambar 6.40**  
COV pada Setiap Variasi Campuran Bahan Bakar dengan Sikloheksanol dan Sikloheptanol (uncertainty + 0.15)



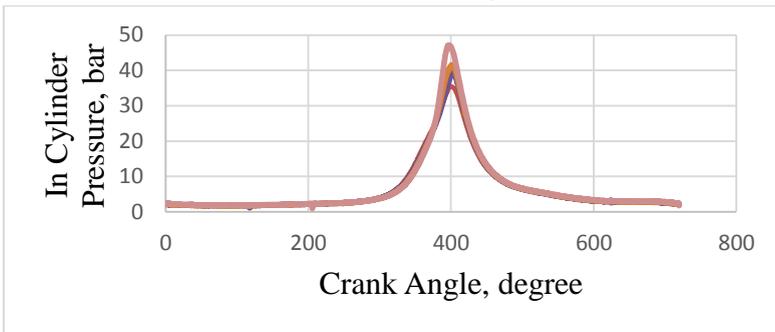
#### D. Tingkat Koreksi Volume Sikloheptanol Terhadap COV

Pada pengujian sebelumnya dengan penambahan sikloheptanol diperoleh campuran E10++ dengan COV paling optimum yaitu 3.42 % dengan volume sikloheptanol 5 % vol/vol. COV ini adalah yang terkecil dibandingkan dengan penambahan sikloheksanol pada campuran dan putaran mesin yang sama yaitu pada E10++ dan 8,500 rpm, di mana COV nya hanya sebesar 4.24 %. Selain itu COV ini juga paling kecil dibandingkan COV ketika 0.5 % vol/vol sikloheptanol ditambahkan pada campuran E5 pada putaran 8,500 rpm. Dan pada pengujian selanjutnya adalah dengan memvariasikan volume sikloheptanol ke campuran yang sama dengan variasi volume 1.3 % vol/vol dan masih pada kondisi putaran mesin 8,500 rpm.

Gambar di bawah ini adalah variasi tekanan pembakaran pada E10++ dengan penambahan volume sikloheptanol 1.3 % vol/vol.

**Gambar 6.41**

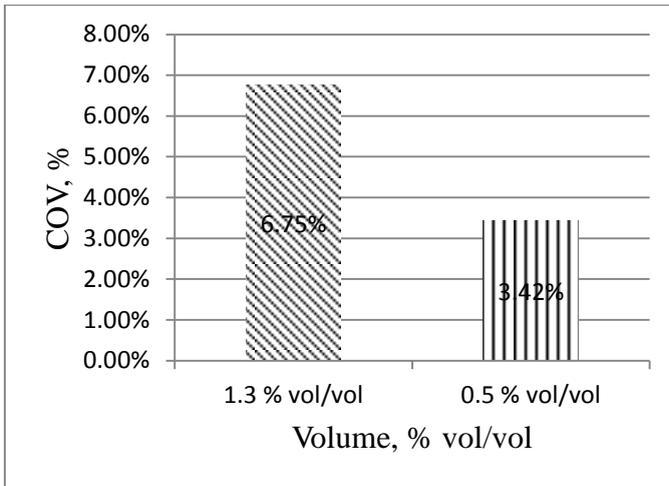
In Cylinder Pressure vs. Crank Angle (E10 + 1.3% vol/vol)



Adapun hasil perbandingan COV pada variasi penambahan volume sikloheptanol antara 0.5 % vol/vol dengan 1.3 % vol/vol seperti pada gambar 5.42 di bawah ini.

**Gambar 6.42**

COV pada Setiap Variasi Sikloheptanol pada Campuran E10  
(uncertainty + 0.15)



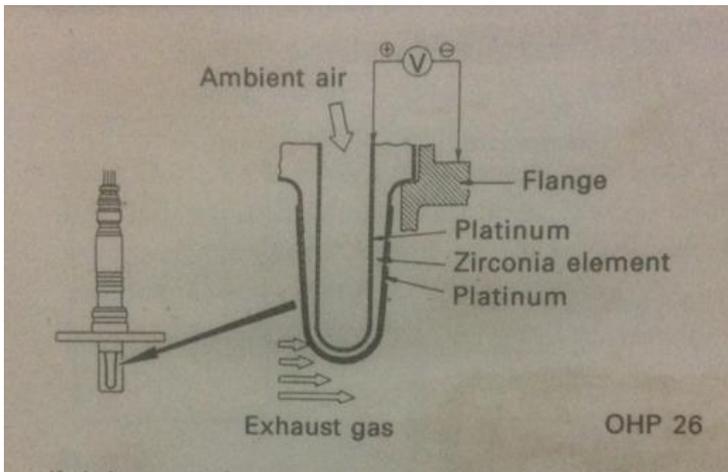
### **E. Ignition Timing, Injection Duration, dan Air Fuel Ratio Feed Back Correction**

Sensor oksigen mendeteksi apakah perbandingan udara bahan bakar terlalu gemuk atau kurus. Sensor ini terletak di dalam exhaust *manifold* di bagian dalam pipa gas buang. Sensor oksigen terdiri dari elemen konduktor yang dibuat dari zirconium dioxide ( $ZrO_2$ ) sejenis keramik. Elemen ini dilapisi platinum pada kedua sisinya, bagian dalam dan luar. Udara luar berhubungan dengan sisi dalam sensor, dan sisi luar sensor berhubungan dengan gas buang [29].

Bila konsentrasi oksigen pada permukaan dalam elemen zirconium berbeda banyak dengan konsentrasi pada permukaan luar saat temperatur tinggi (400 °C atau lebih tinggi), elemen zirconium membangkitkan tegangan, yang bekerja sebagai sinyal OX ke *Engine ECU*, kemudian menginformasikan tentang konsentrasi oksigen di dalam gas buang. Bila perbandingan campuran udara bahan bakar kurus, pada gas buang terdapat banyak oksigen, hasilnya

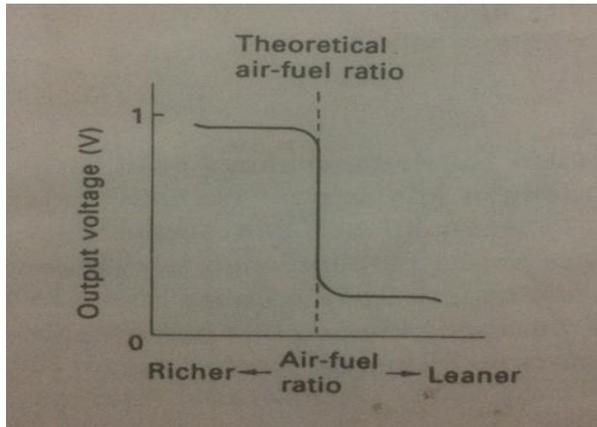
kecil sekali perbedaannya antara konsentrasi oksigen di sisi dalam dan luar sensor. Karena itu, tegangan dari elemen zirconium rendah (mendekati nol). Sebaliknya bila campuran gemuk, oksigen dalam gas buang hampir tidak ada. Hal ini menghasilkan perbedaan besar antara konsentrasi di dalam dan di luar sensor, dan tegangan yang dihasilkan elemen zirconium besar (maksimum kira-kira 1 volt)

. **Gambar 6.43**  
Oksigen Sensor



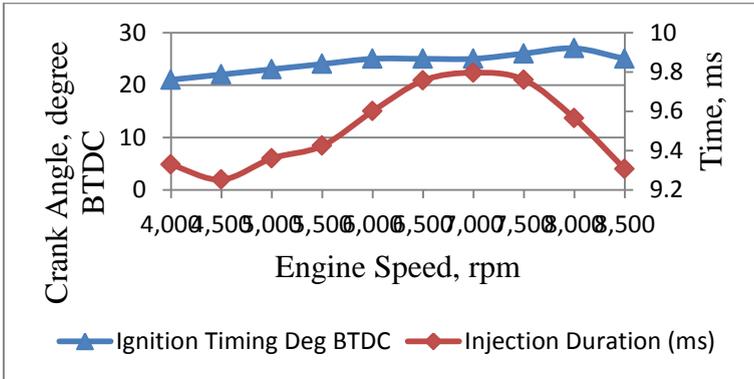
Platinum (yang dilapisi elemen) bekerja sebagai katalis, menyebabkan oksigen dan CO dalam gas buang bereaksi. Hal ini mengurangi volume oksigen dan menambah sensitifitas sensor. Berdasarkan sinyal dari sensor ini, *Engine ECU* menambah atau mengurangi volume penginjeksian agar perbandingan udara bahan bakar konstan (mendekati perbandingan teoritis).

**Gambar 6.44**  
Air Fuel Ratio

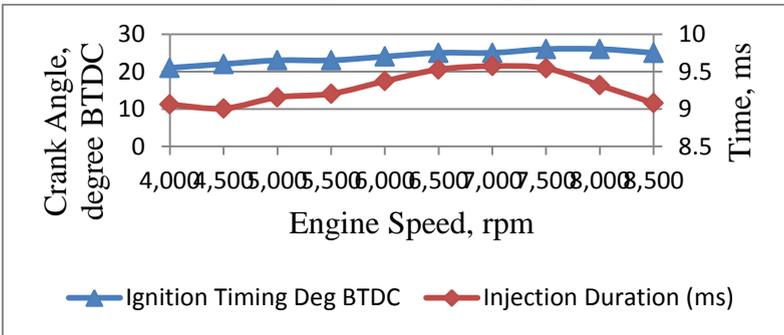


Koreksi *ignition timing* dan *injection duration* pada setiap campuran bahan bakar dapat ditunjukkan pada gambar 5.45 sd 5.51 di bawah ini. Secara umum *ignition timing* akan maju ketika putaran mesin bertambah tinggi, hal ini karena pada putaran mesin yang lebih tinggi, waktu yang tersedia cukup singkat untuk menyelesaikan pembakaran dalam satu siklusnya, pembakaran yang terjadi menjadi lebih cepat sehingga *timing ignition* memang harus dimajukan lebih awal, berkaitan dengan ini pun kecepatan rambatan api sangat diperlukan. Etanol memiliki *laminar flame speed* yang lebih tinggi (0.42 m/s) sehingga kecepatan rambatan api juga meningkat, dan kemungkinan juga dapat menurunkan *engine knock*, selain akibat dari tingginya nilai oktan pada etanol. Sedangkan *injection duration* akan bertambah sesuai dengan meningkatnya putaran mesin, dan pada akhirnya menurun perlahan (*fuel cut off*), untuk menghindari terjadinya *over running* dan mempertahankan *air fuel ratio* (AFR).

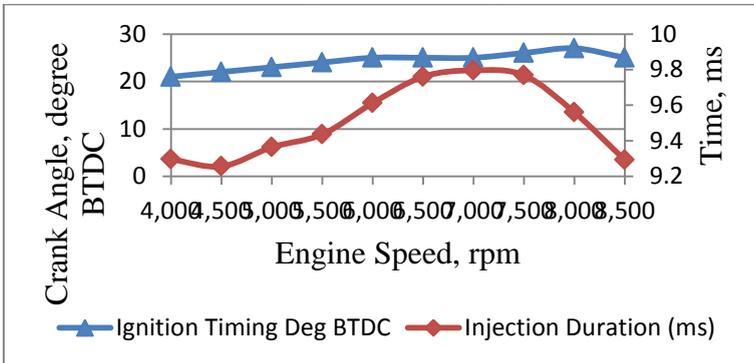
**Gambar 6.45**  
Koreksi Ignition Timing pada E0



**Gambar 6.46**  
Koreksi Ignition Timing pada E5

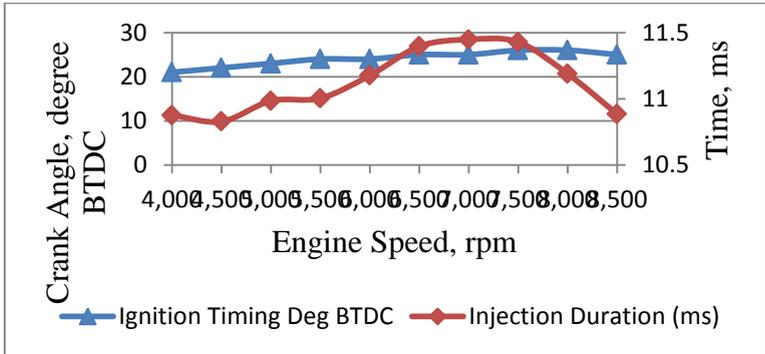


**Gambar 6.47**  
Koreksi Ignition Timing pada E10



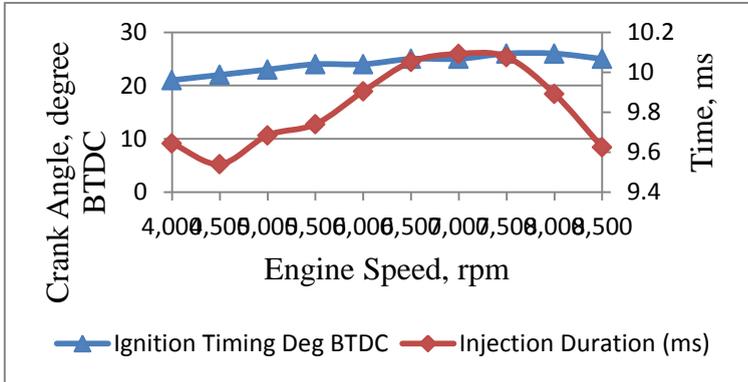
**Gambar 6.48**

Koreksi Ignition Timing pada E15



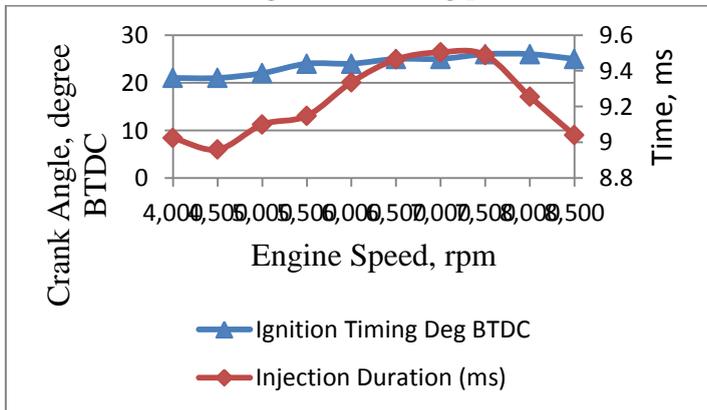
**Gambar 6.49**

Koreksi Ignition Timing pada E5++



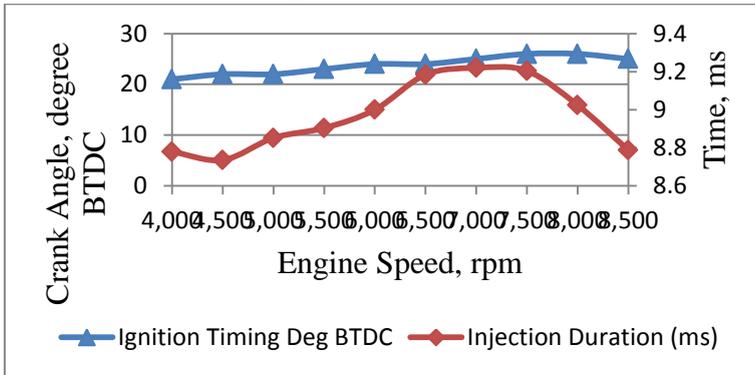
**Gambar 6.50**

Koreksi Ignition Timing pada E10++



**Gambar 6.51**

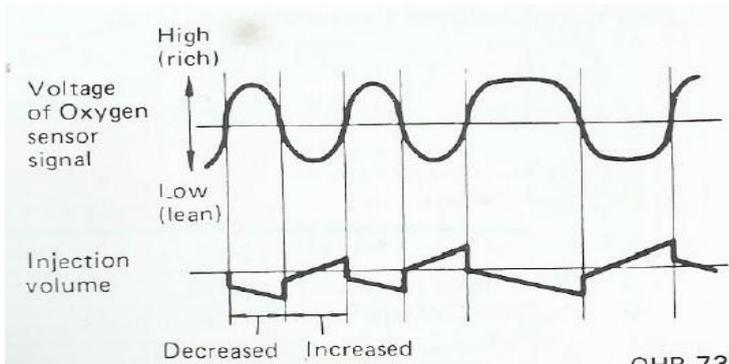
Koreksi Ignition Timing pada E15++



Untuk mempertahankan AFR mendekati tingkat AFR teoritis, ECU mengoreksi *injection duration* berdasarkan signal-signal dari sensor oksigen (ini disebut *closed loop operation*). Jika ECU membandingkan tegangan signal-signal yang dikirim dari sensor oksigen dengan tegangan signal lebih tinggi, dari yang ditetapkan, ECU menetapkan AFR lebih kaya dibanding AFR teoritis dan dikurangnya jumlah bahan bakar yang diinjeksikan pada nilai yang tepat.

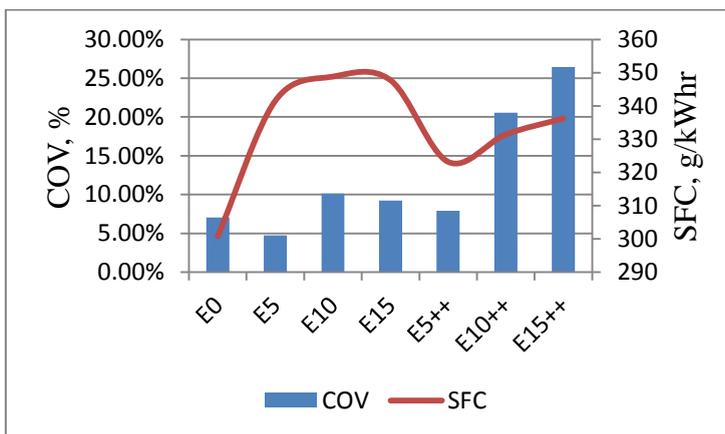
Jika tegangan signal lebih rendah, ECU menetapkan AFR lebih kurus dibanding AFR teoritis, dan menambah jumlah bahan bakar yang diinjeksikan. Variasi koefisien koreksi ini pada tingkat 0.8 sampai 1.2 dan 1.0 selama operasi *open loop*.

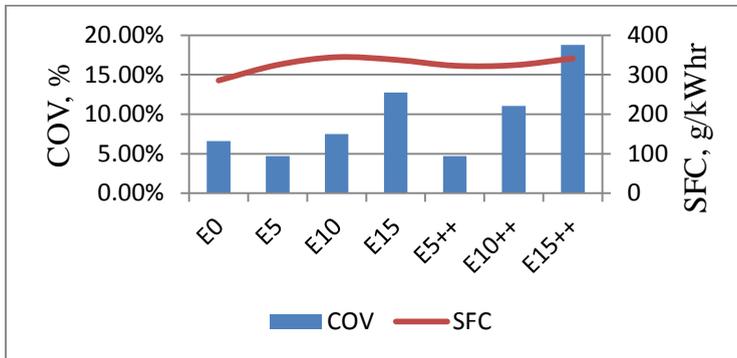
**Gambar 6.52**  
Voltage Sensor Oksigen dan Injection Volume [29]



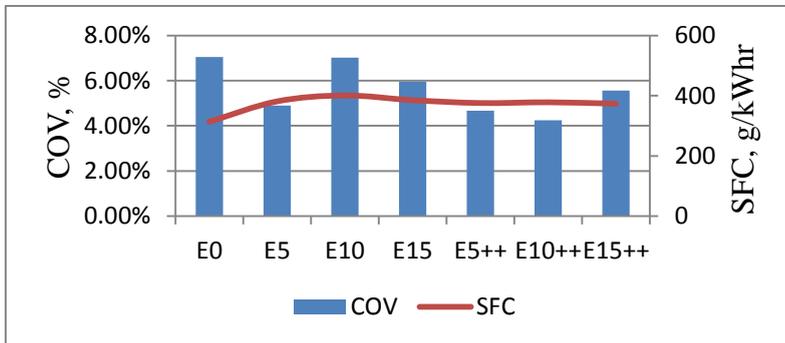
Gambar 5.53 sd 5.59 berikut ini adalah koreksi AFR pada setiap campuran bahan bakar. *Injection duration* akan terkoreksi berdasarkan sinyal dari oksigen sensor, secara umum dapat dilihat bahwa ketika tegangan oksigen sensor turun, maka campuran bahan bakar terdeteksi kurus sehingga *injection duration* akan bertambah, begitu juga sebaliknya.

**Gambar 6.68**  
COV vs. SFC pada Setiap Campuran Bahan Bakar (a) pada 4,000 rpm, (b) pada 6,000 rpm dan (c) pada 8,500 rpm





(b)



(c)

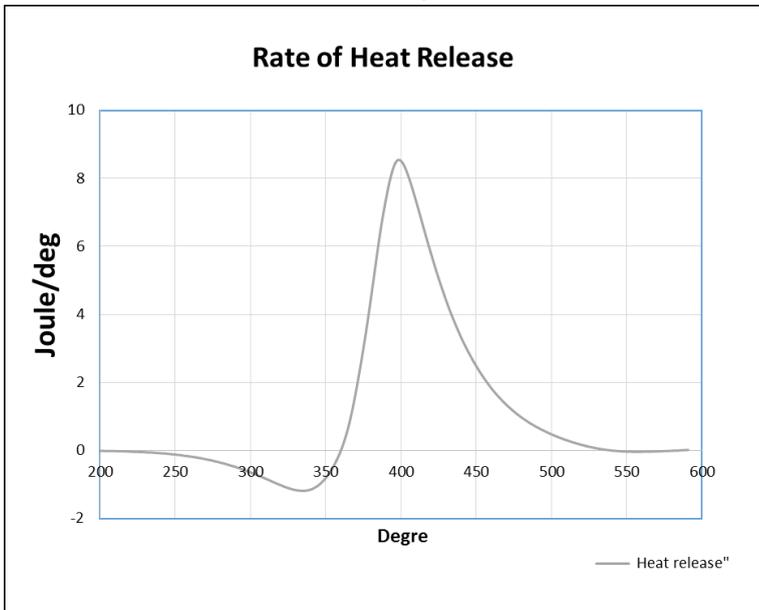
Perhitungan *heat release* sesuai dengan tekanan silinder (persamaan 8) ditujukan untuk mendapatkan beberapa informasi tentang proses pembakaran di mesin. *Heat release rate* menggambarkan kinerja mesin dalam berbagai kondisi operasi dan kinerja mesin yang sama pada kondisi yang sama. Selain itu, sifat fisik dan kimia dari bahan bakar yang digunakan dalam mesin pembakaran internal adalah satu dari parameter utama yang mempengaruhi *heat release rate* tersebut.

Pada putaran 4,000 rpm untuk campuran E10++ mampu meningkatkan *heat release* paling besar menjadi 8.54

J/deg, sedangkan pada putaran 6,000 rpm dan 8,500 rpm *heat release* yang paling besar tetap dihasilkan oleh campuran E10++ masing - masing sebesar 8.04 J/deg dan 8.01 J/deg. Ini menunjukkan bahwa dengan penambahan zat aditif oksigenat ke dalam campuran mampu meningkatkan *heat release*, salah satu penyebab hal ini terjadi adalah nilai densitas sikloheksanol yang lebih tinggi (0.96 kg/L) dari etanol (0.79 kg/L) dan dari gasolin (0.7 - 0.75 kg/L) sehingga pada volume yang sama jumlah bahan bakar akan lebih berat sehingga energi yang dihasilkan dapat setara bahkan lebih besar.

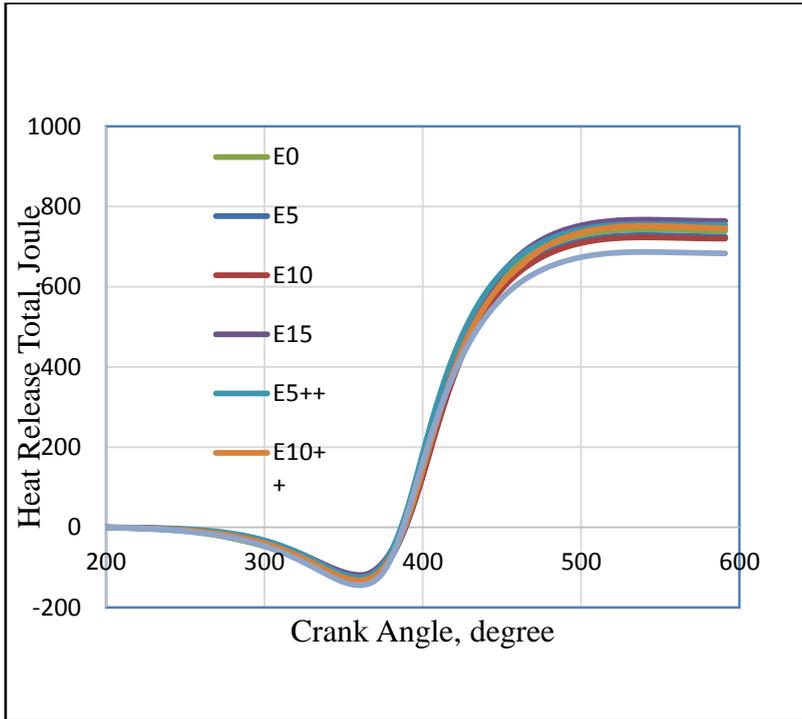
**Gambar 6.69**

Heat Release Rate E10++ pada 4,500 rpm  
(uncertainty + 0.35)



**Gambar 6.70**

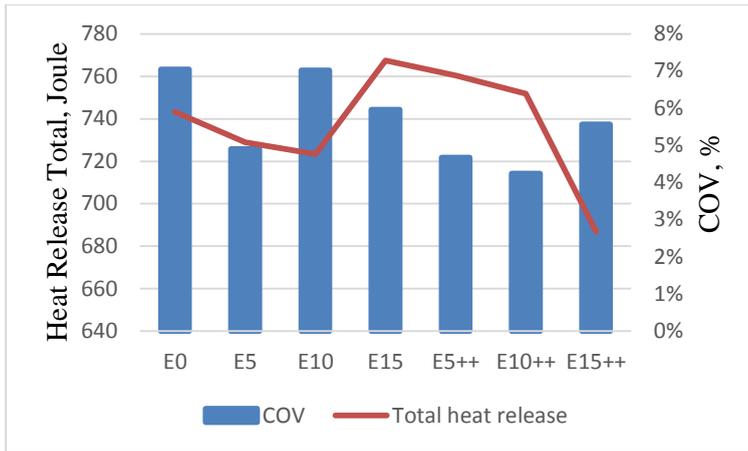
Heat Release Total vs. Crank Angle (uncertainty + 0.35)



Semakin besar total *heat release* menunjukkan pembakaran yang lebih baik. Dengan meningkatnya volume etanol dalam campuran bahan bakar, dapat meningkatkan nilai total *heat release*. Ini karena etanol memiliki molekul -OH dalam kelompok molekulnya yang membantu meningkatkan pembakaran, dan pembakaran bahan bakar dalam jumlah besar terjadi di area yang dekat dengan TDC. Untuk semua bahan bakar yang diuji, *heat release* terjadi di daerah dekat dengan TDC [30]. Penurunan COV memberikan efek positif pada *heat release* yang dihasilkan. Ini menunjukkan bahwa dengan menambahkan zat aditif sikloheksanol dapat meningkatkan proses pembakaran. Seperti yang terlihat pada gambar 5.71, pada E5++ dan E10++ *heat release* yang terjadi

lebih tinggi dibandingkan dengan E5 dan E10, bahkan dibandingkan dengan penggunaan gasolin murni (E0) sekalipun.

**Gambar 6.71**  
Heat Release Total vs. COV



Kandungan air dalam bahan bakar, dapat memodifikasi output daya mesin dengan berbagai cara, yaitu dengan mengurangi tekanan kompresi, dengan meningkatkan kerja yang dilakukan selama langkah usaha untuk mengurangi temperatur yang mengurangi kehilangan panas, dan dengan meningkatkan laju pembakaran. Kandungan air memperlambat proses pembakaran, tetapi tetap konstan jumlah energi yang dihasilkan pada setiap siklusnya [31]. Pada campuran bahan bakar E0 sd E15, di mana seperti penjelasan sebelumnya meskipun menggunakan etanol *fuel grade* yang masih terdapat kandungan air (0.5 %), dapat mempengaruhi pembakaran yang terjadi sehingga berdampak pada *heat release* yang dihasilkan. Dengan menambahkan zat aditif sikloheksanol, yang memiliki karakteristik pelarut karena sifat semi polarnya akibat semakin panjangnya rantai C, hal ini dapat membuat campuran gasolin etanol semakin homogen dan berdampak

pada pembakaran yang terjadi, yang pada akhirnya sangat berpengaruh pada *heat release* total yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.71.

### 1. *Exhaust Gas Emission*

Emisi gas buang merupakan efek dari proses pembakaran, dimana setiap proses pembakaran tentunya menghasilkan suatu produk pembakaran. Hasil pembakaran dari mesin SI cukup merusak lingkungan, penambahan etanol bisa dikatakan sebagai salah satu solusi guna memperbaiki kualitas emisi gas buangnya.

### 2. *Karbon Monoksida (CO)*

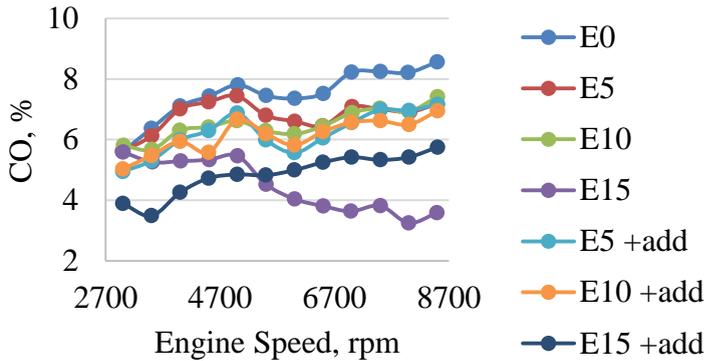
Karbon monoksida (CO) dihasilkan oleh pembakaran yang tidak sempurna karena kekurangan oksigen (misalnya disebabkan campuran yang terlalu gemuk), tetapi kenyataannya CO juga dihasilkan pada saat campuran kurus dikarenakan temperatur pembakaran semakin turun sehingga pada proses oksidasi selanjutnya tidak merubah sisa CO menjadi CO<sub>2</sub>.  $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$

Semakin besar kandungan CO yang terdapat pada gas buang menunjukkan bahwa pembakaran yang terjadi semakin tidak sempurna. Pada gambar 5.72 terlihat bahwa pada sistem yang ada saat menggunakan bahan bakar gasolin, terdapat kandungan CO yang paling besar yaitu antara 2.5 % - 2.9 %. Semakin besar penambahan volume etanol, dapat terlihat bahwa kandungan CO yang dihasilkan juga semakin kecil. Dan kandungan CO yang paling rendah terdapat pada penambahan volume etanol sebesar 15 % yang dapat menurunkan emisi CO sampai sebesar 0.1 % pada 5,000 rpm. Hal ini dikarenakan etanol mempunyai molekul -OH dalam gugus molekulnya yang membantu terjadinya reaksi pembakaran yang lebih sempurna. Semakin banyak bahan bakar yang berikatan dengan oksigen membantu proses oksidasi sehingga CO

dapat berubah menjadi CO<sub>2</sub>. Penambahan etanol memberikan pengaruh yang positif dalam hal pengurangan emisi CO.

**Gambar 6.72**

CO vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran  
(uncertainty + 0.197)



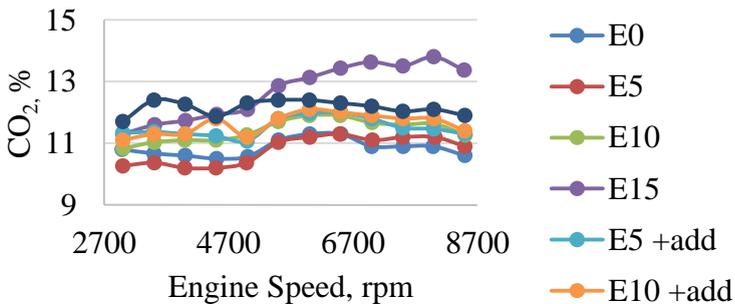
Hasil gas CO dengan penambahan sikloheksanol menghasilkan perbandingan dengan variasi bahan bakar lain seperti gambar di atas. Penambahan sikloheksanol pada variasi bahan bakar dengan persentase etanol dapat mengurangi emisi gas CO yang dihasilkan. Gambar 5.72 merupakan pengaruh penambahan etanol pada emisi CO aditif dan CO non aditif, ini adalah produk dari pembakaran tidak sempurna karena tidak cukup oksigen dalam campuran udara-bahan bakar atau waktu pembakaran yang cukup dalam satu siklusnya. Konsentrasi emisi CO juga sangat tergantung pada kondisi operasi mesin dan rasio udara-bahan bakar. Beberapa CO selalu muncul pada knalpot bahkan pada campuran kurus tetapi konsentrasi berkurang dengan penurunan temperatur pembakaran.

### 3. Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Kadar CO dan CO<sub>2</sub> memiliki hubungan yang sangat erat. Menurunnya kadar CO pada emisi gas buang akan meningkatkan kadar CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> merupakan komponen produk pada reaksi pembakaran. Karbon terbakar yang membentuk CO<sub>2</sub> akan menghasilkan banyak panas per satuan bahan bakar (8,084 kkl/kg karbon) dari pada menghasilkan CO (2,430 kkl/kg karbon). Tujuan pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Dengan kata lain CO<sub>2</sub> merupakan gas yang diinginkan sebagai produk reaksi pembakaran, dimana untuk bahan bakar minyak yang optimum harus menghasilkan CO<sub>2</sub> sebanyak 14.5 % sd 15 %.

**Gambar 6.73**

CO<sub>2</sub> vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran  
(uncertainty + 1.292)



Sama seperti gas CO, pada CO<sub>2</sub> yang ditambahkan dengan aditif juga berdampak. Berdasarkan gambar di atas, variasi bahan bakar dengan sikloheksanol menghasilkan sebagian besar gas CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi dari variasi bahan bakar tanpa sikloheksanol. Sehingga dapat disimpulkan penambahan zat aditif oksigenat

tersebut dapat memberikan pengaruh yang baik pada emisi gas buang yang dihasilkan.

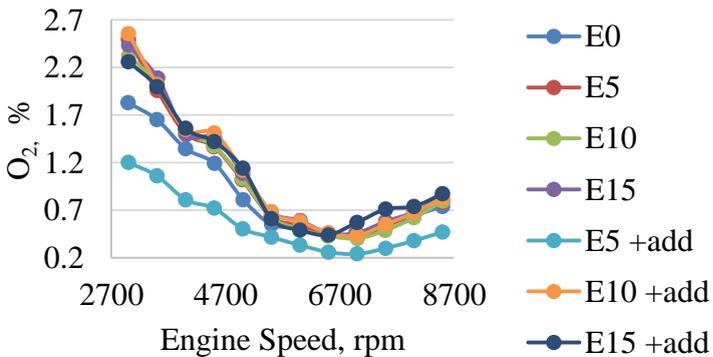
Kandungan molekul oksigen yang lebih tinggi pada etanol mengubah CO yang dihasilkan selama pembakaran menjadi CO<sub>2</sub>. Oleh karena itu penggunaan etanol sebagai bahan bakar sangat menguntungkan untuk mengontrol emisi gas buangnya, tetapi di sisi lain efek global warning dari CO<sub>2</sub> harus dipertimbangkan pada saat memilih etanol sebagai bahan bakar.

#### 4. Oksigen (O<sub>2</sub>)

Konsentrasi oksigen (O<sub>2</sub>) pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan O<sub>2</sub> yang digunakan.

**Gambar 6.74**

O<sub>2</sub> vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran  
(uncertainty + 0.173)



Dapat dilihat bahwa kadar oksigen O<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh campuran etanol dengan gasolin rata - rata mengalami kenaikan dibandingkan dengan O<sub>2</sub> yang dihasilkan dari proses pembakaran gasolin murni. Pada putaran rendah kadar O<sub>2</sub> yang dihasilkan pada proses pembakaran tinggi pada semua variasi bahan bakar.

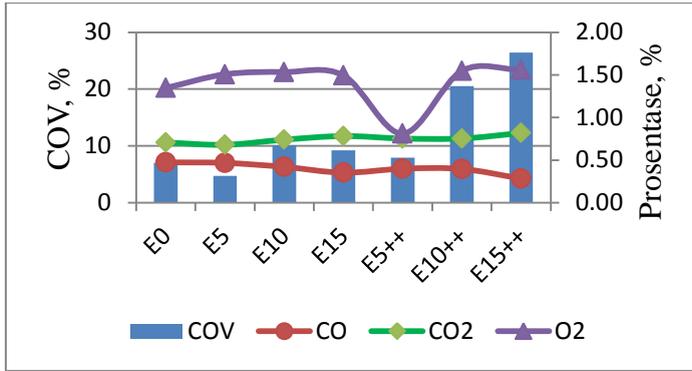
Seiring dengan naiknya putaran *engine*, kadar  $O_2$  menurun. Penggunaan campuran etanol akan menghasilkan  $O_2$  yang lebih tinggi. Konsentrasi dari  $O_2$  di gas buang kendaraan berbanding terbalik dengan konsentrasi  $CO_2$ . Hal ini diakibatkan *excess air* atau udara berlebih, dan hal ini menandakan campuran bahan bakar dengan udara berlebih dan menyebabkan kandungan oksigen semakin banyak ditambah dengan oksigen dari etanol. Hal ini tidak berdampak karena dengan udara berlebih menandakan bahan bakar yang tidak terbakar akan lebih sedikit (HC berkurang) dibandingkan dengan kekurangan udara dan HC yang meningkat nantinya.

Dapat dilihat juga bahwa kadar  $O_2$  yang dihasilkan dengan campuran etanol yang ditambah dengan aditif rata - rata mengalami kenaikan walaupun tidak signifikan. Hal ini dikarenakan proses pembakaran yang terjadi membutuhkan  $O_2$  yang besar sehingga  $O_2$  yang keluar sebagai gas buang dari campuran dengan aditif jumlahnya tidak terlalu signifikan. Konsentrasi  $O_2$  pada gas buang pembakaran berbanding terbalik dengan konsentrasi  $CO_2$  yang dihasilkan.

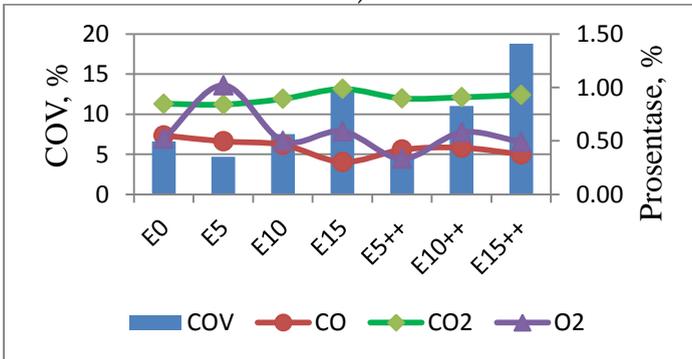
Gambar 5.75 di bawah ini dapat menunjukkan pengaruh COV dari setiap campuran bahan bakar pada variasi putaran mesin terhadap  $CO$ ,  $CO_2$ , dan  $O_2$  yang dihasilkan

**Gambar 6.75**

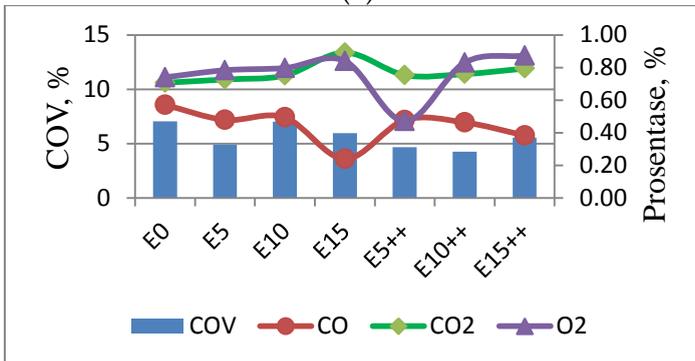
COV vs. CO, CO<sub>2</sub>, dan O<sub>2</sub> pada Setiap Campuran Bahan Bakar (a) pada 4,000 rpm, (b) pada 6,000 rpm dan (c) pada 8,500 rpm



a)



(b)



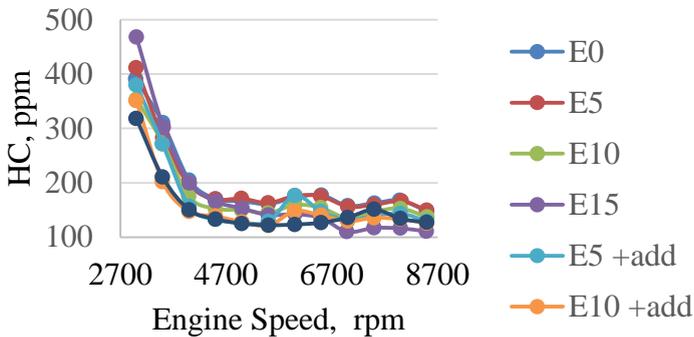
(c)

## 5. Hidrokarbon (HC)

Bila uap gasolin dipanaskan pada temperatur tinggi, akan terjadi oksidasi akibatnya pembakaran tidak sempurna karena masih ada bagian uap gasolin yang tidak terbakar, yang keluar dari ruang bakar dalam bentuk gas HC mentah.

**Gambar 6.76**

HC vs. Engine Speed pada Setiap Variasi Campuran  
(uncertainty + 12.737)



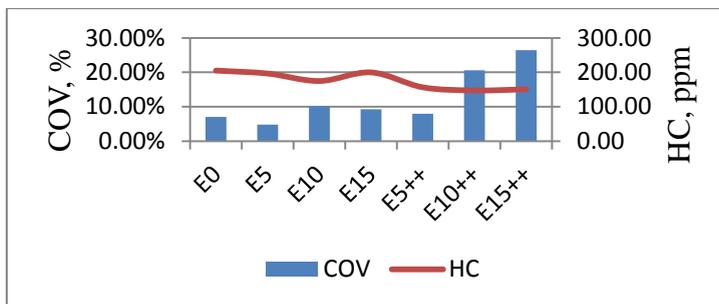
Berdasarkan gambar 5.76 dan 5.77 dapat dilihat bahwa dengan penambahan aditif pada campuran bahan bakar dapat menurunkan emisi HC. Pada E5++, E10++, dan E15++ dapat dilihat di bahwa rata - rata dari setiap putaran *engine* menghasilkan HC yang lebih rendah dari campuran bahan bakar tanpa aditif.

Penambahan etanol memberikan perubahan pada emisi gas buang HC, salah satu faktor yang mungkin adalah *wall quenching* yaitu pada saat api menjaral ke arah dinding, terdapat lapisan tipis yang tidak terjadi reaksi kimia kecuali terjadinya pemecahan bahan bakar. Lapisan tipis ini mengandung HC yang tidak terbakar atau disebut juga *quench distance*. Besarnya *quench distance* ini bervariasi antara 0.008 cm sampai 0.038 cm yang dipengaruhi oleh temperatur campuran, tekanan, AFR, temperatur

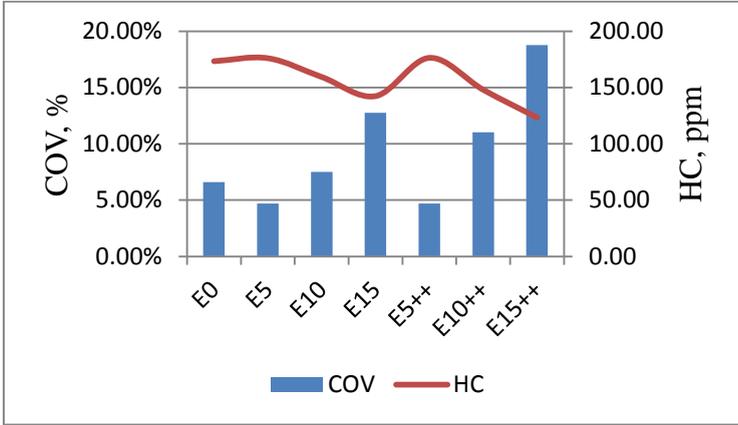
permukaan dinding dan endapan pembakaran. Besarnya konsentrasi HC di dalam gas buang sama dengan besar konsentrasi CO, yaitu tinggi pada saat campuran kaya dan berkurang pada titik temperatur tertinggi. Etanol memiliki *quenching distance* yang lebih pendek dibandingkan dengan gasolin sehingga api dari pembakaran campuran gasolin dengan etanol dapat merambat lebih mendekati dinding silinder. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah bahan bakar yang terbakar semakin banyak sehingga mengurangi HC yang merupakan komponen dari bahan bakar minyak. Di sisi lain kandungan karbon (50.59 %) dan hidrogen (12.98 %) masih lebih rendah dari gasolin, hal ini juga sangat membantu mengurangi kadar HC yang tidak terbakar. Selain itu proses pencampuran udara-bahan bakar meningkatkan intensitas turbulensi pada kecepatan mesin yang lebih tinggi, hal ini menyebabkan pembakaran lebih sempurna sehingga dapat juga mengurangi HC. Konsentrasi HC juga erat kaitannya dengan disain ruang pembakaran, disain sistem induksi dan variabel kecepatan dan beban operasi.

**Gambar 6.77**

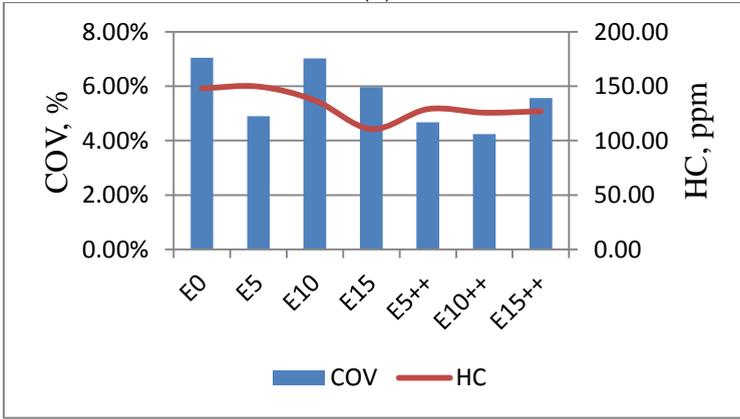
COV vs. HC pada Setiap Campuran Bahan Bakar (a) pada 4,000 rpm, (b) pada 6,000 rpm dan (c) pada 8,500 rpm



(a)



(b)



(c)

## Daftar Pustaka

- Ministry of Energy and Mineral Resources, *Data Handbook of Energy & Economic Statistic of Indonesia*, 2014.
- Dhilip Khatiwada, *Scenarios for bioethanol production in Indonesia: How can we meet mandatory blending targets ?* Energy, 2017. **119**: p. 351-361.
- Yuli Indartono, *Bioethanol, alternatif energi terbarukan: kajian prestasi mesin dan implementasi di lapangan*. Berita Iptek, 2005.
- Henry Joseph Jr., et al., *Flex fuel vehicles in Brazil*. Energy & Environment Affairs Commission, 2013.
- Abraham Sin Oih Yu, et al., *Evolution of flex fuel technology : a case study on volkswagen Brazil*. XXXIV Encontro da ANPAD, 2010.
- Vinicius Rückert Rosoa, et al., *Effects of mixture enleanment in combustion and emission parameters using a flex-fuel engine with ethanol and gasoline*. Applied Thermal Engineering, 2019. **153**: p. 463-472.
- Policarpo, N.A., *Emission estimates for an on-road flex-fuel vehicles operated by ethanol-gasoline blends in an urban region, Brazil*. Elsevier Urban Climate, 2018. **24**: p. 111-120.
- Phuangwongtrakul, S., et al., *Experimental study on sparking ignition engine performance for optimal mixing ratio of ethanol-gasoline blended fuels*. Applied Thermal Engineering, 2016. **100**: p. 869-879.
- Wang, X., et al., *The effects of hydrous ethanol gasoline on combustion and emission characteristics of a port injection gasoline engine*. Case Studies in Thermal Engineering, 2015. **6**: p. 147-154.
- Kaleli, A., M.A. Ceviz, and K. Erenturk, *Controlling spark timing for consecutive cycles to reduce the cyclic variations of SI engines*. Applied Thermal Engineering, 2015. **87**: p. 624-632.
- Sen, A. K., A. Medina, P. L. Curto-Risso, A. Calvo Herná'ndez. *Effect of ethanol addition on cyclic variability in a simulated spark ignition gasoline engine*. Springer Science & Business, Meccanica, 2014. 49:2285-2297.

- Charles E. Wyman, *Handbook on bioethanol: production and utilization*. Applied Energy Technology Series, 2010.
- Yuksel, Fikret., et al., *The use of ethanol gasoline blend as a fuel in an SI engine*. Renewable Energy, 2004. **29**: p. 1181-1191.
- Anton L. Wartawan, *Bahan bakar bensin otomotif*. Penerbit Universitas Trisakti, 1997. ISBN 979-8398-28-9.
- Al-Baghdadi, M.A.S., *Hydrogen ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines*. Renewable Energy, 2003. **28**: p. 1471-1478.
- Heywood, John B., *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 1988. ISBN 0-07-028637-X.
- Junfeng Yang, et al., *Cyclic Variation of Combustion in SI Engines*. UNICEG Meeting University of Birmingham, 2018.
- Maj Ball Jeffrey K., *Cycle by cycle variation in spark ignition internal combustion engines*. Dissertation University of Oxford, 1999.
- Ni Ketut sari, et al., *Teori dan aplikasi pembuatan bioethanol dari selulose*. Jakad Media Publishing, 2017.
- PPPPTK Bidang Mesin dan Teknik Industri, *Konversi energi biomassa*. Kementrian P & K, 2015.
- Treybal, R.E., *Mass-transfer operations* (3<sup>rd</sup> ed.). Singapore: McGraw-Hill, 1981.
- McCabe, W., Smith, J.C., and Harriot, P., *Unit operation of chemical engineering*, McGraw Hill Book, Co., United States of America, 1993.
- Alexios Kyriakides, et al., *Evaluation of gasoline-ethanol-water ternary mixtures used as a fuel for an Otto engine*. Fuel, 2013. **108**: p. 208-215.
- Harold Hart, Suminar Setiati (alih bahasa), *Kimia organik edisi kesebelas*. Penerbit Erlangga, 2003.
- Zlata Mujikova, et al., *Water tolerance of petrol-ethanol blends*. Preliminary communication University of Chemistry and Technology, Prague, 2016.
- Yuvarajan Devarajan, et al., *Emission and combustion profile study of unmodified research engine propelled with neat biofuels*. Springer, 2018. [Issue 20](#): pp. 19643-19656.
- <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound>

- Sathaporn Chuepeng, et al., *Lean hydrous and anhydrous bioethanol combustion in spark ignition engine at idle*. Energy Conversion and Management, 2016. **128**: p. 1-11.
- New Team Toyota Step 3, *Toyota computer controlled system*. Training Manual Toyota, 1993. Pub. TTM301-IN.
- Vighnesha Nayak, et al. *Combustion characteristics and cyclic variation of a LPG fuelled MPFI four cylinder gasoline engine*. Energy Procedia, 2016. **90**: p. 470-480.
- Schifter, I., et al., *Combustion characterization in a single cylinder engine with mid-levels hydrated ethanol-gasoline blended fuels*. Fuel, 2013. **103**: p. 292-298.
- Zhuang, Y. and G. Hong, *Effects of direct injection timing of ethanol fuel on engine knock and lean burn in a port injection gasoline engine*. Fuel, 2014. **135**: p. 27-37.
- Yao, Y.-C., J.-H. Tsai, and I.T. Wang, *Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol-gasoline blend*. Applied Energy, 2013. **102**: p. 93-100.
- Turkcan, A., A.N. Ozsezen, and M. Canakci, *Experimental investigation of the effects of different injection parameters on a direct injection HCCI engine fueled with alcohol-gasoline fuel blends*. Fuel Processing Technology, 2014. **126**: p. 487-496.
- Zhuang, Y. and G. Hong, *Primary investigation to leveraging effect of using ethanol fuel on reducing gasoline fuel consumption*. Fuel, 2013. **105**: p. 425-431.
- Feng, R., et al., *Combustion and emissions study on motorcycle engine fueled with butanol-gasoline blend*. Renewable Energy, 2015. **81**: p. 113-122.
- Schifter, I., et al., *Combustion characterization in a single cylinder engine with mid-level hydrated ethanol-gasoline blended fuels*. Fuel, 2013. **103**: p. 292-298.
- Anand, T.N.C., A. Madan Mohan, and R.V. Ravikrishna, *Spray characterization of gasoline-ethanol blends from a multi-hole port fuel injector*. Fuel, 2012. **102**: p. 613-623.
- Catapano, F., P. Sementa, and B.M. Vaglieco, *Air-fuel mixing and combustion behavior of gasoline-ethanol blends in a GDI wall-guided turbocharged multi-cylinder optical engine*. Renewable Energy, 2016. **96**: p. 319-332.

- Costa, R.C. and J.R. Sodré, *Compression ratio effects on an ethanol/gasoline fuelled engine performance*. Applied Thermal Engineering, 2011. **31**(2): p. 278-283.
- Huang, Y., G. Hong, and R. Huang, *Investigation to charge cooling effect and combustion characteristics of ethanol direct injection in a gasoline port injection engine*. Applied Energy, 2015. **160**: p. 244-254.
- Kim, N., S. Cho, and K. Min, *A study on the combustion and emission characteristics of an SI engine under full load conditions with ethanol port injection and gasoline direct injection*. Fuel, 2015. **158**: p. 725-732.
- Li, L., et al., *Exhaust and evaporative emissions from motorcycles fueled with ethanol gasoline blends*. Science of The Total Environment, 2015. **502**: p. 627-631.
- Li, Y., et al., *Combustion, performance and emissions characteristics of a spark-ignition engine fueled with isopropanol-n-butanol-ethanol and gasoline blends*. Fuel, 2016. **184**: p. 864-872.
- Liu, H., et al., *Dual-Fuel Spark Ignition (DFSI) combustion fuelled with different alcohols and gasoline for fuel efficiency*. Fuel, 2015. **157**: p. 255-260.
- Liu, H., et al., *Comparative study on alcohol-gasoline and gasoline-alcohol Dual-Fuel Spark Ignition (DFSI) combustion for engine particle number (PN) reduction*. Fuel, 2015. **159**: p. 250-258.
- Masum, B.M., et al., *Effect of alcohol-gasoline blends optimization on fuel properties, performance and emissions of a SI engine*. Journal of Cleaner Production, 2015. **86**: p. 230-237.
- Melo, T.C.C.d., et al., *Hydrous ethanol-gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine*. Fuel, 2012. **97**: p. 796-804.
- Najafi, G., et al., *Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasoline-ethanol blended fuels using response surface methodology*. Energy, 2015. **90**: p. 1815-1829.
- Sileghem, L., T. Wallner, and S. Verhelst, *A quasi-dimensional model for SI engines fueled with gasoline-alcohol blends: Knock modeling*. Fuel, 2015. **140**: p. 217-226.
- Suarez-Bertoa, R., et al., *Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the*

- Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC). Fuel*, 2015. **143**: p. 173-182.
- Wang, Z., et al., *Comparative study on alcohols-gasoline and gasoline-alcohols dual-fuel spark ignition (DFSI) combustion for high load extension and high fuel efficiency*. *Energy*, 2015. **82**: p. 395-405.
- Gholamhassan Najafi, et al., *Optimization of performance and exhaust emission parameters of a SI (spark ignition) engine with gasoline-ethanol blended fuels using response surface methodology*. Elsevier, *energy xxx*, 2015, 1-15.
- Aguilar, E.W.Z., et al., *Thermal design of a tray type distillation column of an ammonia/water absorption refrigeration cycle*. *International Journal of Applied Thermal Engineering*, 2011.
- Cengel, Y.A & Boles M.A., *Thermodynamics an engineering approach* (5th ed.). McGraw-Hill, 2006.
- Koretsky, M.D., *Engineering & chemical A Thermodynamics* (2nd ed.). John Wiley & Sons, 2004.
- Reyes, M., et al., *Characterization of cycle to cycle variations in a natural gas spark ignition engine*. *Fuel*, 2015. **140**: p. 752-761.
- Reyes, M., et al., *Study of the cycle to cycle variations of an internal combustion engine fuelled with natural gas/hydrogen blends from the diagnosis of combustion pressure*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. **38**: p. 15477-15487.
- Reyes, M., et al., *Characterization of the combustion process and cycle to cycle variations in a spark ignition engine fuelled with natural gas/hydrogen mixtures*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016. **41**: p. 2064-2074.
- Kyrtatos, Panagiotis, et al., *Cycle to cycle variations in diesel engines*. *Applied Energy*, 2016. **171**: p. 120-132.
- Kumar Thakur, Amit, et al., *Progress in performance analysis of ethanol gasoline blends on SI engine*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **69**: p. 324-340.
- Sakai, Stephen, et al., *Effect of ethanol blending on particulate formation from premixed combustion in spark ignition engines*. *Fuel*, 2017. **196**: p. 154-168.

- Gong, Changming, et al., *Cycle by cycle combustion variation in a DISI engine fueled with methanol*. *Fuel*, 2011. **90**: p. 2817-2819.
- Gravalos, I., et al., *Emission characteristics of spark ignition engine operating on lower higher molecular mass alcohol blended gasoline fuels*. *Renewable Energy*, 2013. **50**: p. 27-32.
- Barakat, Y., et al., *Fuel consumption of gasoline ethanol blends at different engine rotational speeds*. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016. **25**: p. 309-315.
- Fatouraie, Mohammad, *The effects of ethanol/gasoline blends on advanced combustion strategies in internal combustion engines*. Dissertation The University of Michigan, 2014.
- Yeliana, *Parametric combustion modeling for ethanol gasoline fuelled spark ignition engines*. Dissertation Michigan Technological University, 2010.

# ETANOL MESIN GASOLIN *SPARK IGNITION* MENGGUNAKAN ZAT ADITIF OKSIGENAT

Indonesia masih sangat tergantung pada sumber energi tak terbarukan padahal jumlahnya semakin menipis. Sejak tahun 2004 Indonesia menjadi negara net importer minyak bumi. Konsekuensinya, fluktuasi harga dan ketersediaan pasokan minyak dunia mempengaruhi ketahanan energi Indonesia. Untuk mengatasi hal tersebut maka perlu dikembangkan energi lain pengganti bahan bakar fosil yang bersifat terbarukan, ramah lingkungan, dan berasal dari alam. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial dikembangkan di Indonesia sebagai pengganti bbm adalah bioetanol ( $C_2H_5OH$ ). Penggunaan bioetanol, yang didistilasi secara mandiri memanfaatkan panas gas buang dengan *compact distillator* merubah bioetanol *low grade* menjadi *high grade*, sebagai campuran bahan bakar fosil memberikan pengaruh bagi efisiensi mesin yang dihasilkan bahan bakar. Studi ini mengkaji efek campuran bioetanol gasolin (RON 88) pada mesin *single-cylinder spark ignition* (SI) 125 cc yang dilakukan dengan variasi campuran bahan bakar (E0, E5, E10, dan E15) dengan penambahan 0.5 % vol/vol oksigenat sikloheksanol dan sikloheptanol pada masing – masing campuran bahan bakarnya, dengan pembukaan *throttle* dipertahankan 100 %, dan variasi kecepatan mesin. Kinerja mesin diukur dengan menghubungkan mesin dengan dynamometer dan variasi *cylinder pressure combustion* diukur dengan *pressure transducer*. Hasil pengujian dapat membuktikan bahwa campuran bahan bakar dengan oksigenat tersebut dapat memperbaiki COVIMEP pada *cycle to cycle variations* (3.42 % pada campuran E10++) sehingga fluktuasi *torque* dapat diminimalisasi yang mengakibatkan kestabilan performa mesin (BHP, *torque*, SFC, dan *heat release*) meningkat, disamping itu emisi menjadi lebih baik (CO dan HC turun, sedangkan CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> meningkat).



**K I M I A**

ISBN 9786 2358 3294 4



9 786235 832944