



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH ETANOL PADA
PREMIUM TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
KONDISI ATMOSFERIK DAN BERTEKANAN DI MOTOR
OTTO SILINDER TUNGGAL SISTEM INJEKSI**

DISERTASI

**ATOK SETIYAWAN
0706221022**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH ETANOL PADA
PREMIUM TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
KONDISI ATMOSFERIK DAN BERTEKANAN DI MOTOR
OTTO SILINDER TUNGGAL SISTEM INJEKSI**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**ATOK SETIYAWAN
0706221022**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Atok Setiyawan

NPM : 0706221022

Tanda Tangan :



Tanggal : 20 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh

Nama : Atok Setiyawan
NPM : 0706221022
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Kajian Eksperimental Pengaruh Etanol Pada Premium Terhadap Karakteristik Pembakaran Kondisi Atmosferik Dan Bertekanan Di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof Dr. Ir. Bambang Sugiarto M.Eng.

Co Promotor : Prof. Ir. Yulianto Sulisty Nugroho M.Sc., Ph.D (

Penguji : Prof. Dr. Ir. Prawoto Ms.Ae.

Penguji : Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono DEA (

Penguji : Dr. Ir. Adi Suryosatyo M.Eng.

Penguji : Dr. Ir. Iman K. Reksowardoyo, M.Eng

Penguji : Dr. Lukman Shalahuddin M.Sc.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 20 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, atas karunia dan ridlo-Nya maka disertasi dengan judul “Kajian Eksperimental Pengaruh Etanol Pada Premium Terhadap Karakteristik Pembakaran Kondisi Atmosferik Dan Bertekanan Di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi” ini dapat diselesaikan.

Disertasi ini bertujuan untuk mengkarakterisasi pembakaran campuran premium (*Regular Unleaded Indonesia Gasoline*)-etanol kering yang meliputi pengujian sifat-sifat campuran premium-etanol dengan peralatan dan metode yang standar (ASTM/API) kemudian dilanjutkan dengan karakterisasi pembakaran pada kondisi atmosferik di Kalorimeter Api dan diteruskan dengan karakterisasi pembakaran premium-etanol bertekanan di Motor Otto silinder tunggal sistem injeksi serta pengaruhnya pada emisi gas buang. Premium yang merupakan bahan bakar utama bagi motor Otto di Indonesia mempunyai sifat-sifat yang khas dibandingkan dengan sifat *gasoline* yang digunakan pada negara lain. Hasil lain yang didapatkan dari penelitian ini adalah karakteristik pembakaran kondisi atmosferik dan bertekanan di motor Otto memberikan hasil yang sangat berbeda sama sekali. Hal ini merupakan temuan yang patut dicermati dan menjadi pembuka pada penelitian berikutnya.

Dengan kesadaran penuh, penulis merasa dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan disertasi ini masih banyak kekurangan, sehingga dengan tangan terbuka penulis menerima kritik dan saran untuk dapat memperbaiki riset terkait dimasa yang akan datang.

Akhirnya, pada kesempatan ini penulis memberikan apresiasi dan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penelitian dan penyusunan disertasi ini utamanya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng selaku Promotor atas semua perhatian, bimbingan, saran dan arahnya.
2. Bapak Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc, Ph.D selaku Ko-Promotor atas semua perhatian, bimbingan, saran dan arahnya.
3. Seluruh Dewan Penguji atas arahan dan bimbinganya mulai Penelitian I sampai dengan Penelitian IV.

4. Seluruh dosen, staf sekretariat Departemen Teknik Mesin dan Pasca Sarjana Bidang Ilmu Teknik atas segala bantuannya selama penulis menjadi mahasiswa.
5. Pimpinan, Peneliti, Teknisi dan staf administrasi Badan Termodinamika Motor dan Propulsi (BTMP - BPP Teknologi), Puspitek Serpong atas diijinkannya penulis melakukan penelitian sebagai materi utama disertasi ini dengan segala bantuan dan sumbang sarannya.
6. Istriku: Nurlita Abdulgani, anak-anakku: Aussie Amalia & Anugerah Akbar Setiyawan, Bapak-Ibu: S. Setijo Wijono (Alm) – Soebijati dan Mertua: Abdulgani Ibrahim (Alm) – Nurlina atas do'a dan dukungan semangat yang telah diberikan selama penulis menyelesaikan studi.
7. Dan, semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Atok Setiyawan
NPM : 0706221022
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Disertasi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Kajian Eksperimental Pengaruh Etanol Pada Premium Terhadap Karakteristik Pembakaran Kondisi Atmosferik Dan Bertekanan Di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 20 Juli 2012

Yang menyatakan


(Atok Setiyawan)

ABSTRAK

Nama : Atok Setiyawan
Program studi : Teknik Mesin
Judul : Kajian Eksperimental Pengaruh Etanol Pada Premium Terhadap Karakteristik Pembakaran Kondisi Atmosferik Dan Bertekanan Di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi

Penggunaan etanol sebagai bahan bakar pada motor Otto baik *dedicated* maupun sebagai campuran pada *gasoline*, masih banyak dijadikan sebagai obyek penelitian. Hal ini sejalan dan harus disesuaikan dengan perkembangan teknologi dan kinerja motor Otto, reformulasi bahan bakar *gasoline* maupun pengurangan emisi gas buang. Penambahan etanol pada premium akan merubah sifat-sifat utama bahan bakar yang terkait dengan karakteristik pembakaran.

Penelitian difokuskan pada karakterisasi pembakaran premium, etanol dan campurannya dengan kondisi atmosferik pada Kalorimeter Api dan bertekanan pada motor Otto. Karakterisasi pembakaran kondisi atmosferik dipengaruhi oleh konsentrasi etanol dalam premium sedangkan untuk bertekanan di motor Otto dengan beberapa parameter bervariasi yang meliputi: konsentrasi etanol dan λ pada kondisi operasional motor secara umum/pemakaian harian yang meliputi: MBT, beban 3 kW (*Widely Open Throttle-WOT*), putaran 4000 rpm.

Sifat-sifat penting yang berubah dengan penambahan etanol pada premium adalah: penambahan 5% (v/v) etanol memberikan efek azeotropika tertinggi dengan nilai RVP sebesar 71,4 kPa, RON dan kalor penguapan meningkat masing-masing sebesar 1,9 point dan 10% tetapi nilai kalor menurun sebesar 1,4% dibandingkan premium. Karakteristik pembakaran kondisi atmosferik: setiap penambahan etanol 10% (v/v) akan menurunkan laju pelepasan massa dan kalor masing-masing sebesar 5,8% dan 8,4% untuk massa bahan bakar yang sama. Sedangkan karakteristik pembakaran bertekanan di motor Otto: *ignition delay* tidak berubah secara signifikan, durasi pembakaran meningkat dari 41°C_A menjadi 45°C_A, setiap penambahan 10% (v/v) etanol berpengaruh pada: konsumsi bahan bakar dan laju pelepasan massa masing-masing meningkat rata-rata sebesar 12,8% dan 11,3%, tetapi laju pelepasan kalor menurun sebesar 2,1%. Efek positif dari penambahan etanol pada premium adalah penurunan emisi gas buang berupa CO₂, CO dan HC masing-masing maksimum sebesar 4,4%, 14,5% dan 17,4%.

Karakteristik pembakaran kondisi atmosferik dan bertekanan di motor Otto yang berupa laju pelepasan massa menunjukkan sifat yang antagonis, tidak demikian halnya dengan laju pelepasan kalor.

Penambahan etanol pada premium untuk aplikasi motor Otto menunjukkan efek negatif berupa meningkatnya konsumsi bahan bakar dan efisiensi termal tetapi berdampak positif terhadap penurunan emisi gas buang.

Kata kunci : premium, etanol, efek azeotropika, karakteristik pembakaran, laju pelepasan massa, laju pelepasan kalor, *ignition delay*, durasi pembakaran, MBT.

ABSTRACT

Name : Atok Setiyawan
Study Programe : Mechanical Engineering
Title : Experimental Study of The Influence of Ethanol-Premium Blends on Combustion Characteristics at Atmospheric Condition And Pressurized in a Single Cylinder Spark Ignition Engine.

The use of ethanol as a motor fuel in both dedicated and as blends in gasoline is still interesting as objects of research. This is in line and should be adjusted with several issues i.e.: the development of technology and performance of Spark Ignition Engine (SIE), fuel reformulation of gasoline and the reduction of exhaust emissions. The addition of ethanol on premium will change the predominant properties associated with combustion characteristics.

Research was focus on the characterization of the combustion of premium, ethanol and the blends in two methods, i.e.: atmospheric condition in a Cone Calorimeter and pressurized in a SIE.

The parameter of test for atmosphric combustion characterics was concentration of ethanol in premium only. While for pressurized condition in the SIE, many parameters were varied includes: ethanol concentration and λ based on daily motor operation i.e.: at MBT, load was 3 kW (Widely Open Throttle-WOT), speed was 4000 rpm.

The important properties were changed by the addition of ethanol on premium i.e.: addition of a 5% (v/v) delivered the highest value of the azeotrope effect with RPV of 71,4 kPa, Ron and heat of vaporization increased by 1.9 point and about 10% respectively if compared to premium. For the atmospheric combustion characteristics, the addition of a 10% (v/v) ethanol decreased mass and heat release rate as much as 5.8% and 8.4% respectively for the same quantitative of fuel. Meanwhile the pressurized combustion characteristics in SIE showed that ignition delay was not changed significantly, the duration of combustion increased from 41 to 45°C_A, the addition of 10% (v/v) ethanol increased fuel consumption and the mass release rate on average by 12.8% and 11.3% respectively, but the rate of heat release decreased by 2.1% compared to premium.

The positive effects of the addition of ethanol on premium were a decreased in exhaust emission of CO₂, CO and HC at a maximum value of 4.4%, 14.5% and 17.4% respectively compared to premium.

Athomspheric and pressurized combustion characteristics in term of mass release rate showed the nature of the antagonist behaviour, is not the case with the rate of heat release.

The addition of ethanol on premium for SIE application demonstrated the negative effects, mainly an increasing fuel consumption and thermal efficiency but positively impact on a decreasing exhaust gas emission.

Keywords: premium, ethanol, azeotrope effect, combustion characteristic, the rate of mass release, the rate of heat release, *ignition delay*, combustion duration and MBT.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1.1 Kebijakan Energi di Indonesia	2
1.1.2 Penggunaan Etanol Sebagai bahan Bakar Motor Otto di Berbagai Negara	3
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Cakupan Penelitian Dan Batasan Masalah	7
1.4 Tujuan Penelitian	9
1.5 Manfaat Penelitian	9
1.6 Keterbaruan Penelitian	9
1.7 Sistematika Penulisan	10
2. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	12
2.1....Bahan Bakar Motor Otto (<i>Gasoline</i>)	12
2.2 Etanol	13
2.3 Sifat-sifat <i>gasoline</i> /premium, Etanol Dan Campurannya	14
2.3.1 Volatilitas	15
2.3.2 Angka Oktana (<i>Research Octane Namber-RON</i>)	18
2.3.3 Nilai kalor	20
2.3.4 Kecepatan Api Laminer	20
2.3.5 Kemurnian etanol dan Toleransi Air Dalam campuran gasoline-etanol	24
2.3.6 Spesifikasi Etanol Di Indonesia	25
2.4 Pembakaran Bahan Bakar Kondisi Atmosferik di Kalorimeter Api (<i>Pool Fire</i>)	27
2.4.1 Pelepasan Massa Dan Kalor Dengan Metode Konsumsi Oksigen	27

2.5	Karakteristik Pembakaran, Kinerja Dan Emisi Gas Buang Pada Motor Otto	28
2.5.1	Geometri Silinder Piston, Batang Penghubung Dan Poros Engkol	28
2.5.2	Pelepasan kalor Pada Pembakaran di Motor Otto	31
2.5.3	Karakteristik Pembakaran di Motor Otto	30
2.5.4	Variasi Siklus Dan Stabilitas Operasional Motor Otto	36
2.5.5	Kinerja Dan Emisi Gas Buang Motor Otto	37
3	MATERIAL, PERALATAN DAN METODE	40
3.1	Material	40
3.1.1	Premium (<i>Unleaded Regular Indonesia Gasoline</i>)	40
3.1.2	Etanol Kering	40
3.2	Peralatan Pengujian Dan Penelitian	41
3.2.1	Peralatan Pengujian Sifat-Sifat Bahan Bakar	41
3.2.2	Peralatan Kalori Meter Api (<i>Pool Fire</i>)	41
3.2.3	Motor Uji, Bangku Uji & Instrumentasi	42
3.3	Metode Pengujian Dan Penelitian	47
3.3.1	Metode Dan Proses Pencampuran Premium-Etanol Kering	47
3.3.2	Metode Pengujian Sifat-sifat Bahan Bakar	48
3.3.3	Metode Pengujian Karakteristik Pembakaran di Kalori Meter Api	48
3.3.4	Metode Pengujian Dan Penelitian Karakteristik Pembakaran di Motor Otto	48
4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1	Hasil Pengujian Sifat-Sifat Campuran Premium Dan Etanol Kering	53
4.1.1	Angka Oktana Riset	53
4.1.2	Volatilitas dengan <i>Reid Vapor Pressure</i>	55
4.1.3	Volatilitas dengan Kurva Distilasi	58
4.1.4	Densitas	60
4.1.5	Viskositas Kinematik	62
4.1.6	Nilai Kalor	62
4.2	Karakteristik Pembakaran Premium, Etanol Dan Campurannya Kondisi Atmosferik Di Kalorimeter Api	63
4.3	Karakteristik Pembakaran Premium, Etanol Dan Campurannya Kondisi Bertekanan di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi	72
4.3.1	Analisa Karakteristik Pembakaran	77
4.3.2	Kestabilan Pembakaran	90

4.3.3 Emisi Gas Buang	92
5. KESIMPULAN	96
DAFTAR ACUAN	99
LAMPIRAN	110



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Roadmap pengembangan bahan bakar nabati (BBN) di Indonesia	3
Tabel 1.2. Penggunaan etanol di beberapa negara	4
Tabel 2.1. Spesifikasi beberapa jenis <i>gasoline</i>	13
Tabel 2.2. Tipikal sifat-sifat <i>gasoline</i> dan etanol	15
Tabel 2.3. Sifat-sifat etanol, <i>gasoline</i> dan campuran yang digunakan oleh beberapa peneliti	16
Tabel 2.4. Karakteristik efek azeotropika etanol dengan beberapa molekul	17
Tabel 2.5. Konstanta pers. 4, untuk $T_{u0} = 350$ K	22
Tabel 2.6. Nilai konstanta m , untuk kisaran 350-650K	22
Tabel 2.7. Nilai konstanta untuk pers. 4c	23
Table 2.8. Spesifikasi standar bioetanol terdenaturasi untuk gasohol	26
Tabel 2.9. Ringkasan Penelitian Kinerja Motor Otto Berbahan Bakar: <i>gasoline</i> , etanol dan Campurannya.	38
Tabel 2.10. Ringkasan Penelitian Emisi Gas Buang Motor Otto Berbahan Bakar: <i>gasoline</i> , etanol dan Campurannya.	39
Tabel 3.1. Spesifikasi etanol kering	40
Tabel 3.2. Spesifikasi motor Honda Supra 125 X PGMFI	42
Tabel 4.1. Hasil uji sifat-sifat campuran premium-etanol kering	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Transformasi penggunaan energi disektor transportasi dari 2006 ke 2010	3
Gambar 1.2. Skematis dan Konseptual dari Penelitian	8
Gambar 2.1. Tekanan uap terhadap konsentrasi etanol dalam campuran pada temperatur yang berbeda	18
Gambar 2.2. Kenaikkan tekanan uap <i>gasoline</i> dengan penambahan etanol	18
Gambar 2.3. Efek penambahan senyawa pengungkit oktan <i>gasoline</i> : (a) Gasoline A dan (b) Gasoline B	19
Gambar 2.4. Kecepatan pembakaran etanol dan isoootane sebagai fungsi <i>equivalence ratio</i>	21
Gambar 2.5. Kecepatan pembakaran laminer campuran <i>gasoline</i> -etanol terhadap rasio udara-bahan bakar	22
Gambar 2.6. Variasi dari durasi pembakaran dengan konsentrasi etanol	24
Gambar 2.7. Toleransi air dalam campuran <i>gasoline</i> -etanol	25
Gambar 2.8. Geometri silinder piston, batang penghubung dan poros engkol	29
Gambar 2.9. Tipikal Siklus perubahan tekanan silinder terhadap sudut engkol	30
Gambar 2.10. Tahapan proses pembakaran di motor Otto	33
Gambar 2.11. Rasio ekuivalen bahan bakar/ <i>gasoline</i> -udara sebagai fungsi dari prosentase etanol	34
Gambar 2.12. Pengaruh penambahan etanol terhadap fraksi massa bahan bakar yang terbakar	35
Gambar 2.13. Durasi pembakaran terhadap prosentase etanol	35
Gambar 2.14. Dampak penambahan etanol terhadap tekanan maksimum pembakaran	36
Gambar 1.15. Temperatur maksimum pembakaran sebagai fungsi etanol	36
Gambar 3.1. Mesin CFR milik UPPJ (Unit Produksi Pelumas Jakarta), PT Pertamina	41
Gambar 3.2. Skematik Peralatan Kalorimeter Api milik Lab. Pembakaran DTM-UI	42
Gambar 3.3. Motor uji – Honda Supra 125 PGMFI	44
Gambar 3.4. (a) ECU dan (b) Haltec Platinum Sprint 500	44
Gambar 3.5. (a) penempatan piezo quartz pressure transducer di kepala silinder dan (b) posisi katup dan piezo quartz pressure transducer.	45
Gambar 3.6. Skematik sistem peralatan uji dan motor uji – Honda Supra 125 PGM-FI	46
Gambar 3.7. Gambar peralatan uji dan motor uji – Honda Supra PGM-FI	47
Gambar 3.8. Diagram alir penelitian	52
Gambar 4.1. Angka Oktana Riset beberapa jenis <i>gasoline</i> dan premium dengan campuran etanol	54
Gambar 4.2. Reid Vapor Pressure campuran <i>gasoline</i> dan etanol	56
Gambar 4.3. Kurva distilasi <i>anhydrous ethanol</i> dan <i>gasoline</i> yang ada di Indonesia dan Brazil	59
Gambar 4.4. Kurva distilasi campuran etanol kering dan premium (E5-E100)	59

Gambar 4.5. Densitas campuran <i>anhydrous ethanol</i> dan <i>gasoline</i> yang ada di Indonesia dan Brazil	62
Gambar 4.6. Kinematik viskositas campuran premium dan etanol kering	63
Gambar 4.7. Nilai kalor beberapa jenis <i>gasoline</i> dan campuran dengan etanol	63
Gambar 4.8. Proses pembakaran dan bentuk nyala api dari (a) premium, (b) E5, (c) E25 dan (d) etanol	64
Gambar 4.9. Kurva penurunan massa campuran premium-etanol terhadap waktu	66
Gambar 4.10. Laju pelepasan massa pembakaran premium, etanol dan campurannya pada kondisi atmosferik	67
Gambar 4.11. Pelepasan kalor total campuran premium-etanol	68
Gambar 4.12. Pola laju pelepasan kalor campuran premium-etanol	69
Gambar 4.13. Rata-rata laju pelepasan kalor dan massa, nilai kalor bahan bakar, total pelepasan kalor dan efisiensi pembakaran di Kalorimeter Api.	70
Gambar 4.14. Temperatur maksimum dan rata-rata dari gas buang serta efisiensi pembakaran	71
Gambar 4.15. Evolusi kebutuhan O_2 terhadap waktu	71
Gambar 4.16. Evolusi konsentrasi CO_2 yang dihasilkan pembakaran terhadap waktu	72
Gambar 4.17. Torsi vs ignition timing pada putaran 4000 rpm dan $\lambda=1$	73
Gambar 4.18. Daya aktual, daya indikatif dan IMEP	75
Gambar 4.19. Efisiensi dan IMEP untuk premium, etanol dan campurannya pada λ 0,9; 1; dan 1,1	77
Gambar 4.20. Pelepasan massa total untuk premium, etanol dan campurannya pada λ 0,9; 1 dan 1,1	79
Gambar 4.21. Pelepasan kalor total untuk premium, etanol dan campurannya pada λ 0,9;1 dan 1,1	81
Gambar 4.22. Pelepasan massa dan kalor total	81
Gambar 4.23. Prediksi kecepatan Pembakaran Laminer kondisi STP dan bertekanan di ruang bakar Motor Otto	83
Gambar 4.24. Kurva pelepasan kalor total dan laju pelepasan kalor	85
Gambar 4.25. Tahapan proses pembakaran untuk λ 0,9; 1 dan 1,1.	87
Gambar 4.26. Durasi pembakaran bahan bakar di ruang bakar motor Otto	87
Gambar 4.27. Laju pelepasan massa dan kalor untuk λ 0,9; 1 dan 1,1	89
Gambar 4.28. Tekanan puncak dari E10 untuk λ 0,9; 1 dan 1,1 – (potongan dari siklus lengkap)	91
Gambar 4.29. COV_{IMEP} vs Jenis bahan bakar	92
Gambar 4.30. Emisi CO_2 vs jenis bahan bakar	93

Gambar 4.31. Emisi CO vs Jenis bahan bakar

94

Gambar 4.32. Emisi HC vs Jenis bahan bakar

95

Gambar 4.33. Temperatur gas buang

95



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	: Spesifikasi Premium	110
Lampiran II	: Spesifikasi standar bioetanol terdenaturasi untuk gasohol Indonesia	111
Lampiran III	: Sifat-sifat beberapa bahan bakar	112
Lampiran IV	: Contoh Heat Release Rate - Lambda 0,9	113
Lampiran V	: Contoh Heat Release Rate - Lambda 1	114
Lampiran VI	: Contoh Heat Release Rate - Lambda 1,1	115
Lampiran VII	: Contoh Variasi Siklus - Lambda 0,9 – E10	116
Lampiran VIII	: Contoh Variasi Siklus - Lambda 1 – E10	117
Lampiran IX	: Contoh Variasi Siklus - Lambda 1,1 – E10	118



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Etanol sebagai bahan bakar motor Otto (*Spark Ignition Engine-SIE*) sudah digunakan sejak Henry Ford membuat mobil pada tahun 1896. Kemudian, etanol ditinggalkan sebagai bahan bakar motor bensin setelah ditemukannya energi fossil berupa bahan bakar minyak (BBM) dengan harga lebih murah, nilai kalor tinggi dan mudah penggunaannya^[1]. Pada era 1970 pada saat terjadi krisis energi minyak, etanol mendapatkan perhatian lagi sebagai pengganti bahan bakar motor bensin, tetapi hal ini tidak berlangsung lama karena harga BBM turun kembali. Hanya Brazil yang tetap konsisten menggunakan etanol sampai saat ini karena ketersediaan etanol di *local market* dan di pihak lain BBM harus impor. Di Brazil saat ini, sekitar 20% motor Otto menggunakan *neat alcohol (hydrated ethanol: ± 96% etanol dan ± 4% air)* dan *flexible fuel vehicle (FFV)* yang menggunakan 85% etanol (E85) dan 80% menggunakan gasohol dengan kandungan alkohol antara 22-25%^[2].

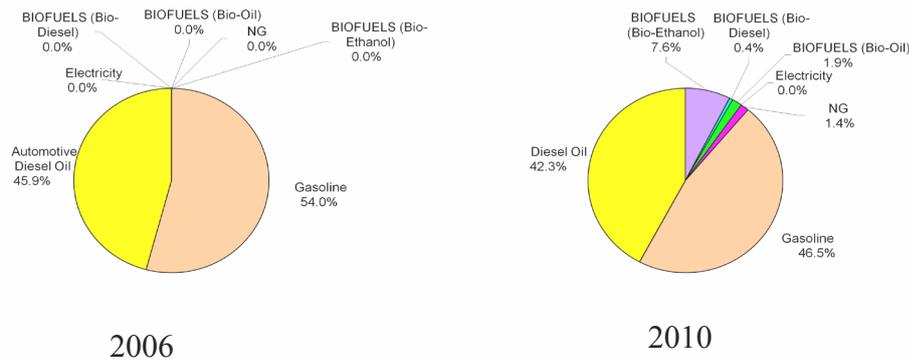
Akhir-akhir ini penggunaan etanol mendapatkan perhatian lagi di banyak negara mengingat: (1) harga BBM yang terus meningkat karena tidak seimbangnya permintaan dan persediaan serta cadangan minyak bumi semakin menipis, (2) etanol sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui hasil fermentasi dari biomassa (3) etanol sebagai *oxigenate octane booster* pada *Reformulated Gasoline (RFG)* menggantikan *lead* dan *MTBE*, (4) etanol dapat menurunkan emisi CO, HC dan NOx (*regulated emission*) dan (5) etanol dapat menurunkan emisi gas rumah kaca CO₂ (*unregulated emission*) sesuai dengan *Kyoto Protocol*, (6) dengan harga minyak mentah diatas USD 100, maka secara umum etanol menjadi sangat kompetitif secara ekonomis.

1.1.1. Kebijakan Energi di Indonesia

Energi merupakan salah satu pendorong utama bagi pertumbuhan ekonomi Indonesia, sehingga masalah ketersediaan dan harga energi selalu menjadi issue yang krusial dan sensitif mengingat kondisi ke-energian di Indonesia sebagai berikut^[3]: (1) konsumsi energi meningkat rata-rata sebesar 7% dengan pasokan dari BBM sekitar 54% dari bauran energi final, (2) intensitas dan elastisitas energi yang tinggi padahal energi per-kapita rendah (boros energi), (3) cadangan minyak bumi relatif tetap sebaliknya konsumsi terus meningkat, (4) ketergantungan terhadap impor minyak bumi akan membawa konsekuensi pada keamanan pasokan energi dalam negeri, (5) pengembangan dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan terkendala harga murah energi karena subsidi dan (6) pesatnya peningkatan penjualan kendaraan bermotor yang mengkonsumsi bahan bakar minyak.

Sesuai dengan Undang-Undang energi No. 30 Tahun 2007, maka pemerintah membuat kebijakan pengembangan dan penggunaan energi yang diarahkan kepada usaha-usaha sebagai berikut^[3]: (a) mengembangkan eksplorasi produksi dan (b) konservasi energi (optimalisasi produksi) pada sisi penyediaan, (c) diversifikasi dan (d) energi efisiensi pada sisi pemanfaatan energi. Dalam mengimplementasikan kebijakan tersebut juga didorong harga energi ke arah harga ke-ekonomian secara bertahap dengan mempertimbangkan faktor lingkungan.

Konsumsi energi nasional, utamanya bahan bakar minyak, sektor transportasi merupakan pengonsumsi terbesar dari bahan bakar minyak dan sampai saat ini sulit untuk melakukan diversifikasi energi karena desain motor bakar (Otto dan Diesel) masih mengacu pada sifat-sifat bahan bakar minyak. Gambar 1.1, menunjukkan arah transformasi dan komitmen pemerintah untuk melaksanakan kebijakan diversifikasi energi di sektor transportasi dengan mengedepankan penggunaan biofuel: biodiesel dan bioetanol.



Gambar 1.1. Transformasi penggunaan energi disektor transportasi dari 2006 ke 2010^[4]

Dari Gambar 1.1, tersebut terlihat bahwa dalam kurun waktu sekitar 3 tahun, sektor transportasi diharapkan sudah mampu menyerap energi bio-diesel dan bio-ethanol masing-masing sebesar 0,4% dan 7,6% dari total konsumsi bahan bakar/energi. Dalam jangka yang lebih panjang, secara jelas pemerintah sudah menyiapkan *roadmap* pengembangan bahan bakar nabati (BBN) seperti tertera pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1, *Roadmap* Pengembangan Bahan Bakar Nabati (BBN) di Indonesia^{*}

	2005-1010	2011-2015	2016-2025
Bio-Etanol	5 % dari konsumsi 1,48 juta KL (74 ribu KL)	10 % dari konsumsi 2,78 juta KL (278 ribu KL)	15 % dari konsumsi 6,28 juta KL (942 ribu KL)
Bio-Diesel	10 % dari konsumsi 2,41 juta KL (241 ribu KL)	15 % dari konsumsi 4,52 juta KL (678 ribu KL)	20 % dari konsumsi 10,22 juta KL (2044 ribu KL)
Bio-Oil			
BioKerosine	1 juta KL	1,8 juta KL	4,07 juta KL
Bio-Nabati Murni untuk Pembangkit Listrik	0,4 juta KL	0,74 juta KL	1,69 juta KL
BioFuel	2 % dari konsumsi 5,29 juta KL (1.058 ribu KL)	3 % dari konsumsi 9,84 juta KL (2.844 ribu KL)	5 % dari konsumsi 22,26 juta KL (11.130 ribu KL)

*) Catatan: diolah dari sumber no: 6.

1.1.2 Penggunaan Etanol Sebagai bahan Bakar Motor Otto di Berbagai Negara

Etanol telah digunakan pada motor bakar torak sejak awal penemuan motor Otto, sebelum kemudian beralih ke bahan bakar minyak. Etanol kembali digunakan sebagai campuran pada bahan bakar bensin secara masif di Brazil sejak krisis minyak tahun 1970-an. Sejak itu Brazil tetap konsisten meneliti dan mengembangkan motor Otto yang sesuai dengan penggunaan etanol hingga prosentase mencapai 22-25% dari total kendaraan yang menggunakan 85% etanol (*Flexible Fuel Vehicles – FFV*) dan 100% (*neat ethanol*). Sedangkan negara lainnya kebanyakan hanya menggunakan etanol dalam campuran *gasoline* dengan prosentase kurang dari 10%.

Tabel 1.2, memberikan sebagian data dari beberapa negara-negara yang sudah menggunakan etanol sebagai campuran bahan bakar pada motor Otto. Indonesia lewat PT Pertamina baru mengenalkan produk bahan bakar *bio-premium* dan *bio-pertamax* di tahun 2006 dengan jangkauan yang sangat terbatas di beberapa kota besar di pulau Jawa saja, seperti: Jakarta, Bandung, Semarang, Surabaya, Denpasar dan Malang^[5].

Tabel 1.2. Penggunaan etanol di beberapa negara^[6]

Negara	Gasohol	Volume (L/thn)	Keterangan
Brazil	E20 s/d E25	~ 14 milyar (total)	program Proalcool, sejak 1975, produsen & pengguna terbesar
AS	E10, E85	> 6 milyar	sejak 1978
Colombia	E10	1 milyar (2006)	sejak 2001
Australia	E10, E20	60 juta	penyajalan sejak 1992
Swedia	E5	50 juta	sejak 2000
India	E5	1,3 milyar	wajib sejak 2003
Thailand	E10	60 juta	sejak 2002, berencana ekspor
Jepang	E3 & E10	total 7,8 milyar	(pasar potensial), belum diwajibkan
Cina	E10	1,48 milyar	(pasar potensial)
Indonesia*)	E-3 (BioPremium)	4,2 juta	Agust-06
	E-3 (BioPertamax)	4,3 juta	Des-06

Catatan: *) Pertamina^[5]

Berdasarkan Tabel 1.1 dan 1.2, sekarang Indonesia baru mengkonsumsi etanol sebagai bahan bakar motor Otto sebanyak 11,5% dari target tahun 2010 yang sebesar 74 juta liter. Keterbatasan penggunaan etanol pada motor Otto selain faktor teknis juga disebabkan faktor lain, utamanya harga etanol masih tidak kompetitif jika harga bahan bakar minyak kurang dari sekitar USD 65/barrel. Hanya Brazil yang dapat menghasilkan etanol dengan harga sekitar USD 26/barrel, sedangkan negara lain seperti USA, negara-negara Eropa dan Asia masih disekitar USD 65/barrel^[7].

Sifat-sifat etanol sangat berbeda dengan *gasoline*/premium demikian pula dengan campuran keduanya^[8]. Pencampuran etanol pada premium menimbulkan efek azeotropika, dimana volatilitas campuran sampai dengan konsentrasi etanol tertentu mempunyai nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan volatilitas bahan bakar penyusunnya. Keunggulan etanol sebagai bahan bakar alternatif motor Otto adalah nilai oktan yang tinggi, yaitu RON sebesar 125 sedangkan kekurangannya adalah nilai kalor yang rendah, hanya sekitar 60-70% dari *gasoline*/premium.

Penelitian penggunaan bahan bakar etanol murni (*dedicated*) maupun campuran *gasoline*-etanol (bahan bakar campuran etanol dan *gasoline* secara umum dinyatakan dengan simbol E-XX, dimana XX merupakan prosentase etanol dalam campuran basis volume) telah dan masih menjadi perhatian peneliti di bidang motor bakar baik motor Otto maupun motor diesel. Dengan semakin mahal harga BBM, meningkatnya issue “*global warming*” dengan usaha menurunkan produksi CO₂ dari proses pembakaran dan usaha mencari bahan bakar yang dapat diperbaharui, maka penggunaan etanol di masa yang akan datang dimungkinkan ada kecenderungan yang meningkat.

1.2 Perumusan Masalah

Penggunaan etanol sebagai bahan bakar pada motor Otto baik *dedicated* maupun sebagai campuran pada *gasoline*, masih banyak dijadikan sebagai obyek penelitian. Hal ini sejalan dan harus disesuaikan dengan perkembangan teknologi dan kinerja motor Otto, reformulasi bahan bakar *gasoline* maupun pengurangan emisi gas buang.

Etanol sebagai senyawa murni mempunyai sifat dan karakteristik pembakaran yang hampir sama di berbagai negara, tetapi tidak demikian halnya dengan *gasoline*. *Gasoline* yang tersusun dari ratusan senyawa hidrokarbon, dimungkinkan di tiap negara mempunyai sifat-sifat yang berbeda-beda karena disesuaikan dengan berbagai faktor, antara lain: iklim, persyaratan dan spesifikasi *gasoline* yang ditetapkan, *crude oil* dan kilang yang dimiliki serta teknologi motor Otto yang banyak tersedia di pasaran. Pencampuran *gasoline* dan etanol berdasarkan data yang ada, mempunyai sifat-sifat dan karakteristik yang beragam, dimana keberagaman tersebut lebih disebabkan karena perbedaan dari sifat-sifat *gasoline* itu sendiri. Demikian halnya dengan premium, tentu saja pencampuran dengan etanol kering akan memberikan sifat-sifat dan karakteristik yang khas bila dibandingkan dengan campuran *gasoline*-etanol yang ada di negara lain.

Mayoritas motor Otto yang selama ini menggunakan bahan bakar campuran *ethanol-gasoline* maupun *dedicated* masih menggunakan basis desain dengan karakteristik pembakaran *gasoline*. Sehingga unjuk kerja dan emisi gas buang yang dihasilkan belum optimum. Di pihak lain, penelitian etanol sebagai bahan bakar

motor Otto secara umum masih bersifat praktis, yaitu memperbaiki unjuk kerja dan emisi gas buang dengan cara: (a) modifikasi minor konstruksi motor, (b) merubah setting operasional motor dan (c) merubah komposisi campuran *gasoline*-etanol baik tanpa maupun dengan tambahan aditif maupun *co-solvent*.

Karakteristik pembakaran di motor Otto melibatkan banyak parameter yang saling berkompetisi. Sehingga seringkali karakteristik pembakaran yang dihasilkan oleh peneliti bisa berbeda dengan yang lain – tergantung pemilihan dan pengaturan parameter, selain karena faktor bahan bakar. Untuk memahami karakteristik pembakaran di motor Otto yang melibatkan banyak parameter tersebut, maka penelitian akan dimulai dengan karakteristik pembakaran kondisi atmosferik – hanya dipengaruhi oleh campuran etanol dalam premium.

Dalam penelitian ini premium-etanol konsentrasi tinggi (sampai 40% v/v - E40) akan diuji sifat-sifatnya sesuai dengan standar yang lazim. Dari pengujian sifat-sifat campuran premium-etanol tersebut akan didapat hasil dan kecenderungan perubahan sifat-sifat tersebut terhadap penambahan konsentrasi etanol dalam campuran.

Karakterisasi pembakaran campuran premium-etanol pada kondisi atmosferik dilakukan di Kalorimeter Api dengan metode *pool fire*. Pada kondisi ini parameter yang berperan dalam perubahan karakterisasi pembakaran hanyalah konsentrasi etanol dalam campuran sedangkan parameter lainnya relatif sama dan konstan.

Karakterisasi pembakaran bertekanan dilakukan di motor Otto dengan mengatur beberapa parameter yang dijaga konstan dan beberapa parameter divariasikan – cukup banyak parameter operasional motor Otto yang mempengaruhi karakteristik pembakaran, utamanya antara lain: rasio udara-bahan, waktu penyalaan api, kecepatan dan beban motor.

Evolusi karakteristik pembakaran kondisi atmosferik ke bertekanan di motor Otto akan di verifikasi dengan hasil pengujian kecepatan pembakaran laminar dari peneliti lain untuk campuran *gasoline*-etanol pada *constant volume combustion bomb*” dimana parameter yang terlibat adalah: rasio udara-bahan bakar, konsentrasi etanol dalam *gasoline*, temperatur dan tekanan. Kecepatan pembakaran akan sangat berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran khususnya pada laju pelepasan

massa dan kalor, durasi pembakaran dan pada motor Otto juga berpengaruh terhadap variasi siklus per siklus serta pembentukan emisi gas buang.

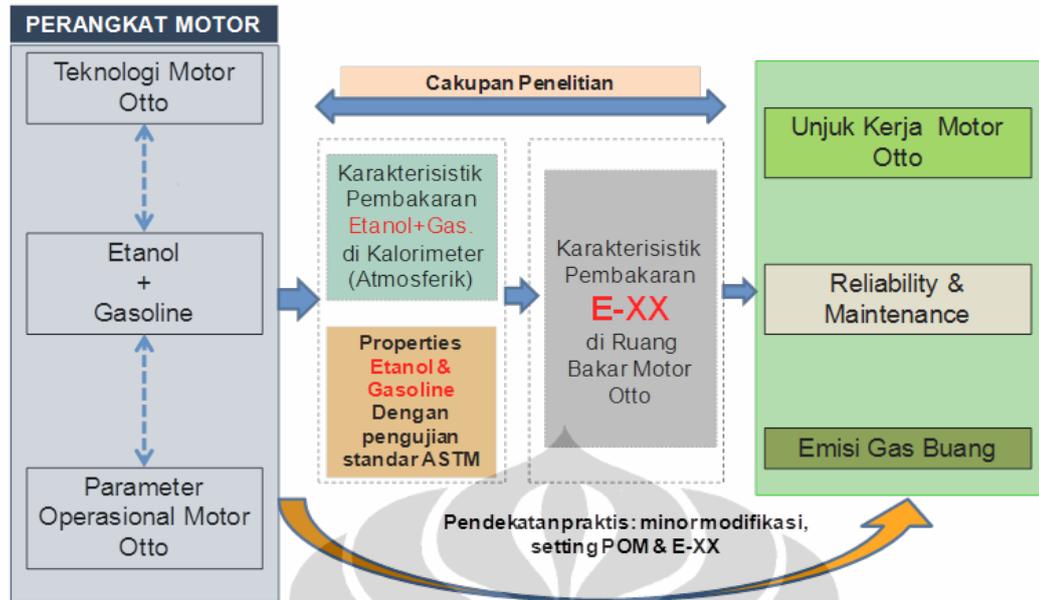
Kemudian karakteristik pembakaran kondisi bertekanan di motor Otto akan dikorelasikan dengan kinerja dan emisi gas buang dari motor Otto silinder tunggal dengan sistem injeksi yang beroperasi pada kondisi tertentu.

1.3 Cakupan Penelitian Dan Batasan Masalah

Cakupan penelitian secara keseluruhan dapat digambarkan secara skematik seperti yang tertera pada Gambar 1.2.

Gambar 1.2, menunjukkan konseptual dan ringkasan dari penelitian “Kajian Eksperimental Pengaruh Etanol Pada Premium Terhadap Karakteristik Pembakaran Kondisi Atmosferik dan Bertekanan Di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi“. Sebelum dilakukan karakterisasi pembakaran campuran etanol-premium di dalam ruang bakar motor Otto, dimana cukup banyak faktor yang berpengaruh, seperti jenis bahan bakar, setting operasional, desain dan konstruksi motor Otto, maka perlu dilakukan pengujian sifat-sifat campuran bahan bakar premium & etanol secara standar dan pengujian karakterisasi pembakaran campuran bahan bakar premium & etanol kondisi atmosferik pada kalorimeter api. Pada kondisi atmosferik ini tidak banyak faktor berpengaruh seperti yang terjadi pada ruang bakar Motor Otto.

Pada penelitian karakterisasi pembakaran di kalorimeter api ini hanya variasi dari komposisi campuran etanol-premium yang berperan dalam menentukan laju pelepasan kalor bahan bakar. Sedangkan pada karakterisasi pembakaran di ruang bakar Motor Otto selain komposisi campuran masih ada beberapa parameter yang berpengaruh terhadap laju dan besarnya pelepasan kalor, seperti antara lain: waktu awal injeksi bahan bakar, durasi injeksi bahan bakar, tekanan ruang bakar (*compression ratio* dan *load*), A/F, kecepatan dan beban motor serta *ignition timing*.



Gambar 1.2. Skematis dan Konseptual dari Penelitian

Mengingat cakupan penelitian cukup luas, maka perlu dilakukan batasan-batasan dalam penelitian sebagai berikut:

- Premium yang dipakai dalam penelitian adalah premium yang dibeli pada SPBU yang bertanda “Pasti Pas”.
- Etanol kering yang digunakan dalam penelitian adalah etanol yang mempunyai kemurnian etanol lebih besar dari 99,9%.
- Motor Otto yang dipakai dalam penelitian adalah motor Otto yang mempunyai teknologi yang sekarang banyak diadopsi oleh kebanyakan motor Otto yang tersedia di pasar Indonesia: sistem injeksi dengan rasio kompresi kisaran 9 – 9,5 yang masih bisa menggunakan bahan bakar premium.
- Penelitian karakteristik pembakaran bertekanan di motor Otto dilakukan pada *Minimum Advanced for the Best Torque* (MBT), daya luaran motor Otto yang konstan sebesar 3 kW ataupun pada *Widely Open Throttle* (WOT) dengan kecepatan motor sebesar 4000 rpm – merupakan kondisi operasional motor yang sering dipakai dalam operasional harian.
- Penelitian/pengujian kinerja motor Otto dilakukan pada kondisi *Minimum Advanced for the Best Torque* (MBT), kecepatan 4000 rpm dan daya luaran efektif motor sampai dengan sekitar 3 kW - *Widely Open Throttle* (WOT).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah antara lain sebagai berikut:

- a. Melakukan pengujian sifat-sifat dari bahan bakar premium (*Regular Unleaded Indonesia Gasoline*), etanol kering dan campurannya sampai dengan prosentase tinggi etanol (5% - 40% (v/v)).
- b. Melakukan kajian eksperimental karakteristik pembakaran premium, etanol dan campurannya kondisi atmosferik dan bertekanan di motor Otto silinder tunggal dengan sistem injeksi.
- c. Memberikan analisa dan *interface* pemahaman (korelasi) yang terpadu antara (1) sifat-sifat bahan bakar, (2) karakteristik pembakaran kondisi atmosferik yang hanya dipengaruhi oleh konsentrasi etanol dalam campuran (3) karakteristik pembakaran bertekanan yang dipengaruhi oleh banyak parameter operasional di motor Otto dan (4) korelasi karakteristik pembakaran dengan kinerja, stabilitas operasional dan emisi gas buang pada motor Otto.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang diharapkan adalah antara lain sebagai berikut:

- a. Mendapatkan sifat-sifat premium-etanol & karakteristik proses pembakaran premium-etanol (atmosferik & bertekanan).
- b. Sebagai *interface* pemahaman antara karakteristik pembakaran dengan kinerja motor, stabilitas operasional & emisi.
- c. Acuan rancang bangun ataupun modifikasi motor Otto berbahan bakar premium-ethanol.

1.6. Keterbaruan Penelitian

Keterbaruan penelitian ini adalah:

- a. Mendapatkan informasi sifat-sifat campuran premium (*Regular Unleaded Indonesia Gasoline*), etanol kering dan campurannya dengan konsentrasi etanol tinggi ($\leq 40\%$ v/v etanol pada premium).
- b. Mendapatkan karakteristik pembakaran campuran premium-etanol kering konsentrasi tinggi pada kondisi atmosferik dan bertekanan di motor Otto.

- c. Mendapatkan karakteristik pembakaran di motor Otto dan dampak terhadap kinerja, stabilitas pembakaran dan emisi gas buang dengan bahan bakar campuran premium-etanol konsentrasi tinggi.

1.7. Sistematika Penulisan

Penulisan disertasi ini terdiri atas 5 bab, daftar pustaka dan lampiran-lampiran, adapun kelima bab tersebut adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan. Terdiri atas latar belakang, perumusan masalah, cakupan dan batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, keterbaruan penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka Dan Landasan Teori. Memaparkan teori dasar dan studi literatur yang mendasari penelitian ini. Tinjauan pustaka meliputi *review* penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sifat-sifat bahan bakar campuran *gasoline*-etanol, karakteristik pembakaran campuran *gasoline*-etanol baik kondisi atmosferik dengan metode *pool fire*, maupun karakteristik pembakaran campuran *gasoline*-etanol pada pembakaran di motor Otto dengan berbagai variasi yang antara lain: desain, rasio kompresi, teknologi/mekanisme pembakaran, rasio udara-bahan bakar, kecepatan, beban motor, variasi siklus, kinerja dan emisi gas buang.

Landasan teori ini meliputi persamaan dasar dari dan persamaan pengatur karakteristik pembakaran baik kondisi atmosferik maupun bertekanan di motor Otto yang nantinya akan digunakan untuk pengolahan data, evaluasi dan pembahasan.

Bab 3 Material, Peralatan Dan Metode. Menguraikan material, peralatan dan metode penelitian yang akan digunakan dalam penelitian. Material yang akan digunakan dalam penelitian adalah bahan bakar *gasoline* yang mayoritas digunakan di Indonesia yaitu: premium dan etanol kering dengan bahan baku singkong. Peralatan yang digunakan dalam pengujian dan penelitian adalah yang peralatan yang sesuai dengan standar pengujian ASTM/API untuk mendapatkan sifat-sifat bahan bakar yang diuji. Kalorimeter Api dipilih untuk mendapatkan karakteristik pembakaran premium, etanol dan campurannya dengan kondisi atmosferik. Sedangkan karakteristik pembakaran bertekanan dilakukan pada Motor Otto silinder tunggal sistem injeksi dengan modifikasi pada ECU dan kepala silinder motor untuk mengakomodir pemasangan *piezo quartz pressure transducer*. Metode yang dipilih dalam penelitian adalah metode yang sesuai dengan standar ASTM/API

untuk pengujian sifat-sifat bahan bakar, standar operasional kalorimeter api sedangkan metode karakterisasi pembakaran di motor Otto dengan kondisi operasional motor pada MBT, daya luaran dan kecepatan konstan tetapi dengan 3 variasi rasio udara-bahan bakar (λ), yaitu: 0,9; 1 dan 1,1.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan. Berisi tentang data hasil pengujian sifat-sifat premium, etanol dan campurannya, data pengujian karakteristik pembakaran kondisi atmosferik dan bertekanan di motor Otto serta evaluasi, analisa dan pembahasan yang diperlukan dalam penelitian. Adapun hasil dan pembahasan dimulai dengan sifat-sifat campuran premium-etanol dengan berbagai perubahannya dibandingkan dengan sifat-sifat dasar dari bahan bakar pembentuknya kemudian juga dibandingkan dengan hasil penelitian peneliti terdahulu. Pembahasan dilanjutkan dengan analisa hasil pengolahan data dari karakterisasi pembakaran kondisi atmosferik berupa laju dan total pelepasan massa dan kalor, durasi pembakaran dan efisiensi pembakaran untuk campuran premium-etanol. Dilakukan perhitungan kecepatan pembakaran laminar berdasarkan persamaan empiris hasil penelitian di *constant volume spherical combustion bomb* dengan variasi temperatur, tekanan, kandungan etanol, dan rasio udara-premium dan etanol. Selanjutnya dilakukan pengolahan data yang dipresentasikan dalam bentuk grafik, analisa dan pembahasan karakterisasi pembakaran bertekanan campuran premium-etanol berbasis pada daya output luaran (tekanan efektif rata-rata) motor Otto yang sama dan konstan. Analisa dilakukan berupa: laju pelepasan massa dan kalor, *ignition delay*, durasi pembakaran, kecepatan pembakaran laminar, variasi siklus kemudian dilanjutkan dengan analisa pengaruh penambahan etanol pada premium terhadap kinerja dan emisi gas buang.

Bab 5 Kesimpulan. Berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian yang telah dilakukan.

Daftar Pustaka. Berisi beberapa sumber baik dalam bentuk buku maupun dalam bentuk paper dan jurnal yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

Lampiran. Berisi data-data dalam bentuk tabel dan grafik sebagai pendukung/tambahan informasi yang digunakan saat melakukan pembahasan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Dalam cakupan penelitian tersaji beberapa bagian pengujian dan penelitian yang meliputi: (1) pengujian bahan bakar premium, etanol dan campurannya, (2) pengujian dan penelitian karakteristik pembakaran bahan bakar yang diuji pada kondisi atmosferik pada Kalorimeter Api dengan metode pembakaran kolam (*pool fire*) dan (3) pengujian dan penelitian karakteristik pembakaran bahan bakar uji pada kondisi bertekanan di Motor Otto dengan kondisi operasional yang telah ditentukan.

Bab berikut akan menyajikan kajian pustaka dan landasan teori yang sesuai dengan bidang pengujian dan penelitian untuk memberikan rujukan dalam penelitian dan mengetahui subyek penelitian peneliti terdahulu serta teori dan persamaan pengatur (*governing equations*) berupa korelasi parameter-parameter yang mendasari perilaku suatu proses pembakaran.

2.1 Bahan Bakar Motor Otto (*Gasoline*)

Gasoline masih menjadi bahan bakar utama motor Otto karena sifat-sifatnya yang sangat sesuai dengan karakteristik pembakaran di motor Otto. *Gasoline* yang merupakan bahan bakar fosil adalah suatu campuran yang kompleks yang terdiri dari ratusan senyawa hidrokarbon yang dapat dikelompokkan dalam parafanik, naphtanik dan aromatik, mempunyai titik didih antara 30-220°C dengan kandungan karbon C₄ – C₁₂ dan sedikit sulfur, oksigen dan senyawa nitrogen. Komposisi kimia *gasoline* sangat tergantung pada bahan baku minyak mentah (API, komposisi kimia), proses kilang (*distillation, alkylation, hydrocracking, catalytic cracking*), spesifikasi dan sifat-sifat yang disesuaikan dengan kondisi iklim, persyaratan dan spesifikasi yang diminta oleh pembuat motor Otto (sesuai dengan teknologi yang diterapkan) dan persyaratan ambang batas polutan.

Spesifikasi dari salah satu jenis *gasoline* yang dijual di Indonesia adalah premium – yang akan digunakan dalam penelitian – selain jenis lainnya seperti: pertamax dan pertamax plus. Spesifikasi dari premium sesuai dengan Keputusan Dirjen MiGas

tersaji pada Lampiran I. Sedangkan spesifikasi beberapa jenis *gasoline* yang digunakan di beberapa negara tersaji pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Spesifikasi Beberapa Jenis *Gasoline*



2.2 Etanol

Etanol atau etil alkohol sebagai senyawa tunggal mempunyai rumus kimia C_2H_5OH merupakan suatu cairan hasil proses fermentasi dan distilasi dari karbohidrat yang banyak terkandung pada hasil pertanian – seperti: jagung, singkong, tebu, dll. Etanol merupakan cairan yang tak berwarna, mudah menguap (*volatile*) dan mudah terbakar. Etanol banyak digunakan sebagai bahan campuran pada minuman keras dan pelarut kimia selain bisa juga digunakan sebagai bahan bakar.

Sebagai bahan bakar pada motor Otto, etanol mempunyai sifat-sifat yang dibutuhkan, seperti: nilai oktan yang tinggi, mampu diperbaharui, menghasilkan emisi polutan yang lebih rendah. Sedangkan sifat-sifat yang kurang mendukung sebagai bahan bakar motor Otto adalah: nilai kalor yang hanya sekitar 2/3 dibandingkan *gasoline*, higroskopis dan dapat bercampur air dengan segala perbandingan sehingga dapat menyebabkan korosi maupun pemisahan antara

gasoline dengan etanol. Sifat-sifat etanol secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran II dan III.

2.3 Sifat-Sifat *Gasoline*/Premium, Etanol Dan Campurannya

Spesifikasi bahan bakar untuk Motor Otto harus mempunyai sifat-sifat dan persyaratan yang telah ditentukan oleh pabrikan guna menunjang pengoperasian motor secara efisien, handal, mudah dan murah perawatan serta mempunyai usia teknis yang panjang. *Gasoline* masih menjadi bahan bakar utama untuk motor Otto saat ini, mengingat sifat-sifat yang paling cocok dengan karakteristik operasional motor Otto. Sedangkan etanol merupakan salah satu bahan bakar yang prospektif untuk menggantikan bahan bakar fosil seperti *gasoline* karena beberapa sifatnya yang lebih baik dari *gasoline* serta merupakan jenis bahan bakar yang mampu diperbaharui.

Sedangkan etanol merupakan senyawa murni bisa didapatkan dari proses fermentasi karbohidrat yang terdapat pada berbagai macam bahan makanan, seperti: jagung, pohong, tebu, sorgum, dll. Berikut diulas beberapa sifat penting dari bahan bakar untuk motor Otto baik untuk *gasoline*, etanol maupun campurannya.

Kesuksesan masalah diversifikasi energi/bahan bakar di motor Otto sangat tergantung pada kesesuaian dan kemiripan sifat-sifat bahan bakar substitusi (*etanol*) dengan bahan bakar referensi (*gasoline*) mengingat desain motor bensin masih merujuk pada sifat-sifat *gasoline* (Tabel 2.1).

Perbandingan sifat-sifat antara etanol dan *gasoline* dapat dilihat pada Tabel 2.2. Etanol sebagai senyawa murni mempunyai nilai tunggal untuk setiap sifat yang dimilikinya sedangkan *gasoline* sebagai senyawa campuran dari berbagai hidrokarbon (C_4-C_{12}) mempunyai nilai majemuk sehingga untuk setiap *gasoline* yang digunakan oleh suatu negara/daerah bisa sangat berbeda.

Pensubstitusian ataupun pencampuran bahan bakar *gasoline* dengan etanol akan mempengaruhi unjuk kerja dan emisi gas buang - tergantung sejauh mana pencampuran tersebut merubah sifat-sifat penting dari bahan bakar referensi. Sifat-sifat etanol, *gasoline* dan campurannya dari beberapa peneliti terangkum dalam Tabel 2.3, beberapa sifat-sifat penting yang berkaitan dengan karakteristik utama pembakaran campuran *gasoline*-etanol akan didiskusikan sebagai berikut:

Tabel 2.2. Tipikal Sifat-sifat *gasoline* dan etanol^[12]

		Ethanol	Gasoline (typical)
Molar mass	(g/mol)	46.07	102.5
C	(%wt)	52.2	86.5
H	(%wt)	13.1	13.5
O	(%wt)	34.7	0
Density	(kg/m ³)	794	735-760
Latent heat of vaporization	(kJ/kg)	854	289
Distillation	(°C)	78.4	30-190
Net heating value	(kJ/kg)	26805	42690
Net heating value	(kJ/l)	21285	32020
Stoichiometric ratio		8.95	14.4
RON		111	95
MON		92	85

2.3.1. Volatilitas

Volatilitas merupakan sifat bahan bakar yang penting bagi motor Otto karena berkaitan dengan kemudahan menguap dari suatu bahan bakar. Volatilitas berkaitan dengan kemudahan motor distart-dingin, kemampuan beroperasi (*driveability*), terjadinya proses *vapourlock* pada saat panas, pembentukan deposit di ruang bakar dan pelepasan emisi *volatile organic compound* (VOC) dari tangki bahan bakar. Penentuan nilai volatilitas dari suatu bahan bakar sangat ditentukan oleh kondisi iklim setempat sehingga dalam *gasoline* sendiri yang terdiri dari berbagai campuran hidrokarbon dari fraksi ringan sampai sedang (C₄-C₁₂) harus diformulasikan sehingga memenuhi persyaratan/kebutuhan tersebut diatas. Volatilitas bahan bakar seringkali juga dinyatakan dengan tekanan uap yang dinyatakan dalam *Reid Vapour Pressure* (RVP) dengan satuan tekanan.

Etanol (C₂H₅OH) merupakan zat murni sehingga hanya mempunyai satu titik didih. Pencampuran etanol dan *gasoline*/hidrokarbon akan memberikan efek azeotropika dimana volatilitas atau tekanan uap dari campuran lebih besar dari tekanan uap komponen penyusunnya. Efek azeotropika sangat tergantung pada komposisi *gasoline*/jenis hidrokarbon seperti yang terlihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.3. Sifat-sifat etanol, *gasoline* dan campuran yang digunakan oleh beberapa peneliti^[12,13,14,15,16,17,18,19]

No.	Properties	Unit	Yuksel		Kelly			Topgul			Heish					Jeuland		Setiyawan			Hasan		Poulopoulos	
			Etanol	Gasoline	RFG	E-50	E-85	E0	E10	E20	E0	E5	E10	E20	E30	Ethanol	Gasoline	Gasoline	Ethanol	E85	Gasoline	Ethanol	Gasoline	E10
1	Formula		C2H5OH	C4 to C12																				
2	Berat molekul		46,07	100-105												46,07	102,5					114,15	46,07	
3	MTBE	Vol%			11	5,5	1,65																	
4	Lead	g/L																						
5	Carbon	wt %			13,6	13,4	13,2																	
6	Hydrogen	wt %			84,4	67,7	56,7																	
7	Oxygen	wt %			2	18,9	30,1																0,16	3,58
8	Aromatics	wt %																					43,7	42,9
9	Saturated	wt %																					49,7	38,1
10	Alkenes	wt %																					5,7	7,8
11	Benzene	wt %																					2,52	2,25
12	Xylene	wt %																					10,7	9,9
13	Toluene	wt %																					11,1	10,7
14	Sulphur	ppm			36	17	5	1200	1700	2200	61	59	55	49	45									
15	Densitas (15/15°C)	Kg/m3	0,79	0,69-0,79	N/A	N/A	N/A	764,9	768	771,5	757,5	759,1	760,8	764,5	768,2	794	735-760				801	765	785	
16	Specific gravity (15/15°C)		106-110	91	0,741	0,767	0,784												0,74	0,813	0,801			
17	Panas Penguapan	KJ/kg														854	289					305	840	
18	Titik beku	°C	-114	-40																				
19	Titik didih	°C	78	27-225																				
20	Tekanan uap	kPa at 38°C	15,9	48-103	47,2	34,28	42,4	57,6	66,7	66,2	53,7	59,3	59,6	58,3	56,8								61,4	65,9
21	Panas spesifik	KJ/kg/K	2,4	2																		2,4	1,7	
22	Viskositas	mPa s at 20 °C	1,19	0,37-0,44																				
23	Nilai kalor bawah	MJ/L	21,1	30-33	31,2	26,29	22,65	33,6	32,4	31,19	32,27	30,8	30,3	29,82	27,92	21,285	32,02	33,03	13,23	15,562	33,66	21,1		
24	Titik nyala	°C	13	-43																				
25	Temperatur nyala sendiri	°C	423	257																				
26	Distillation (10-90% Vol)	°C			57-146	62-79	73-78				54,5-167,3	49,7-167,7	50,8-166,4	52,8-163	54,8-159,3	78,4	30-190	55-167,8	67,9-73,5	63-73,9				
27	Batas mampu terbakar	Vol %																						
	Bawah		4,3	1,4																				
	Atas		19	7,6																				
28	Stokiometeri A/F		9	14,7				14,7	14,13	13,56						8,95	14,4					15,13	9	
29	Angka Oktana																							
	RON		108,6	88-100	96,9	104,5 (est)	109,7 (est)	86,4	87,4	89,9	95,4	96,7	98,1	100,7	102,4	111	95	88,1	± 108	> 111			95,5	98,9
	MON		89,7	80-90	87,9	91,5 (est)	93,9 (est)	98,8	99,9	101,6						92	85						86	87
30	Residu	ml (Vol%)									(1,7)	(1,5)	(1,5)	(1,5)	(1,5)			1,2	0,2	0,55				
31	Kandungan air	wt %																						
32	Washed gum	(mg/100ml)									0,2	0,2	0,2	0,6	0,2									
33	Unwashed gum	(mg/100ml)									18,8	18,6	17,4	15	14,4									
34	Corrosivity (3 h at 50°C)	ASTM D130									1a	1a	1a	1a	1a									

Tabel 2.4 menunjukkan bahwa efek azeotropika bagi masing-masing molekul yang berlainan, baik dari konsentrasi etanol maupun titik didih azeotropikanya. Namun yang tetap konsisten adalah titik didih dari azeotropika selalu lebih rendah dari titik didih molekul murni penyusunnya sebelum dicampur dengan etanol.

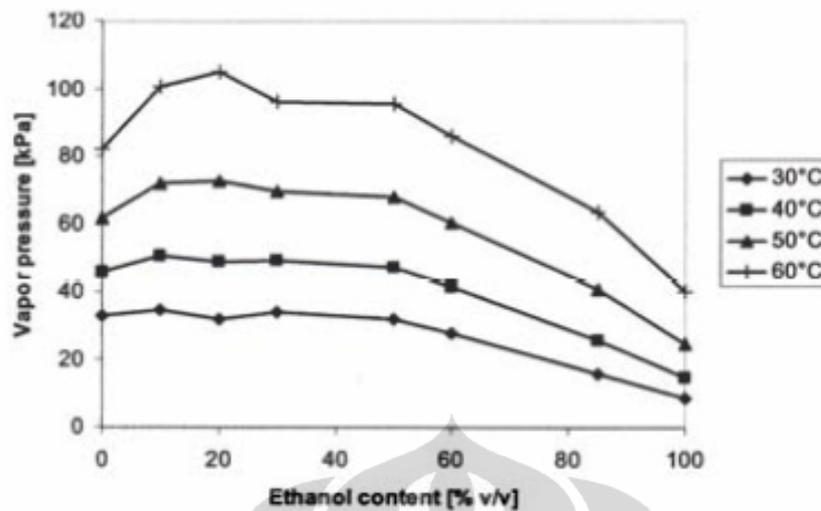
Efek azeotropika tidak hanya ditentukan oleh jenis hidrokarbon dan konsentrasi etanol dalam campuran, tetapi juga dipengaruhi oleh temperatur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1^[20].

Tabel 2.4. Karakteristik efek azeotropika etanol dengan beberapa molekul^[12].

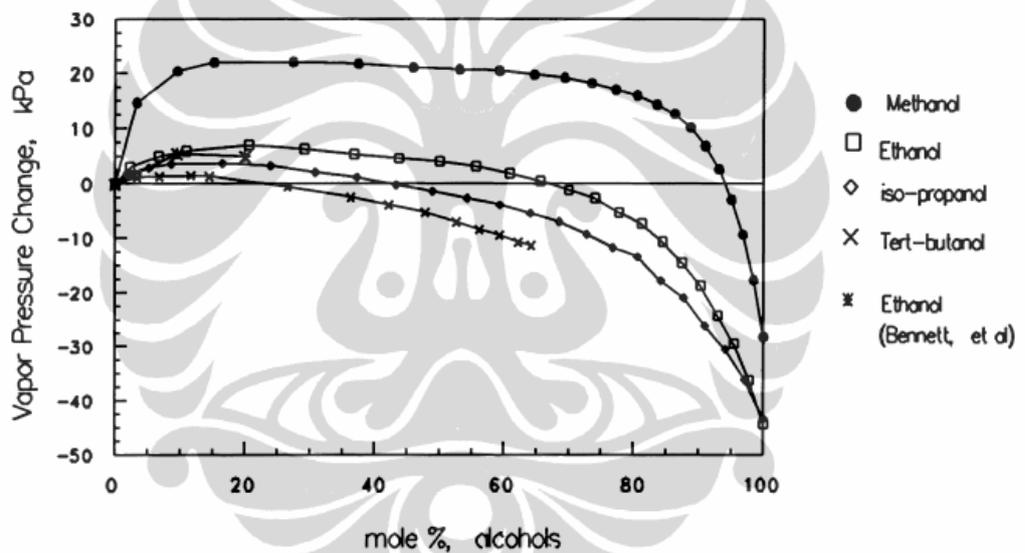
Molecule	Pure boiling point (°C)	Azeotrope boiling point (°C) with ethanol	Composition of the azeotrope (%wt ethanol)
<i>n</i> -pentane	36	34	5
<i>n</i> -hexane	69	59	21
benzene	80	68	32
cyclohexane	81	65	29.2
toluene	111	77	68
<i>n</i> -octane	126	77	88

Efek ezotropika terjadi antara kandungan etanol 2-20% v/v untuk seluruh kisaran temperatur campuran. Semakin tinggi temperatur campuran akan semakin tinggi tekanan uap yang terjadi, artinya bahwa campuran akan semakin mudah menguap. Kenaikkan efek azeotropika semakin tinggi sebanding dengan kenaikan temperatur campuran *gasoline*-etanol (Gambar 2.1).

Efek azeotropika campuran etanol dengan berbagai senyawa ataupun bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini. Campuran metanol dengan *gasoline* memberikan efek azeotropika terbesar dibandingkan dengan senyawa lain, seperti: etanol, *iso-propanol* dan *tetra-butanol*.



Gambar 2.1. Tekanan uap terhadap konsentrasi etanol dalam campuran pada temperatur yang berbeda^[20]



Gambar 2.2. Kenaikkan tekanan uap gasoline dengan penambahan etanol^[21].

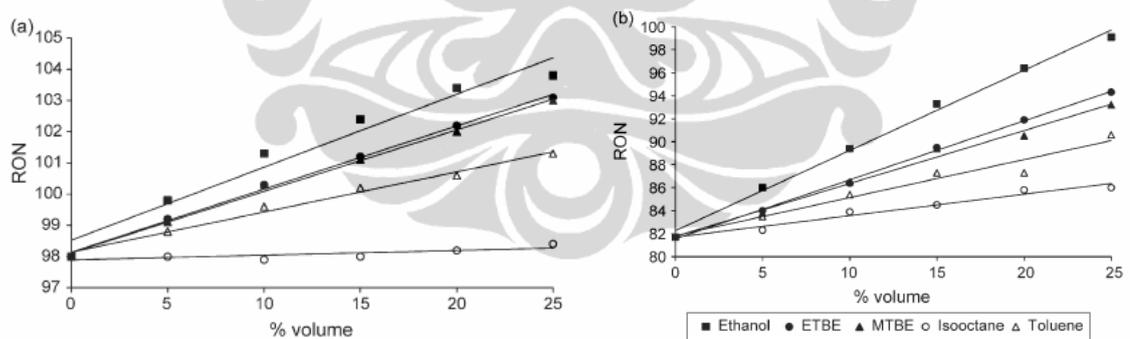
2.3.2 Angka Oktana (*Research Octane Number-RON*)

Angka oktana merupakan parameter terpenting didalam spesifikasi bahan bakar motor Otto karena angka oktana berkaitan langsung dengan kualitas bahan bakar motor Otto yang akan mempengaruhi proses pembakaran di dalam ruang bakar dan sekaligus menentukan tingkat efisiensi termal motor. Efisiensi motor Otto secara ideal dinyatakan dengan rumusan $\eta_{th} = 1/\gamma^{k-1}$, dimana semakin besar harga γ (*compression ratio*) maka motor akan mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi.

Konsekuensi dari *compression ratio* yang tinggi dibutuhkan bahan bakar dengan angka oktana yang tinggi pula supaya tidak terjadi *knocking* yang dapat merusak motor. Sebuah korelasi memberikan petunjuk praktis bahwa untuk menaikkan 1 point *compression ratio* dibutuhkan kenaikan 5 point angka oktana bahan bakar^[22].

Untuk menaikkan angka oktan dari *gasoline* dapat ditambahkan suatu senyawa yang mempunyai angka oktan lebih tinggi atau yang sering disebut dengan *octane booster* misalnya, seperti: MTBE, ETBE, TAME, etanol (*oxygenate octane booster*) dan *toluene*, *xylene* ataupun *iso-octane* (hidrokarbon yang mempunyai nilai oktan tinggi) dan jenis aditif lain.

Etanol selain dikenal sebagai senyawa yang dapat meningkatkan angka oktan *gasoline*, juga dapat sebagai bahan bakar alternatif pada motor Otto baik sebagai campuran dengan *gasoline* maupun *dedicated*. Etanol sebagai senyawa pengungkit oktan pada *gasoline* mempunyai efektifitas yang paling unggul dibandingkan dengan senyawa lain seperti: ETBE, MTBE, Iso-octane dan toluene^[11], seperti tersaji pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Efek penambahan senyawa pengungkit oktan *gasoline*: (a) Gasoline A dan (b) Gasoline B – spesifikasi Gasoline A dan B tersaji pada Tabel 1^[11].

Penambahan etanol pada *gasoline* mempunyai dampak yang baik yaitu dapat menaikkan angka oktan gasoline karena etanol mempunyai angka oktan tinggi berkisar 108-111 (Tabel 2.1), sedangkan *gasoline* mempunyai angka oktana berkisar antara 88-100 tergantung pada komposisi hidrokarbon utamanya kandungan aromatic (Tabel 2.1). Secara umum dapat diprediksi bahwa penambahan

etanol sebesar 10% akan memberikan kenaikan pada angka oktana *gasoline* sebesar antara 2 - 3,5 point – tergantung pada komposisi kimia dari *gasoline*^[11] atau lihat Tabel 2.1.

Penambahan etanol kedalam *gasoline* akan merubah sifat-sifat *gasoline* secara signifikan antara lain dan utamanya adalah: volatilitas, densitas, viskositas, panas penguapan dan angka oktan. Besarnya perubahan sifat-sifat campuran etanol dan *gasoline* tergantung pada prosentase dan kemurnian etanol serta komposisi senyawa *gasoline*^[13,15,16,21,23].

2.3.3 Nilai kalor

Nilai kalor merupakan parameter dan tuntutan utama dari pemilihan bahan bakar untuk dapat digunakan pada sektor transportasi karena pertimbangan keterbatasan tempat penyimpanan di kendaraan. Salah satu keunggulan bahan bakar hidrokarbon adalah mempunyai densitas energi yang lebih besar dalam kondisi atmosferik bila dibandingkan dengan jenis bahan bakar alternatif lainnya, seperti etanol, metanol, LPG dan *natural gas*.

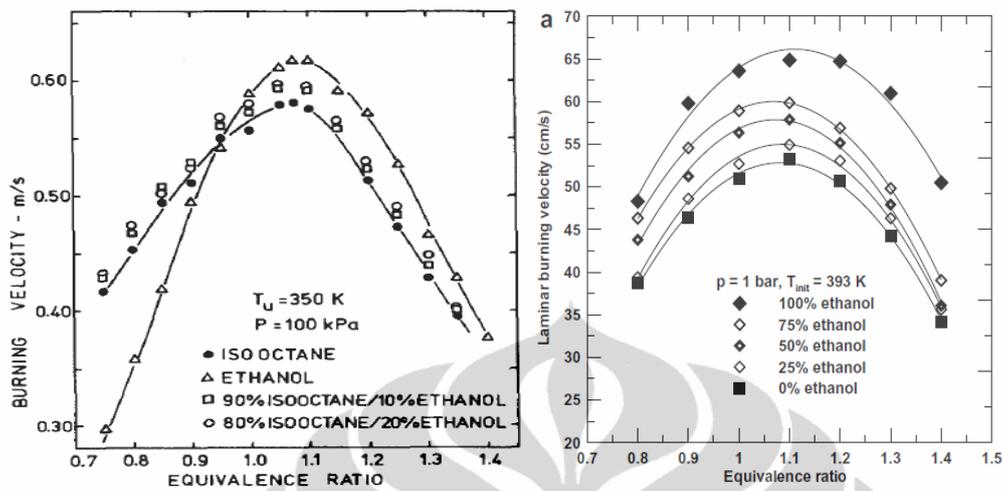
Nilai kalor dari *gasoline* akan tergantung pada hidrokarbon/komposisi kimia penyusunnya seperti: *alkene, benzene, aromatic dan oxygen* (C, H dan O). Demikian juga halnya dengan etanol bervariasi tergantung dari kualitas dan komposisi/ spesifikasinya^[24,25]. Seperti pada Tabel 2.1, nilai kalor dari *gasoline* bervariasi dari sekitar 30 – 33.6 MJ/liter, sedangkan *anhydrous ethanol* berkisar 21 MJ/liter atau sekitar 2/3 nilai kalor dari *gasoline*. Bahkan nilai kalor bawah untuk jenis *hydrated alcohol* kurang dari separuh *gasoline* – 13.3 MJ/liter^[17,26].

2.3.4. Kecepatan Api Laminer

Kecepatan rambat api dalam pembakaran campuran udara-bahan bakar merupakan hal yang penting dalam pembakaran mengingat proses pembakaran membutuhkan waktu yang sangat singkat. Bila tidak cukup waktu bahan bakar terbakar, maka merupakan kerugian energi karena energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar tidak dapat dilepaskan. Disamping itu bahan bakar yang tidak terbakar juga menyebabkan polusi udara (*unburned hydrocarbon*).

Gulder^[27] dan Broustail^[28] melakukan penelitian kecepatan pembakaran laminer etanol, butanol, isooctane dan campurannya dalam di bomb pembakaran volume

konstan (*constant volume combustion bomb*) dengan hasil seperti terlihat pada Gambar 2.4.



(a) Gulder

(b) Broustail

Gambar 2.4. Kecepatan pembakaran etanol dan isoctane sebagai fungsi *equivalence ratio*.

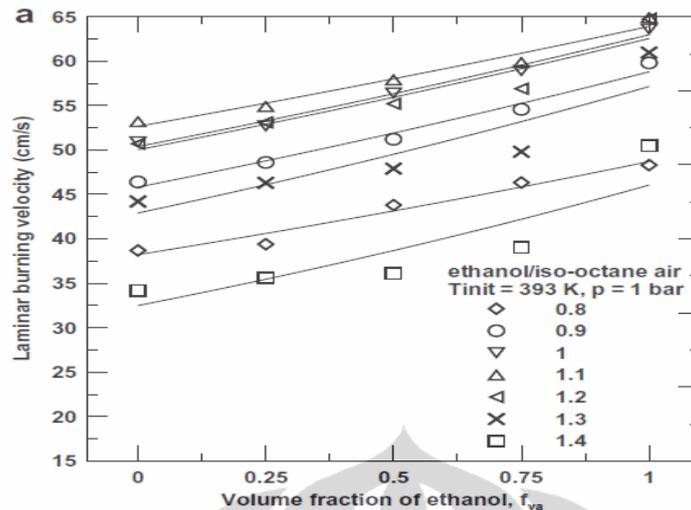
Dari kedua grafik tersebut ada perbedaan yang mendasar dari keduanya yaitu pada kisaran campuran miskin ($\Phi < 0,95$), gulder mendapatkan hasil bahwa etanol murni dengan $\Phi < 0,95$ kecepatan pembakaran laminar lebih rendah dibandingkan dengan gasoline. Sedangkan hasil yang didapat oleh Broustail, tidak ada *threshold* antara etanol murni dengan gasoline.

Gambar 2.5 memperlihatkan kecepatan pembakaran laminar campuran etanol-gasoline dengan berbagai perbandingan dan variasi rasio udara-campuran etanol-premium. Secara umum dapat disimpulkan bahwa penambahan etanol pada gasoline akan mempercepat kecepatan pembakaran laminar untuk rasio udara-campuran etanol-premium sembarang.

Korelasi empiris untuk kecepatan pembakaran laminar yang diusulkan Gulder^[27] adalah:

$$S_{u0}(\phi) = FB\phi^\alpha \exp\{-\beta[\phi - 1.075]^2\} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan nilai konstanta pers. (1) tersaji pada Tabel 2.5.



Gambar 2.5. Kecepatan pembakaran laminar campuran *gasoline*-etanol terhadap rasio udara-bahan bakar^[28]

Tabel 2.5. Konstanta pers. 4, untuk $T_{u0} = 350$ K.

Fuel	F	B (m/s)	α	β
C_2H_5OH	1	0.609	0.25	6.34
C_8H_{18}	1	0.5924	-0.326	4.48
$C_8H_{18}-C_2H_5OH$	$1 + 0.07V^{0.35}$	0.5924	-0.326	4.48

dimana: V adalah fraksi etanol dalam campuran isooktan, $0 \leq V \leq 0,2$

Untuk kecepatan pembakaran sebagai fungsi temperatur, Gulder mengusulkan korelasi empiris untuk kisaran temperatur 350-650K sebagai berikut:

$$S_u(T, \phi) = S_{u0}(\phi) [T_u/T_0]^m \quad \dots\dots\dots(2)$$

Dengan nilai konstanta m tersaji pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Nilai konstanta m , untuk kisaran 350-650K.

Fuel	Exponent m
C_2H_5OH	1.75
C_8H_{18}	1.56
$C_8H_{18}-C_2H_5OH$	$1.56 + 0.23V^{0.46}$

Sedangkan peneliti lain mengusulkan korelasi empiris dari kecepatan pembakaran sebagai fungsi terhadap temperatur dan tekanan untuk beberapa bahan bakar sebagai berikut^[29]:

$$S_{u(T,P)} = S_{u(298K,1atm)} \left(\frac{T_u}{T_{u(298K,1atm)}} \right)^\alpha \left(\frac{P_u}{P_{u(298K,1atm)}} \right)^\beta \dots\dots\dots(3)$$

Dengan nilai α dan β untuk bahan bakar etanol, metanol, isooktan dan *gasoline* sebagai berikut:

$$\alpha = 2,18 - 0,8(\phi - 1) \text{ dan } \textit{gasoline} \alpha = 2,4 - 0,271\phi^{3,51} \dots\dots\dots(4a)$$

$$\beta = -0,16 + 0,22(\phi - 1) \text{ dan } \textit{gasoline} \beta = -0,357 + 0,14\phi^{2,77} \dots\dots\dots(4b)$$

$$S_{u(298,1atm)} = B_m + B_\phi (\phi - \phi_m)^2 \dots\dots\dots(4c)$$

Dengan nilai konstanta pers. 4c tersaji dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Nilai konstanta untuk pers. 4c.

Bahan bakar	ϕ_m	B_m (cm/s)	B_ϕ (cm/s)
Metanol	1,11	36,9	-140,5
Etanol	1,08	34,2	-138,7
Iso-oktan	1,13	26,3	-84,7
Gasoline	1,21	30,5	-54,9

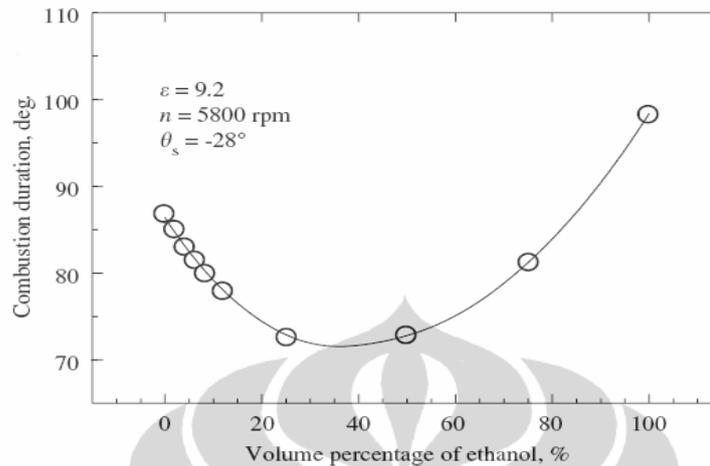
Gulder memberikan korelasi kecepatan pembakaran laminar campuran *gasoline*-etanol sebagai berikut:

$$S_{L,fva}^0 = S_{L,C_8H_{18}}^0 \left(\frac{S_{L,C_xH_yO}^0}{S_{L,C_8H_{18}}^0} \right)^{f_{va}} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana: $S_{L,fva}^0$ adalah kecepatan pembakaran linier untuk campuran isooktana-alkohol (kondisi standar), $S_{L,C_8H_{18}}^0$ adalah kecepatan pembakaran linier untuk ios-oktana (kondisi standar) dan $S_{L,C_xH_y}^0$ adalah kecepatan pembakaran linier untuk alkohol (kondisi standar).

Kecepatan rambat api mempunyai korelasi terhadap waktu pembakaran (*combustion duration*). Bayraktar^[8] menghitung durasi pembakaran *gasoline* murni (E0) sampai dengan etanol (E100) dengan asumsi bahwa desain ruang bakar dari motor Otto dianggap tetap secara teoritis, rasio kompresi 9,2, putaran 5800 rpm dan waktu penyalaan sebesar 28° BTDC. Hasil perhitungan seperti yang ditunjukkan

pada Gambar 2.6. Durasi pembakaran terpendek dicapai pada campuran etanol sekitar 25%.



Gambar 2.6. Variasi dari durasi pembakaran dengan konsentrasi etanol^[8].

Dari Tabel 2.3, terlihat bahwa terdapat sekitar 34 jenis sifat-sifat yang diuji oleh peneliti untuk mengevaluasi perubahan kinerja, emisi gas buang, lubrikasi dan kompatibilitas komponen dari motor bensin terhadap penggunaan bahan bakar campuran etanol dan *gasoline* dengan berbagai prosentase volume. Jenis pengujian yang dilakukan oleh setiap peneliti disesuaikan dengan tujuan penelitian itu sendiri.

2.3.5 Kemurnian etanol dan Toleransi Air Dalam campuran *gasoline*-etanol

Ada dua jenis etanol yang tersedia di pasaran sesuai dengan kandungan air dalam etanol – hal ini berkaitan dengan proses pemurnian etanol itu sendiri, yaitu: *hydrated (hydrous) alcohol* yang merupakan hasil fermentasi dan distilasi langsung dari biomass (tebu, jagung, beras, bit, dll) mempunyai kemurnian diatas 94% ($\pm 6,8$ % air) dan *anhydrous alcohol* merupakan proses distilasi lanjutan dan pengeringan dari *hydrated alcohol* sehingga diperoleh tingkat kemurnian diatas 99,3% ($< 0,7$ % air)^[30].

Air dan etanol saling melarutkan dalam berbagai perbandingan (*miscible*) sedangkan hidrokarbon dan etanol tidak saling melarutkan (*immiscible*). *Gasoline* yang mengandung hidrokarbon dalam temperatur ambient dapat melarutkan sampai dengan 50 ppm air tanpa separasi^[23]. Fase separasi antara *gasoline*-etanol tergantung pada kandungan air dalam etanol, temperatur lingkungan dan komposisi kimia dari *gasoline*^[31].

Kandungan air dalam etanol bila dicampurkan dengan *gasoline* harus mendapatkan perhatian karena dapat mengalami separasi. Salah satu fungsi pencampuran etanol dalam *gasoline* adalah sebagai *octane enhancer*, sehingga bila terjadi separasi karena kandungan air melebihi toleransi maka *gasoline* yang terpisah dari etanol akan mempunyai nilai oktan yang lebih rendah dari campurannya. Angka oktana *gasoline* yang menurun akan mengakibatkan *knocking* yang dapat merusak motor. Untuk menghindari proses separasi di dalam campuran *gasoline*-etanol dapat ditambahkan dengan *higher aliphatic alcohol* atau sering disebut *cosolvents* seperti *tertiary butyl alcohol*, *benzyl alcohol*, *cyclohexano*, *tolouene*, atau *isopropanol*^[10,11].

Gulder^[23] melakukan penelitian toleransi air didalam campuran *gasoline*-etanol sebagai fungsi dari temperatur campuran dan prosentase etanol dalam *gasoline* supaya tidak terjadi separasi dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 2.7.

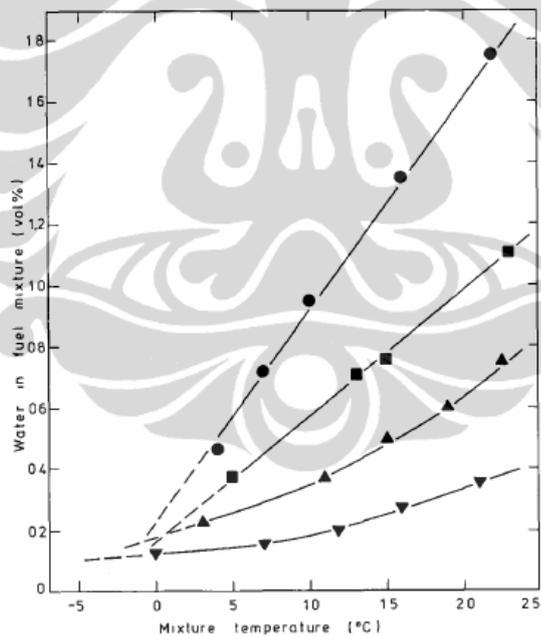


Figure 1 Water tolerance of ethanol-gasoline mixtures as a function of mixture temperature and ethanol content ●, 30 vol% ethanol in ethanol-gasoline mixture, ■, 20 vol%, ▲, 15 vol%, ▼, 10 vol%

Gambar 2.7. Toleransi air dalam campuran *gasoline*-etanol^[23]

2.3.6. Spesifikasi Etanol Di Indonesia

Etanol sebagai bahan bakar alternatif untuk motor Otto akan menjadi bagian penting dari substitusi bahan bakar fosil/*gasoline*. Untuk itu pemerintah

Indonesia telah membuat standarisasi untuk etanol yang terbagi dalam 2 jenis, yaitu: SNI-06-3565-1994 untuk alkohol teknis dan SNI DT 27-0001-2006 untuk bioetanol terdenaturasi atau sebagai *Fuel Grade Ethanol* (FGE). Etanol teknis mempunyai kandungan etanol antara 95% - 96.8% atau bisa disebut sebagai *hydrous ethanol*. Sedangkan etanol terdenaturasi mempunyai kadar etanol minimum sebesar 99.5% atau biasa disebut sebagai etanol kering/*anhydrous ethanol*. Spesifikasi dari bioetanol untuk tujuan bahan bakar motor Otto (gasohol) dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Table 2.8. Spesifikasi standar bioetanol terdenaturasi untuk gasohol^[30]

No	Sifat	Unit, Min/Maks	Spesifikasi ^{*)}
1	Kadar etanol	%-V, min	99.5 (sebelum denaturasi) ^{**)} 94.0 (setelah denaturasi)
2	Kadar metanol	mg/l, maks	300
3	Kadar air	%-V, maks	1
4	Kadar denaturasi	%-V, min %-V, maks	2 5
5	Kadar tembaga (Cu)	mg/kg, maks	0.1
6	Keasaman sebagai CH ₃ COOH	mg/l, maks	30
7	Tampakan		Jernih dan terang, tidak ada endapan dan kotoran
8	Kadar ion klorida	mg/l, maks	40
9	Kandungan belerang (S)	mg/l, maks	50
10	Kadar getah (gum), dicuci	mg/100 ml, maks	5
11	pHe		6.5 - 9

*) Jika tidak diberikan catatan khusus, nilai batasan (spesifikasi) yang tertera adalah nilai untuk bioetanol yang sudah didenaturasi

**) FGE (Fuel grade Ethanol) atau etanol kering biasanya memiliki berat jenis dalam rentang 0.7936-0.7961 (pada kondisi 15.56/15.56°C) atau berat jenis dalam rentang 0.7871-0.7896 (pada kondisi 25/25°C), diukur dengan cara piknometri atau hidrometri yang sudah sangat lazim diterapkan dalam industri alkohol.

2.4 Pembakaran Bahan Bakar Kondisi Atmosferik di Kalorimeter Api (*Pool Fire*)

Pengujian pembakaran bahan bakar dalam kondisi atmosferik di kalorimeter api dengan metode *pool fire* bertujuan untuk mendapatkan karakteristik pembakaran kondisi atmosferik utamanya adalah: laju pelepasan massa dan kalor yang berkaitan dengan sifat-sifat bahan bakar, seperti: volatilitas, kalor penguapan dan nilai kalor bahan bakar uji. Pada pembakaran kondisi atmosferik yang bersifat terbuka – pasokan udara pembakaran tidak terbatas - parameter yang divariasikan hanya kandungan etanol dalam premium/*gasoline*.

2.4.1 Laju Pelepasan Massa Dan Kalor Dengan Metode Konsumsi Oksigen

Laju pelepasan kalor suatu material/bahan bakar yang mampu bakar dapat ditentukan dengan berbagai metode antara lain: berdasarkan laju pelepasan massa, konsumsi oksigen, kehilangan kalor sensibel dengan analisa kesetimbangan energi dan produksi komposisi gas buang hasil pembakaran^[33]. Laju pelepasan kalor dengan konsumsi oksigen yang dikembangkan oleh Hugget^[32] berdasarkan Thornton's Rule^[34] dimana mengukur laju pelepasan kalor berbagai bahan organik berdasarkan prinsip konsumsi oksigen yang digunakan untuk mengoksidasi bahan bakar.

Laju pelepasan massa secara empiris dapat diukur dan dihitung dengan membandingkan massa awal dan akhir bahan bakar yang terbakar dalam kurun waktu tertentu selama proses pembakaran di Kalorimeter Api. Namun demikian Pello^[35], memberikan korelasi persamaan laju pembakaran/pelepasan massa dari pembakaran kolam ukuran medium (*moderate scale-pool fires*) sebagai berikut:

$$m'' = 0.15 \frac{\mu_{\infty}}{PR^2} \left[\frac{g(\rho_{\infty} - \rho_f)}{v_{\infty}^2 \rho_{\infty}} \right]^{1/3} B \left[\frac{\ln(1+B)}{B} \right]^{1/3} + \chi_R \dot{Q} / DL_v + \dot{q}'' / L_v - \dot{q}_{rs} / L_v \quad (5)$$

dimana:

D = diameter kolam

L_v = kalor penguapan

B = angka perpindahan massa

PR = angka Prandl

G = gaya gravitasi

μ_{∞} = viskositas gas kondisi ambient

ρ_{∞} = densitas gas kondisi ambient

ρ_f = densitas gas dalam api

χ_R = fraksi radiatif

\dot{Q} = laju pelepasan kalor

\dot{q}_e'' , \dot{q}_{rs}'' = fluks radiasi eksternal dan fluks reradiasi

Berbagai bahan bakar yang mempunyai beragam komposisi kimia akan melepaskan kalor rata-rata tetap yaitu sebesar 13,1 MJ/kg.O₂ yang dikonsumsi dengan tingkat akurasi $\pm 5\%$ ^[32,33,34,36,37]. Untuk menentukan laju pelepasan kalor dengan konsumsi oksigen, Hugget melakukan dua pengukuran secara simultan, yaitu (i) pengukuran

laju aliran volumetrik udara dan gas produk pembakaran, (ii) pengukuran konsentrasi oksigen pada saluran gas buang.

Untuk pembakaran sempurna, dimana gas produk pembakaran hanya terdiri dari uap air dan karbondioksida, maka besarnya laju pelepasan kalor dari material yang mampu bakar dalam basis laju aliran volume, adalah^[33,89]:

$$\dot{q}(t) = \Delta h_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot \left[\frac{M_{O_2}}{M_a} \right] (1 - x_{H_2O}^0) \cdot \phi \cdot x_{O_2}^0 \cdot \dot{V}_A \quad \dots\dots\dots(6)$$

dimana:

$\dot{q}(t)$ adalah laju pelepasan kalor (KW), $\Delta h_{c,ox}$ adalah kalor pembakaran netto sebesar 13,1 MJ/kg.O₂, ρ_{O_2} adalah densitas oksigen (kg/m³), M_{O_2} adalah berat molekul oksigen, M_a adalah berat molekul udara, $x_{H_2O}^0$ adalah fraksi mol H₂O di udara masuk, ϕ adalah faktor penipisan oksigen, $x_{O_2}^0$ adalah fraksi mol O₂ yang terukur pada udara masuk, dan \dot{V}_A adalah laju volume udara yang masuk ke dalam sistem pada kondisi standar (m³/s).

Dengan mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut: pengukuran udara dengan pelat orifis, faktor ekspansi oksigen sebesar 1,5 dan pembakaran berlangsung sempurna ($x_{CO} = 0$),

$$\left[\frac{M_{O_2}}{M_a} \right] = \frac{0,032}{0,02896} = 1,1 \quad \text{dan}$$

$$\phi = \frac{x_{O_2}^0 (1 - x_{CO_2}) - x_{O_2} (1 - x_{CO_2}^0)}{(1 - x_{O_2} - x_{CO_2}) \cdot x_{O_2}^0}, \text{ maka dengan memasukkan kondisi tersebut diatas}$$

ke persamaan (5), maka persamaan (5) akan menjadi^[39]:

$$\dot{q}(t) = \Delta h_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot 1,10 \cdot C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e} \left(\frac{x_{O_2}^0 - x_{O_2}}{1,105 - 1,5x_{O_2}} \right)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

Dimana: C adalah konstanta kalibrasi pelat orifis, X_{O_2} adalah fraksi mol O₂ yang terukur di saluran gas buang, ΔP adalah tekanan jatuh pada pelat orifis (Pa), dan T_e adalah temperatur absolut gas buang pada pelat orifis (K).

2.5 Karakteristik Pembakaran, Kinerja Dan Emisi Gas Buang Pada Motor Otto

2.5.1 Geometri Silinder Piston, Batang Penghubung Dan Poros Engkol

Gambar 2.8, menunjukkan geometri silinder piston, batang penghubung dan poros engkol dengan berbagai nomenklaturinya. Beberapa terminologi dan definisi

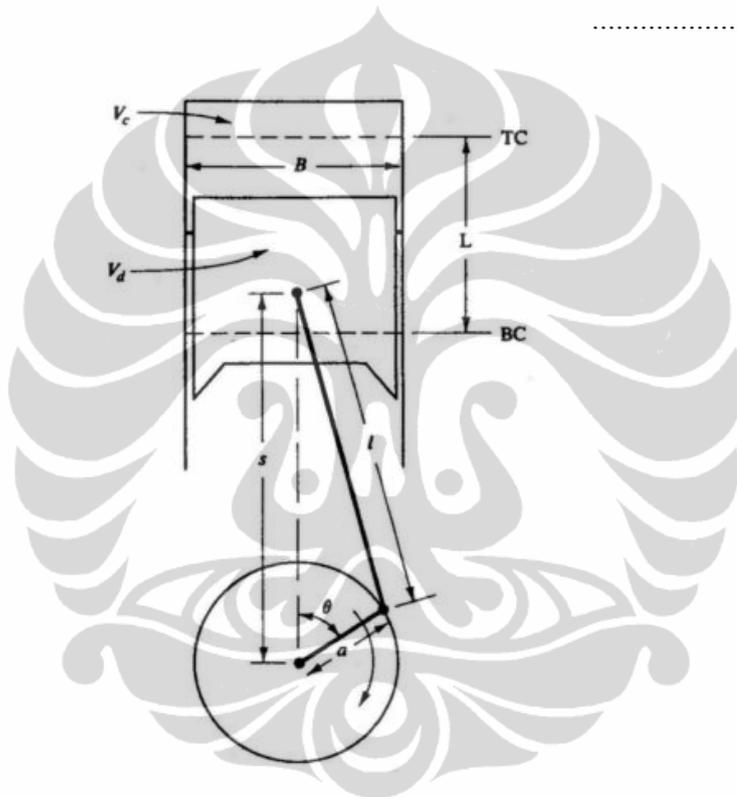
berkaitan dengan geometri silinder piston, batang penghubung dan poros engkol dapat dituliskan sebagai berikut:

Rasio kompresi dapat diekspresikan sebagai^[29]:

$$\gamma_c = \frac{\text{volume silinder maksimum}}{\text{volume silinder minimum}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \dots\dots\dots(8)$$

Rasio lubang/diameter silinder dan langkah piston:

$$R_{bs} = \frac{B}{L} \dots\dots\dots(9)$$



Gambar 2.8. Geometri silinder piston, batang penghubung dan poros engkol

Rasio batang penghubung dan radius engkol:

$$R = \frac{l}{a} \dots\dots\dots(10)$$

Hubungan antara langkah piston dan radius engkol dapat dituliskan:

$$L = 2a \dots\dots\dots(11)$$

Persamaan volume silinder pada sembarang posisi sudut engkol (θ) dapat dituliskan:

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4}(l+a-s) \dots\dots\dots(12)$$

Dimana s adalah jarak antara *crank axis* dan *piston pin axis* yang dapat dinyatakan sebagai:

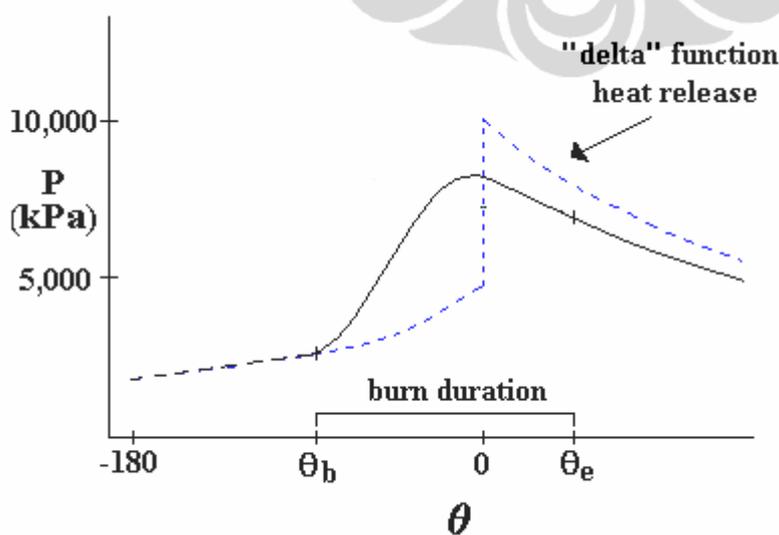
$$s = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \dots\dots\dots(13)$$

Dengan menuliskan sudut engkol (θ) seperti yang disajikan pada Gambar 2.7, maka pers. (12) dapat dituliskan kembali sebagai:

$$\frac{V}{V_c} = 1 + \frac{1}{2}(\gamma_c - 1) \left[R + 1 - \cos \theta - (R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right] \dots\dots\dots(14)$$

2.5.2. Pelepasan kalor Pada Pembakaran di Motor Otto

Pelepasan kalor di silinder ruang bakar motor Otto berlangsung sangat cepat dan dalam kondisi yang selalu berubah: volume, tekanan dan temperatur. Persamaan pelepasan kalor di ruang bakar motor Otto tetap menggunakan hukum Termodinamika I meskipun harus disesuaikan dengan kondisi alamiah pembakaran yang selalu berubah terhadap volume, tekanan dan temperatur. Gambar 2.9 memberikan gambaran evolusi tekanan di ruang bakar motor Otto yang selalu berubah terhadap posisi sudut engkol – yang berarti juga akan merubah volume ruang bakar.



Gambar 2.9. Tipikal Siklus perubahan tekanan silinder terhadap sudut engkol

Persamaan diferensial dari Hukum I Termodinamika untuk sudut engkol yang kecil ($d\theta$) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\partial Q - \partial W = dU \quad \dots\dots\dots(15)$$

Dengan $\partial W = PdV$ dan $dU = mc_v dT$, sehingga pers. (15) dapat dituliskan:

$$\partial Q - PdV = mc_v dT \quad \dots\dots\dots(16)$$

Persamaan gas ideal adalah sebagai berikut $PV = mRT$, sehingga:

$$mdT = \frac{1}{R}(PdV + VdP) \quad \dots\dots\dots(17)$$

Dan,

$$dU = \frac{c_v}{R}(PdV + VdP) \quad \dots\dots\dots(18)$$

Sehingga Hukum I Termodinamika menjadi:

$$\partial Q - PdV = \frac{c_v}{R}(PdV - VdP) \quad \dots\dots\dots(19)$$

Pelepasan kalor untuk sudut engkol tertentu, maka:

$$\frac{\partial Q}{d\theta} - \left(1 + \frac{c_v}{R}\right) P \frac{dV}{d\theta} = \frac{c_v}{R} V \frac{dP}{d\theta} \quad \dots\dots\dots(20)$$

Dengan $R = c_p - c_v$ dan $k = c_p/c_v$, dan dengan mendefinisikan $\frac{c_v}{R} = \frac{1}{k-1}$, maka persamaan Hukum I Termodinamika dapat ditulis sebagai:

$$\frac{\partial Q}{d\theta} = \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} \quad \dots\dots\dots(21)$$

atau

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{k-1}{V} \frac{\partial Q}{d\theta} - k \frac{P}{V} \frac{dV}{d\theta} \quad \dots\dots\dots(22)$$

2.5.3. Karakteristik Pembakaran di Motor Otto

Proses pembakaran di dalam silinder ruang bakar motor Otto merupakan proses yang rumit dengan dipengaruhi oleh banyak parameter desain dan operasional.

Karakteristik pembakaran dapat meliputi: *ignition delay*, *combustion duration*, laju dan total pelepasan massa dan kalor, besar dan posisi tekanan maksimum serta variasi siklus

Dua parameter yang sering digunakan untuk mendiskripsikan fenomena pembakaran di dalam motor Otto adalah: (1) waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) yang dinyatakan dalam waktu (atau sudut engkol/*crank angle*) antara penyalaan busi dan awal pembakaran dan (2) lama pembakaran (*combustion duration*) yang dinyatakan dalam waktu (atau sudut engkol/*crank angle*) antara waktu penyalaan busi dan akhir pembakaran^[29].

Pembakaran dimulai sesegera mungkin setelah percikan api busi, tetapi tahap awal pembakaran berlangsung cukup lambat - waktu tunda penyalaan (*ignition delay*) digunakan untuk mendiskripsikan tahap awal ini. Demikian juga halnya dengan akhir pembakaran (*combustion end*) sulit secara akurat dapat ditentukan karena fenomena pembakaran terlambat (*late burning*)^[41]. Dengan alasan tersebut, maka *ignition delay* dan *combustion end* biasanya didefinisikan secara sembarang (*arbitrarily*); contohnya *ignition delay* dipertimbangkan sebagai waktu dimana rasio bahan bakar yang telah terbakar mencapai 5% atau 10% dan *combustion end* dinyatakan sebagai waktu dimana rasio bahan bakar yang telah terbakar mencapai 85% atau 90%^[29,41].

Dua teknik utama yang selama ini eksis untuk melakukan diagnostik pembakaran atau menentukan tahapan proses pembakaran di motor Otto adalah:

1. pengukuran posisi/perkembangan api dengan menggunakan metode optik pada motor dengan komponen yang transparan, dan
2. pengukuran data tekanan silinder

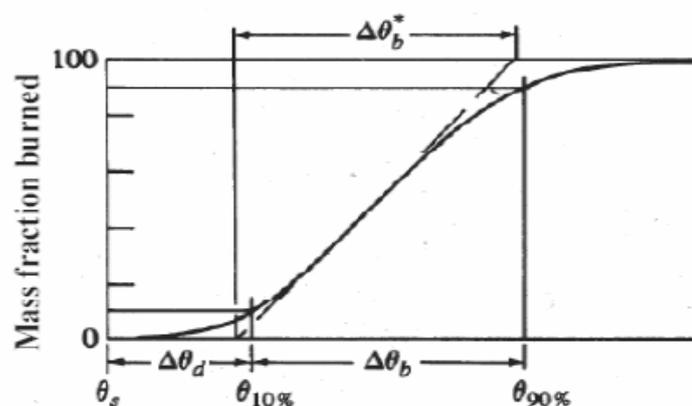
Metode dan teknik yang pertama membutuhkan instrumentasi yang spesifik, dan tidak banyak yang mempunyai perangkat tersebut sehingga jarang peneliti menggunakan pendekatan tersebut, sebaliknya yang kedua banyak digunakan oleh peneliti di bidang motor bakar.

Diagnostik dan pendiskripsian fenomena pembakaran di ruang bakar motor Otto yang menggunakan pengukuran data tekanan silinder dapat diperoleh dengan

memasang *piezo-electric sensor* ke dalam ruang bakar. Dari sensor tersebut akan didapatkan tekanan aktual silinder dan volume silinder yang merupakan parameter utama untuk dapat menentukan tekanan rata-rata indikatif (*Indicated Mean Effective Pressure* – IMEP), menghitung torsi, efisiensi indikatif dan juga untuk menghitung parameter penting dari pembakaran seperti: laju pembakaran, temperatur global silinder (*bulk temperature*), *ignition delay*, durasi pembakaran dan laju pelepasan kalor. Bahkan dari pengambilan data tekanan silinder tersebut dapat diproses lebih lanjut untuk dapat mendeteksi tingkat stabilitas pembakaran di ruang bakar.

Definisi umum dan banyak dipakai oleh peneliti untuk mengkarakterisasi pelepasan energi pada pembakaran di ruang bakar motor Otto adalah^[29]:

- Sudut pengembangan api $[\Delta\theta_d]$ adalah interval *crank angle* antara busi memercikkan api dan sebagian kecil massa bahan bakar terbakar untuk melepaskan energinya secara signifikan (Gambar 2.10). Biasanya digunakan sejumlah fraksi massa bahan bakar sebesar 10%, meskipun beberapa peneliti ada yang menggunakan 5%.
- Sudut pembakaran cepat $[\Delta\theta_b^*]$ adalah interval *crank angle* yang diperlukan untuk membakar hampir seluruh bahan bakar (Gambar 2.10). Biasanya didefinisikan interval antara tahap akhir dari pengembangan api (fraksi massa = 10%) dan akhir dari proses propagasi api (fraksi massa = 90%).
- Sudut Pembakaran Menyeluruh $[\Delta\theta_o]$, durasi seluruh proses pembakaran – merupakan penjumlahan dari $\Delta\theta_d$ dan $\Delta\theta_b$ (Gambar 2.10).



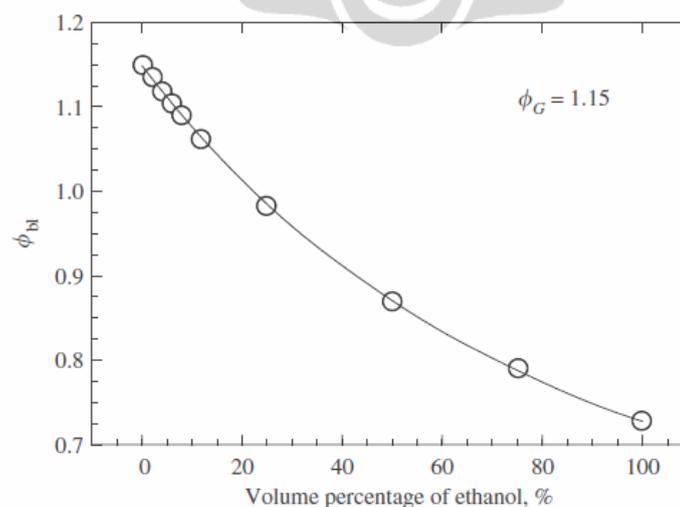
Gambar 2.10. Tahapan proses pembakaran di motor Otto

Bayraktar^[8], melakukan kajian teoritis karakteristik pembakaran untuk penambahan etanol pada *gasoline* terhadap perubahan parameter pembakaran di dalam ruang bakar motor Otto, dengan data-data utama yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Ruang bakar motor Otto berbentuk *disc*
2. Diameter silinder 86,4 mm, panjang langkah 67,4 mm, jarak antara busi dengan pusat ruang bakar 14,44mm
3. Rasio kompresi 9,2
4. Putaran motor konstan sebesar 5800 rpm
5. *Ignition timing* konstan sebesar 28 BTDC
6. *Equivalent ratio gasoline*-udara sebesar 1,15

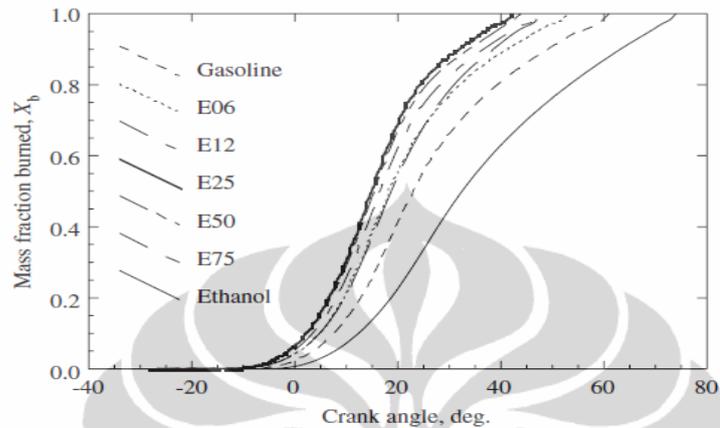
Beberapa hasil kajian yang telah dilakukan oleh Bayraktar dapat disajikan sebagai berikut.

Gambar 2.11 memperlihatkan perubahan rasio ekuivalen bahan bakar-udara, dimana *gasoline* digunakan sebagai bahan bakar referensi yaitu sebesar 1,15 – kondisi kaya. Nilai ini merupakan campuran kaya dari *gasoline*-udara. Dengan menjaga pasokan udara yang tetap, maka penambahan etanol akan membuat campuran menjadi miskin (*lean*). Penurunan nilai rasio ekuivalensi bahan bakar-udara pada penambahan etanol terlihat jelas pada gambar 2.11 – dimana semakin besar konsentrasi etanol pada premium akan semakin miskin campuran. Campuran stokiometri terjadi pada penambahan etanol sekitar 25% basis volume.



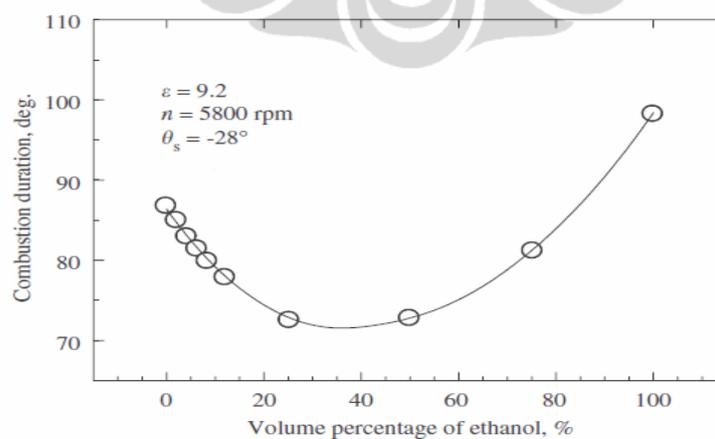
Gambar 2.11. Rasio ekuivalen bahan bakar/*gasoline*-udara sebagai fungsi dari prosentase etanol

Gambar 2.12 memperlihatkan proses pembakaran fraksi massa terhadap penambahan etanol pada *gasoline*. Kecepatan pelepasan fraksi massa bahan bakar yang terbakar terendah terjadi pada etanol murni sedangkan tertinggi terjadi pada campuran etanol 25% dan *gasoline* 75% basis volume.



Gambar 2.12. Pengaruh penambahan etanol terhadap fraksi massa bahan bakar yang terbakar

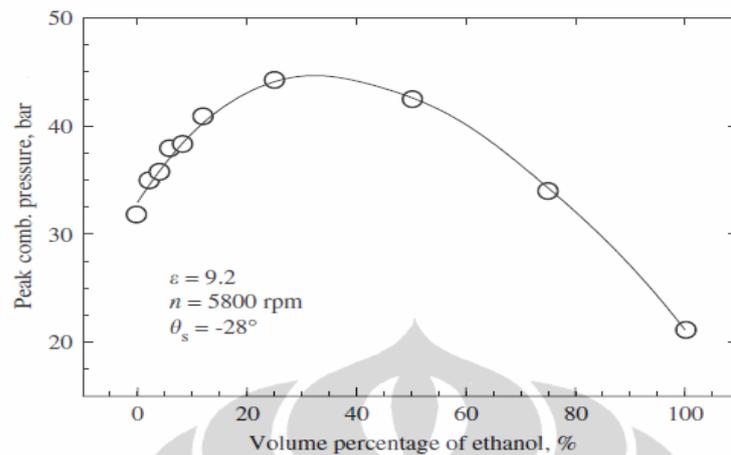
Peningkatan penambahan etanol akan semakin memperbesar fraksi pelepasan massa bahan bakar sampai dengan 25% (v/v) etanol, untuk kemudian ada kecenderungan menurun. Dengan semakin cepat pelepasan massa bahan bakar maka berarti durasi pembakaran akan semakin pendek. Semakin cepat pelepasan massa bahan bakar dan semakin pendeknya durasi pembakaran dapat dikorelasikan terhadap pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Durasi pembakaran terhadap prosentase etanol

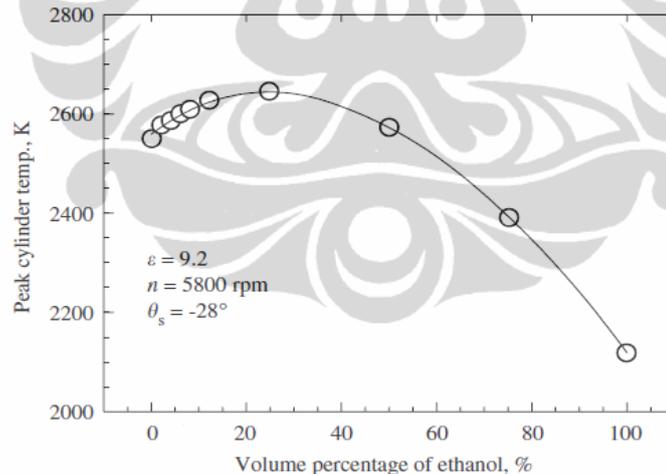
Bayraktar mendapatkan hasil bahwa tekanan maksimum di dalam silinder ruang bakar terjadi pada penambahan 25% volume etanol (Gambar 2.14)

demikian juga hanya dengan temperatur maksimum yang terjadi di dalam silinder ruang bakar motor Otto (Gambar 2.15).



Gambar 2.14. Dampak penambahan etanol terhadap tekanan maksimum pembakaran

Dalam kajiannya, penambahan etanol sebesar 25% volume, memberikan hasil terbaik, dengan campuran mendekati stokiometri, pelepasan fraksi massa terbesar, durasi pembakaran terendah serta tekanan dan temperatur maksimum.



Gambar 1.15. Temperatur maksimum pembakaran sebagai fungsi volume etanol

2.5.4. Variasi Siklus Dan Stabilitas Operasional Motor Otto

Tekanan yang terjadi didalam silinder selalu berubah karena: (1) terjadi pelepasan energi akibat proses pembakaran, dan (2) proses kompresi dan/atau ekspansi dari gerakan piston pada *cylinder liner*. Gabungan dari tekanan-tekanan yang diukur dengan *piezo quartz pressure transducer* selama dua putaran poros engkol akan

membuat satu siklus sempurna dari motor Otto. Siklus yang dihasilkan pada proses pembakaran di motor Otto tidak selalu sama atau bervariasi dari satu siklus ke siklus berikutnya. Hal ini bisa terjadi karena^[8,29]:

- a. *Ignition timing* biasanya ditentukan berdasarkan rata-rata siklus, lebih cepat dari rata-rata siklus maka perlu *over-advanced*, sedangkan lebih lambat dari rata-rata siklus perlu *retarding* dengan konsekuensi kehilangan daya.
- b. Terjadinya variasi gerakan dari campuran (bahan bakar-udara) pada saat percikan api siklus per siklus.
- c. Bervariasinya rasio campuran bahan bakar-udara siklus per siklus
- d. Bervariasi campuran antara *fresh charge* dan *residual gas* utamanya yang berada diantara celah busi siklus per siklus.

Variasi siklus yang berlebihan akan sangat mengganggu pengoperasian motor Otto secara halus dan handal. Salah satu cara untuk mendapatkan variasi siklus yang didapat dari pengukuran tekanan di silinder ruang bakar adalah dengan menghitung koefisien variasi dari tekanan rata-rata indikatif (COV_{IMEP}), yang biasa dinyatakan dengan:

$$COV_{imep} = \frac{\sigma_{imep}}{imep} \times 100 \dots\dots\dots(23)$$

Koefisien variasi merupakan rasio antara deviasi IMEP terhadap rata-rata IMEP. Berdasarkan rekomendasi dari banyak peneliti, nilai COV_{imep} yang melebihi 10% sudah masuk kategori mengganggu pengoperasian motor Otto^[29].

2.5.5. Kinerja Dan Emisi Gas Buang Motor Otto

Penelitian di bidang motor Otto terus berkembang seiring dengan perkembangan teknologi. Penelitian-penelitian yang dilakukan pada dasarnya mengarah pada peningkatan kinerja motor Otto yang dapat berupa: (1) kinerja yang makin meningkat (daya dan torsi meningkat serta konsumsi bahan bakar yang rendah), (2) emisi gas buang yang serendah mungkin. Dalam mencapai tujuan tersebut, banyak peneliti mengambil strategi dari berbagai aspek, antara lain: (1) pengembangan desain dan teknologi motor, (2) memperbaiki operasional motor dengan mengembangkan teknologi kontrol (ECU), dan (3) penggunaan jenis bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dan dari sumber yang dapat diperbaharui.

Tabel 2.9, memberikan ringkasan beberapa peneliti yang melakukan riset motor Otto untuk mendapatkan kinerja terbaik berbahan bakar campuran *gasoline*-etanol dengan berbagai macam: (1) teknologi dan spesifikasi motor, (2) variasi parameter operasional motor dan (3) variasi konsentrasi etanol dalam *gasoline*.

Tabel 2.9. Ringkasan Penelitian Kinerja Motor Otto Berbahan Bakar: *gasoline*, etanol dan Campurannya.



Keterangan: N/A: data tak tersedia, n: putaran, CR: compression ratio, T.V.O: Throttle valve opening, IT: Ignition timing, MBT: Minimum Advanced for the Best Torque, λ : rasio udara-bahan bakar, WOT: Widely Opening Throttle, MPI: Multi-Port Injection, EFI: Electronic Fuel Injection, CFR Engine: Coordinating Fuel Research Engine, SOHC: Single Overhead Camshaft, DOHC: Double Overhead Camshaft.

Sedangkan Tabel 2.10, memberikan ringkasan beberapa peneliti yang melakukan riset motor Otto untuk mendapatkan emisi gas buang (*regulated emission*) berbahan bakar campuran *gasoline*-etanol dengan berbagai macam: (1) teknologi dan spesifikasi motor, (2) variasi parameter operasional motor dan (3) variasi konsentrasi etanol dalam *gasoline*.

Tabel 2.10. Ringkasan Penelitian Emisi Gas Buang Motor Otto Berbahan Bakar: *gasoline*, etanol dan Campurannya.

No.	Peneliti	Kondisi & Parameter uji	Jenis & Spec. motor uji	Etanol (% vol.)	Regulated Emission		
					CO	HC	NOx
1	Yuksel	n	CR: 8,1, 4-cyl, 4-stroke, Carb.	E30-E60	-80	-50	
2	Kelly	FTP emission Test	CR: 8,8, MPI, V-6	E85	-18	-21	-28
3	Guerieri	N/A	N/A	E40	-50	-30	
4	Bang-Quan He	n	CR: 8,2, MPI, EFI	E10 / E30	- 5,2 / - 4,45	- 9,8 / - 23,1	N.S.
5	Al-Hasan	n	CR: 9,2, Carb., 4 cyl, 4-stroke	E2,5 - E25	-46,5	-24,3	
6	Ceviz	λ	CR: 9,2, Carb.	E5 - E20	-30	-20,2	
7	Wu Chan-Wei	n, T.V.O.	CR: 9,5, MPI	E5 - E30	- 10 - (-90)	- 20 - (-80)	
8	Jia Le-Wei	European Drive Cycl	CR: 9:1, Carb.	E10	-8,4	-14,2	-8,6
9	Topgul	CR, IT, WOT	1 cyl, 4-stroke, Inj, SOCH	E10-E60	+ 5,2	-6,4	
10	Chan-wei Wu	λ , T.V.O., n	4 cyl, MPI, DOCH	E5-E30	- 2,5	- 7	
11	Setiyawan	n, ϕ mainjet, CR, IT, WOT	1-cyl, 4-stroke, Carb.	E-85	-23	-16	
12	Bresenham	over head & side valve	4-stroke	E0-E50	↓	±	±
13	Farayedi	-	4-stroke	E10, 15, 20	↓	↑ / ↓	↓ / ↑
14	Hsieh, et al.	T.V.O, n	CR: 9.5, MPI, Closed loop	E0, 5, 10, 20, 30	-(10 - 90%)	-(20 - 85%)	operasional
15	Linguang	$\phi_{nozzler}$, t_{inject} , I.T, λ , Full load	EFI, 1 cyl, 4-stroke	E100	- 38%	- 46%	slightly ↑
16	Ceviz, et.al.	COV (IMEP)	CR:9.2, 4-stroke, carburator	E0, 5, 10, 15, 20	E10 ↓	E10 ↓	

Keterangan: N/A: data tak tersedia, n: putaran, CR: compression ratio, T.V.O: Throttle valve opening, IT: Ignition timing, λ : rasio udara-bahan bakar, WOT: Widely Opening Throttle, MPI: Multi-Port Injection, EFI: Electronic Fuel Injection, CFR Engine: Coordinating Fuel Research Engine, SOHC: Single Overhead Camshaft, DOHC: Double Overhead Camshaft.

BAB 3

MATERIAL, PERALATAN DAN METODE

Bab berikut menjelaskan material, peralatan dan metode yang akan digunakan dalam penelitian. Berhubung pengujian dan penelitian meliputi tiga bagian utama maka penjelasan akan dilakukan secara berurutan sesuai dengan tahapan pengujian dan penelitian.

3.1 Material

3.1.1. Premium (*Unleaded Regular Indonesia Gasoline*)

Gasoline yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *Unleaded Regular Indonesia Gasoline* atau disebut dengan premium dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh Dirjen MIGAS No:3674/K/24/2006 (Lampiran I). Premium dibeli di Stasiun Pengisian Bahan Bakar Umum (SPBU) Pertamina yang berlabel “Pasti Pas”. Premium yang didapatkan dari SPBU yang sudah terakreditasi “Pasti Pas” sehingga diharapkan kualitas premium yang digunakan sebagai penelitian adalah dalam kondisi baik dan standar sesuai dengan spesifikasinya

3.1.2. Etanol Kering

Etanol yang digunakan untuk penelitian adalah etanol kering/ *anhydrous ethanol* yang diperoleh langsung dari salah satu produsen etanol di Jawa Timur dan belum mengalami proses “denaturasi”. Denaturasi adalah proses penambahan sejumlah kecil hydrocarbon ke dalam *anhydrous ethanol* dan kemudian dinamakan “*Fuel grade Ethanol*”^[30]. Spesifikasi *anhydrous ethanol* yang dicampurkan ke dalam premium tersaji pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi etanol kering

3.2 Peralatan Pengujian Dan Penelitian

3.2.1 Peralatan Pengujian Sifat-Sifat Bahan Bakar

Peralatan yang digunakan untuk menguji sifat-sifat premium, etanol dan campurannya adalah sesuai dengan standar ASTM/API yang dimiliki oleh Laboratorium Unit Produksi Pelumas Jakarta dan Surabaya.

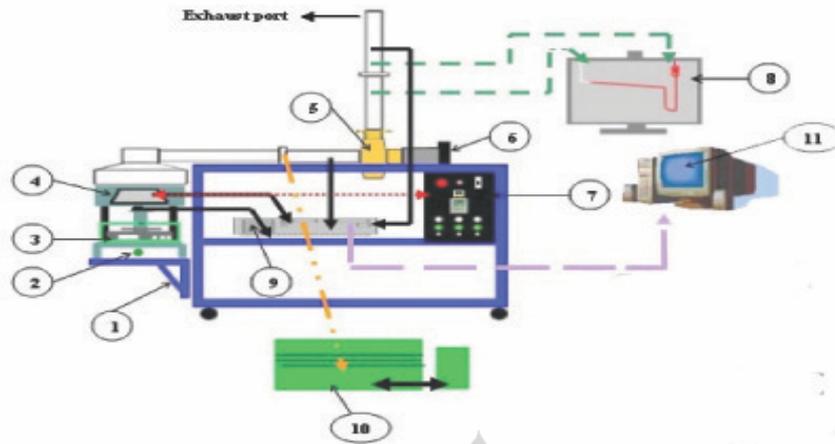
Salah satu peralatan uji sifat-sifat bahan bakar, yaitu mesin CFR (Coordinating Fuel Research) yang digunakan untuk menguji nilai oktan riset (*Research Octane Number-RON*) adalah seperti terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Mesin CFR milik UPPJ (Unit Produksi Pelumas Jakarta), PT Pertamina

3.2.2 Peralatan Kalori Meter Api (*Pool Fire*)

Peralatan yang digunakan untuk uji pelepasan kalor dan massa bahan bakar premium, etanol dan campurannya adalah kalorimeter api yang dikembangkan oleh Nugroho^[39]. Skematik dan komponen dari kalorimeter api dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Keterangan Gambar:

- | | |
|--|-----------------------|
| 1. Dudukan Sistem Heater (<i>adjustable</i>) | 7. Panel Kontrol |
| 2. Kenop pengatur ketinggian heater | 8. Manometer Miring |
| 3. Timbangan Digital | 9. Data Acquisition |
| 4. Conical Heater | 10. Gas Analyzer |
| 5. Blower | 11. Personal Computer |
| 6. Fan pendingin motor blower | |

Gambar 3.2. Skematik Peralatan Kalorimeter Api milik Lab. Pembakaran DTM-UI

3.2.3 Motor Uji, Bangku Uji & Instrumentasi

3.2.3.1 Motor Uji Dan Modifikasi

Motor uji yang digunakan dalam penelitian karakterisasi pembakaran campuran premium-etanol kondisi bertekanan di ruang bakar motor Otto adalah motor Honda Supra X-125 PGMFI – bersilinder tunggal sistem injeksi dengan berbagai modifikasi supaya dapat beroperasi sesuai dengan parameter yang divariasikan. Spesifikasi teknis detail dari Honda Supra 125 PGMFI tersaji pada Tabel 2.3.

Tabel 3.2. Spesifikasi motor Honda Supra 125 X PGMFI

ENGINE	Bore and stroke Displacement Compression ratio Valve train Intake valve Exhaust valve Lubrication system Oil pump type Cooling system Air filtration Crankshaft type Cylinder arrangement	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>opens ———</p> <p>closes ———</p> <p>opens ———</p> <p>closes ———</p> </div> <div style="margin-right: 10px;"> <p>at 1 mm (0.04 in) lift</p> </div> </div> <p>52.4 x 57.9 mm (2.06 x 2.28 in) 124.8 cm³ (7.61 cu-in) 9.3 : 1 2 valve, single chain driven SOHC 5° BTDC 22° ABDC 37° BBDC -3° ATDC Forced pressure and wet sump Trochoid Air cooled Paper filter Assembled type Single cylinder inclined 80° from vertical</p>
--------	--	--

FUEL SYSTEM (Programmed Fuel Injection)		
ITEM		SPECIFICATION
Throttle body identification number		GQR0A
Idle speed		1,400 ± 100 min ⁻¹ (rpm)
Throttle grip free play		2 – 6 mm (0.1 – 0.2 in)
EOT (Engine Oil Temperature) sensor resistance	20°C/68°F	2.5 – 2.8 kΩ
	100°C/212°F	0.21 – 0.22 kΩ
Fuel injector resistance (at 20°C/68°F)		10.3 – 11.3 Ω
Fuel pressure		294 kPa (3.0 kgf/cm ² , 43 psi)
Fuel pump flow (at 12V)		13.9 cm ³ (0.47 US oz, 0.49 Imp oz) minimum/10 seconds

IGNITION SYSTEM		SPECIFICATIONS		Unit: mm (in)
ITEM				
Spark plug		NGK	DENSO	
	Standard	CPR6EA-9	U20EPR9	
	Optional	CPR7EA-9	U22EPR9	
Spark plug gap		0.80 – 0.90 mm (0.031 – 0.035 in)		
Ignition coil peak voltage		100 V minimum		
Ignition pulse generator peak voltage		0.7 V minimum		
Ignition timing		10° BTDC at idle		

CYLINDER HEAD/VALVES			STANDARD		SERVICE LIMIT	Unit: mm (in)
ITEM						
Cylinder compression			1,275 kPa (13.0 kgf/cm ² , 185 psi) at 600 min ⁻¹ (rpm)		—	
Cylinder head warpage			—		0.05 (0.002)	
Valve, valve guide	Valve clearance	IN	0.05 ± 0.02 (0.002 ± 0.001)		—	
		EX	0.05 ± 0.02 (0.002 ± 0.001)		—	
	Valve stem O.D.	IN	4.975 – 4.990 (0.1959 – 0.1965)		4.965 (0.195)	
		EX	4.955 – 4.970 (0.1951 – 0.1957)		4.945 (0.195)	
	Valve guide I.D.	IN	5.000 – 5.012 (0.1969 – 0.1973)		5.03 (0.198)	
		EX	5.000 – 5.012 (0.1969 – 0.1973)		5.03 (0.198)	
	Stem-to-guide clearance	IN	0.010 – 0.037 (0.0004 – 0.0015)		0.065 (0.0026)	
		EX	0.030 – 0.057 (0.0012 – 0.0022)		0.085 (0.0033)	
Valve seat width		IN/EX	1.0 (0.04)		1.6 (0.06)	
Valve spring free length			IN/EX	37.62 (1.481)		35.8 (1.41)
Rocker arm/shaft	Rocker arm I.D.	IN/EX	10.000 – 10.015 (0.3937 – 0.3943)		10.10 (0.398)	
	Rocker arm shaft O.D.	IN/EX	9.972 – 9.987 (0.3926 – 0.3932)		9.92 (0.391)	
Camshaft	Cam lobe height	IN	32.278 – 32.518 (1.2708 – 1.2802)		31.94 (1.257)	
		EX	32.121 – 32.361 (1.2646 – 1.2741)		31.79 (1.252)	

CYLINDER/PISTON		STANDARD		SERVICE LIMIT	Unit: mm (in)	
ITEM						
Cylinder	I.D.	52.405 – 52.415 (2.0632 – 2.0636)		52.445 (2.0648)		
	Out of round	—		0.10 (0.004)		
	Taper	—		0.10 (0.004)		
	Warpage	—		0.05 (0.002)		
Piston, piston rings	Piston mark direction		"IN" mark facing toward the intake side		—	
	Piston O.D.		52.362 – 52.400 (2.0615 – 2.0630)		52.292 (2.0587)	
	Piston O.D. measurement point		10 mm (0.4 in) from bottom of skirt		—	
	Piston pin bore I.D.		13.002 – 13.008 (0.5119 – 0.5121)		13.03 (0.513)	
	Piston pin O.D.		12.994 – 13.000 (0.5116 – 0.5118)		12.98 (0.511)	
	Piston-to-piston pin clearance		0.002 – 0.014 (0.0001 – 0.0006)		0.075 (0.0030)	
	Piston ring-to-ring groove clearance	Top	0.030 – 0.065 (0.0012 – 0.0026)		0.10 (0.004)	
		Second	0.015 – 0.050 (0.0006 – 0.0020)		0.09 (0.004)	
	Piston ring end gap	Top	0.10 – 0.30 (0.004 – 0.012)		0.5 (0.02)	
		Second	0.10 – 0.30 (0.004 – 0.012)		0.5 (0.02)	
Oil (side rail)		0.20 – 0.70 (0.008 – 0.028)		1.1 (0.04)		
Cylinder-to-piston clearance		0.005 – 0.053 (0.0002 – 0.0021)		0.159 (0.0063)		
Connecting rod small end I.D.		13.016 – 13.034 (0.5124 – 0.5131)		13.05 (0.514)		
Connecting rod-to-piston pin clearance		0.016 – 0.040 (0.0006 – 0.0016)		0.07 (0.003)		

Sedangkan motor uji Honda Supra 125 PGMFI yang digunakan untuk meneliti karakteristik pembakaran, kinerja dan emisi gas buang dengan bahan bakar: premium, etanol dan campurannya dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Motor uji – Honda Supra 125 PGMFI

ECU yang terpasang pada Honda Supra 125 PGMFI tidak bisa di program ulang untuk dapat mengakomodasikan perubahan parameter yang diinginkan dalam penelitian. Sehingga perlu dilakukan penggantian ECU dengan *Engine Management System* (EMS) merk Haltec Platinum Sprint 500 untuk dapat diprogram dan dapat mengendalikan parameter operasional motor. Gambar ECU dan EMS merk Haltec Platinum Sprint 500 dapat dilihat pada Gambar 3.4.



(a)



(b)

Gambar 3.4. (a) ECU dan (b) Haltec Platinum Sprint 500

Selain mengganti ECU dengan EMS merk Haltec, modifikasi perlu dilakukan pada kepala silinder, dimana diameter ulir untuk busi (*spark plug*) diperbesar dari 10 mm menjadi 12 mm untuk dapat menampung diameter *piezo quartz pressure transducer*, seperti tampak pada Gambar 3.5.



(a) penempatan piezo quartz pressure transducer di kepala silinder dan (b) posisi katup dan piezo quartz pressure transducer.

3.2.3.2 Bangku Uji Dan Instrumentasi

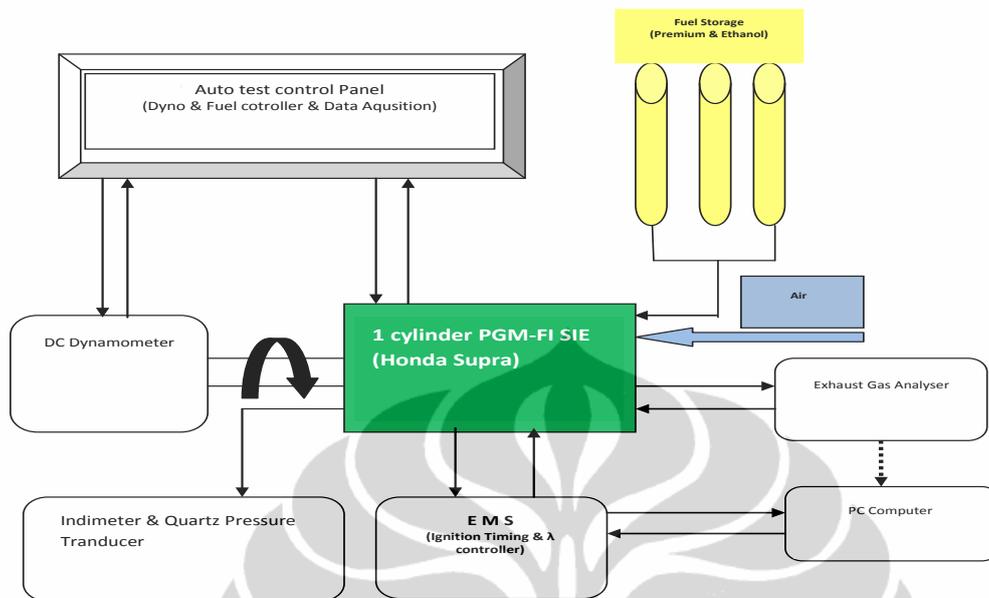
Skematik sistem peralatan, instrumentasi dan motor uji tersaji pada Gambar 3.6 sedangkan gambarnya tersaji pada Gambar 3.7 di bawah ini.

Motor uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah motor Honda Supra 125 PGM-FI, empat langkah, satu silinder, sistem injeksi bahan bakar *multi-point* dan telah dimodifikasi dengan spesifikasi lengkap tersaji pada Tabel 3.2.

Engine Control Unit (ECU) yang terpasang pada motor aslinya diganti dengan *Engine Management System (EMS)* tipe Haltec Platinum Sprint 500, sehingga motor uji dapat diatur waktu pengapian dan tekanan dan jumlah pasokan bahan bakar (lama injeksi).

Motor uji dikopel dengan sebuah dynamometer DC (tipe Bull – 30 kW), yang dikendalikan dengan elektronik terprogram (*software auto test*) dari ruang kendali. Sedangkan konsentrasi emisi gas buang (CO_2 , CO, HC, O_2 and NO_x) dan rasio udara-bahan bakar (λ) diukur dengan "EGA 2000 Gas Analyser" – Gambar 3,7b. Silinder motor uji dipasang *piezo quartz pressure transducer* dan terhubung dengan indimeter dan PC komputer untuk merekam data tekanan gas di dalam silinder

sebagai fungsi *crank angle*. *Quartz pressure transducer* dan indimeter dapat dilihat pada Gambar 3.7.b.



Gambar 3.6. Skematik sistem peralatan uji dan motor uji – Honda Supra 125 PGM-FI



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.7. Gambar peralatan uji dan motor uji – Honda Supra PGM-FI
(a) Motor & peralatan uji, (b) indimeter untuk menangkap sinyal piezoquartz pressure transducer dan (c) Auto test control panel.

3.3 Metode Pengujian Dan Penelitian

3.3.1 Metode Dan Proses Pencampuran Premium-Etanol Kering

Pencampuran dua bahan bakar yang berbeda properties, seperti premium dan etanol kering secara signifikan bisa menimbulkan ketidak-stabilan campuran atau separasi karena etanol mengandung air dalam jumlah tertentu. Jumlah air yang dapat diserap dalam campuran premium-etanol tanpa terjadi separasi bervariasi antara 0,3 – 0,5% basis volume, tergantung pada temperatur, kandungan aromatik premium dan prosentase etanol dalam campuran^[31].

Semakin tinggi temperatur dan prosentase etanol dalam campuran, semakin tinggi kemampuan campuran premium-etanol dapat mengikat air tanpa mengalami separasi^[54]. Untuk menghindari proses absorpsi air oleh etanol (zat higroskopis) dan penguapan fraksi ringan dari premium (mudah menguap/volatile), maka pencampuran dilakukan pada temperatur kurang dari 5°C. Pencampuran dilakukan dengan pengocokan secara manual di dalam botol untuk volume sebanyak 10 liter.

Campuran premium-etanol stabil dan tidak mengalami separasi, karena menggunakan etanol kering dengan kandungan air maksimum 0,3% basis volume (Tabel 3.1). Campuran 90% premium dan 10% etanol (E-10) kemampuan mengikat air tanpa separasi pada temperatur 30°C sebesar sekitar 0,4% - plotting pada Grafik

Gulder^[54]. Pada campuran dengan prosentase etanol yang lebih besar kemampuan menyerap air tanpa separasi juga bertambah.

3.3.2 Metode Pengujian Sifat-sifat Bahan Bakar

Pengujian sifat-sifat bahan bakar premium, etanol dan campuran etanol-premium dilaksanakan di laboratorium Unit Produksi Pelumas Surabaya (UPPS) dan Unit Produksi Pelumas Jakarta (UPPJ) - PT Pertamina (Persero) dengan peralatan dan metode sesuai dengan standar ASTM. Pengujian volatilitas dilakukan dengan *Reid Vapor Pressure* (ASTM D-5191), kurva distilasi (ASTM D-86), densitas dengan ASTM D-323 dan angka oktana dengan ASTM D699-86. Pada setiap pengujian mengikuti prosedur yang telah ditetapkan oleh ASTM. Sedangkan untuk pengujian nilai kalor dilakukan di Lab. Kimia FTI - ITS dengan Parr – Bomb Calorimeter.

3.3.3 Metode Pengujian Karakteristik Pembakaran di Kalori Meter Api

Semua peralatan ukur terlebih dahulu dilakukan kalibrasi, utamanya adalah gas analyser dimana pengukuran udara atmosfer yang ditunjukkan pada display berharga 20.95%^[45]. Mengingat premium dan etanol merupakan bahan bakar yang reaktif dan mempunyai nilai kalor tinggi, maka dilakukan pengujian jumlah sample – untuk mendapatkan waktu pembakaran dan panas yang dilepaskan sesuai. Setelah peralatan diaktifkan dan semua peralatan ukur dalam kondisi stabil, tuangkan 10 gram bahan bakar uji – jumlah sample yang sesuai – ke dalam cawan uji dan diletakkan diatas *electronic micro balance* kemudian secepatnya dekatkan api yang dipantikkan dari *igniter* diatas cawan uji sehingga terjadi pembakaran. Catat data berat bahan bakar uji dan tekanan jatuh di pelat orifis setiap interval 10 detik, sedangkan data lain seperti temperatur gas buang, komposisi dan konsentrasi gas buang langsung terekam di data akuisisi yang terkoneksi dengan PC.

3.3.4 Metode Pengujian Dan Penelitian Karakteristik Pembakaran di Motor Otto

Untuk mendapatkan data-data karakteristik pembakaran bertekanan di dalam motor Otto dilakukan tahapan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Setting motor uji dan *Engine Management System* (EMS)
 - Dilakukan modifikasi terhadap lubang busi pada motor Honda Supra 125 PGM-FI dari diameter 10 mm menjadi 12 mm. Perbesaran diameter

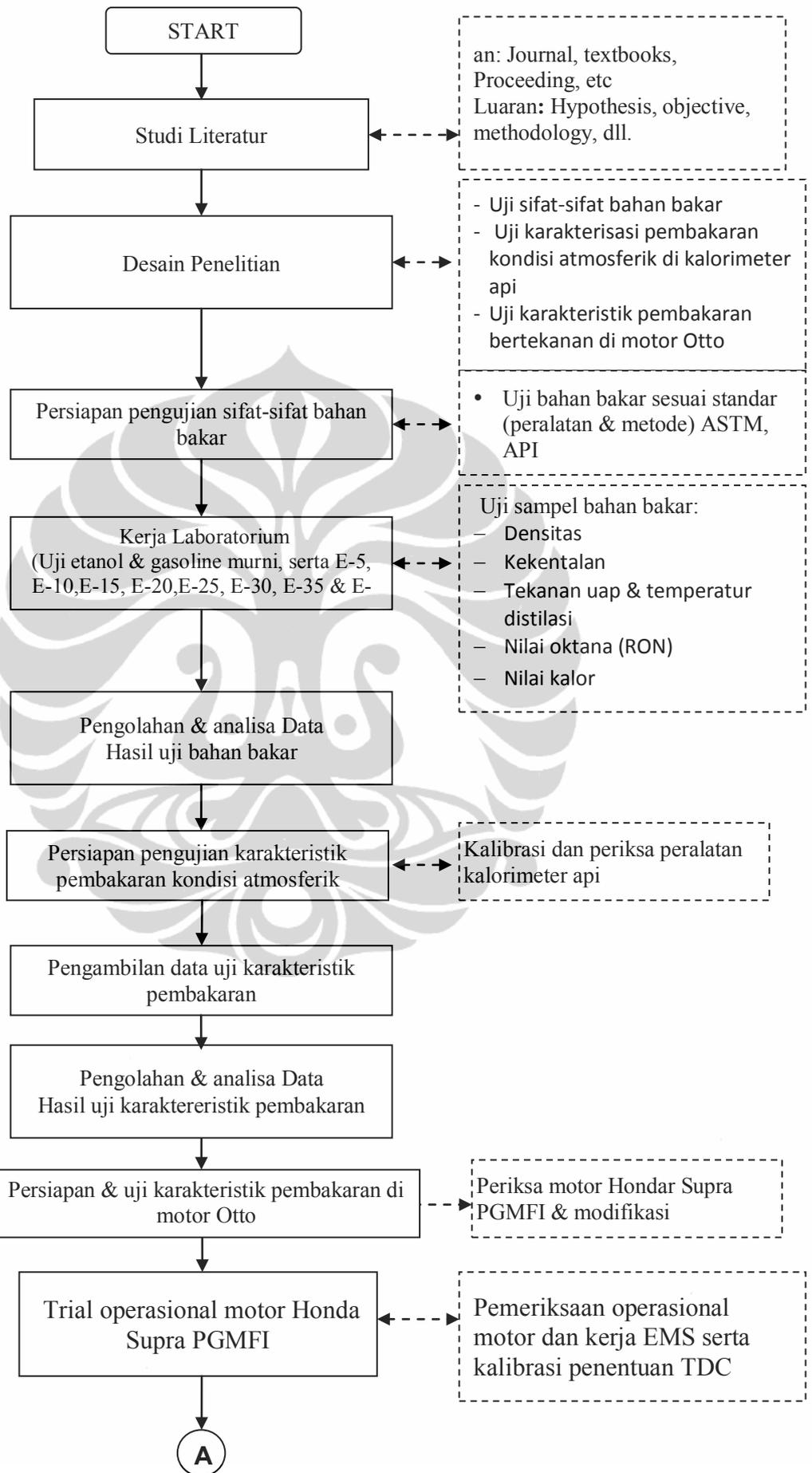
lubang busi disesuaikan sesuai dengan diameter *piezo quartz pressure transducer* yang terpasang pada busi.

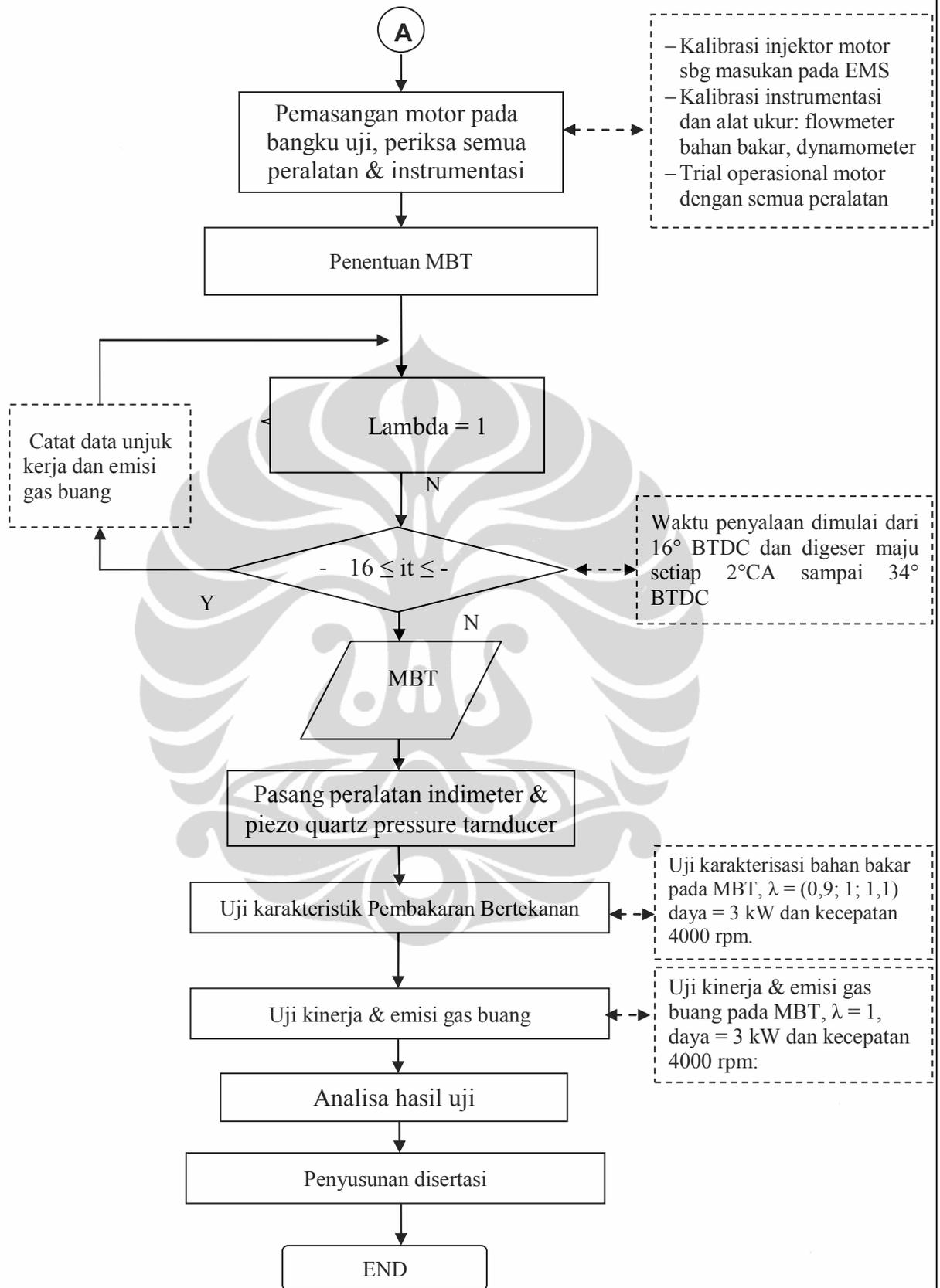
- Pemasangan peralatan *trigger (encoder)* pada piringan cam untuk mengidentifikasi posisi sudut engkol terhadap posisi tahapan proses pembakaran, seperti waktu awal percikan bunga api dan posisi torak pada titik mati atas (*Top Death Center-TDC*).
 - Pemasangan perangkat EMS merk Haltec Premium Sprint 500 sebagai pengganti ECU Honda Supra 125 PGMFI beserta pemasangan *trigger ignition timing* dan penanda *ignition timing* pada cam.
 - Kalibrasi injektor bahan bakar Honda Supra 125 PGMFI untuk mendapatkan laju aliran massa menggunakan *burrete* dan stopwatch pada tekanan 200 kPa(g) sesuai dengan buku manual pada motor uji Honda Supra PGM-FI – tempat pengujian mempunyai tekanan barometer sebesar 756 mm Hg. Hasil kalibrasi ini akan menjadi masukan parameter utama di dalam EMS sehingga rasio udara-bahan bakar dapat diatur dan besarnya telah terkalibrasi.
 - Setting EMS dan kalibrasi *timing ignition*.
- b. Pemasangan motor pada bangku uji dan persiapan pengujian
- Pemasangan motor Honda Supra 125 PGMFI pada bangku uji
 - Kalibrasi peralatan ukur, seperti *flow meter, exhaust gas analyser*, setting dan kalibrasi peralatan data akuisisi (*auto test software*).
 - Pemasangan instalasi tabung/tangki bahan bakar
 - Pemasangan dan kalibrasi indimeter yang meliputi: pemasangan instalasi *piezo quartz pressure transducer, Analog Digital Converter (ADC), Signal Amplifier* dan PC.
- c. Poros motor dikopel dengan dynamometer yang dikendalikan dengan elektronik terprogram (*software auto test*) yang memungkinkan beban motor (bukaan *throttle*) dan kecepatan motor (beban dynamometer) diatur, sedangkan

waktu penyalaan dan λ dikendalikan oleh EMS yang terhubung dengan komputer (Gambar 3.6).

- d. Temperatur ruang uji/*test bench* dipertahankan konstan sebesar 26°C.
- e. Pengambilan data penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan yang meliputi:
 - Pengambilan data untuk menentukan waktu penyalaan terbaik atau waktu pengapian minimum untuk torsi terbaik (*Minimum advance for Best Torque* - MBT). Penentuan MBT dilakukan dengan memvariasikan waktu penyalaan pada kondisi motor: 4000 rpm, 3 N.m dan rasio udara-bahan bakar (λ) stokiometrik dimulai dari 16°CA sampai dengan sekitar 34°CA atau setelah torsi mengalami penurunan. Data yang diambil adalah: *ignition timing*, bukaan katup (VE), waktu injeksi bahan bakar, torsi, daya, laju aliran bahan bakar, konsumsi bahan bakar spesifik, λ , CO₂, CO, HC dan temperatur gas buang.
 - Pengambilan data untuk penelitian karakteristik pembakaran dilakukan dengan kondisi operasional motor: MBT, beban sebesar 3 KW, putaran 4000 rpm dengan lambda bervariasi 0,9, 1 dan 1,1. Data yang diambil adalah: *ignition timing*, bukaan katup (VE), waktu injeksi bahan bakar, torsi, daya, laju aliran bahan bakar, konsumsi bahan bakar spesifik, λ , CO₂, CO, HC, temperatur gas buang dan tekanan di dalam ruang bakar. Setting pengambilan data tekanan ditentukan sebagai berikut:
 - Data tekanan ruang bakar diambil 20 kali dimana setiap data yang diambil merupakan rata-rata dari pembacaan 50 siklus.
 - *Sampling rate* pengambilan data tekanan di dalam silinder ruang bakar adalah sebesar 0,5° CA.

Metode dan prosedur dari penelitian, dapat disajikan dalam bentuk diagram alir seperti Gambar 3.8.





Gambar 3.8. Diagram alir penelitian

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut akan disajikan hasil, analisa dan diskusi dari pengujian dan penelitian setelah dilakukan pengolahan data dan disajikan dalam bentuk tabel ataupun grafik.

Hasil pengujian dan penelitian akan dianalisa dan didiskusikan terhadap standar, karakteristik pembakaran yang bisa berupa persamaan matematika maupun empiris, kinerja, emisi gas buang dan juga diperbandingkan dengan hasil yang didapat oleh peneliti sebelumnya/lainnya.

4.1 Hasil Pengujian Sifat-Sifat Campuran Premium Dan Etanol Kering

Berdasarkan data-data hasil pengujian dan pengolahan data, Tabel 4.1 menyajikan sifat-sifat penting dari premium, etanol dan campurannya terkait dengan karakteristik pembakaran, yang nantinya dapat membantu proses analisa proses karakterisasi pembakaran baik kondisi atmosferik maupun bertekanan.

Tabel 4.1. Hasil uji sifat-sifat campuran premium-etanol kering

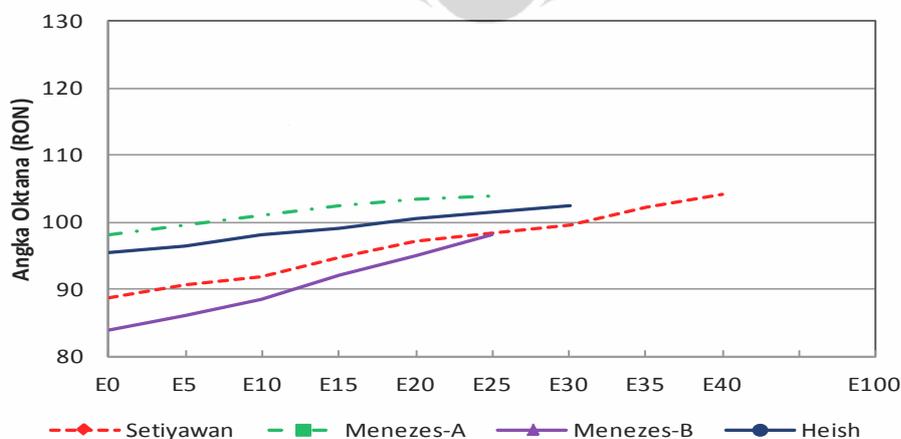
4.1.1. Angka Oktana Riset

Kualitas dari *gasoline* salah satunya ditunjukkan dengan angka oktana, yang mana mengindikasikan ketahanan suatu bahan bakar terhadap *knocking*/ketukan. Angka

Oktana Riset (RON) merupakan salah satu sifat-sifat *gasoline* yang terpenting bagi motor Otto, hal ini berkaitan dengan *knocking* yang mungkin bisa terjadi selama proses pembakaran di dalam silinder ruang bakar. Pembakaran di dalam motor Otto dipicu oleh percikan api yang keluar dari *spark plug* kemudian api akan merambat dan membakar campuran bahan bakar-udara yang ada di dalam silinder tetapi pembakaran secara *autoignition* harus dicegah. Angka oktana yang tinggi akan memperbaiki proses pembakaran sehingga efisiensi juga meningkat.

Berdasarkan hasil pengujian, angka oktana riset dari etanol kering jauh lebih tinggi dibandingkan dengan premium (Tabel 4.1), dimana etanol mencapai angka sekitarr 127 (hasil ekstrapolasi) sedangkan premium hanya sekitar 88,6. Nilai oktana dari etanol yang diuji dan disajikan oleh beberapa peneliti sangat bervariasi antara 108 sampai dengan 129^[12,13,55,56].

Penambahan etanol kedalam premium akan menaikkan angka oktana riset campuran sebanding dengan prosentase etanol dalam campuran (Gambar 4.1). Hasil pengujian para peneliti menunjukkan bahwa, besarnya kenaikan angka oktana riset dari campuran *gasoline*-etanol sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu: komposisi kimia dan angka oktana riset dari *gasoline* serta prosentase penambahan etanol. Gambar 4.1 memperlihatkan kenaikan angka oktana campuran *gasoline* dan etanol sangat dipengaruhi oleh nilai angka oktana dari *gasoline* murni. Semakin tinggi angka oktana *gasoline* murni, maka dampak kenaikan angka oktana campuran menjadi semakin kecil.



Gambar 4.1. Angka Oktana Riset (RON) beberapa jenis *gasoline* dan premium dengan campuran etanol

Secara rata-rata, setiap penambahan 5% etanol kering kedalam premium akan meningkatkan angka oktana riset campuran sebesar 1,9 poin dan pada penambahan 40% etanol didapatkan RON sebesar sekitar 104 (hasil ekstrapolasi).

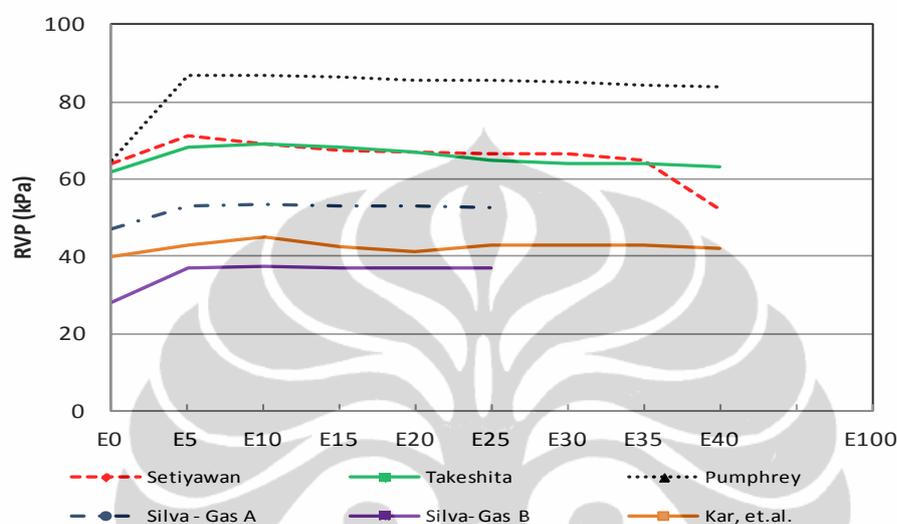
Pada Gambar 4.1, terlihat bahwa angka oktana *base gasoline* yang rendah akan sangat efektif dinaikkan angka oktannya bila ditambahkan etanol kering dan sebaliknya yang terjadi. Penambahan etanol pada *gasoline* yang digunakan penelitian oleh Menezes, tipe A yang mempunyai angka oktana sebesar 98,6, dan setiap penambahan 5% etanol hanya menaikkan angka oktana campuran sebesar rata-rata 1,04 poin, sedangkan tipe B berangka oktana 82,5 akan meningkat angka oktannya sebesar rata-rata 3,3 poin setiap penambahan 5% etanol. Demikian juga *gasoline* yang dipakai oleh Heish berangka oktana sebesar 95,4 dengan penambahan 5% etanol dapat meningkatkan angka oktana sebesar rata-rata 1,7.

4.1.2. Volatilitas dengan Reid Vapor Pressure

Volatilitas dapat dipahami sebagai kemudahan suatu bahan bakar untuk menguap. Volatilitas merupakan sifat-sifat yang sangat penting dalam proses pembakaran, pada kondisi atmosferik maupun kondisi bertekanan di dalam motor Otto. Pada dasarnya bahan bakar akan terbakar bila terjadi pencampuran bahan bakar dalam fasa uap dan udara. Salah satu ukuran tingkat volatilitas suatu *gasoline* adalah dengan mengukur Reid Vapor Pressure (RVP). Mengingat *gasoline* tersusun dari ratusan senyawa hidrokarbon mulai dari fraksi ringan (C_4) sampai dengan fraksi menengah (C_{10-12}), maka pengukuran volatilitas dengan Reid Vapor Pressure hanya mengindikasikan kemudahan menguap untuk fraksi ringan yang terkandung di dalam *gasoline*. Sedangkan kemudahan menguap untuk semua fraksi di dalam *gasoline* dapat dinyatakan dalam kurva distilasi.

Gambar 4.2, menunjukkan perubahan volatilitas berbagai jenis *gasoline* dalam RVP (kPa) terhadap penambahan etanol sampai dengan prosentase sebesar 40%. Penambahan etanol sebesar 5% sampai pada premium memberikan kenaikan RVP maksimum, kemudian secara perlahan menurun menuju tekanan uap etanol (E-100). Peneliti lain^[10,11,21] mendapatkan RVP maksimum terjadi pada campuran *gasoline* dan etanol antara 6-10%. Kecuali *gasoline* yang digunakan oleh Silva – mempunyai RVP sekitar 30 dan 48 - RVP *gasoline* yang digunakan para peneliti

lainnya mempunyai RVP yang relatif sama yaitu di kisaran 62 (Gambar 4.2). Besar peningkatan RVP dari campuran etanol dan *gasoline* sangat ditentukan oleh komposisi senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam *gasoline*, mengingat *gasoline* tersusun dari ratusan jenis hidrokarbon sehingga setiap *gasoline* yang digunakan oleh setiap negara akan berbeda-beda pula ^[21,31].



Gambar 4.2. Reid Vapor Pressure campuran *gasoline* dan etanol

Penambahan etanol kering sebesar 5% (v/v) ke dalam premium mengakibatkan kenaikan RVP sebesar 11,5% dari 64 kPa (premium murni) menjadi 71,3 kPa (campuran etanol 5% dan premium 95%). Peningkatan lebih lanjut jumlah/prosentase etanol ke dalam premium akan menurunkan RVP secara bertahap dan pada prosentase etanol sebesar 40%, nilai RVP campuran sudah lebih kecil dari premium murni. Efek perubahan RVP terhadap penambahan etanol pada premium mempunyai kesamaan dengan hasil yang didapat dari Takeshita^[11], berdasarkan Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 didapatkan fakta bahwa *gasoline* type A yang digunakan sebagai penelitian (sebagai bahan dasar pembuatan *commercial gasoline* di Brazil yang mengandung sekitar 25% etanol) mempunyai kemiripan spesifikasi dengan premium yang dijual di Indonesia.

Kenaikkan RVP campuran etanol dan *gasoline* yang lebih besar dibandingkan dengan RVP senyawa penyusunnya disebut dengan efek azeotropika - ini merupakan karakteristik yang khas dari pencampuran etanol dengan hidrokarbon/*gasoline*. Efek azeotropika yang ditimbulkan oleh penambahan etanol dalam

gasoline tergantung pada komposisi kimia *gasoline* dimana *gasoline* yang mengandung konsentrasi tinggi dari senyawa *paraffin* dan *naphthene* akan memberikan efek azeotropika yang lebih tinggi dibandingkan dengan senyawa aromatik^[11].

Struktur hidrokarbon yang menyebabkan efek azeotropika dengan etanol dalam campuran *gasoline*-etanol masih belum diketahui secara pasti^[57]. Etanol (senyawa berstruktur polar) bertanggung jawab terhadap peningkatan volatilitas campuran *gasoline*-etanol yang merupakan hasil dari penurunan interaksi molekul antara etanol dan senyawa hidrokarbon (non-polar)^[57].

Pembatasan nilai RVP - seperti yang tercantum dalam spesifikasi - untuk *gasoline* sangat penting untuk alasan: keamanan pada saat transportasi dan penyimpanan, mengetahui tendensi kemudahan meledak dan unjuk kerja motor Otto, khususnya pada saat start dingin. Selain itu RVP yang tinggi akan menyebabkan meningkatnya *evaporation emission* dari tangki bahan bakar, pada saat pengisian bahan bakar dan kerugian penguapan di tangki penyimpan.

Premium yang dipasarkan oleh PT Pertamina mempunyai RVP yang sudah melampaui batas atas spesifikasi yaitu sebesar sekitar 63 kPa, sehingga dengan penambahan etanol kering sebesar 5% (seperti pada bio-premium dan bio-pertamax) maka RVP akan melampaui spesifikasi yang telah ditetapkan oleh Dirjen Migas. Melihat pengalaman Brazil, maka spesifikasi premium dengan campuran etanol harus dilakukan revisi karena nilai RVP dari campuran premium dengan etanol kering akan lebih tinggi dibandingkan dengan *gasoline* tanpa etanol (lihat Tabel 4.1).

Volatilitas campuran premium-etanol selain dipengaruhi oleh konsentrasi etanol dalam campuran, berdasarkan penelitian Kar et.al kenaikan temperatur campuran *gasoline*-etanol akan menaikkan volatilitas, hal yang sama juga akan berlaku dengan campuran premium-etanol (Gambar 2.1). Penelitian tidak melakukan perubahan temperatur campuran karena disesuaikan dengan standar yang telah ditentukan untuk pengujian bahan bakar Otto, RVP lebih dititik beratkan pada karakteristik penguapan pada kondisi atmosferik, yaitu berkaitan dengan start dingin motor dan emisi *volatile organic compound* (VOC) pada saat penyimpanan.

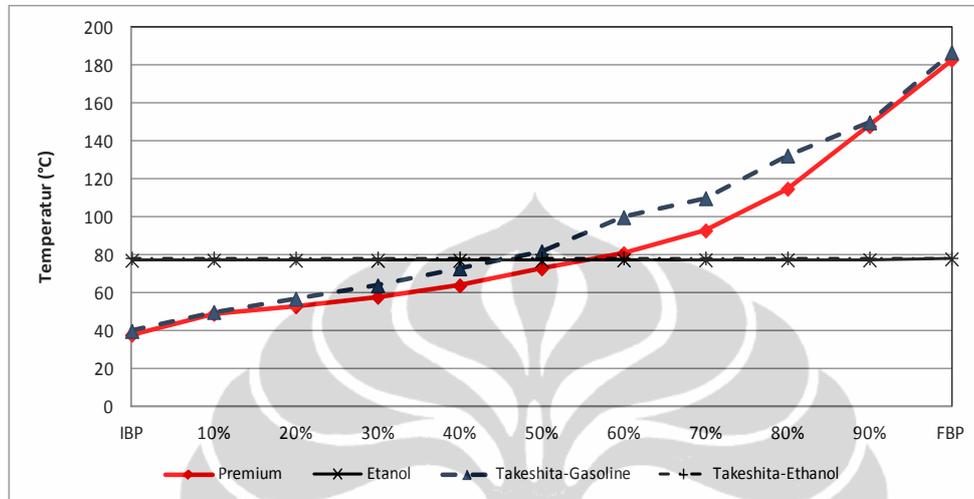
4.1.3. Volatilitas dengan Kurva Distilasi

Selain dengan RVP, volatilitas juga dapat ditentukan dengan kurva distilasi yang diuji sesuai dengan ASTM D-86. Pengujian distilasi untuk mendapatkan kurva distilasi sangat penting untuk mengetahui tingkat volatilitas semua fraksi senyawa yang terkandung didalam hidrokarbon/*gasoline*. Dengan kurva distilasi dapat diprediksi kandungan hidrokarbon fraksi ringan, menengah dan berat yang ada di *gasoline*, dimana fraksi ringan (temperatur pada saat penguapan mencapai 10% vol – T_{10}) bertanggung jawab atas; kemudahan start dingin dan *engine warming up*. Volatilitas fraksi menengah (temperatur pada saat penguapan mencapai 50% vol – T_{50}) memberikan kontribusi terhadap tingkat ke-ekonomi-an pemakaian bahan bakar dan nyaman pada saat melaju (*cruising speed*). Sedangkan volatilitas fraksi berat (temperatur pada saat penguapan mencapai 90% vol – T_{90}) berakibat terhadap pembentukan residu karbon di ruang bakar dan pengenceran/dilusi minyak pelumas.

Gambar 4.3 menunjukkan kurva distilasi dari etanol, premium dan *gasoline* yang digunakan penelitian oleh Takshita. Etanol kering mempunyai temperatur distilasi tunggal yaitu dengan nilai sekitar 79°C, karena etanol merupakan senyawa tunggal maka terlihat bahwa etanol yang digunakan dalam penelitian maupun yang digunakan penelitian oleh Takeshita mempunyai temperatur distilasi yang sama. Sedangkan premium dan *gasoline* menunjukkan hal yang berbeda, temperatur awal dan akhir distilasi menunjukkan nilai yang sama tetapi temperatur distilasi untuk fraksi menengah (10-90%) terjadi perbedaan yang signifikan. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan komposisi dan prosentasi fraksi menengah (C_5 - C_{10}) dari premium/*gasoline* yang berbeda.

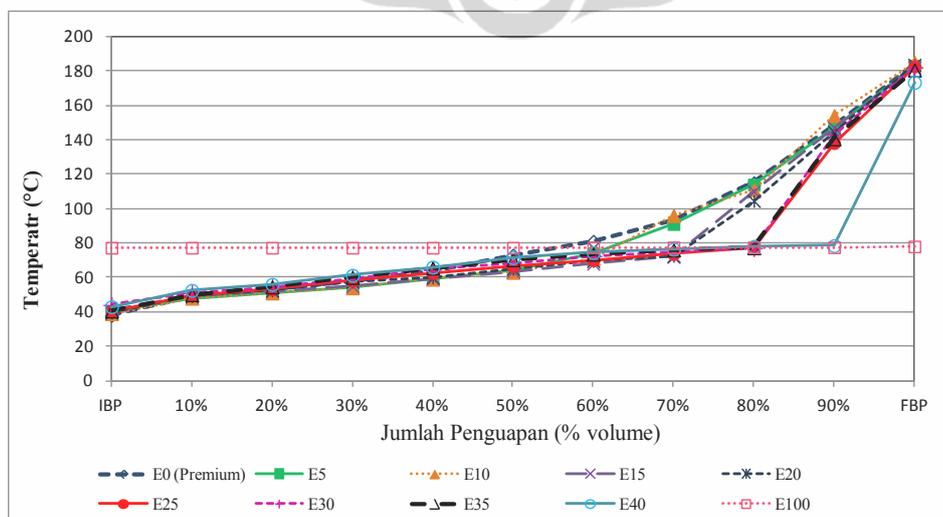
Bila dilihat dari nilai RVP, maka etanol, premium dan campuran premium-etanol yang ada di Indonesia mempunyai kemiripan dengan penelitian Takeshita^[11] (Gambar 4.2). Gambar 4.3 juga memperlihatkan bahwa terdapat kesamaan temperatur distilasi, terutama fraksi ringan (T_{10} atau RVP) maupun kandungan fraksi berat (T_{90} dan *Final Boiling Point*/FBP). Sedangkan volatilitas senyawa hidrokarbon fraksi menengah terdapat sedikit perbedaan antara premium dan *gasoline* Brazil^[11] (T_{50}). Pada fraksi menengah premium lebih mudah menguap dibandingkan dengan *gasoline* Brazil hal ini akan kontribusi terhadap tingkat ke-

ekonomian pemakaian bahan bakar dan kenyamanan pada saat melaju. Perbedaan tersebut disebabkan oleh formulasi *gasoline* yang telah ditetapkan oleh masing-masing negara yang didasarkan oleh kondisi iklim dari masing-masing negara dan regulasi emisi gas buang.



Gambar 4.3. Kurva distilasi *anhydrous ethanol* dan *gasoline* yang ada di Indonesia dan Brazil

Gambar 4.4, memperlihatkan kurva distilasi etanol, premium dan campuran premium-etanol sampai dengan prosentase etanol sebesar 40%. Pada penguapan fraksi ringan (T_{10}) dan fraksi menengah (T_{50}) pencampuran etanol sampai dengan 20% temperatur penguapan dari campuran premium-etanol lebih rendah dibandingkan dengan premium, hal ini sesuai dengan hasil yang didapat dari pengukuran RVP (Gambar 4.2).



Gambar 4.4. Kurva distilasi campuran etanol kering dan premium (E5-E100)

Berdasarkan Gambar 4.4, beberapa hal menarik yang dapat diamati dan didiskusikan adalah:

1. Etanol mempunyai temperatur penguapan sekitar 78°C dengan temperatur awal dan akhir penguapan yang sama.
2. Sedangkan premium yang merupakan campuran dari ratusan hidrokarbon ($\text{C}_4 - \text{C}_{12}$), mempunyai temperatur awal penguapan (IBP) sebesar 38°C dan temperatur akhir penguapan (FBP) sebesar 183°C .
3. Penambahan etanol kedalam premium cenderung menaikkan temperatur awal penguapan (IBP). Semakin besar penambahan etanol ke dalam premium, IBP campuran akan menuju ke IBP etanol, hal ini sesuai dengan penelitian dari Takshita^[10].
4. Pada temperatur awal penguapan (IBP) etanol yang sebesar 78°C , volume penguapan premium sudah mencapai sekitar 60% basis volume (*threshold*).
5. Pola penguapan E5 dan E10 masih sama dengan premium meskipun nilainya sedikit dibawahnya. Sedangkan pola penguapan E15 sampai dengan E40, telah terjadi perubahan pola penguapan terutama pada penguapan diatas 60% basis volume, yang mana temperatur penguapan sudah mengikuti temperatur penguapan etanol. Pada daerah ini penguapan terjadi pada temperatur penguapan dari etanol – semakin besar konsentrasi etanol semakin landai grafik dari penguapan karena mengikuti temperatur penguapan etanol kemudian baru naik kembali menuju temperatur akhir penguapan campuran.
6. Penambahan etanol kering cenderung menurunkan temperatur penguapan akhir (FBP) dari campuran. Hal ini juga ditunjukkan dalam penelitian Takshita^[10]. Campuran 90% etanol dan 10 % *gasoline*, FBP campuran sudah berimpit dengan FBP etanol kering murni.

4.1.4. Densitas

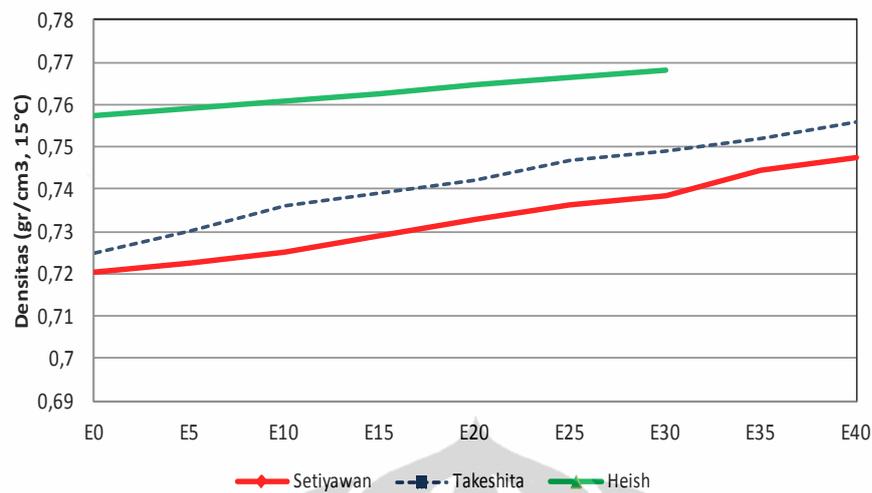
Densitas bisa menjadi indikasi komposisi *gasoline* yang tersusun dari ratusan senyawa hidrokarbon. Densitas yang rendah menunjukkan jumlah kandungan senyawa fraksi ringan dari hidrokarbon yang besar dan sebaliknya. Gambar 4.5, menunjukkan perubahan densitas campuran premium/*gasoline*-etanol seiring dengan peningkatan prosentase etanol.

Seperti terlihat pada Gambar 4.5, penambahan konsentrasi etanol kedalam permium/*gasoline* akan menaikkan densitas campuran, hal ini menunjukkan bahwa densitas etanol lebih besar dibandingkan dengan premium/*gasoline*. Perubahan densitas akan berpengaruh pada jumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam silinder ruang bakar selama satu siklus pembakaran. Perubahan ini akan berakibat pada perubahan kebutuhan udara pembakaran supaya didapat campuran yang konstan. Tidak dilakukannya penyesuaian kebutuhan udara pembakaran akan mengakibatkan pembakaran yang tidak komplet/sempurna dan akan berpengaruh terhadap unjuk kerja motor Otto dan emisi gas buang, utamanya: CO dan HC.

Densitas etanol lebih besar 10,1% dibandingkan dengan premium. Densitas campuran premium-etanol meningkat sebanding dengan konsentrasi etanol yang ditambahkan ke premium. Densitas akan menentukan jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam silinder ruang bakar dalam basis berat. Semakin besar densitas akan menambah jumlah massa bahan bakar yang masuk kedalam ruang bakar untuk volume injeksi yang sama. Meskipun densitas etanol lebih besar dibandingkan premium, tetapi karena etanol mengandung oksigen didalamnya, maka kebutuhan udara pembakaran justru akan menurun.

Perbandingan densitas untuk beberapa campuran *gasoline* dan etanol dari beberapa peneliti tersaji dalam Gambar 4.5. Densitas campuran meningkat secara proporsional terhadap kenaikan etanol dalam campuran *gasoline*-etanol. Densitas campuran dari Heish jauh lebih besar dibandingkan campuran yang digunakan oleh Takesita dan Setiyawan. Mengingat etanol kering merupakan senyawa murni dengan densitas yang sama sekitar 0,79 gr/cm³, maka bila ada perbedaan harga campuran akan ditentukan oleh densitas *gasoline* – *gasoline* merupakan campuran dari ratusan senyawa hidrokarbon dari C₄ – C₁₂.

Gao et.al.^[58] dalam penelitiannya menunjukkan bahwa pola, penetrasi dan sudut semprotan dalam injektor tipe *swirl* antara *gasoline* murni dengan etanol murni maupun campuran *gasoline*-etanol (konsentrasi etanol 25%, 50% dan 75% v/v) tidak ada perubahan yang signifikan.



Gambar 4.5. Densitas campuran *anhydrous ethanol* dan *gasoline* yang ada di Indonesia dan Brazil

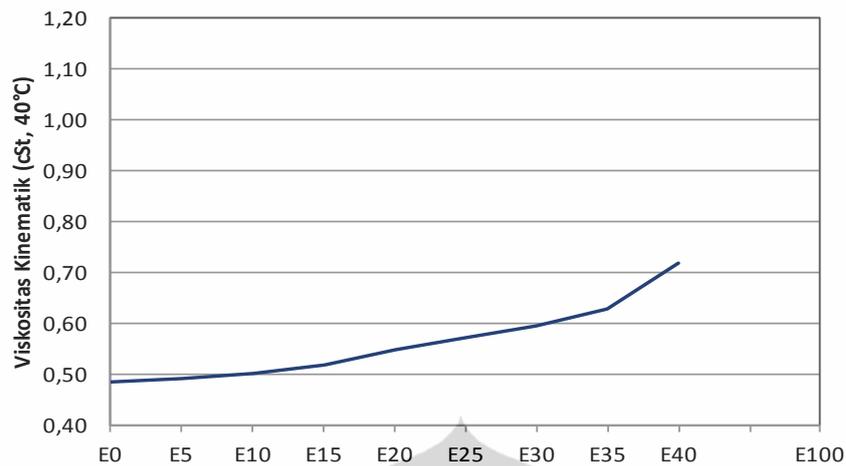
4.1.5. Viskositas Kinematik

Viskositas merupakan indikasi dari kemudahan suatu cairan untuk mengalir. Pada sistem pembakaran motor Otto perubahan viskositas akan mempengaruhi kemampuan pompa bahan bakar untuk memasok bahan bakar ke dalam silinder ruang bakar dan ukuran droplet bila menggunakan sistem injeksi.

Sesuai dengan Gambar 4.6, viskositas kinematik dari premium berharga 0,48 cSt sedangkan etanol kering sebesar 1,11 cSt atau 225% lebih tinggi dibandingkan dengan premium. Penambahan etanol pada premium akan menaikkan viskositas campuran sebanding dengan prosentase etanol. Penambahan sampai dengan 40% etanol menaikkan viskositas campuran sebesar 48%. Kenaikkan viskositas akibat dari penambahan etanol ke dalam *gasoline* sampai kadar tertentu, selama ini tidak mengakibatkan perubahan dan kinerja dari pembentukan droplet oleh nozzle^[58,59].

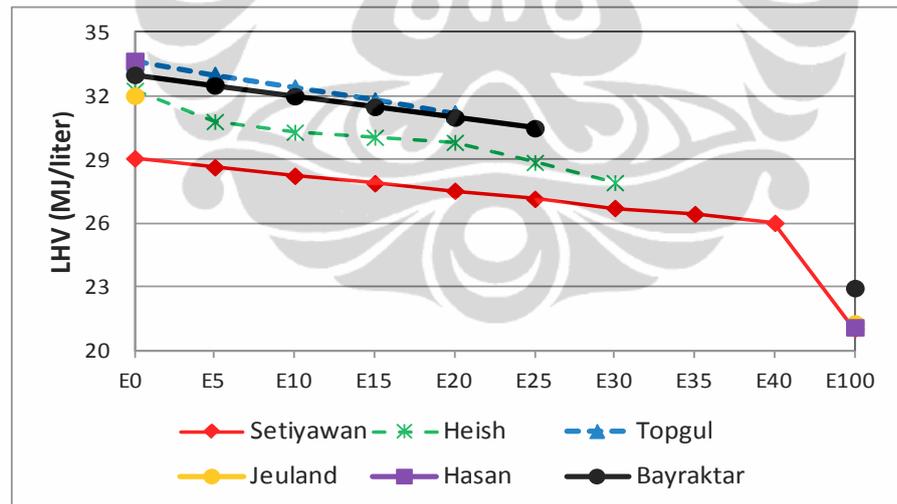
4.1.6. Nilai Kalor

Gambar 4.7 memperlihatkan nilai kalor dari beberapa *gasoline*, etanol dan campurannya dari beberapa peneliti. Kalor bahan bakar merupakan salah satu sifat bahan bakar yang terpenting, terlebih untuk kebutuhan transportasi/*mobile*. Dalam motor Otto pemilihan bahan bakar harus mempunyai rasio daya luaran terhadap berat mesin yang tinggi, dimana daya luaran sangat ditentukan oleh nilai kalor.



Gambar 4.6. Kinematik viskositas campuran premium dan etanol kering

Premium mempunyai nilai kalor sebesar 29,07 MJ/l atau 9% lebih rendah dibandingkan dengan gasoline yang digunakan penelitian lain seperti: Topgul^[15] dan Hasan^[18] dan 13,5% lebih rendah yang digunakan oleh Heish^[16], Jeuland^[12] dan Bayraktar^[8]. Penurunan nilai kalor campuran *gasoline* dan etanol proporsional terhadap konsentrasi etanol dalam *gasoline* seperti terlihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Nilai kalor beberapa jenis *gasoline* dan campuran dengan etanol

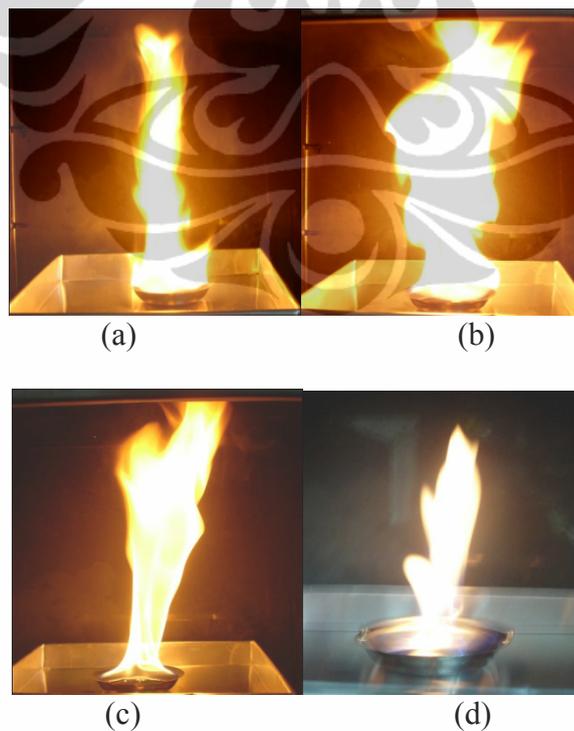
4.2. Karakteristik Pembakaran Premium, Etanol Dan Campurannya Kondisi Atmosferik Di Kalorimeter Api

Gambar 4.8 menunjukkan bentuk nyala api dari pembakaran premium (E0), E5, E25 dan etanol (E100). Pembakaran E5 dan E25 yang merupakan campuran

premium-etanol memberikan nyala api yang lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar penyusunnya, yaitu: premium dan etanol.

Nyala api yang besar pada campuran premium-etanol disebabkan oleh volatilitas E5 dan E25 yang masing-masing sebesar 71,4 dan 66,5 kPa lebih besar dibandingkan dengan volatilitas premium yang sebesar 64 kPa dan etanol (15,6 kPa). Volatilitas yang besar akan memperbanyak jumlah bahan bakar yang diuapkan sehingga nyala api juga akan semakin membesar. Demikian juga halnya dengan temperatur distilasi, campuran E5 mempunyai temperatur yang lebih dibandingkan dengan premium yang maknanya bahwa tingkat penguapan E5 lebih besar dibandingkan dengan premium.

Nyala api juga dipengaruhi oleh tingkat reaktifitas dari bahan bakar. Campuran premium-etanol (E5 dan E25) bisa jadi lebih reaktif dibandingkan dengan premium dan etanol, dan ini merupakan salah satu efek azeotropika dari campuran premium-etanol. Reaktifitas bahan bakar yang tinggi akan memperbaiki kesempurnaan proses pembakaran.



Gambar 4.8 Proses pembakaran dan bentuk nyala api dari (a) premium, (b) E5, (c) E25 dan (d) etanol

Gambar 4.9 menunjukkan kurva penurunan massa bahan bakar atau jumlah massa bahan bakar yang tersisa pada kurun waktu tertentu dari premium, etanol dan campurannya. Pada awal pembakaran setelah dilakukan pemantikan api pada bahan bakar, jumlah massa yang terbakar cukup tinggi sampai detik ke 10-20 kemudian turun sampai dengan detik ke 50, kemudian meningkat secara signifikan dan menurun kembali pada akhir pembakaran.

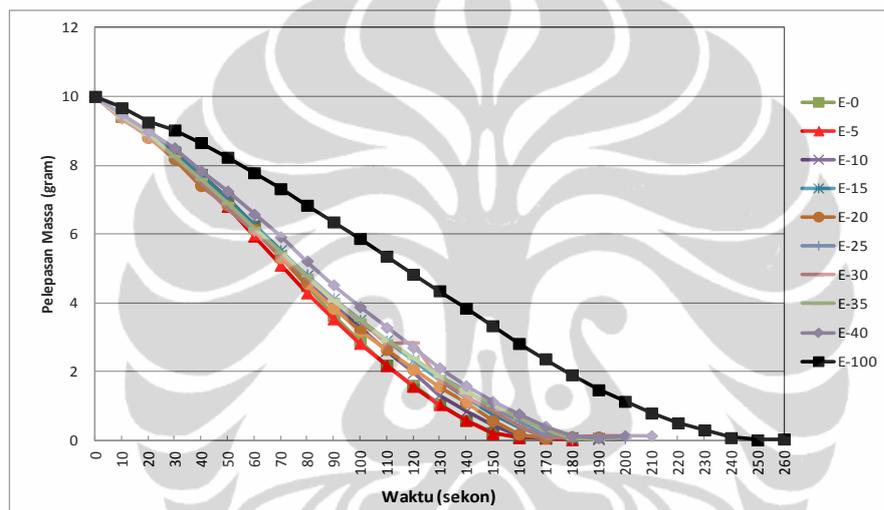
Pada fase awal, pembakaran berjalan cepat karena pembakaran dikendalikan oleh tersedianya uap bahan bakar yang ditentukan oleh volatilitas (RVP) pada kondisi atmosferik – hanya fraksi ringan hidrokarbon yang bisa menguap. Pada fase awal ini telah tersedia cukup uap bahan bakar yang telah bercampur dengan udara/oksigen disekitarnya, sehingga pada saat pemantik menyala maka langsung terbakar dengan cepat dan menghasilkan api yang cukup besar.

Pada fase berikutnya, setelah api terbentuk maka temperatur disekitar bahan bakar akan naik dan penguapan/pelepasan massa akan meningkat sejalan dengan api yang juga semakin membesar. Penurunan massa berlangsung lebih cepat ditandai dengan kurva yang slopenya tajam – sebagian besar bahan bakar (fraksi menengah dari hidrokarbon/premium dan etanol) terbakar pada fase ini. Pelepasan massa yang cepat pada fase ini lebih didominasi oleh tersedianya kalor penguapan di sekitar bahan bakar (*heat of evaporation*) – sesuai dengan persamaan (1) dan tekanan uap sudah kurang berperan penting. Jadi meskipun RVP dari E5 sampai dengan E35 masih lebih tinggi dari premium (Tabel 4.1), tetapi kalor penguapan dari campuran etanol pada premium akan meningkat sebesar 15% untuk setiap kenaikan 5% etanol dibandingkan dengan premium murni.

Sedangkan pada fase akhir, pembakaran mengalami perlambatan karena jumlah bahan bakar yang tersedia tinggal sedikit dan yang tersisa adalah fraksi berat dari hidrokarbon meskipun temperatur masih cukup tinggi.

Kecepatan pelepasan massa bahan bakar selama proses pembakaran dalam kondisi atmosferik sangat ditentukan oleh volatilitas bahan bakar dan kalor penguapan yang ditunjukkan dari nilai RVP-nya. Sesuai dengan Gambar 4.9, pembakaran etanol (E100) lebih lambat dibandingkan dengan premium maupun campuran premium-etanol lainnya karena volatilitasnya lebih rendah dan kalor penguapan yang tinggi

(lebih 3 kali lipat dari premium). Sedangkan E-5 yang merupakan campuran etanol (5% v/v) dengan premium (95% v/v), pelepasan massa mempunyai nilai yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan premium, hal ini menunjukkan bahwa ada pengaruh tekanan uap lebih nesar dibandingkan dengan kenaikan kalor penguapan. Penurunan secara drastis terlihat pada E-25 sampai dengan E-40 dimana kecepatan pelepasan massa sudah melambat dibandingkan dengan E5 sampai dengan E20 hal ini bisa disebabkan kalor penguapan dari E25- E40 sudah demikian tinggi dibandingkan dengan premium sehingga panas yang dilepaskan terserap kembali untuk penguapan bahan bakar.



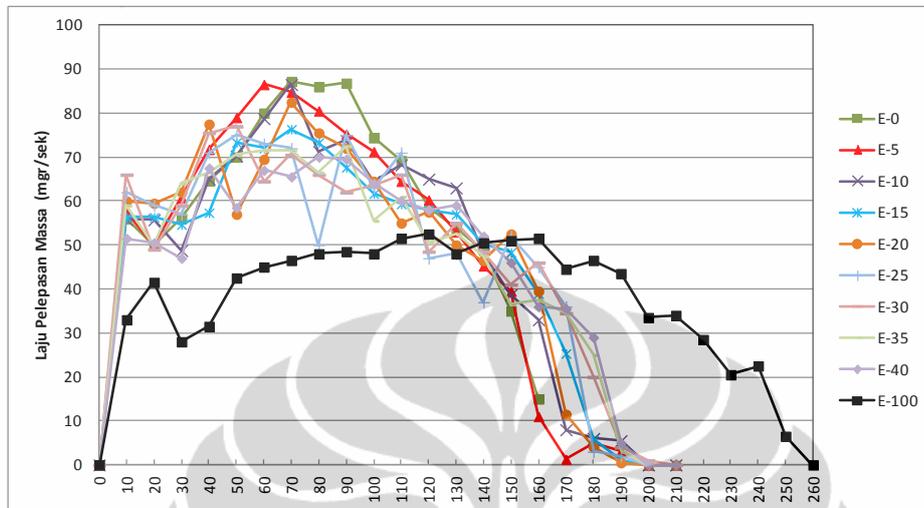
Gambar 4.9. Kurva penurunan massa campuran premium-etanol terhadap waktu

Gambar 4.10 menggambarkan evolusi laju pelepasan massa dari proses pembakaran mulai dari premium, campuran premium-etanol dan etanol murni pada kondisi atmosferik. Laju pelepasan massa premium lebih tinggi dibandingkan dengan etanol dan campuran etanol-premium. Laju pelepasan massa dari bahan bakar sangat terkait dengan pelepasan massa seperti yang tersaji pada Gambar 4.9.

Laju pelepasan massa bahan bakar pada awalnya cukup tinggi, untuk kemudian turun sesaat dan naik lagi secara konsisten dan pada akhirnya turun secara perlahan hingga bahan bakar habis. Secara rata-rata premium mempunyai laju pelepasan massa yang relatif lebih besar dibandingkan dengan etanol dan campurannya.

Rata-rata laju pelepasan massa bahan bakar cenderung menurun dengan penambahan etanol kedalam premium. Premium mempunyai laju pelepasan massa

sebesar 71,5 mgr/sek sedangkan etanol hanya sebesar 44 mgr/sek. Penambahan etanol sebesar 5% kedalam premium akan menurunkan laju pelepasan massa sekitar 2 mgr/sek.

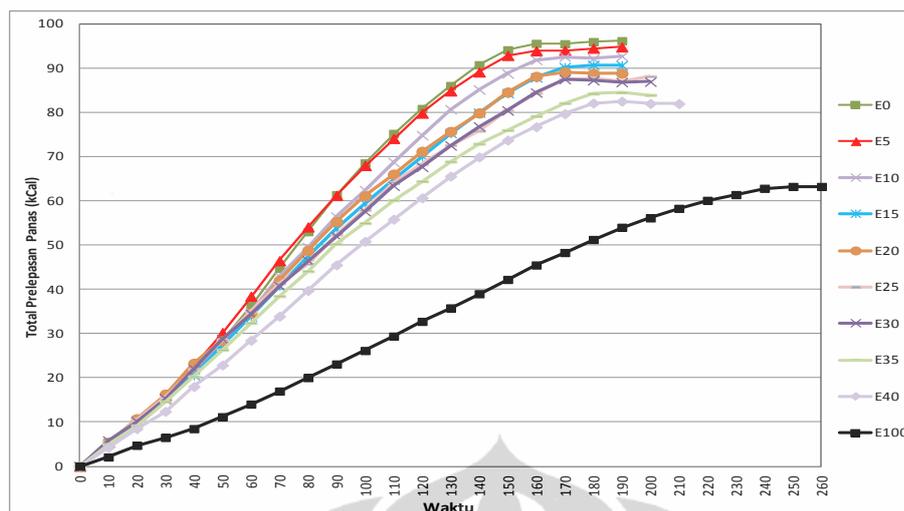


Gambar 4.10. Laju pelepasan massa pembakaran premium, etanol dan campurannya pada kondisi atmosferik

Gambar 4.11 menunjukkan jumlah kalor total yang dilepaskan oleh bahan bakar. Pelepasan kalor total suatu bahan bakar sebanding dengan massa bahan bakar, nilai kalor yang dimiliki oleh bahan bakar dan tergantung pula pada efisiensi pembakaran. Penambahan etanol pada premium akan menurunkan pelepasan kalor total campuran untuk jumlah massa yang sama, hal ini sesuai dengan nilai kalor etanol yang lebih rendah dibandingkan premium yaitu hanya sekitar 70%.

Pelepasan kalor total untuk premium menunjukkan angka paling tinggi dibandingkan dengan etanol dan campurannya yaitu sebesar 96,6 kCal, sedangkan untuk etanol murni hanya sekitar 63,2 kCal. Penambahan etanol kedalam premium akan menurunkan pelepasan kalor total proposional terhadap jumlah penambahan etanolnya. Penambahan etanol kedalam premium setiap 5% basis volume akan menurunkan kandungan kalor bahan bakar sebesar 1,7%.

Gambar 4.12 menunjukkan pola dan laju pelepasan kalor premium, etanol dan campurannya. Pada fase awal pembakaran laju pelepasan kalor berjalan lambat seiring dengan terbatasnya uap bahan bakar. Fase berikutnya, dengan meningkatnya ketersediaan uap yang dapat terbakar maka laju pelepasan kalor juga meningkat secara signifikan.

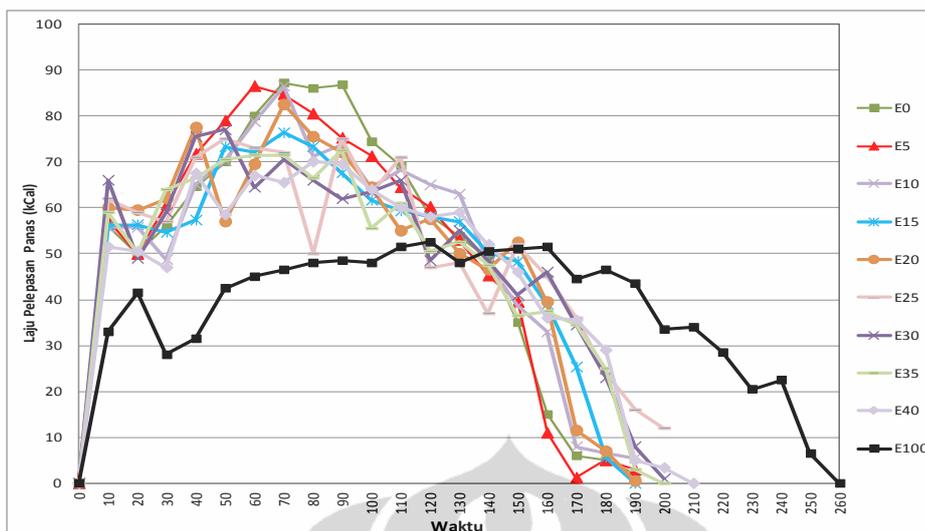


Gambar 4.11. Pelepasan kalor total campuran premium-etanol

Grafik laju pelepasan kalor mempunyai kesamaan dengan laju pelepasan massa, hal ini saling berkaitan erat dimana laju pelepasan kalor akan selalu proporsional dengan laju pelepasan massa karena kalor yang dihasilkan merupakan perkalian antara jumlah massa bahan bakar dikalikan dengan nilai kalor dari bahan bakar itu sendiri.

Rata-rata laju pelepasan premium juga menunjukkan angka yang tertinggi dibandingkan dengan campuran premium-etanol dan etanol (Gambar 4.13). Rata-rata laju pelepasan kalor premium sebesar 0,6 kCal/sekon dan menurun dengan peningkatan jumlah etanol yang dicampurkan kedalam premium. Sedangkan etanol sendiri mempunyai rata-rata pelepasan kalor hanya sebesar 0,25 kCal/sekon atau hanya sekitar 42% dibandingkan premium.

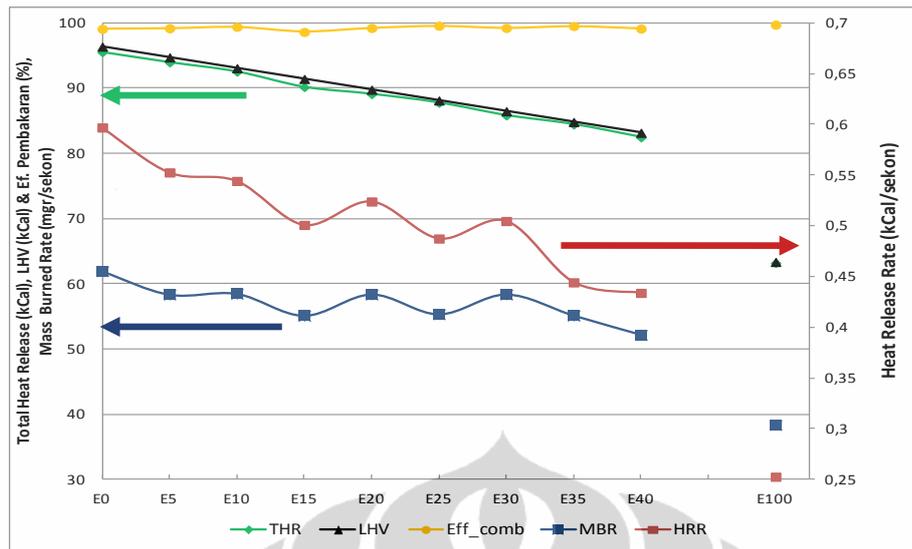
Gambar 4.13 menunjukkan hubungan antara konsentrasi penambahan etanol dalam premium terhadap pelepasan panas total, nilai kalor, laju pelepasan massa dan kalor serta efisiensi pembakaran. Dengan penambahan etanol kedalam premium, maka akan berdampak pada penurunan nilai kalor bahan bakar campuran, penurunan pelepasan panas total, dan penurunan laju pelepasan massa dan kalor tetapi efisiensi pembakaran cenderung meningkat terhadap penambahan etanol pada premium.



Gambar 4.12. Pola laju pelepasan kalor campuran premium-etanol

Pengaruh penambahan etanol pada premium terhadap penurunan laju pelepasan massa dan kalor, penurunan kalor total dan penurunan nilai kalor telah didiskusikan sebelumnya. Sedangkan peningkatan efisiensi pembakaran karena penambahan etanol kedalam premium dapat dikarenakan oleh perubahan komposisi dan prosentase senyawa didalam campuran. Premium yang tersusun dari berbagai senyawa hidrokarbon (C_4-C_{12}) pada saat terbakar meninggalkan deposit karena tidak terbakarnya hidrokarbon yang berat sedangkan etanol yang merupakan senyawa murni (C_2H_5OH) merupakan senyawa ringan yang homogen. Sehingga dengan penambahan etanol ke dalam premium maka akan memperbesar fraksi senyawa ringan pada campuran yang pada akhirnya akan memperbaiki kesempurnaan pembakaran atau berkurangnya deposit.

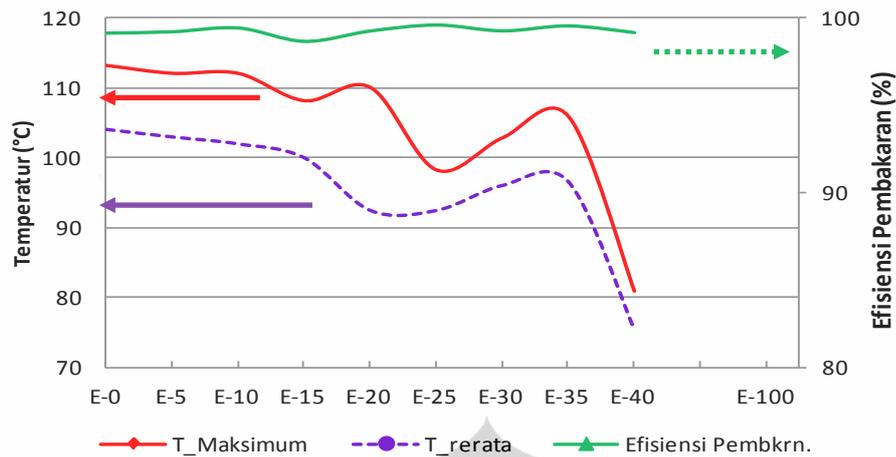
Gambar 4.14, mendeskripsikan temperatur gas buang maksimum dan rata-rata serta efisiensi pembakaran dari premium, campuran premium-etanol dan etanol kering murni. Penambahan etanol kedalam premium cenderung menurunkan temperatur maksimum dan rata-rata dari gas buang hasil pembakaran. Penurunan temperatur gas buang dapat disebabkan oleh penurunan nilai kalor bahan bakar dan jumlah pelepasan kalor total dari pembakaran bahan bakar. Dengan penambahan etanol kedalam premium, maka akan menurunkan nilai kalor bahan bakar serta penurunan jumlah kalor yang dilepas selama pembakaran terjadi (Gambar 4.13).



Gambar 4.13. Rata-rata laju pelepasan kalor dan massa, nilai kalor bahan bakar, total pelepasan kalor dan efisiensi pembakaran di Kalorimeter Api.

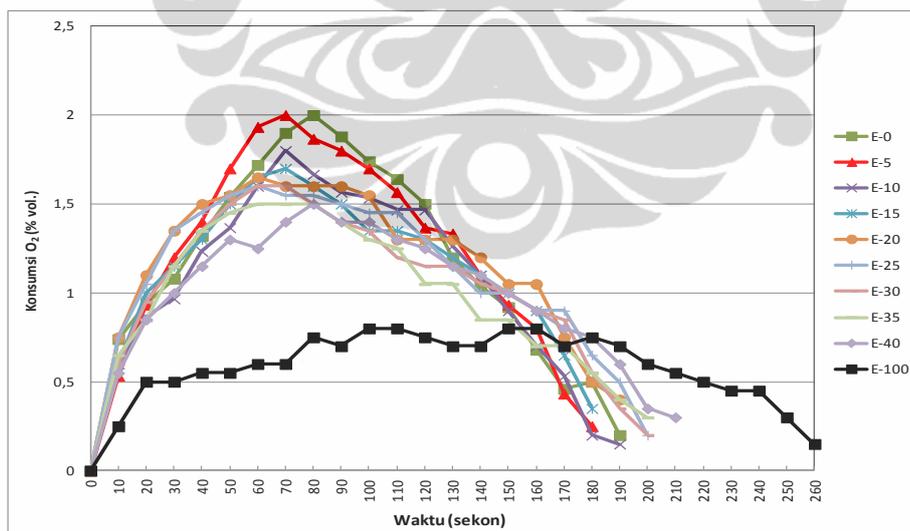
Temperatur maksimum gas buang dari premium mencapai nilai 113°C sedangkan untuk etanol hanya sekitar 81°C atau hanya sekitar 72% dari premium. Dalam satu sisi temperatur gas buang menurun dengan penambahan etanol dalam premium, tetapi dalam hal lainnya, efisiensi pembakaran malah meningkat sejalan dengan penambahan etanol dalam premium. Pembakaran premium mempunyai efisiensi sebesar 99,1% sedangkan etanol murni mencapai 99,7% etanol. Secara umum efisiensi pembakaran mempunyai nilai yang cukup besar mengingat ketersediaan udara yang berlimpah dan waktu pembakaran yang tidak dibatasi.

Peningkatan efisiensi pembakaran karena penambahan etanol pada premium dapat terjadi karena: (1) dengan penambahan etanol maka fraksi ringan dari campuran akan semakin besar dan sebaliknya fraksi berat dari hidrokarbon premium akan semakin sedikit sehingga jumlah deposit hidrokarbon yang dihasilkan akan semakin sedikit pula atau dengan kata lain pembakaran menjadi lebih sempurna, (2) dengan semakin rendahnya temperatur gas buang, maka berdasarkan pers. (7) kalor yang dapat dimanfaatkan di dalam peralatan (kalorimeter api) menjadi lebih besar dan pada akhirnya efisiensi menjadi meningkat.



Gambar 4.14. Temperatur maksimum dan rata-rata dari gas buang serta efisiensi pembakaran

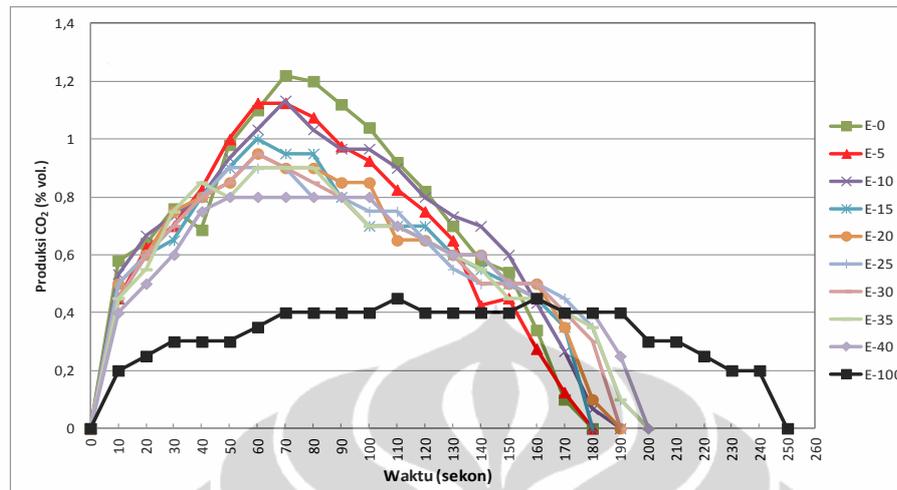
Gambar 4.15 mendeskripsikan korelasi evolusi kebutuhan O_2 selama proses pembakaran berlangsung dari bahan bakar premium (E0), etanol (E100) dan campurannya. Kenaikkan kebutuhan O_2 selama proses pembakaran sejalan dengan kenaikan pelepasan massa (Gambar 4.10). Basis dari grafik 4.15 adalah selisih antara konsentrasi oksigen awal $\pm 20,95\%$ (udara segar) dan jumlah oksigen yang terdeteksi di gas buang yang terukur dengan gas analyser.



Gambar 4.15. Evolusi kebutuhan O_2 terhadap waktu

Karbondioksida pada sisi lain merupakan hasil dari pembakaran sempurna dari bahan bakar, dimana akan meningkat dengan meningkatnya laju pelepasan massa (Gambar 4.16). Grafik produksi karbondioksida mempunyai kesamaan dengan

grafik kebutuhan oksigen pembakaran karena pada pembakaran sempurna akan mempunyai rasio kebutuhan oksigen dan produksi karbondioksida yang tetap.



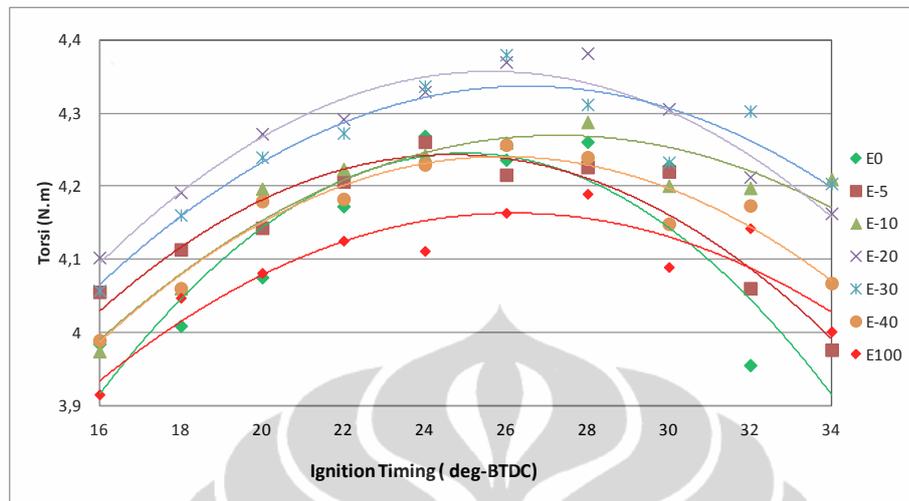
Gambar 4.16. Evolusi konsentrasi CO₂ yang dihasilkan pembakaran terhadap waktu

4.3. Karakteristik Pembakaran Premium, Etanol Dan Campurannya Kondisi Bertekanan di Motor Otto Silinder Tunggal Sistem Injeksi

Sebelum pada pembahasan karakteristik pembakaran bertekanan di motor Otto, pada kondisi *Minimum Advanced for the Best Torque* (MBT), maka akan sedikit dilakukan pembahasan terkait dengan MBT untuk setiap bahan bakar.

Gambar 4.17, memperlihatkan evolusi torsi terhadap kenaikan waktu pengapian untuk masing-masing bahan bakar. Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan *Minimum Advanced for the Best Torque* (MBT) untuk masing-masing bahan bakar dengan torsi awal sekitar 4 N.m, putaran 4000 rpm, bukaan katup tetap (*partly fully open*) dan $\lambda \approx 1$ (campuran stoikiometrik). Setting waktu penyalaan awal untuk semua bahan bakar adalah 16° BTDC (spesifikasi waktu penyalaan pada saat *idle* adalah 10° BTDC) dan dinaikkan setiap 2° sudut engkol sampai didapatkan nilai torsi tertinggi dan kemudian diteruskan sampai beberapa derajat sudut engkol dengan kecenderungan torsi sudah menurun – pada penelitian ini sudut engkol terakhir adalah sebesar 34° CA (Gambar 4.17). Mengingat angka oktana (RON) etanol dan campuran etanol-premium yang lebih besar dari premium (Tabel 4.1), maka untuk mendapatkan nilai aman maka akhir dari pengaturan *ignition timing* di

akhiri pada sudut engkol 34° BTDC. Untuk bahan bakar campuran premium – etanol kering dilakukan dengan cara dan metode yang sama.



Gambar 4.17. Torsi vs ignition timing pada putaran 4000 rpm dan $\lambda=1$

MBT yang didapat dari bahan bakar premium dan campuran etanol-premium adalah: berkisar antara 24° BTDC (premium) sampai dengan 28° BTDC. Kenaikan waktu pengapian seiring dengan kenaikan angka oktana bahan bakar karena semakin tinggi angka oktana akan semakin tahan terhadap knocking. Dengan memajukan waktu pengapian maka akan semakin tinggi tekanan maksimum yang terjadi di dalam silinder ruang bakar sehingga torsi akan meningkat pula.

Penurunan torsi seiring dengan kenaikan waktu penyalaan setelah melewati MBT karena proses pembakaran awal dari bahan bakar terjadi bersamaan dengan piston bergerak menuju TDC sehingga ada gaya yang saling bertentangan bahkan kalau terlalu maju maka motor bisa mati. Pada MBT waktu pembakaran akan terjadi paling singkat, dengan memajukan dan memundurkan waktu pengapian dari MBT, maka waktu pembakaran bahan bakar akan meningkat^[60].

4.3.1 Analisa Karakteristik Pembakaran

Sebelum pada kajian analisa karakteristik pembakaran dengan berdasarkan pengukuran data tekanan di dalam silinder ruang bakar motor Otto, perlu didahului dengan analisa dan evaluasi parameter yang berkaitan dengan parameter utama operasional motor bakar terkait dengan karakteristik pembakaran seperti: konsistensi daya luaran aktual terhadap daya luaran setting, daya indikatif dan

kehilangan energi/efisiensi yang terjadi di dalam silinder ruang bakar. Mengingat sesuai dengan metode pengujian bahwa sebagai parameter bebas yang penting berupa daya efektif luaran yang sebesar 3 kW.

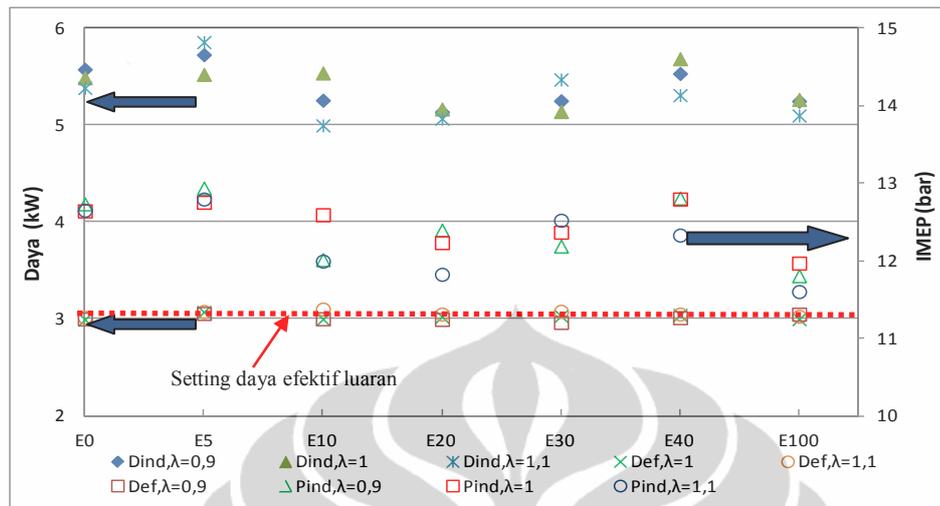
Sehubungan dengan bahan bakar uji (premium, etanol dan campurannya) mempunyai kandungan energi yang berbeda sedangkan daya efektif luaran dijaga tetap, maka akan ada peningkatan jumlah pasokan bahan bakar. Demikian juga energi yang dilepaskan oleh bahan bakar pada pembakaran di dalam ruang bakar motor Otto akan sangat dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar yang dipasok.

Gambar 4.18 menggambarkan variasi daya efektif luaran dari motor Otto uji yang disetting pada daya efektif luaran sebesar 3 kW dan daya indikatif hasil perhitungan dengan data tekanan yang terekam oleh *piezo quartz pressure transducer* serta tekanan indikatif rata-rata (IMEP). Daya efektif luaran aktual dari pengujian bervariasi meskipun telah disetting pada 3 kW mengingat motor Otto merupakan sistem yang dinamis dengan parameter yang terlibat demikian banyak. Dari pengujian tersebut deviasi terbesar dari daya luaran terhadap nilai setting adalah sebesar 3,3% dengan daya efektif luaran minimum sebesar 2,97 kW dan nilai maksimum sebesar 3,11 kW.

Daya efektif luaran yang bervariasi merupakan hasil dari bervariasinya daya indikatif yang merupakan hasil proses pembakaran di dalam ruang bakar motor Otto. Nilai daya indikatif lebih besar dari daya efektif luaran, dimana selisih antara daya indikatif dan daya efektif luaran merupakan kehilangan energi karena gaya gesekan antara komponen/efisiensi mekanis.

Tekanan rata-rata indikatif bervariasi sesuai dengan bervariasinya daya indikatif dimana tekanan indikatif (imajiner) merupakan pembagian daya indikatif terhadap volume langkah dari motor Otto. Dengan demikian ada korelasi yang sangat kuat antara daya luaran efektif, daya indikatif dan tekanan rata-rata indikatif (IMEP). Daya efektif luaran merupakan parameter bebas terhadap konsentrasi etanol dalam campuran premium-etanol karena daya efektif luaran disetting pada 3 kW. Sehingga variasi dari daya indikatif dan tekanan rata-rata indikatif (IMEP) akan dipengaruhi oleh konsentrasi etanol didalam premium-etanol karena menyangkut

proses pembakaran yang meliputi: efisiensi pembakaran, efisiensi mekanis dan juga sifat-sifat dari bahan bakar seperti yang tersaji pada Tabel 4.1.



Gambar 4.18. Daya aktual, daya indikatif dan IMEP

Gambar 4.19, menunjukkan hasil perhitungan efisiensi yang terjadi pada proses pembakaran hingga menghasilkan daya luaran efektif serta tekanan indikatif (IMEP). Tekanan rata-rata indikatif (IMEP) bervariasi sangat dipengaruhi oleh pasokan bahan bakar dan efisiensi pembakaran dan kehilangan panas. Berdasarkan Gambar 4.19 a, b dan c menunjukkan bahwa penambahan etanol ke dalam premium mempunyai kecenderungan menurunkan efisiensi termal efektif dari motor uji untuk rasio udara-bahan bakar yang konstan. Sedangkan efisiensi termal efektif cenderung meningkat secara signifikan untuk campuran yang semakin miskin.

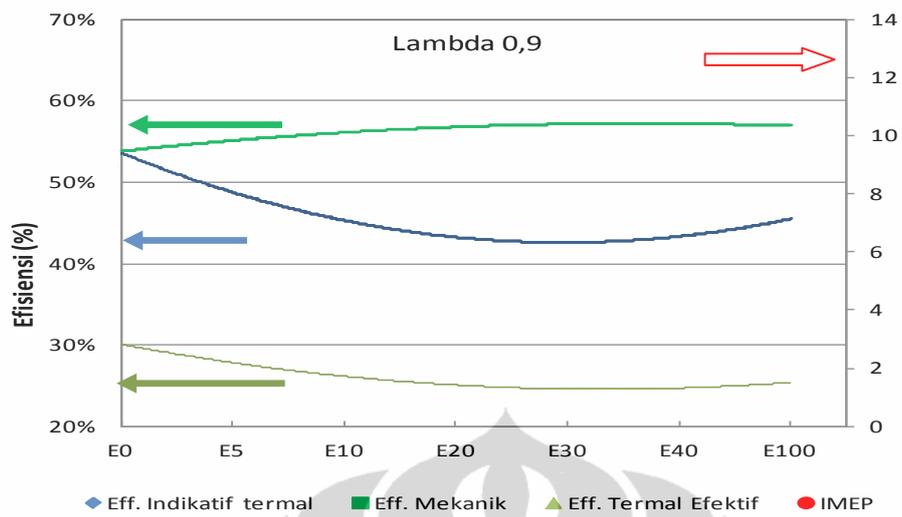
Penambahan etanol sebesar 10% basis volume akan menurunkan efisiensi termal efektif untuk lambda 0,9; 1 dan 1,1 masing-masing sebesar 3,5%; 3% dan 3,5%. Bila dirunut kebelakang, penurunan efisiensi termal efektif dipengaruhi oleh efisiensi pembakaran, kehilangan panas dan efisiensi mekanis, seperti yang disajikan dalam Gambar 4.19. Penurunan efisiensi termal efektif karena penambahan etanol lebih didominasi oleh penurunan efisiensi pembakaran dan kehilangan panas dibandingkan dengan efisiensi mekanis, bahkan ada kecenderungan adanya peningkatan efisiensi mekanis yang mampu mengkompensasi penurunan efisiensi pembakaran dan kehilangan panas yang turun cukup drastis meskipun tidak signifikan. Penurunan efisiensi pembakaran yang

cukup besar pada penambahan etanol pada premium akan memberikan efek peningkatan pasokan bahan bakar, sehingga dapat dipastikan bahwa akan terjadi kenaikan pasokan bahan bakar campuran premium-etanol dan etanol. Peningkatan pasokan campuran premium-etanol dan etanol juga disebabkan oleh menurunnya nilai kalor campuran untuk massa yang sama (Gambar 4.20).

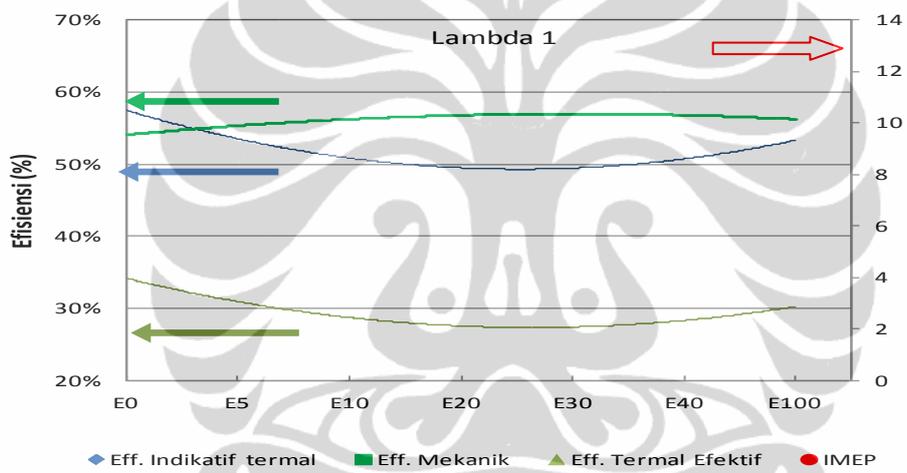
Penurunan rata-rata efisiensi pembakaran untuk masing-masing lambda 0,9; 1 dan 1,1 adalah sebesar 4,4; 1,43 dan 1,36. Hal ini menunjukkan bahwa bila lambda – rasio antara udara-bahan bakar aktual dan udara-bahan bakar stokiometri – dijaga tetap maka untuk menghasilkan daya efektif luaran yang konstan telah terjadi penurunan efisiensi pembakaran karena adanya peningkatan jumlah pasokan bahan bakar. Hal ini berbeda dengan penelitian yang banyak dilakukan oleh peneliti lain dimana udara dijaga konstan sehingga bila awal kondisi awal untuk pembakaran gasoline adalah kaya, maka dengan penambahan etanol akan terjadi pemiskinan campuran (*leaner*) sehingga pembakaran semakin baik dan efisiensi pembakaran meningkat^[8,12,13,16,17,25]. Penurunan efisiensi pembakaran yang cukup drastis pada pembakaran kaya tersebut karena kurangnya pasokan udara.

Peningkatan efisiensi mekanis karena penambahan etanol untuk masing-masing lambda 0,9; 1 dan 1,1 adalah sebesar 1,35; 0,9 dan 1,36. Dalam hal ini efisiensi mekanis lebih diatur oleh gesekan mekanis antar komponen yang utamanya ditentukan oleh kecepatan motor dan kehilangan energi panas dari ruang bakar ataupun kalor yang dihasilkan oleh proses pembakaran bahan bakar. Lambda sudah tidak dominan dan berperan langsung dalam menentukan efisiensi mekanis.

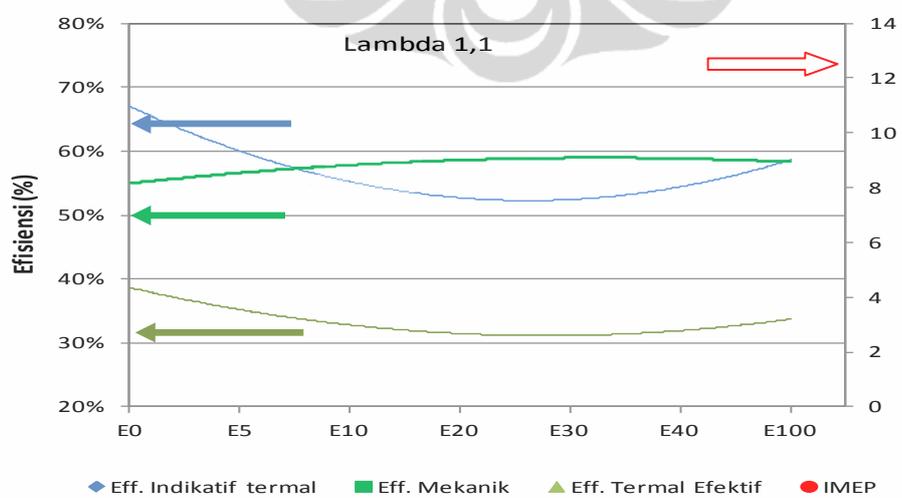
Diskusi Gambar 4.19 tersebut diatas diperlukan guna memahami bahwa dalam penelitian karakteristik pembakaran bertekanan di motor Otto berbeda dengan penelitian karakteristik pembakaran kondisi atmosferik dan kecepatan pembakaran laminer pada “*constant volume spherical combustion bomb*” dimana jumlah bahan bakar adalah tetap sedangkan pada motor Otto berbeda karena daya efektif luaran harus dijaga konstan. Jumlah pasokan bahan bakar yang berbeda antar bahan bakar tersebut akan menjadi perhatian penting pada diskusi selanjutnya.



(a) Lambda 0,9



(b) Lambda 1



(c) Lambda 1,1

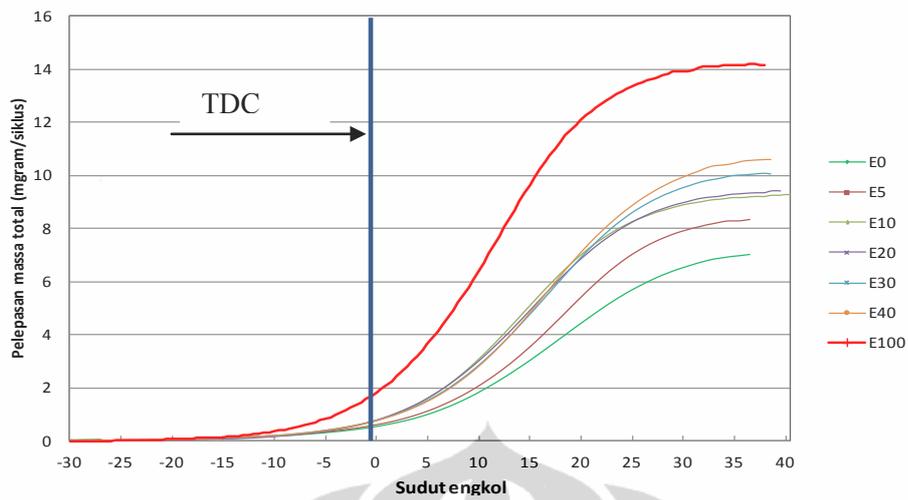
Gambar 4.19. Efisiensi dan IMEP untuk premium, etanol dan campurannya pada Lambda 0,9; 1; dan 1,1

Gambar 4.20. menunjukkan pelepasan massa total per siklus dari masing-masing bahan bakar dengan lambda 0,9; 1 dan 1,1. Pelepasan massa ataupun proses pembakaran bahan bakar awalnya berlangsung sangat lambat, yaitu proses pembakaran dimulai sejak dipercikannya api busi di sekitar sudut engkol 24-28°C_A BTDC. Kemudian terbentuk *flame kernel* yang merupakan inti api yang akan berpropagasi membakar campuran dan menjauh dari pusat api di busi. Pembakaran massa berlangsung cepat di sekitar TDC hingga mencapai sudut engkol di sekitar 40°C_A ATDC.

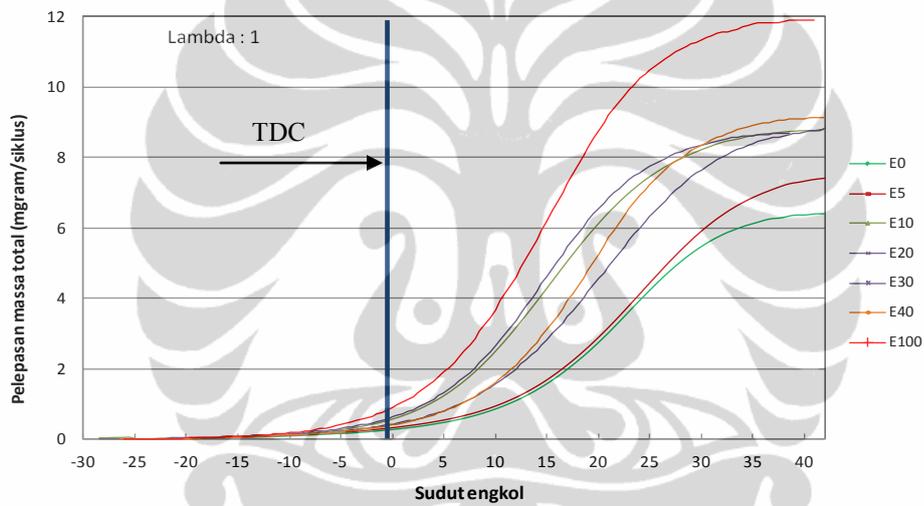
Jumlah bahan bakar yang dipasok ke silinder meningkat seiring dengan kenaikan prosentase etanol pada premium dan semakin kaya campuran. Konsumsi bahan bakar untuk lambda 0,9 (kaya) lebih besar dibandingkan dengan lambda 1 (stoikiometri) dan 1,1 (miskin) untuk jenis bahan bakar yang sama.

Penambahan pasokan campuran premium-etanol dan etanol murni dibandingkan dengan premium karena nilai kalor etanol hanya sekitar 70% dari premium, selain itu efisiensi pembakaran turun drastis (Gambar 4.19). Setiap penambahan etanol 10% basis volume pada premium akan meningkatkan kebutuhan bahan bakar masing-masing untuk lambda 0,9;1 dan 1,1 adalah sebesar 12,8; 10,8 dan 9,8. Bahkan kebutuhan etanol murni untuk menghasilkan daya efektif luaran yang sama, yaitu sebesar 3 kW meningkat dua kali lipat dibandingkan dengan premium.

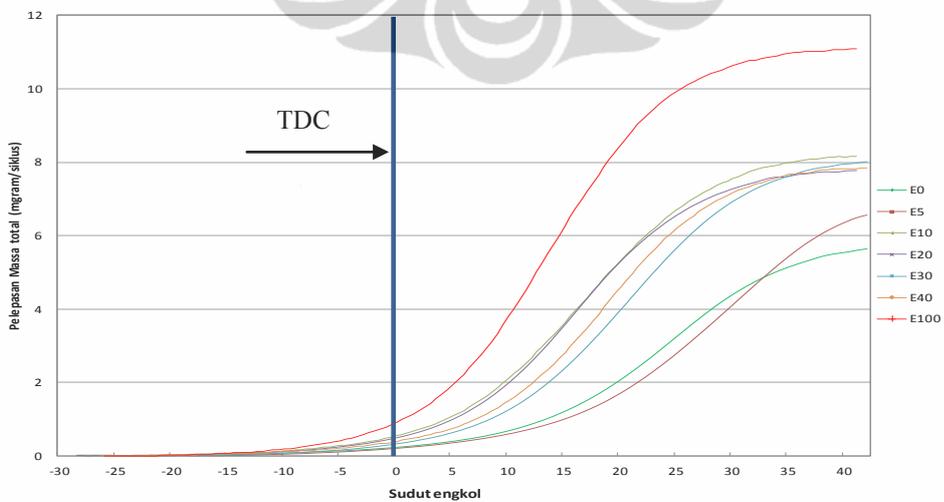
Energi yang dilepaskan per siklus per jenis bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 4.21. Pelepasan kalor akan sejalan dengan pelepasan massa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20. Menarik untuk diamati bahwa berdasarkan Gambar 4.20 terlihat bahwa meskipun pelepasan massa meningkat seiring dengan konsentrasi etanol dalam campuran tetapi pelepasan kalor justru memperlihatkan hal sebaliknya, kecuali untuk E5. Untuk E5 pelepasan kalor menunjukkan angka tertinggi dapat dijelaskan sebagai berikut, berdasarkan dari Gambar 4.18 terlihat bahwa daya efektif luaran, daya indikatif dan IMEP yang dihasilkan oleh E5 menunjukkan angka yang paling tinggi sehingga kalor yang harus dilepaskan juga lebih tinggi.



(a) Lambda 0,9



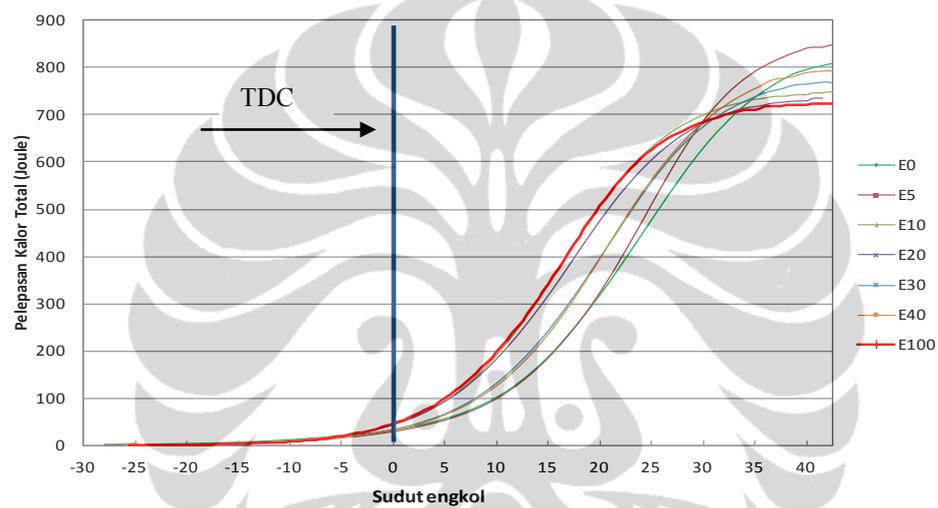
(b) Lambda 1



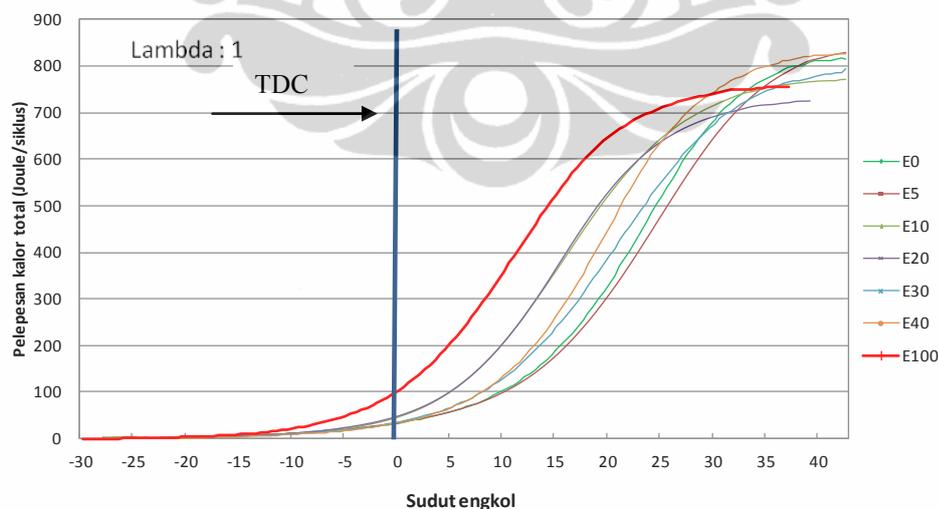
(c) Lmbda 1,1

Gambar 4.20. Pelepasan massa total untuk premium, etanol dan campurannya pada Lambda 0,9; 1 dan 1,1

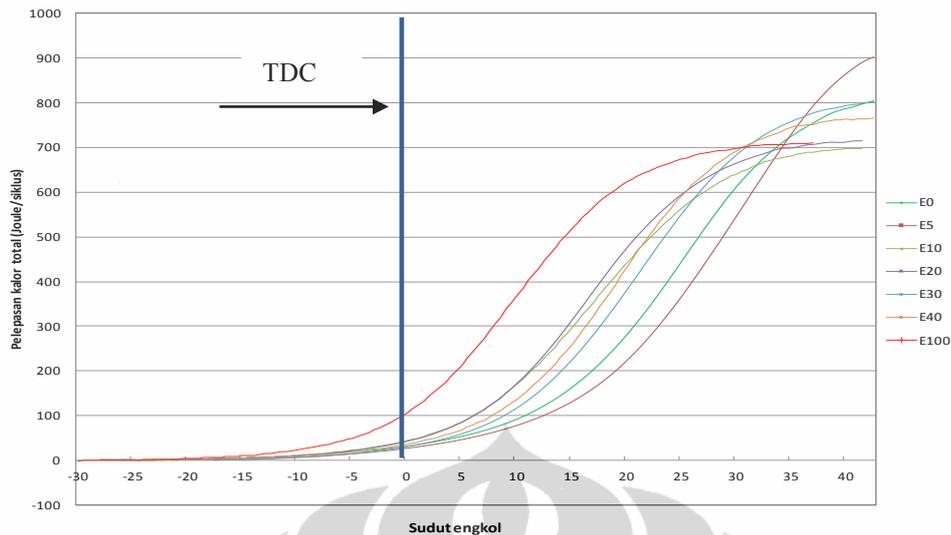
Rata-rata pelepasan kalor per siklus menurun dengan penambahan etanol dalam campuran premium-etanol untuk masing-masing lambda 9,9;1 dan 1,1 adalah sebesar 3,7; 3,4 dan 0,6. Fenomena ini mengkonfirmasi dan menguatkan grafik efisiensi mekanis pada Gambar 4.20, dimana untuk daya luaran yang hampir sama sebesar 3 kW tetapi untuk campuran premium-etanol dibutuhkan pelepasan kalor yang justru semakin kecil. Hal ini merupakan dampak dari meningkatnya efisiensi mekanis yang meningkat seiring dengan meingkatnya konsentrasi etanol.



(a) Lambda 0,9



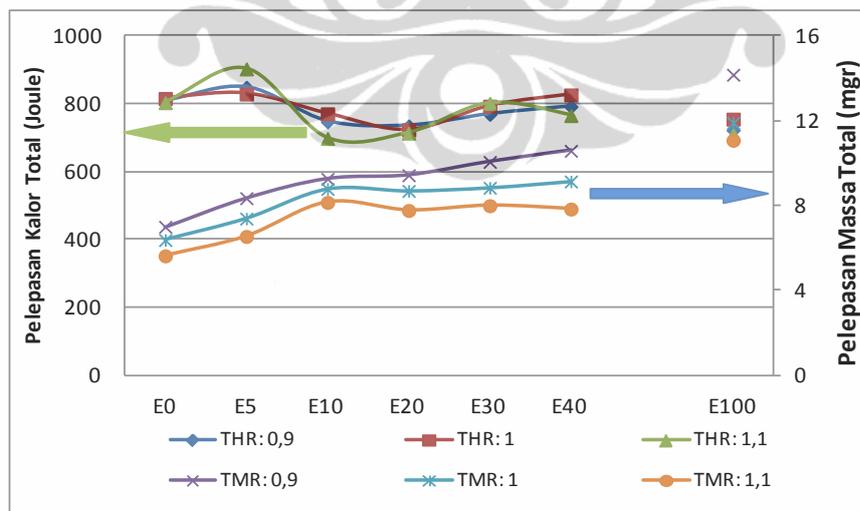
(b) Lambda 1



(c) Lambda 1,1

Gambar 4.21. Pelepasan kalor total untuk premium, etanol dan campurannya pada Lambda 0,9;1 dan 1,1

Perbandingan total pelepasan massa dan kalor tersaji pada Gambar 4.22 di bawah ini. Seperti sudah dijelaskan pada sesi sebelumnya, secara umum dapat dinyatakan bahwa pelepasan massa akan meningkat dengan penambahan konsentrasi etanol dan kekayaan campuran. Tetapi sebaliknya pelepasan kalor justru cenderung menurun dengan meningkatnya konsentrasi etanol sedangkan pengaruh lambda tidak signifikan.



Gambar 4.22. Pelepasan massa dan kalor total

Melihat kembali Gambar 4.19 yang menyajikan data-data tekanan efektif rata-rata indikatif (IMEP-*Indicative Mean Effective Pressure*) terhadap berbagai bahan bakar

dengan λ 0,9; 1 dan 1,1 terlihat bahwa IMEP berkisar antara 11,8 bar sampai dengan 12,9 bar dengan perbedaan 1,1 bar atau sekitar 9,3%.

IMEP pada dasarnya hanyalah tekanan imajiner yang tidak pernah ada didalam ruang bakar. Tekanan aktual yang terjadi di dalam ruang bakar akan berubah-ubah sejalan dengan perubahan sudut engkol. Sehingga IMEP hanya merupakan pendekatan yang merupakan tekanan rata-rata dari evolusi tekanan yang terjadi di dalam silinder (*pressure history*).

Tekanan efektif rata-rata indikatif (IMEP) ini akan digunakan untuk memprediksi kecepatan pembakaran laminar premium, etanol dan campurannya berdasarkan korelasi empiris pada pengujian *bomb/vessel* pembakaran volume konstan (*constant volume combustion vessel/bomb*). Gambar 4.23 mendeskripsikan kecepatan pembakaran laminar dari masing-masing bahan bakar pada kondisi awal dengan $T = 350\text{K}$ dan $P = 100\text{ kPa}$ dan bertekanan di ruang bakar motor Otto sesuai dengan tekanan rata-rata indikatif (IMEP) - (Gambar 4.19). Kecepatan pembakaran laminar pada bomb pembakaran hanya dipengaruhi oleh λ , temperatur dan tekanan. Pada temperatur dan tekanan yang sama, kecepatan akan mencapai maksimum pada kisaran λ 0,9 - 0,93 (kaya) dan tidak tergantung pada jenis bahan bakar^[27] - meskipun di beberapa penelitian masih ditemukan λ yang berbeda-beda.

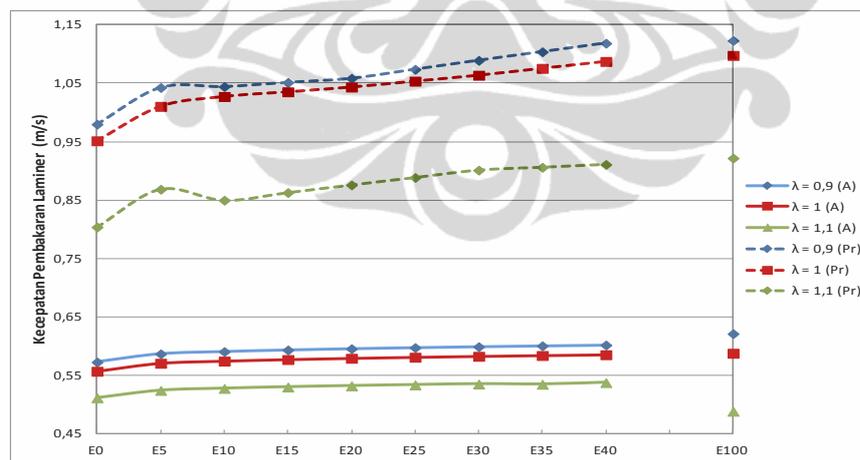
Kalau diamati pada Gambar 2.3, hasil yang didapat oleh Gulder berbeda dengan Broustail, utamanya pada λ yang lebih besar dari 1,1 (miskin) yang mana kecepatan pembakaran laminar turun secara drastis di bawah premium dan campuran etanol-premium. Sedangkan berdasarkan grafik yang didapat dari Broustail^[28], penambahan etanol pada *gasoline* akan menaikkan kecepatan pembakaran secara proporsional.

Korelasi IMEP (Gambar 4.19) di dalam ruang bakar terhadap kecepatan pembakaran laminar tersaji pada Gambar 4.23. Dengan pers. (6) - korelasi Gulder - didapatkan bahwa kecepatan pembakaran laminar meningkat sejalan dan proporsional dengan penambahan volume etanol, kecuali pada E5 dimana terjadi peningkatan yang melonjak secara signifikan karena besaran IMEP juga tertinggi.

E5 mempunyai kecepatan pembakaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan E10 sampai dengan E100 karena IMEP yang terjadi di silinder ruang bakar motor Otto pada E5 memang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya (Gambar 4.19).

Prediksi kecepatan pembakaran laminer ini akan digunakan sebagai pembanding dan rujukan dalam membahas fenomena proses pembakaran dan karakterisasi pembakaran bertekanan di motor Otto. Tentu saja ada beberapa hal yang berbeda kondisi antara pembakaran di *constant volume combustion bomb* dengan di ruang bakar motor Otto. Pada penelitian yang terkondisikan seperti yang terjadi pada *constant volume combustion bomb*, parameter penting dapat dikendalikan hampir secara sempurna, seperti pengaturan temperatur, rasio udara-bahan bakar, homogenitas pencampuran udara-bahan bakar serta terbebasnya kontaminasi dengan senyawa lain. Sebaliknya kondisi di ruang bakar motor Otto parameter tersebut sangat sulit untuk dipastikan kondisinya karena mekanisme motor yang selalu dinamis.

Penambahan etanol setiap 10% basis volume secara rata-rata akan menaikkan kecepatan pembakaran laminer sebesar 3,5% untuk semua lambda, yaitu: 0,9; 1 dan 1,1.



Gambar 4.23. Prediksi kecepatan Pembakaran Laminar kondisi STP dan bertekanan di ruang bakar Motor Otto

Proses pembakaran di ruang bakar motor Otto sangat kompleks bila dibandingkan dengan pembakaran kondisi atmosferik (*pool fire*) dan pembakaran pada volume konstan pada bomb pembakaran. Pada pembakaran kondisi atmosferik, terjadi pada waktu yang relatif sangat lama dalam kisaran ratusan detik sedangkan pada

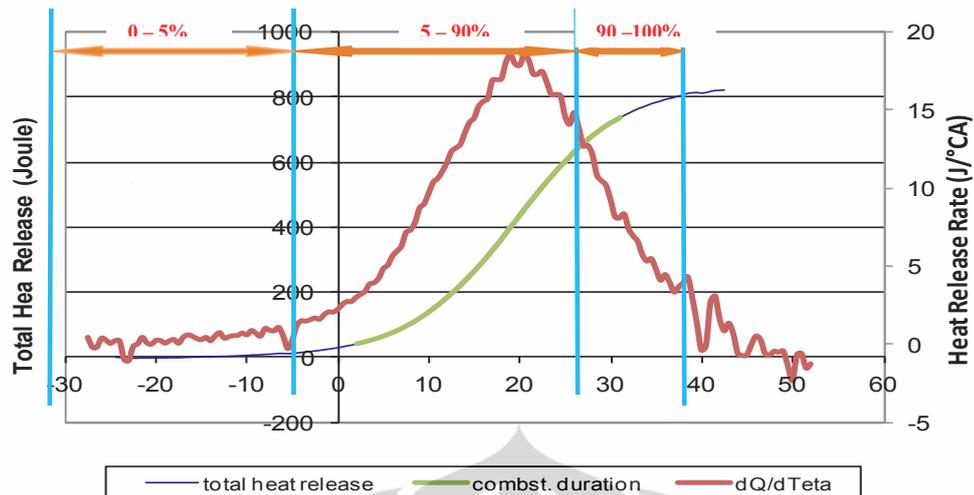
pembakaran pada volume konstan, pembakaran telah dikondisikan dengan pencampuran yang homogen dengan kehilangan panas yang dapat dikendalikan.

Sedangkan pembakaran pada motor Otto sangatlah banyak parameter yang terlibat dan sangat kompleks, kondisi dan parameter yang terjadi pada motor Otto antara lain, adalah: waktu pembakaran yang sangat singkat dalam kisaran kuang dari 10 mikro-detik, sifat-sifat bahan bakar, waktu penyalaan, rasio udara bahan bakar aktual dan teoritis (λ), tercampurnya gas sisa pembakaran, kecepatan dan beban motor serta kompresi rasio.

Kecepatan pembakaran laminar memainkan peranan yang penting berkaitan dengan: (1) *ignition delay* yang mempengaruhi pemajuan percikan api busi (*advanced*) dan variasi siklus, (2) energi minimum untuk membakar campuran udara-bahan bakar dan (3) kisaran rasio udara-bahan bakar yang diijinkan sehingga motor dapat beroperasi stabil^[61].

Pengolahan data tekanan – dengan *piezo-quartz pressure transducer* – dan hasil pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar motor Otto yang penggambarannya disajikan dalam diagram sudut engkol (CA) dan pelepasan kalor total dan laju pelepasan kalor dapat dilihat pada Gambar 4.24. Proses pembakaran dapat dibagi dalam beberapa tahapan, yaitu tahap pertama adalah tahap pengembangan api ($\Delta\theta_d$), yaitu suatu tahap awal dari proses pembakaran yang berupa pengembangan api (*flame kernel*). Tahap ini bermula dari percikan api busi sampai dengan bahan bakar melepaskan panas sekitar 5% (ada beberapa penulis/peneliti menggunakan patokan 10% atau 1%)^[29]. Tahap ini bisa dinyatakan sebagai *ignition delay* tetapi banyak peneliti lebih tepat menyebutnya sebagai pengembangan *flame kernel*.

Tahap kedua adalah tahap pembakaran cepat, yaitu suatu tahap yang dimulai akhir dari tahap pengembangan api sampai dengan proses pelepasan panas sampai mencapai 90 atau 95%% ($\Delta\theta_b$). Sedangkan sudut pembakaran total didefinisikan sebagai jumlah sudut engkol/*crank* mulai dari percikan bunga api busi sampai dengan akhir tahapan pembakaran cepat ($\Delta\theta_d + \Delta\theta_b$)^[29].



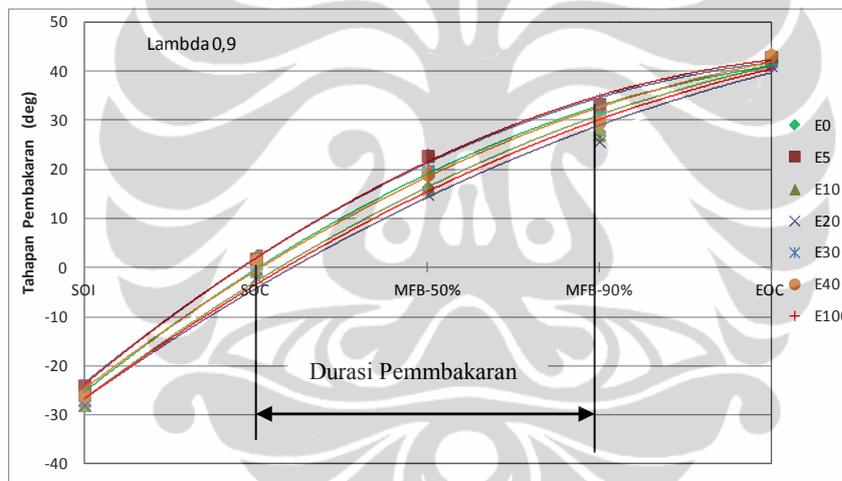
Gambar 4.24. Kurva pelepasan kalor total dan laju pelepasan kalor

Gambar 4.25, memberikan deskripsi durasi setiap tahap dari proses pembakaran dalam ukuran sudut engkol untuk λ 0,9; 1 dan 1,1. Waktu penyalaan (*ignition delay*) adalah waktu yang diperlukan mulai dari percikan api busi sampai dengan terjadinya pelepasan kalor 5% (*Start of Ignition –SOI*). *Ignition delay* dari premium sebesar $26,3^\circ$ CA sedangkan *ignition delay* campuran premium –etanol dan etanol murni yang sebesar antara $25,8 - 27,8^\circ$ CA. *Ignition delay* dari bahan bakar tersebut tidak berbeda secara signifikan karena pada dasarnya awal waktu penyalaan (*ignition timing*) sudah dilakukan penyesuaian dengan MBT. Oleh beberapa peneliti, dalam motor Otto istilah *flame kernel* lebih tepat digunakan dari pada *ignition delay*

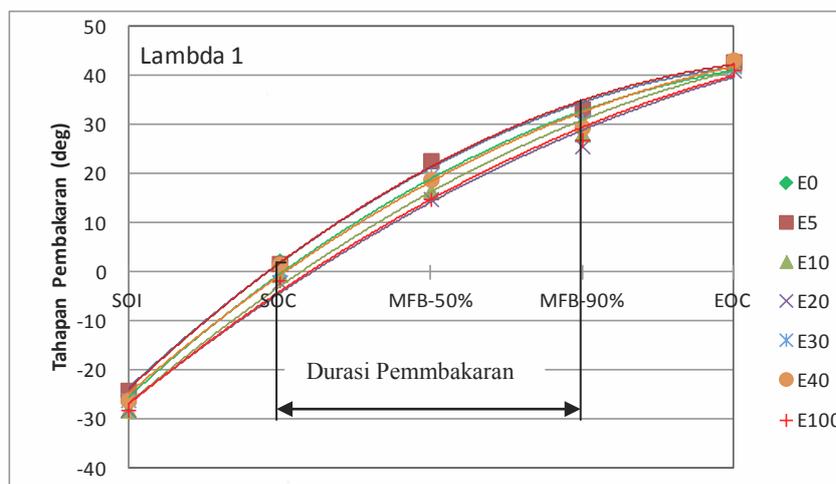
Secara rata-rata durasi pembakaran cepat (antara THR (*Total Heat Release*) 5% - THR 90%) berkisar antara $41 - 44,6^\circ$ CA. Dan Durasi pembakaran total berkisar antara $66,8 - 72,3^\circ$ CA.

Pada awal pengembangan api (0-5%) pengaruh etanol sangat kecil sedangkan pada pembakaran cepat (5-90%) etanol pengaruh terhadap kecepatan pembakaran. Pada tahap awal pembakaran dipengaruhi oleh tingkat keadaan campuran, komposisi dan gerakan campuran di celah busi sedangkan pada pembakaran cepat dipengaruhi oleh secara menyeluruh kondisi ruang bakar, dalam hal ini pengaruh produk antara *aldehydes* yang sangat reaktif lebih dominan dibandingkan kecepatan perambatan api. Hal yang sama juga didapat oleh Schifter et.al.^[62].

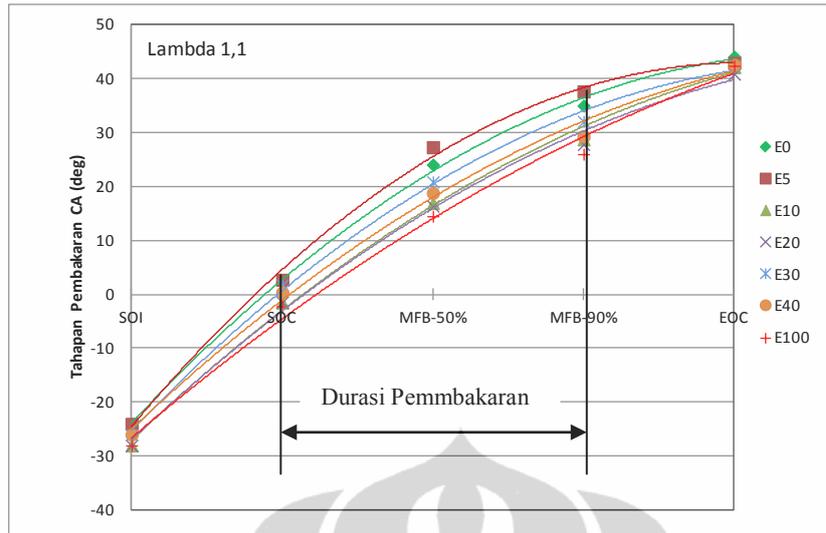
Dari Gambar 4.25, dapat diamati bahwa awal percikan api dilakukan pada saat yang optimum, yaitu kondisi MBT dan dengan akhir pembakaran terjadi pada sudut engkol yang juga hampir bersamaan, yaitu di sekitar 40° ATDC. Perbedaan dapat diamati pada proses pembakaran mulai dari SOC (MFB = 5%) sampai dengan MFB 90%. Semakin miskin campuran maka semakin dibutuhkan sudut engkol yang lebih besar atau pada campuran semakin miskin maka pembakaran semakin lambat – masih sejalan dengan banyak penelitian. Durasi pembakaran dapat diamati dari MFB-50% (*Mass Fraction Burn* sebesar 50%), dimana banyak peneliti menjadikan sebagai pedoman lokasi tekanan maksimum terjadi di dalam ruang bakar motor Otto. Dalam Gambar 4.25 dapat diamati bahwa semakin miskin campuran maka posisi MFB-50% kan bergeser kebelakang atau kecenderungan melambatnya kecepatan pembakaran.



a) Tahapan pembakaran untuk Lambda 0,9



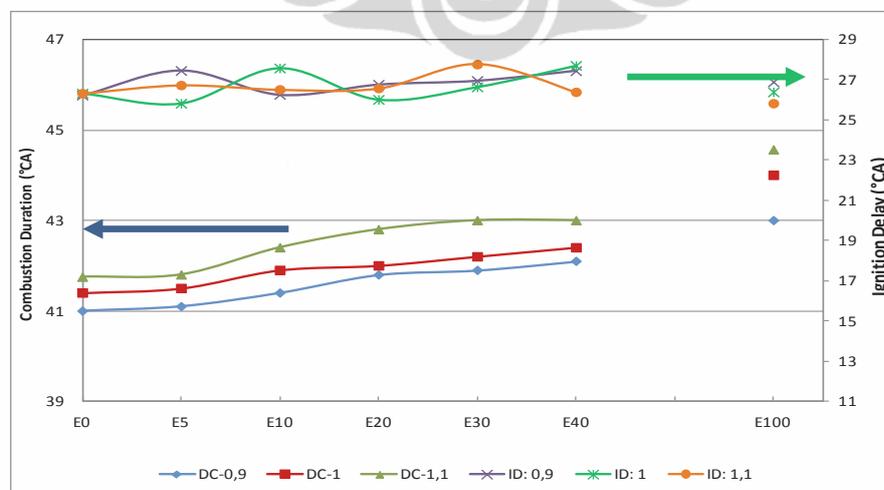
b) Tahapan Pembakaran untuk Lambda 1



c) Tahapan Pembakaran untuk Lambda 1,1

Gambar 4.25. Tahapan proses pembakaran untuk Lambda 0,9; 1 dan 1,1.

Gambar 4.26 mempresentasikan nilai *ignition delay* dan durasi pembakaran untuk semua jenis bahan bakar dengan lambda 0,9; 1 dan 1,1. Secara umum *ignition delay* tidak menunjukkan perbedaan sudut engkol yang dibutuhkan untuk *flame kernel* secara signifikan baik untuk premium, campuran premium-etanol dan etanol murni. Sedangkan durasi pembakaran akan semakin lama dengan meningkatnya konsentrasi etanol dan semakin miskinnya campuran. Durasi pembakaran secara umum berkisar antara 41 – 44,6° sudut engkol untuk semua jenis bahan bakar dan tingkat kekayaan campuran yang berbeda ($\lambda = 0,9; 1$ dan $1,1$).



Gambar 4.26. Durasi pembakaran bahan bakar di ruang bakar motor Otto

Gambar 4.27 menunjukkan grafik dari laju pelepasan massa dan kalor untuk berbagai jenis bahan bakar pada λ 0,9; 1 dan 1,1. Laju pelepasan massa meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi etanol dalam premium maupun etanol murni. Peningkatan laju pelepasan massa adalah merupakan perbandingan antara total pelepasan massa dengan durasi pembakaran. Mengingat pelepasan massa total meningkat cukup drastis dengan penambahan etanol sedangkan durasi pembakaran naik sedikit sehingga hasil akhir akan terjadi peningkatan laju pelepasan massa yang signifikan.

Laju pelepasan massa premium adalah sebesar $0,15 \text{ mgr}/^\circ\text{CA}$ dan akan meningkat seiring dengan penambahan etanol dalam premium. Setiap penambahan 10% (v/v) – sampai dengan 40% - akan meningkatkan laju pelepasan untuk massa masing-masing λ sebesar 0,9; 1 dan 1,1 adalah 11,7%, 9,9% dan 8,7%. Bila dibandingkan hasil prediksi kecepatan pembakaran laminar, yang mana peningkatan kecepatan pembakaran laminar hanya sebesar 3,5% untuk semua λ . Sehingga dengan kata lain dapat dinyatakan bahwa kecepatan pembakaran massa meningkat 3 kali lipat dibandingkan dengan prediksi dengan menggunakan pendekatan *constant volume spherical combustion bomb*.

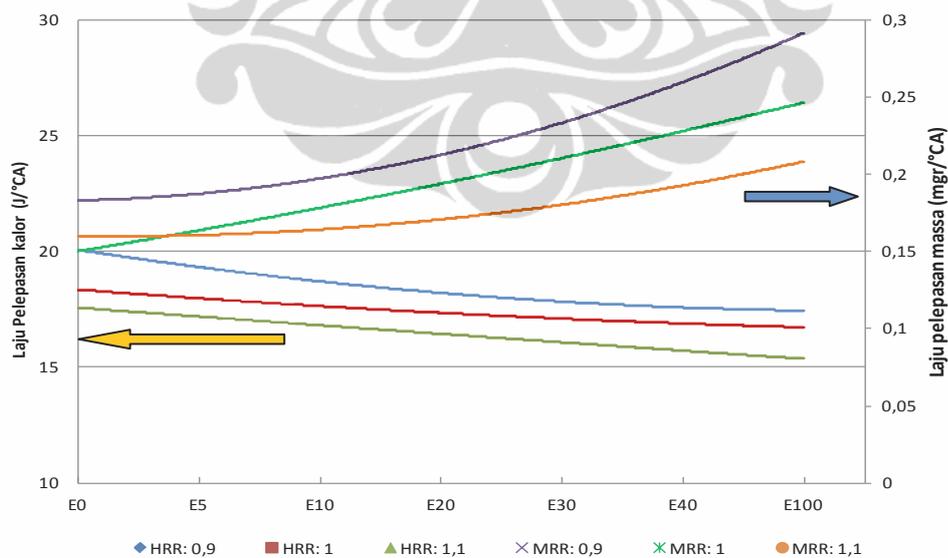
Sedangkan untuk etanol murni peningkatan laju pelepasan massa masing-masing untuk λ sebesar 0,9; 1 dan 1,1 adalah 93%, 75% dan 84%.

Sebaliknya laju pelepasan kalor menurun seiring dengan penambahan etanol dalam premium. Hal ini sama seperti pada pembahasan pelepasan kalor total, dimana pelepasan kalor total terjadi penurunan dan dilain pihak terjadi kenaikan durasi pembakaran. Laju pelepasan kalor untuk premium rata-rata sebesar $20 \text{ Joule}/^\circ\text{CA}$ sedangkan untuk penambahan etanol sebesar 10% (v/v) menurun rata-rata sebesar sekitar $1 \text{ Joule}/^\circ\text{CA}$.

Karakteristik pembakaran, khususnya untuk laju pelepasan massa untuk kondisi atmosferik menunjukkan fenomena yang berbeda dibandingkan untuk kondisi bertekanan. Laju pelepasan massa pada kondisi atmosferik menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan penambahan etanol dan sebaliknya untuk laju pelepasan massa bertekanan di motor Otto. Dengan jumlah massa yang sama, laju pelepasan massa kondisi atmosferik menurun seiring dengan peningkatan

konsentrasi etanol dalam premium maupun etanol murni. Sebaliknya laju pelepasan massa kondisi bertekanan di motor Otto menunjukkan peningkatan seiring dengan kenaikan konsentrasi etanol pada premium ataupun etanol murni. Sedangkan laju pelepasan kalor baik kondisi atmosferik maupun bertekanan menurun seiring dengan penambahan etanol pada premium maupun etanol murni.

Peningkatan laju pelepasan massa bertekanan di motor Otto terjadi karena sesuai dengan pers. (3) menunjukkan bahwa kecepatan pembakaran laminar akan meningkat secara eksponensial terhadap kenaikan temperatur dan tekanan. Alasan yang kedua adalah pembakaran pada kondisi bertekanan yang terjadi di ruang tertutup, hasil reaksi antara yang merupakan hasil dari pembakaran berantai yang berupa *aldehydes* dapat mempercepat proses oksidasi dan reaksi hidrokarbon. Menurut investigasi dari Salooja^[63], *aldehydes* dipercaya dapat mempercepat proses oksidasi dan merupakan suatu senyawa yang sangat reaktif dan sangat membantu dalam reaksi berantai pada pembakaran hidrokarbon. Sedangkan pada pembakaran yang terbuka hasil pembakaran antara yang berupa *aldehydes* tidak efektif untuk berperan sebagai pemercepat reaksi dan membantu meningkatkan reaksi berantai pembakaran berikutnya karena cenderung lepas ke atmosfer.



Gambar 4.27. Laju Pelepasan Kalor vs sudut engkol untuk Lambda 0,9; 1 dan 1,1

4.3.2 Kestabilan Pembakaran

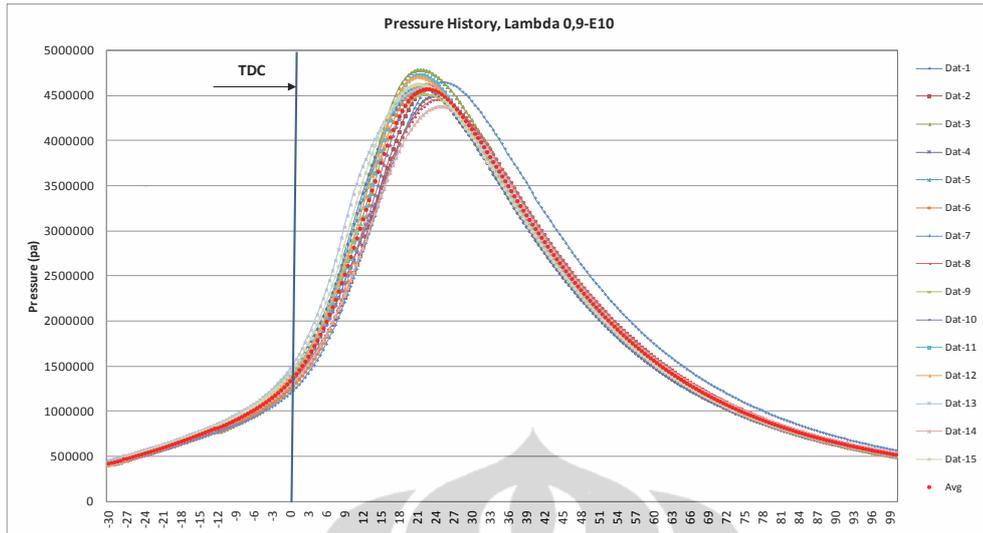
Kestabilan pembakaran merupakan salah satu hal terpenting di dalam melakukan analisa dan karakterisasi proses pembakaran di dalam motor Otto. Sudah jamak diketahui bahwa salah satu kekurangan dari karakteristik motor Otto adalah variasi/perbedaan siklus per siklus yang cukup tinggi. Variasi dari siklus per siklus ini akan mengakibatkan operasional motor menjadi kurang halus sehingga dalam praktek toleransi yang diijinkan adalah kurang dari 10%^[29].

Variasi siklus per siklus yang terjadi pada motor Otto sangat dipengaruhi oleh antara lain: sifat-sifat jenis bahan bakar, komposisi campuran yang dekat dengan busi, homogenitas campuran, pengapian dan sisa gas buang^[29].

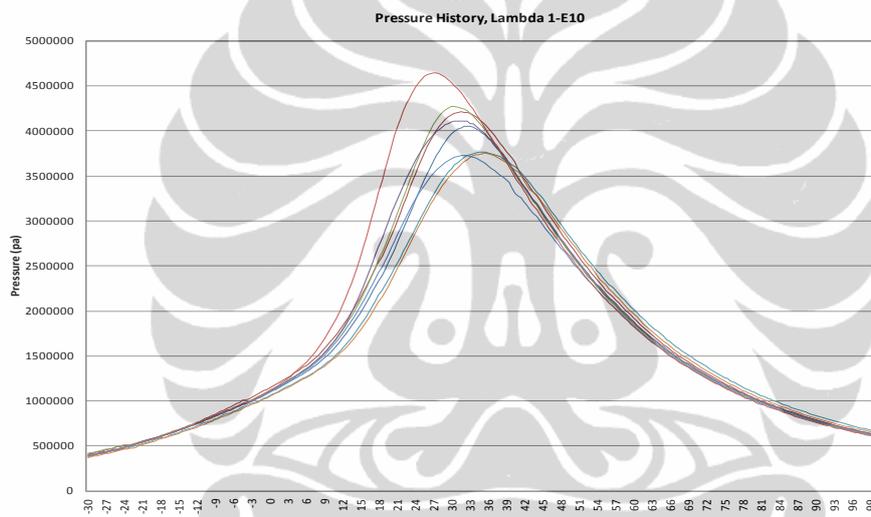
Gambar 4.28 merupakan potongan dari visual variasi siklus dan hanya diambil pada bagian sekitar tekanan puncak siklus dari proses pembakaran di dalam silinder ruang bakar motor Otto. Terlihat bahwa ada variasi yang cukup signifikan antar siklus yang terekam oleh *pressure transducer* dari 15 siklus yang disajikan. Sedangkan *pressure history* dan variasi siklus secara lengkap dalam satu siklus dari E10 untuk masing-masing lambda 0,9; 1 dan 1,1 tersaji pada Lampiran VII sampai dengan IX.

Gambar 4.28, menunjukkan gambaran visual dari variasi siklus untuk semua jenis bahan bakar E10 pada lambda 0,9, 1 dan 1,1. Variasi siklus yang dihitung berdasarkan deviasi variasi siklus atau COV_{IMEP} memberikan informasi seberapa bervariasinya siklus per siklus yang dihasilkan dari proses pembakaran di motor Otto. Semakin besar COV_{IMEP} menandakan semakin bervariasinya siklus dan pada tingkat tertentu (kesepakatan peneliti: diatas 10%) akan menimbulkan masalah dalam operasional motor.

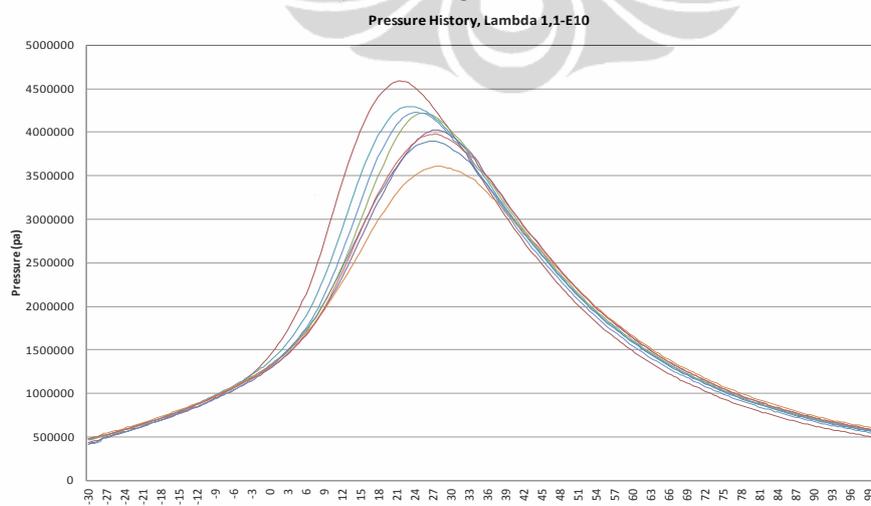
Secara visual terlihat bahwa untuk jenis bahan bakar tertentu, semakin miskin suatu campuran maka akan menghasilkan variasi siklus yang semakin besar. Bila campuran semakin bertambah miskin maka variasi siklus juga semakin meningkat dan akan mengganggu stabilitas operasional motor, bahkan bisa terjadi *misfire* atau motor mati.



a). E10 dengan Lambda 0,9



b) E10 dengan Lambda 1

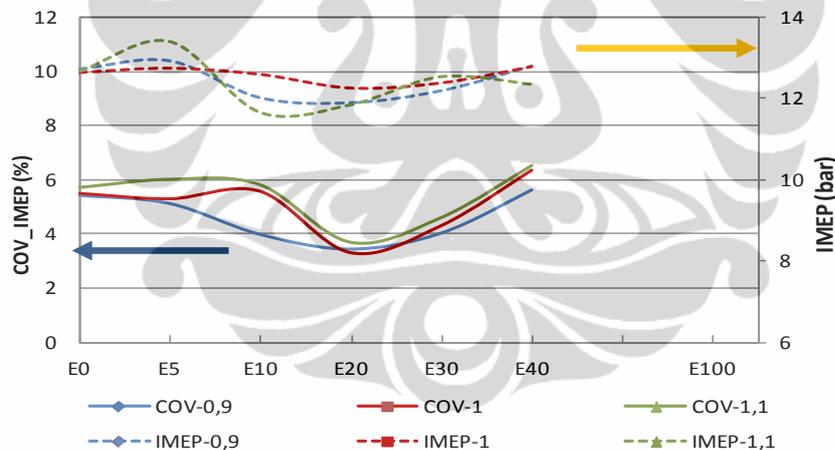


c) E10 dengan Lambda 1,1

Gambar 4.28. Tekanan puncak dari E10 untuk lambda 0,9; 1 dan 1,1 – (potongan dari siklus lengkap)

Gambar 4.29 menunjukkan besaran COV_{IMEP} dari semua jenis bahan bakar: premium, campuran premium-etanol dan etanol murni untuk lambda 0,9; 1 dan 1,1 yang dihitung berdasarkan pers. 23.

Rata-rata COV_{IMEP} untuk semua bahan bakar pada lambda 0,9; 1 dan 1,1 masih dibawah nilai 10% dan capain COV_{IMEP} berkisar antara 3,3 – 6,4%, dengan E-20 mempunyai nilai yang relatif paling rendah. Konsistensi hubungan antara durasi pembakaran yang meningkat dengan variasi siklus yang meningkat dan kecepatan pembakaran yang menurun tidak didapatkan – seperti yang banyak dinyatakan oleh beberapa peneliti. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada banyak penelitian seringkali jumlah massa atau pasokan bahan bakar dijaga konstan sehingga secara logis maka bila durasi pembakaran meningkat dan massa konstan akan mengakibatkan menurunnya laju pelepasan massa bila ini terjadi maka nilai COV_{IMEP} akan cenderung menurun.

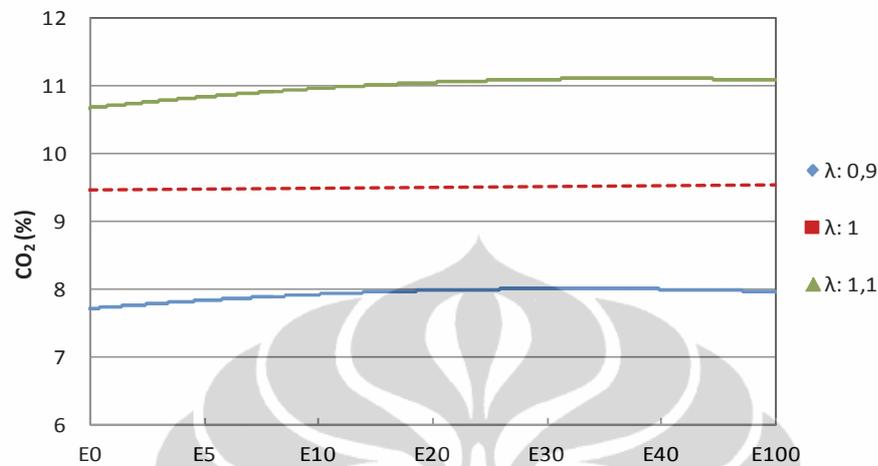


Gambar 4.29. COV_{IMEP} vs Jenis bahan bakar

4.3.3 Emisi Gas Buang

Gambar 4.30 menunjukkan hubungan antara jenis bahan bakar dengan produksi CO_2 . Produksi CO_2 secara signifikan dipengaruhi oleh tingkat kekayaan dari campuran udara-bahan bakar dan sedikit dipengaruhi oleh konsentrasi etanol dalam premium maupun etanol murni. CO_2 yang merupakan hasil pembakaran sempurna dari karbon, maka jumlah yang dihasilkan pasti tergantung pada ketersediaan oksigen/udara dalam proses pembakaran dan jumlah C didalam bahan bakar.

Peningkatan CO₂ yang merupakan hasil pembakaran bahan bakar campuran premium-etanol, rata-rata untuk masing-masing lambda 0,9; 1 dan 1,1 adalah 3,3%, 1,4% dan 4,4%.



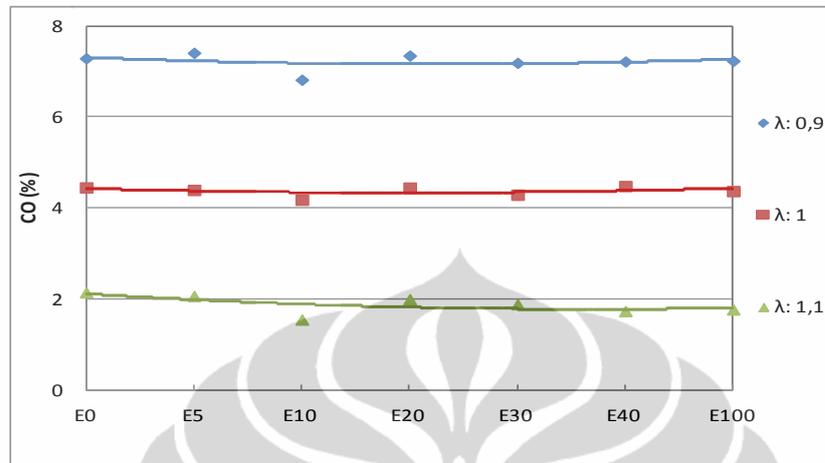
Gambar 4.30. Emisi CO₂ vs jenis bahan bakar

Emisi CO merupakan polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran hidrokarbon yang tidak sempurna, yang dapat disebabkan oleh tidak tersedianya oksigen yang dapat diikat oleh karbon dan/atau tidak cukup waktunya karbon untuk beroksidasi. Emisi CO yang dihasilkan dari premium dan campuran premium-etanol tersaji pada Gambar 4.31. Pada dasarnya emisi CO dan CO₂ saling terkait, dan mempunyai kecenderungan berbalik. Bila terjadi peningkatan CO₂ maka dapat dipastikan akan terjadi penurunan CO dan sebaliknya, selama kondisi operasional motor dijaga konstan.

Penurunan CO dapat dikontribusi oleh 2 hal: (1) jumlah atom C didalam bahan bakar sendiri menurun – etanol mengandung C yang lebih kecil dan (2) dengan adanya molekul oksigenat dalam etanol akan membantu menyempurnakan pembakaran sehingga CO akan juga berkurang. Penambahan etanol pada premium menurunkan kadar CO berkisar antara 1,2 – 14,5% .

Rata-rata penurunan CO karena penambahan etanol pada premium (E-5 sampai dengan E40) adalah masing-masing sebesar 1,2 , 2,0 dan 14,4 untuk λ = 0,9. 1,0 dan 1,1. Pengaruh kekayaan campuran lebih berperan dominan untuk menurunkan CO dibandingkan dengan penambahan etanol, dimana penambahan udara pembakaran lebih besar dibandingkan dengan ketersediaan molekul oksigenat yang

terkandung pada etanol. Penurunan CO yang kecil (kurang dari 15%) juga didapat oleh beberapa peneliti pendahulu^[16,51,52], bahkan Topgul^[15] mendapatkan kandungan CO yang meningkat dengan penambahan CO₂.

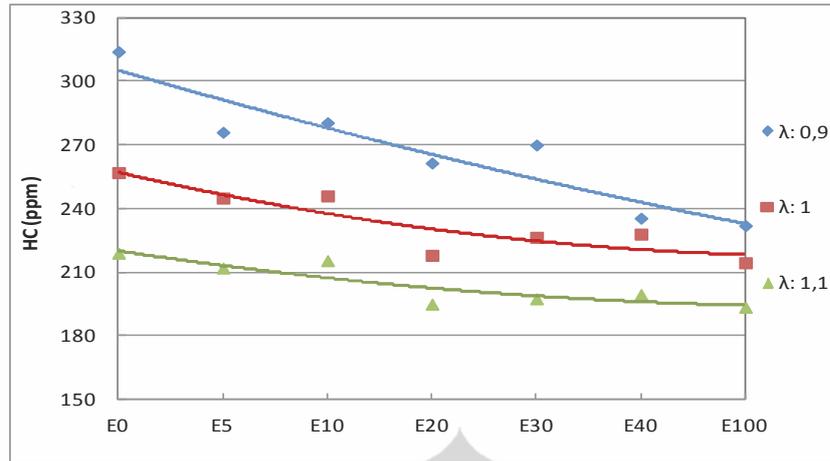


Gambar 4.31. Emisi CO vs Jenis bahan bakar

Emisi polutan lainnya yang dapat dihasilkan dari proses pembakaran hidrokarbon adalah HC/UHC (*unburned hydrocarbon*). Timbulnya emisi HC karena tidak terbakarnya kandungan hidrokarbon yang ada pada bahan bakar yang disebabkan oleh beberapa hal antara lain, yaitu: terjadinya kekurangan oksigen di dalam ruang bakar dan temperatur ruang bakar yang rendah. Jumlah HC yang dihasilkan karena ketidaksempurnaan pembakaran lebih didominasi oleh kondisi temperatur di ruang bakar. Semakin rendah temperatur di dalam ruang bakar akan menyebabkan semakin tingginya polutan HC yang dihasilkan dan sebaliknya. Hal ini terlihat sejalan dengan hasil pengukuran temperatur gas buang (Gambar 4.33).

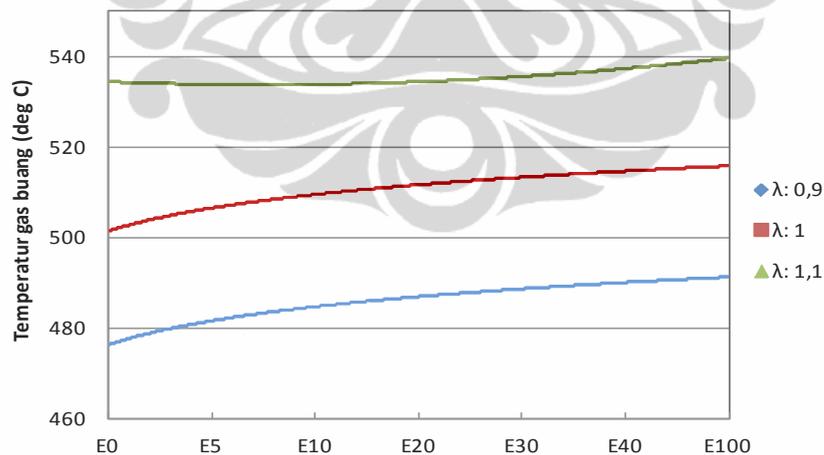
Penurunan emisi HC dikontribusi oleh kenaikan kandungan etanol dalam premium dan kenaikan rasio udara-bahan bakar aktual dan teoritis (λ). Tetapi penurunan HC akan sangat berpengaruh pada pengaruh λ yang kaya dibandingkan pada λ yang miskin.

Rata-rata penurunan HC karena penambahan etanol pada premium (E-5 sampai dengan E40) adalah masing-masing sebesar 17,4; 10,6 dan 7,7 untuk masing-masing $\lambda = 0,9, 1,0$ dan $1,1$. Hal yang sama juga didapat pada hampir semua peneliti terdahulu, dimana penurunan HC lebih besar dibandingkan dengan CO^[15,16,51,52]



Gambar 4.32. Emisi HC vs Jenis bahan bakar

Gambar 4.33, menunjukkan evolusi perubahan temperatur gas buang. Temperatur gas buang cenderung meningkat dengan meningkatnya kandungan udara pembakaran dan penambahan etanol dalam premium. Kenaikkan temperatur gas buang ini bisa diakibatkan oleh durasi pembakaran yang lebih panjang (Gambar 4.19 dan 4.26) serta menurunnya efisiensi termal efektif, dimana keterlambatan dalam proses pembakaran bahan bakar akan membuat terlambat pula mengkonversikan panas untuk dijadikan energi mekanik gerakan poros engkol.



Gambar 4.33. Temperatur gas buang

BAB 5

KESIMPULAN

1. *Regular Unleaded Indonesia Gasoline* (Premium) mempunyai kualitas yang lebih rendah dibandingkan dengan *gasoline* yang secara ekonomis/komersial digunakan beberapa negara, dengan RON rendah: 88, nilai kalor sekitar 29 MJ/l atau hanya 9-13,5% lebih rendah.
2. Penambahan etanol pada premium merubah sifat-sifat campurannya secara signifikan dan akan mempengaruhi karakteristik pembakaran, utamanya, yaitu: RVP, angka oktan riset (RON), kalor penguapan, temperatur distilasi, dan nilai kalor.
 - a. Efek azeotropika tertinggi tercapai pada penambahan etanol sebanyak 5% (v/v) pada premium dengan nilai sebesar 71,4 kPa atau naik sebesar 11,3% dibandingkan premium.
 - b. Secara rata-rata, setiap penambahan 10% etanol kering kedalam premium akan meningkatkan angka oktana riset (RON) campuran sebesar 3,8 poin.
 - c. Penambahan 10% (v/v) etanol pada premium akan menurunkan nilai kalor rata-rata sebesar 2,8% dan meningkatkan kalor penguapan sebesar hampir 20%.
3. Karakteristik pembakaran premium, etanol dan campurannya pada kondisi atmosferik di Kalorimeter Api dikendalikan oleh sifat-sifat bahan bakar, yang meliputi: RVP, kalor penguapan dan konsentrasi etanol pada premium.
4. Penambahan etanol pada premium merubah karakteristik pembakaran kondisi atmosferik yang meliputi laju pelepasan massa dan kalor dan efisiensi pembakaran.
 - a. Laju pelepasan massa untuk premium dan etanol masing-masing sebesar 71,5 mgr/sekondan 44 mgr/sekond. Dan setiap penambahan etanol 10 % basis volume pada premium akan menurunkan laju pelepasan massa sebesar rata-rata 5,8%.
 - b. Laju pelepasan kalor untuk premium dan etanol masing-masing sebesar 688 Cal/sekond dan hanya 278 Cal/sekond. Dan setiap penambahan etanol 10 %

basis volume pada premium akan menurunkan laju pelepasan kalor sebesar rata-rata 8,4%.

5. Karakteristik pembakaran bertekanan di Motor Otto melibatkan banyak parameter yang lebih kompleks dan dikendalikan oleh beberapa parameter, yaitu sifat-sifat bahan bakar (RVP, kalor penguapan, nilai kalor dan RON), konsentrasi etanol pada premium, dan operasional motor (waktu penyalaan dan kekayaan campuran).
6. Pengaruh etanol pada premium terhadap karakteristik pembakaran bertekanan di Motor Otto dengan kondisi operasional motor yang umum/harian: daya efektif luaran: 3 kW (WOT-*Widely Open Throttle*), putaran: 4000 rpm dan MBT, adalah sebagai berikut:
 - a. Penambahan etanol 10% basis volume pada premium menaikkan RON dengan rata-rata sebesar 3,8 poin yang merubah MBT (*Minimum Advanced for the Best Torque*) ke arah pemajuan pengapian, dari 24° BTDC menjadi maksimum 28° BTDC.
 - b. Penambahan etanol pada premium tidak merubah *ignition delay* secara signifikan, dimana dalam kisaran 26-27°C.
 - c. Durasi pembakaran meningkat dengan penambahan etanol pada premium dan semakin miskinnya campuran. Durasi pembakaran berkisar antara 41 - 45°C.
 - d. Penambahan etanol 10% (v/v) pada premium akan menaikkan pasokan bahan bakar sebesar rata-rata 12,8% dibandingkan premium murni, padahal penurunan kalor hanya sebesar 2,5% saja.
 - e. Laju pelepasan massa meningkat dengan penambahan etanol pada premium, dimana penambahan etanol 10% (v/v) meningkat sebesar antara 9,7-12,8% untuk masing-masing lambda 1,1 dan 0,9 dibandingkan premium yang sebesar 0,09 mgr/°C.
 - f. Penambahan 10% (v/v) etanol pada premium akan menurun laju pelepasan kalor dengan kisaran 0,6-3,6% untuk masing-masing lambda 1,1 dan 0,9 dibandingkan premium yang sebesar 12,1 Joule/°C.

- g. Penambahan etanol 10% (v/v) pada premium menurunkan efisiensi termal efektif dan indikatif masing-masing sebesar antara 18,7-22,2% dan 8,2-12,2%.
7. Penambahan etanol pada premium menurunkan emisi gas buang CO₂, CO dan HC maksimum masing-masing sebesar 4,4%, 14,5% dan 17,4%.
 8. Penambahan etanol pada premium merubah sifat-sifat campurannya sehingga perlu dibuatkan spesifikasi tersendiri, terutama nilai RVP dimana RVP bio-premium (E5) masih sama dengan spesifikasi RVP premium.
 9. Karakteristik pembakaran kondisi atmosferik dan bertekanan di motor Otto berupa laju pelepasan massa menunjukkan sifat yang antagonis, tidak demikian halnya dengan laju pelepasan kalor.
 10. Penambahan etanol pada premium untuk aplikasi motor Otto menunjukkan efek negatif dengan meningkatnya konsumsi bahan bakar dan menurunnya efisiensi termal meskipun ada perbaikan di emisi gas buang untuk kondisi operasional umum/harian.

DAFTAR ACUAN

1. Joseph Henry, "Alcohol fueled vehicles and flexi fuel vehicles: The ethanol application as vehicular fuel in Brazil" – akses internet terakhir September 2007.
2. Owen Keith dan Trevor Coley [1995], "Automotive Fuels Reference Book", 2nd ed., Society of Automotive Engineer (SAE) Publisher, Warrendale, USA.
3. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [2006], "Kebijakan Energi Nasional", Rakornas Tentang Revitalisasi Pendidikan, Bio Energi dan Penanganan Bencana Alam, Agustus, Jakarta.
4. Evita H. Legowo [2007], "Key Success Factors for Indonesian Biofuel Development", German-Indonesian Symposium on Renewable Energy, Jakarta.
5. Pertamina [2006], "Perkembangan Pemasaran dan Harga Bahan Bakar Nabati.
6. Gusrizal [2007], "Biofuels Demand and Market Prospect" German-Indonesian Symposium on Renewable Energy, Jakarta.
7. Tim Nasional Pengembangan BBN [2007], "Bahan Bakar Nabati", Eka Tjipta Foundation, Penebar Swadaya.
8. Bayraktar H [2007], "Theoretical investigation of flame propagation process in an SI engine running on gasoline-ethanol blends", *Renewable Energy* Vol. 32, pp. 758-71.
9. Pertamina [2008], "Bahan Bakar Minyak Untuk Kendaraan Bermotor, Rumah tangga, Industri dan marine", PT Pertamina (Persero), Jakarta, Indonesia.
10. Takeshita, E.V., R.V.P. Rezende, S.M.A Guelli U. De Souza, et.al [2008], "Influence of solvent addition on the physicochemical properties of Barzilian gasoline", *Fuel* Vol 87, pp. 2168-77, Elsevier.
11. Da Silva R., Renanto Cataluna, E.W. de Menezes [2005], "Effect additives on the antiknock properties and Reid vapour pressure og gasoline", *Fuel* Vol 84., pp. 951-9, Elsevier.
12. Jeuland, N., et.al. [2004], "Potentiality of Ethanol As Fuel For Dedicated Engine", *Oil and Gas Technology Journal*, Vol. 59, No.6, pp.559-570, Institut Frances du Petrole.

13. Yuksel F, Bedri Yuksel [2004],” The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in SI engine”, *Renewable Energy* Vol. 29, pp. 1181-1191, Elsevier.
14. Kelly, KJ., Bailey, B.K.Coburn, T., Clark, W., Lissiuk, P. [1999],”Federal test procedure emissions test result from ethanol variable-fuel vehicle Cevrolet luminas, SAE paper 990602, pp. 249-60.
15. Topgul Tolga, Huseyin Serdar Yucesu, et.al [2006],”The effects of ethanol-unleade gasoline blends and ignition timing on engine performance and exhaust emissions”, *Journal of Renewable Energy* (31), 2534-42, Elsevier.
16. Hsieh Wei-Dong, Rong-Hong Chen, et.al. [2002],”Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels”, *Atmospheric Environment* (36), pp. 403,10, Pergamon.
17. Setiyawan, Atok [2007],” Uji unjuk kerja dan emisi gas buang motor bensin berbahan bakar etanol 85%dan premium 15% Sebagai Bahan Bakar Alternatif Motor Otto”, Laporan Penelitian, LITMUT-DIKTI.
18. Al-Hasan M [2003],”Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions” *Journal of Energy Conversion and Management* (44) 1547-61, Pergamon.
19. Pouloupoulos S.G., D.P. Samaras and C.J. Philippopoulos [2001],”Regulated and unregulated emission from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels”, *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 4399-4406.
20. Kar Kenneth, T. Last, C. Haywood dan R. Raine [2008],”Measurement of vapour Pressure and Enthalpies of vaporization of gasoline and ethanol blends and their effects on mixture preparation in an SI Engine”, SAE 2008-01-0317.
21. Pumphrey J.A, J.I. Brand and W.A. Scheller [2000],”Vapour pressure measurements and predictions for acohol-gasoline blends”, *Fuel*, Vol. 79, pp. 1405-11.
22. Searle, G.R. [1995],”Octane quality and knock, in motor gasoline, College Petroleum and Energy Studies, Oxford Royal Society of Chemistry Publication.

23. Gulder Omer L. [1983], "On water-ethanol-gasoline blends as spark ignition engine fuels, *Fuel*, Vol. 62 Issue No. 11, pp. 1381-1382.
24. Matthew B dan Marco Bakenhus [2006], "Economical, high-efficiency engine technologies for alcohol fuel"- akses internet terakhir Juli 2007.
25. Bayraktar H [2005], "Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark ignition engines", *Renewable Energy* Vol. 30 pp. 1733-1747.
26. Setiyawan, Atok dan Antonius Chandra [2006], "Uji Unjuk Kerja dan Emisi Gas Buang Pada Dua Buah Bahan Bakar Ber-Angka Oktan 95 Dengan "Oxigenate Octane Booster" Berbeda, Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin UK-Perta, Surabaya.
27. Gulder Omer [1984], "Burning velocities of ethanol-isooctane blends" *Combustion Flame* 56: 261-268.
28. Broustail, G., P. Seers, F. Halter, G. Moreac, C. Mounaim-Rousselle [2011], "Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends", *Fuel* 90, p. 1-6.
29. Heywood, John B., Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc Graw Hill Book Co. Inc., New York, 1988.
30. Prihandana Rama, Kartika Noerwijari, et.al. [2007], "Bioetanol Ubi Kayu – Bahan Bakar Masa Depan", *AgroMedia Pustaka*, Jakarta.
31. Lanzer T., O.F. von Meien, C.I. and Yamamoto, "A predictive thermodynamic model for the Brazilian gasoline", *Fuel* Vol. 84, pp. 1099-104, 2005.
32. Hugget, C., 1980, "Estimation of rate of heat release by means of oxygen-consumption measurements", *Fire and Materials*, Vol. 4, pp. 61-65.
33. Biteau, H., Steinhaus, T., Schemel, C., Simeoni, A., Marlair, G., Bal, N. & Torero, J.L., 2008, "Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown
34. Ostman, B.A.L, G. Svensson, & J. Blomqvist, 1985, "Comparison of three test methods for measuring rate of heat release", *Fire and Materials*, Vol. 9, No. 4, pp. 157-201.

35. Fernandez-Pello, A. C., in *Combustion Fundamentals of Fire* (G. Cox, ed.), Academic, London, 1995, p. 31.
36. Drysdale Dougal, 1998, "Introduction to fire Dynamics", 2nd edition., John Wiley & Sons, west Sussex, England.
37. Stecker D. Kenneth, "Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements", artikel internet:[http://www.ent.ohiou.edu/~womeldor/Pubs/Stecker-O₂-Heat Release](http://www.ent.ohiou.edu/~womeldor/Pubs/Stecker-O2-Heat%20Release), download: 9 April 2009.
38. Parker, W.J.,1982, "Calculation of the heat release rate by oxygen consumption for various applications, NBISIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, USA.
39. Nugroho, S. Yulianto, Achmad Junaedi, dan Gandjar Kiswanto, [2005], "Pengembangan Kalorimeter Api Untuk Karakterisasi Sifat Bahan Bakar Material", *Jurnal Teknologi-Universitas Indonesia*, edisi No. 4, Tahun XIX, Desember p. 294-301.
40. Varapasada R., Nehru KVK, dan Ganessan V. [1993], "Evaluation of SI engine combustion parameters: a new approach", *Combustion Science Technology* Vol. 89, pp. 47-55.
41. Zervas, Efthimios [2005], "Comparative study of some experimental methods to characterize the combustion process in a SI engine", *Energy* vol. 30, pp. 1803-1816, Elsevier.
42. Babu M.K. Gajendra, Daryao S. Khatri dan Alok Kumar, [2009], "An investigation of potential and challenges with higher ethanol-gasoline blend on a single cylinder Spark Ignition Research Engine", SAE paper 2009-01-0137.
43. Chan-Wei Wu, Rong-Horg Chen," The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline-blended fuels", *Atmospher Environmet* Vol.38, pp. 7093-1700, 2004, Elsevier.
44. Bang-Quan He, Jian-Xiin Wang [2002]," A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels", *Atmospheric Environment* Vol. 37, pp. 949-957, Elsevier.

45. Yucesu Huseyin Serdar, Adnan Sozen, et.al., [2007],” Comparative study of mathematical and experimental analysis of spark ignition engine performance used ethanol–gasoline blend fuel, Applied Thermal Engineering Vol. 27, pp. 358-368, Elsevier.
46. Abdel-Rahman AA., Osman AA. [1997],”Experimental investigation on varying the compression ratio of SI engine working under different ethanol-gasoline fuel blends, International Journal of Energy Research, 21: 31-40
47. Guerrheri, Caffrey and Rao [1995],”Investigation into vehicle exhaust emission of high percentage ethanol blends”, SAE paper 950777.
48. Popuri Sriram S.S dan Reda M. Bata [1993],”A Performance study of Iso-butanol, methanol, and ethanol-gasoline blends using a single cylinder engine”, SAE paper 932953, November.
49. Liguang Li, Zhimin Liu, et.al [2003],”Combustion and emission of ethanol fuel (E100) in small SI Engine”, SAE paper 2003-01-3262.
50. Ceviz M.A dan , F. Yuksel [2005],” Effets of ethanol-unleaded gasoline blends on cyclic variability and emissions in an SI engine”, Applied Thermal Engineering Vol. 25, pp. 917-925, Elsevier.
51. Bresenham Damon dan John R Reisel [1999],”The effect of high ethanol blends on emissions from small utility engines”, SAE paper 1999-01-3345.
52. Farayed A.A, et al. [2000],” Effects of blending crude ethanol with unleaded gasoline on exhaust emissions of SI engine”, SAE paper 2000-01-2857, October.
53. Jia Li-Wei, Mei-Qing Shen et.al. [2005],” Influence of ethanol–gasoline blended fuel on emission characteristics from a four stroke motorcycle engine”, J of Hazardous Materials Vol,123, pp. 29-35, Elsevier.
54. Tangka J., Berinyuy J., Tekounegnin and Okale A. [2011],” Physico-chemical properties of bio-ethanol/gasoline blends and the qualitative effect of different blends on gasoline quality and engine performance”, Journal of Petroleum Technology Alternative Fuels, Vol. 2(3), pp.35-44.
55. Eyidogan, M., Ahmet Necati Ozsezen, Mustafa Canakci dan Ali Turkcan, [2010]””Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the performance and

- combustion characteristics of an SI engine”, *Fuel* 89 (2010), 2713-2720.
Energy 36 (2011), 2465-2472.
56. Tangka J., Berinyuy J., Tekounegnin and Okale A. [2011],” Physico-chemical properties of bio-ethanol/gasoline blends and the qualitative effect of different blends on gasoline quality and engine performance”, *Journal of Petroleum Technology Alternative Fuels*, Vol. 2(3), pp.35-44.
 57. Balabin R.M, R.Z. Syunyaev dan A.A. Karpov [2007],”Molar enthalpy of vaporization of ethanol-gasoline mixture and their colloid state”, *Fuel* Vol. 86, pp:323-7, Elsevier.
 58. Gao Jian, Deming Jian, et.al. [2007],” Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline, *Fuel*, Vol. 86, Issue 10-11, July-August, pp 1645-50*).
 59. Kawahara Nobuyuki, Eiji Tomita dan Takuya Kadowaki [2009], ”Mixture formation process in a Spark Ignition Engine with ethanol blended gasoline”, SAE paper 2009-01-1957.
 60. Yamin J.A.A., H.N. Gupta, B.B. Bansala dan O.N. Srivistavab [2000],”Effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen fuel as a fuel”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Pergamon, published by Elsevier, p. 581-89.
 61. Meitghalchi, M. Dan J.C. Keck [1980],”Laminar burning velocity of propane air mixture at high temperature and pressure”, *Combustion Flame*, 38: 143-154.
 62. Schifter, I., L. Diaz, R. Rodriguez, J.P. Gomez dan U. Gonzalez, [2011],” Combustion and emission behaviour for ethanol-gasoline blends in a single cylinder engine”, *Fuel* (2011) available on line 4 February 2011.
 63. Salooja, K. C.,[1965], *Combustion Flame Journal* No. 9:373.
 64. Ishii K, Sasaki T, Urata, Y. Yoshida K, dan Ohno T. [1997], “Investigation of cyclic variation of IMEP under lean burn operation in spark-ignition engine, SAE paper 972830.
 65. Gupta M, Bell S.R., dan Tillman S.T. [1996], “An investigation of lean combustion in natural gas-fueled spark ignited engine”, *J. Energy Res. Technol.*, Vol. 118, pp. 145-68.

66. Bell S.R. dan Gupta M. [1996], "Extention of the lean operating limit for natural gas fueling of a SI engine using hydrogen blending", *Combustion Science Technology*, Vol. 123, pp. 23-48.
67. Lindohlm J, Anders Brink & Mikko Hupa, "Cone Calorimeter – A Tool for measuring Heat Release Rate" http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/FinSweFlameDays09/4B/Lindholm_Paper.pdf, download: 13 April 2009.
68. Ranajit, Sahu [2007], "Technical paper on the introduction of the greater than E-10 gasoline blends"- akses internet terakhir Juli 2007.
69. Costa, R.C, dan Jose R Sofre. [2011], "Compression ratio effects on ethanol/gasoline fuelled engine performance" *Applied Thermal Engineering* (31) 2011, 273-283.
70. Costa, R.C, dan Jose R Sofre. [2010], "Hydrous ethanol vs gasoline-ethanol blend: Engine performance and emission", *Fuel* 89 (2010) 287-293.
71. Kawahara Nobuyuki, Eiji Tomita dan Takuya Kadowaki [2009], "Mixture formation process in a Spark Ignition Engine with ethanol blended gasoline", SAE paper 2009-01-1957.
72. Thurnheer T., P. Soltic, dan P. Dimopoulos Eggenschwiler [2009], "S.I. engine fuelled with gasoline, methane and methane/hydrogen blends: Heat release and loss analysis", *International of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 2494-2503.
73. Galloni, Enzo [2009], "Analysis about parameters that affect cyclic variation in a spark ignition engine", *Applied Thermal Engineering*, 29, pp. 1131-1137.
74. Hu Erjiang, Z. Huang, B. Liu, J. Zheng, dan Xiaolei Gu [2009], "Experimental study on combustion characteristic of a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combining with EGR", *International Journal of Hydrogen*, Vol. 34, pp. 1035-1044.
75. Litak Grzegorz, T. Kaminski, R. Rusinel, J. Czarnigowski dan M. Wendeker [2008], "Patterns in the combustion process in a Spark Ignition Engine", *Chaos, Solutions & Fractals*, Vol. 35, pp. 578-585, Elsevier.

76. Nakama, Kenjiro, Kenjiro Nakma, Jun Kusaka & Yasuhiro Daisho, [2008], "Effect of ethanol on knock in Sprak Ignition Gasoline Engine", SAE paper 2008-32-0020.
77. Rahbari, Alireza, [2008], "The effects of EGR on HCCI engines using ethanol as fuel", SAE paper 2008-01-2409.
78. Zhu Guoming G., Harold Schock, & David L.S. Hung, [2008], "Combustion characteristic of a single-cylinder engine equipped with gasoline and ethanol dual-fuel systems", SAE paper 2008-01-1767.
79. Wallner Thomas & Scott A. Miers, [2008], "Combustion behavior of gasoline and gasoline/ethanol blends in a modern Direct-Injection 4-cylinder engine", SAE paper 2008-01-0077.
80. Hamilton L, Pat Cato, et.al. [2008], "Pre-Ignition Characteristics of Ethanol and E85 Fuel in a Spark Ignition Engine", SAE paper 2008-01-0321, April*).E paper 2008-32-0020.*)
81. Graham L. A., Sher L. Belisle, et.al. [2008], "Emission from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85", Atmospheric Environmet, Vol. 42, Issue 19, June, pp. 4498-4516*).
82. Wang Jinhua, Hao Chen dan Zuohua Huang [2008], "Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, Issue 18, pp. 4876-83.
83. Celik M. Bahattin [2008], "Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, Issue 5-6, April, pp. 396*).
84. Karonis Dimitrios, G. Anastopoulos, S. Stournas, dan E. Lois [2008], "Impact of simultaneous ETBE and Ethanol addition on Motor Gasoline Sifat-sifat", SAE paper 2008-01-2503.*)
85. Cataluna, Renato, Rosangela da Silva, Eliana Weber de Menezes dan Ricardo Boeira Ivanov, [2008], "Specific consumption of liquid biofuels in gasoline fulfilled engines", Fuel 87, pp. 3362-3368.

86. Pana, C., N. Negurescu, M.G. Popa, Al. Cemat dan D. Soare, [2007], "Aspects of the use ethanol in spark ignition engine", SAE paper 2007-01-2040.
87. Vilaro Jonathan S, David C. Arters, et.al. [2007], "A Comprehensive Examination of the Effect of Ethanol-Blended Gasoline on Intake Valve Deposits in Spark Ignited Engines", SAE paper 2007-01-3995*).
88. Yucesu Huseyin Serdar, Adnan Sozen, et.al., [2007], "Comparative study of mathematical and experimental analysis of spark ignition engine performance used ethanol-gasoline blend fuel, Applied Thermal Engineering Vol. 27, pp. 358-368, Elsevier.
89. Martinez F.A. dan Ahmad R. Ganji [2006], "Performance and exhaust emission of a single-cylinder utility engine using ethanol fuel", SAE paper 2006-32-0078, November*).
90. Tanaka Haruya [2006], "Effects of ethanol and ETBE blending in gasoline on evaporative emission", SAE paper 2006-01-3382.
91. Zeng Ke, Z. Huang, B. Liu, L. Liku, D. Jiang. Y, Rend an J. Wang [2006], "Combustion characteristic of a direct-injection natural engine gas under various fuel injection timings", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 806-813.
92. Latey A.A., Bhatti T.S, et.al. [2005], "(M5E20) Injection Investigations on Single-Cylinder SI Engine", SAE paper 2005-26-351, April*).
93. Manqun Lin, Shen Meiqing, et.al. [2005], "Organic Compound Exhaust Analysis From Ethanol-Gasoline-Fueled Motorcycle", SAE paper 2005-32-0055*).
94. Subramanian M., A.K. Setia et.al. [2005], "Effect of Alcohol-Blended Fuels on the Emissions and Field Performance of Two-Stroke- and Four-Stroke-Engine-Powered Two Wheelers", SAE paper 2005-26-034*).
95. Wu Chan-Wei, Rong-Horg Chen [2004], "The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline-blended fuels", Atmospheric Environmet Vol.38, pp. 7093-1700, Elsevier.

96. Pentikainen Juha, L. Rantanen, dan P. Aakko [2004], "The effect of heavy olefins and ethanol on gasoline emissions", SAE paper 2004-01-2003.*)
97. Maheshwari M, Pal N.K., et al. [2004], "Indian Experience With the Use of Ethanol-Gasoline Blends on Two Wheelers and Passenger Cars", SAE paper 2004-28-0086, April*).
98. Latey A.A., Bhatti T.S, et.al. [2004], "Experiment investigation on methanol 5% + ethanol-gasoline mixtures operated single-cylinder SI engine", SAE paper 2004-28-0036, January*).
99. Wu Chan-Wei, Rong-Horg Chen [2004], "The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline-blended fuels", *Atmospheric Environment* Vol.38, pp. 7093-1700, Elsevier.
100. Wei Dai, Eric W. Curtis, et.al [2003], "Engine cycle simulation of ethanol and gasoline blends", SAE paper 2003-01-3093, October*).
101. Strevva E.R. Jose Ricardo Sodre et.al. [2003], "Gasoline-ethanol blend aging effects on engine performance and exhaust emission", SAE paper 2003-01-3184*).
102. Stanglmaier R.H., Charles E. Robert, et.al. [2003], "Measurement of Laminar burning velocity of multi-component fuel blends for use in high-performance SI engines", SAE paper 2003-01-3185*).
103. Bang-Quan He, Jian-Xi Wang [2002], "A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels", *Atmospheric Environment* Vol. 37, pp. 949-957, Elsevier.
104. Iwata, Y, H. Koseki, M. L. Janssens & T. Takahasi, 2001, "Combustion characteristics of crude oil", *Fire and Materials*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-7.
105. Chatris, J.M., J. Quintela, J. Folch, E. Planas, J. Arnaldos dan J. Casal [2001], "Experiment Study of Burning Rate of Hydrocarbon Pool Fire", *Combustion Flame* 126: 1373-1383.
106. American Petroleum Institute (API), 2001, "Alcohol and Ethers: A Technical assessment of their application as fuel and fuel components. API Publication 4261. Third edition.

107. Bresenham Damon dan John R Reisel [1999], "The effect of high ethanol blends on emissions from small utility engines", SAE paper 1999-01-3345*).
108. Halvorsen K.C. [1998], "The necessary components of a dedicated ethanol vehicle", Master thesis, University of Nebraska, USA.
109. Abdel-Rahman AA., Osman AA. [1997], "Experimental investigation on varying the compression ratio of SI engine working under different ethanol-gasoline fuel blends, International Journal of Energy Research, 21: 31-40
110. Guerrheri, Caffrey and Rao [1995], "Investigation into vehicle exhaust emission of high percentage ethanol blends", SAE paper 950777.
111. Owen Keith dan Trevor Coley [1995], "Automotive Fuels Reference Book", 2nd ed., Society of Automotive Engineer (SAE) Publisher, Warrendale, USA.
112. Poola Ramesh B., T. Bhasker et.al. [1994], "The influence of high-octane fuel blends on the performance of a two-stroke SI engine with knock-limited-compression ratio", SAE paper 941863*).
113. Karaosmanoglu Filiz, Asli Isigisur, et.al. [1993], "Unleaded gasoline-azeotropic ethanol blends as fuels as spark ignition engines", SAE paper 932771, October*).
114. Fischer, S.J., B.H. Duparc dan William L. Grosshandler [1987], "The structure and Radiation of an ethanol pool fire" Combustion Flame 70: 291-306.
115. Radwan M.S. [1985], "Performance and Knock Limits of Ethanol-Gasoline Blends in Spark-Ignited Engines", SAE paper 850213 *).
116. Leshner Michael D, Carlos A. Luengo, et.al. [1980], "Brazillian experience with with self-adjusting fuel system for variable alcohol-gasoline blends", SA paper 800265, February*).
117. -----, "Manual Book dari Honda Supra 125 X PGMFI".

LAMPIRAN I:
Spesifikasi Premium

Tabel : V.9
SPESIFIKASI PREMIUM

KARAKTERISTIK	SATUAN	BATASAN				METODE UJI	
		TANPA TIMBAL		BERTIMBAL		ASTM	LAIN
		MIN	MAKS	MIN	MAKS		
1. Bilangan Oktana - Angka Oktana Riset (RON) - Angka Oktana Motor (MON)	RON	88.0	dilaporkan	88,0	-	D 2699-86 D 2700-86	
2. Stabilitas Oksida (Periode Induksi)	menit	360	-	360	-	D 525-99	
3. Kandungan Sulfur	% m/m	-	0,05 1)	-	0,05 1)	D 2622-98	
4. Kandungan Timbal (Pb)	gr/l	-	0,013	-	0.3	D 3237-97	
5. Distilasi :						D 86-99a	
10% vol. Penguapan	°C	-	74	-	74		
50% vol. penguapan	°C	88	125	88	125		
90% vol. Penguapan	°C	-	180	-	180		
Titik didih akhir	°C	-	215	-	205		
Residu	% vol	-	2.0	-	2.0		
6. Kandungan Oksigen	% m/m	-	2,72)	-	2,72)	D 4815-94a	
7. Washed gum	mg/100ml	-	5	-	5	D 381-99	
8. Tekanan Uap	kPa	-	62	-	62	D 5191/D	
9. Berat Jenis pada suhu 15°C	kg/m ³	715	780	715	780	323	
10. Korosi bilah tembaga	menit	Kelas 1		Kelas 1		D 4052/D1298	
11. Uji Doctor		negatif		negatif		D-130-94	IP 30
12. Sulfur Mercaptan	% massa	-	0.002	-	0.002		
13. Penampilan visual		Jernih & terang		Jernih & terang		D-3227	
14. Warna		Merah		Merah			
15. kandungan pewarna	gr/100 l	0,13		0,13			
16. Bau		dapat dipasarkan		dapat dipasarkan			

CATATAN UMUM

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

CATATAN KAKI

- Catatan 1 Batasan 0.05% setara dengan 500 ppm
- Catatan 2 Bila digunakan oksigenat, jenis ether lebih disukai. Penggunaan etanol diperbolehkan sampai dengan maksimum 10% volum (sesuai ASTM).
Alkohol berkarbon lebih tinggi (C>2) dibatasi maksimal 0.1% volum. Penggunaan metanol tidak diperbolehkan
- Spesifikasi tersebut sesuai Lampiran Keputusan Dirjen Migas 3674 K/24/DJM/2006 tanggal 17 Maret 2006 dan dapat berubah sewaktu-waktu*

LAMPIRAN II:

Spesifikasi standar bioetanol terdenaturasi untuk gasohol Indonesia^[45]

No	Sifat	Unit, Min/Maks	Spesifikasi ^{*)}
1	Kadar etanol	%V, min	99.5 (sebelum denaturasi) ^{**)}
			94.0 (setelah denaturasi)
2	Kadar metanol	mg/l, maks	300
3	Kadar air	%V, maks	1
4	Kadar denaturasi	%V, min	2
		%V, maks	5
5	Kadar tembaga (Cu)	mg/kg, maks	0.1
6	Keasaman sebagai CH ₃ COOH	mg/l, maks	30
7	Tampakan		Jernih dan terang, tidak ada endapan dan kotoran
8	Kadar ion klorida	mg/l, maks	40
9	Kandungan belerang (S)	mg/l, maks	50
10	Kadar getah (gum), dicuci	mg/100 ml, maks	5
11	pHe		6.5 - 9

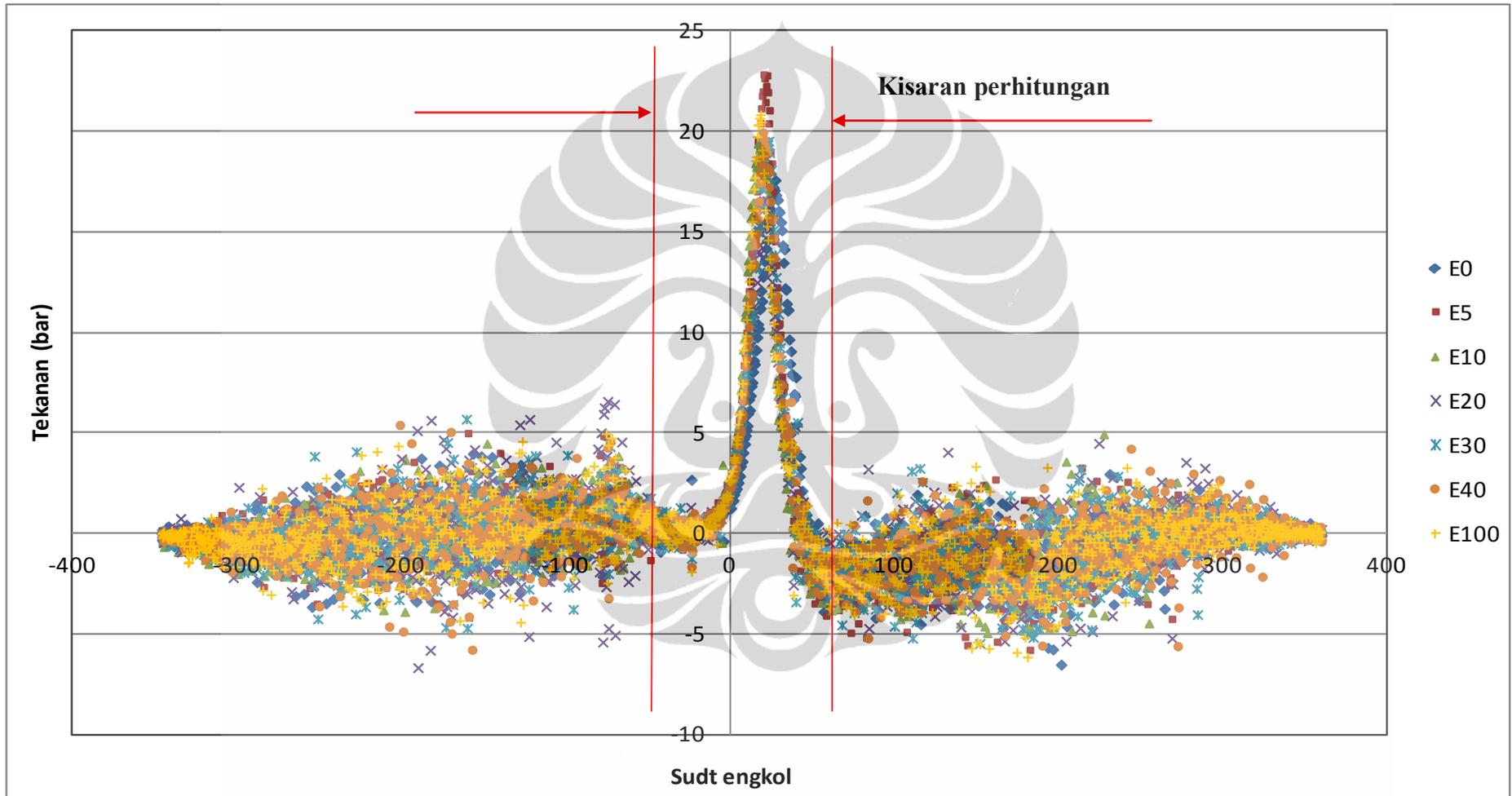
*) Jika tidak diberikan catatan khusus, nilai batasan (spesifikasi) yang tertera adalah nilai untuk bioetanol yang sudah didenaturasi

***) FGE (Fuel grade Etahanol) atau etanol kering biasanya memiliki berat jenis dalam rentang 0.7936-0.7961 (pada kondisi 15.56/15.56°C) atau berat jenis dalam rentang 0.7871-0.7896 (pada kondisi 25/25°C), diukur dengan cara piknometri atau hidrometri yang sudah sangat lazim diterapkan dalam industry alcohol.

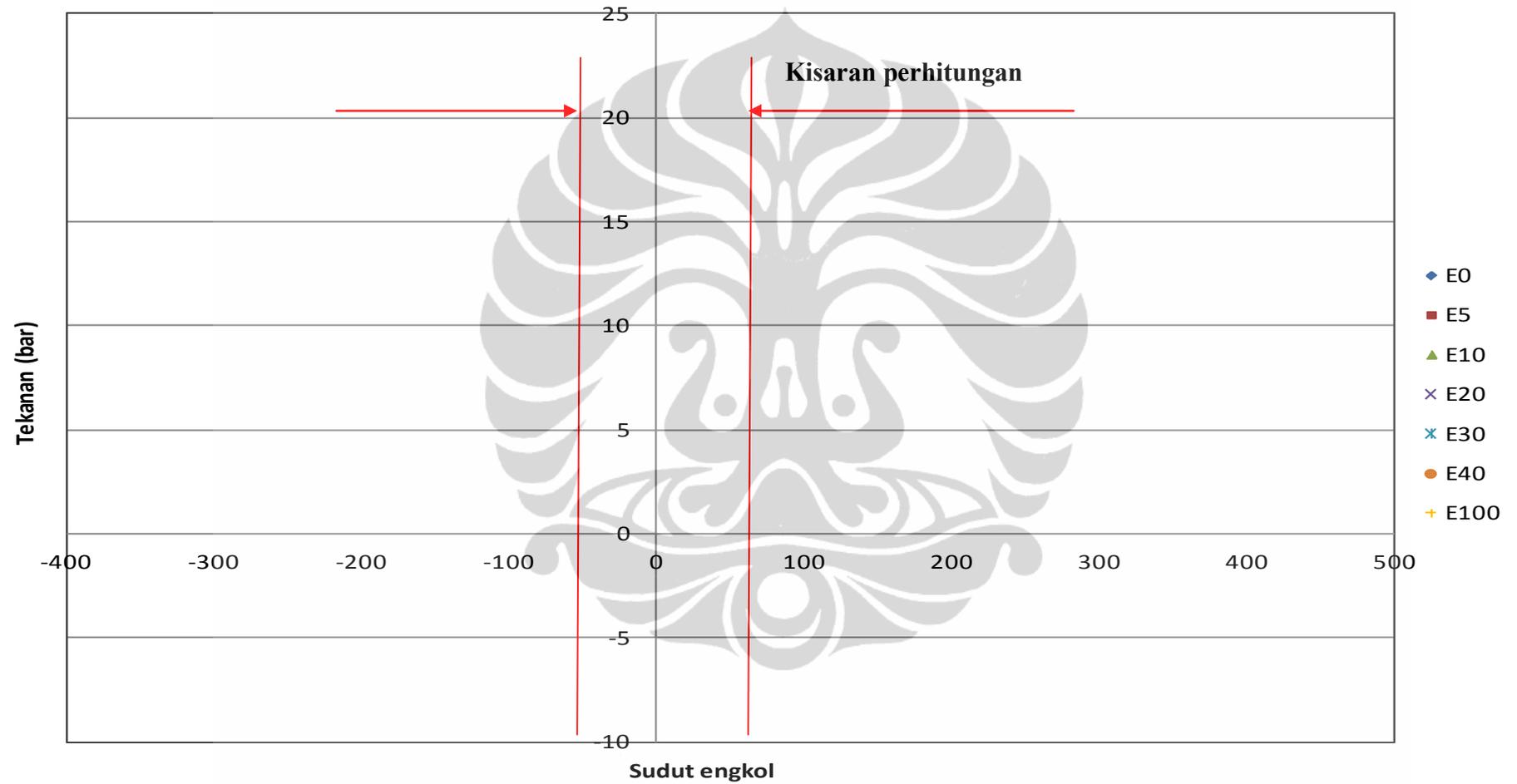
LAMPIRAN III:
Sifat-Sifat Beberapa Bahan Bakar

Properties of Fuels (a)									
Property	Gasoline	No.2 Diesel Fuel	Methanol	Ethanol	MTBE	Propane	Compressed Natural Gas	Hydrogen	Biodiesel
Chemical Formula	C4 to C12	C8 to C25	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	(CH ₃) ₃ COCH ₃	C ₃ H ₈	CH ₄ (83-99%), C ₂ H ₆ (1-13%)	H ₂	C12-C22 FAME
Molecular Weight	100-105	~200	32.04	46.07	88.15	44.1	16.04	2.02	~292(q)
Composition, Weight %									
>Carbon	85-88(b)	87(g)	37.5	52.2	68.1	82	75	0	77(g)
>Hydrogen	12-15(b)	13(g)	12.6	13.1	13.7	18	25	100	12(g)
>Oxygen	0	0(g)	49.9	34.7	18.2	-	-	0	11(g)
Specific gravity, 60° F/60° F	0.72-0.78(b)	0.85(g)	0.796(h)	0.794(h)	0.744(k)	0.508(m)	0.424	0.07(o)	0.88(g)
Density, lb/gal @ 60° F	6.0-6.5(b)	7.079(g)	6.63(b)	6.61(b)	6.19(k)	4.22	1.07(n)	-	7.328(g)
Boiling temperature, °F	80-437(b)	356-644(g)	149(h)	172(h)	131(h)	-44(m)	-263.2 to -126.4(m)	-423(m)	599-662(g)
R Reid vapor pressure (100° F), psi	8-15(c)	<0.2	4.6(l)	2.3(l)	7.8(l)	208	2400	-	<0.04(r)
Heating value (2)									
>Lower (Btu/gal) (d)	116,090	128,450	57,250	76,330	93,540	84,250	-	-	119,550
>Lower (Btu/lb) (d)	18,676	18,394	8,637	11,585	15,091	19,900	20,263	52,217	16,131
>Higher (Btu/gal) (d)	124,340	137,380	65,200	84,530	101,130	91,420	-	-	127,960
>Higher (Btu/lb) (d)	20,004	19,673	9,837	12,830	16,316	21,594	22,449	59,806	17,266
Octane no.(1)									
>Research octane no.	88-98(c)	-	-	-	-	112	-	130+	-
>Motor octane no.	80-88(c)	-	-	-	-	97	-	-	-
Cetane no.(1)	-	40-55(g)	-	0-54(f)	-	-	-	-	48-65(g)
Freezing point, °F	-40(e)	-40-30(4)	-143.5	-173.2	-164(h)	-305.8(m)	-296	-435(p)	26-66(q)(7)
Viscosity, mm ² /s									
>@104 °F	-	1.3-4.1(g)	-	-	-	-	-	-	4.0-6.0(g)
>@68 °F	0.5-0.6(f)	2.8-5.0(f)	0.74(f)	1.50(f)	0.47(f)	-	-	-	-
>@-4 °F	0.8-1.0(f)	9.0-24.0(f)	1.345(f)	3.435(f)	0.77(f)	-	-	-	-
Flash point, closed cup, °F	-45(b)	140-176(g)	52(l)	55(l)	-14(c)	-156(m)	-300	-	212-338(g)
Autoignition temperature, °F	495(b)	~600	867(b)	793(b)	815	842(m)	900-1170(m)	932(m)	-
Water solubility, @ 70° F									
>Fuel in water, volume %	Negligible	Negligible	100(h)	100(h)	4.8(f)	-	-	-	-
>Water in fuel, volume %	Negligible	Negligible	100(h)	100(h)	1.5(f)	-	-	-	-
Flammability limits, volume%									
>Lower	1.4(b)	1.0	7.3(l)	4.3(l)	1.6(c,e)	2.2	5.3	4.1(o)	-
>Higher	7.6(b)	6.0	36.0(l)	19.0(l)	8.4(c,e)	9.5	15	74(o)	-
Latent heat of vaporization									
>Btu/gal @ 60° F	~900(b)	~710	3,340(b)	2,378(b)	863(5)	775	-	-	-
>Btu/lb @ 60° F	~150	~100	506(b)	395(b)	138(5)	193.1	219	192.1(p)	-
Specific heat, Btu/lb °F	0.48(e)	0.43	0.60(j)	0.57(j)	0.50(j)	-	-	-	-
Stoichiometric air/fuel, weight	14.7	14.7	6.45	9.00	11.7	15.7	17.2	34.3(o)	13.8(g)
Volume % fuel in vaporized stoichiometric mixture	2.0 (b)	-	12.3(b)	6.5(b)	2.7(l)	-	-	-	-

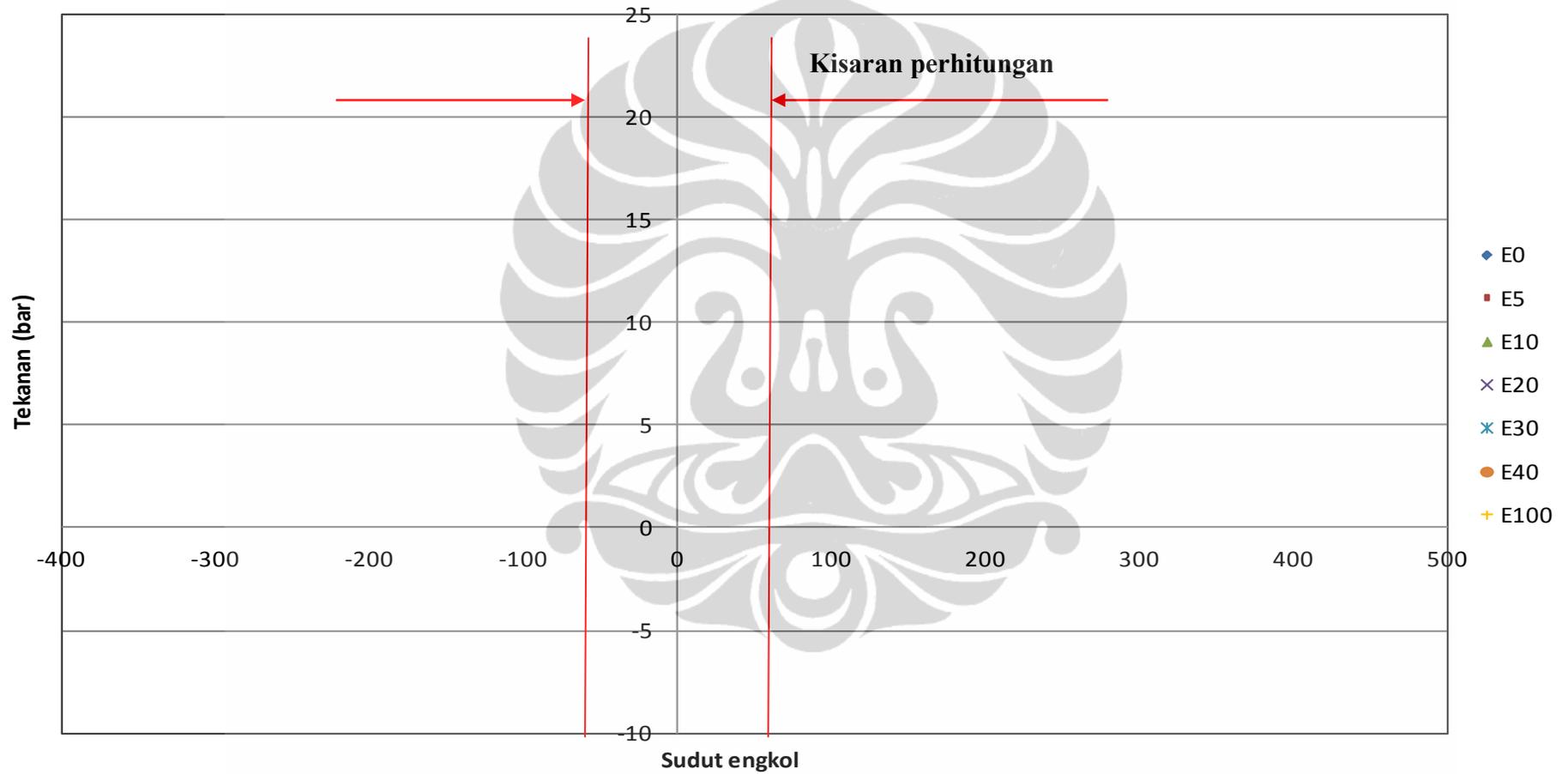
LAMPIRAN IV:
Contoh Heat Release Rate - Lambda 0,9



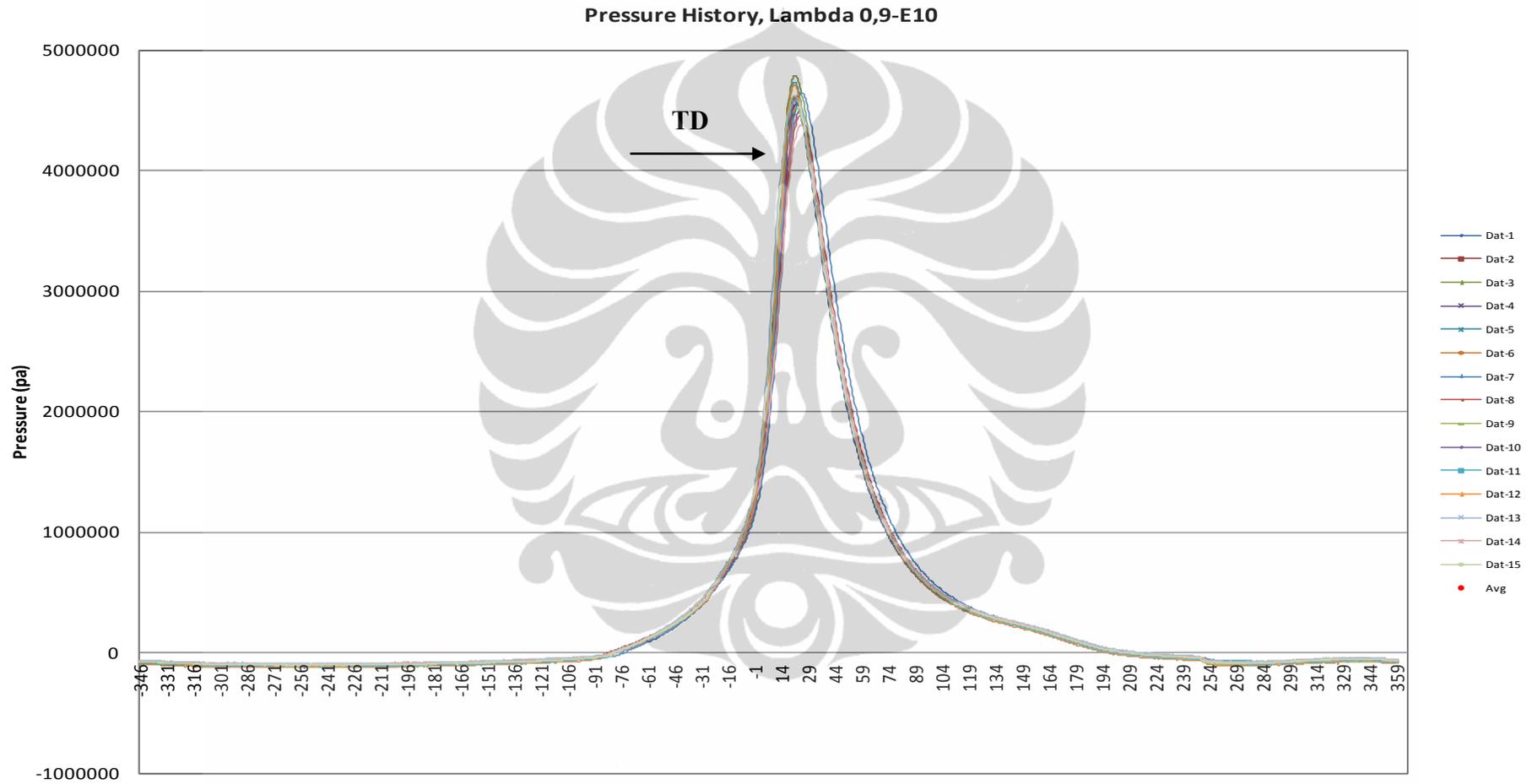
LAMPIRAN V:
Contoh Heat Release Rate - Lambda 1



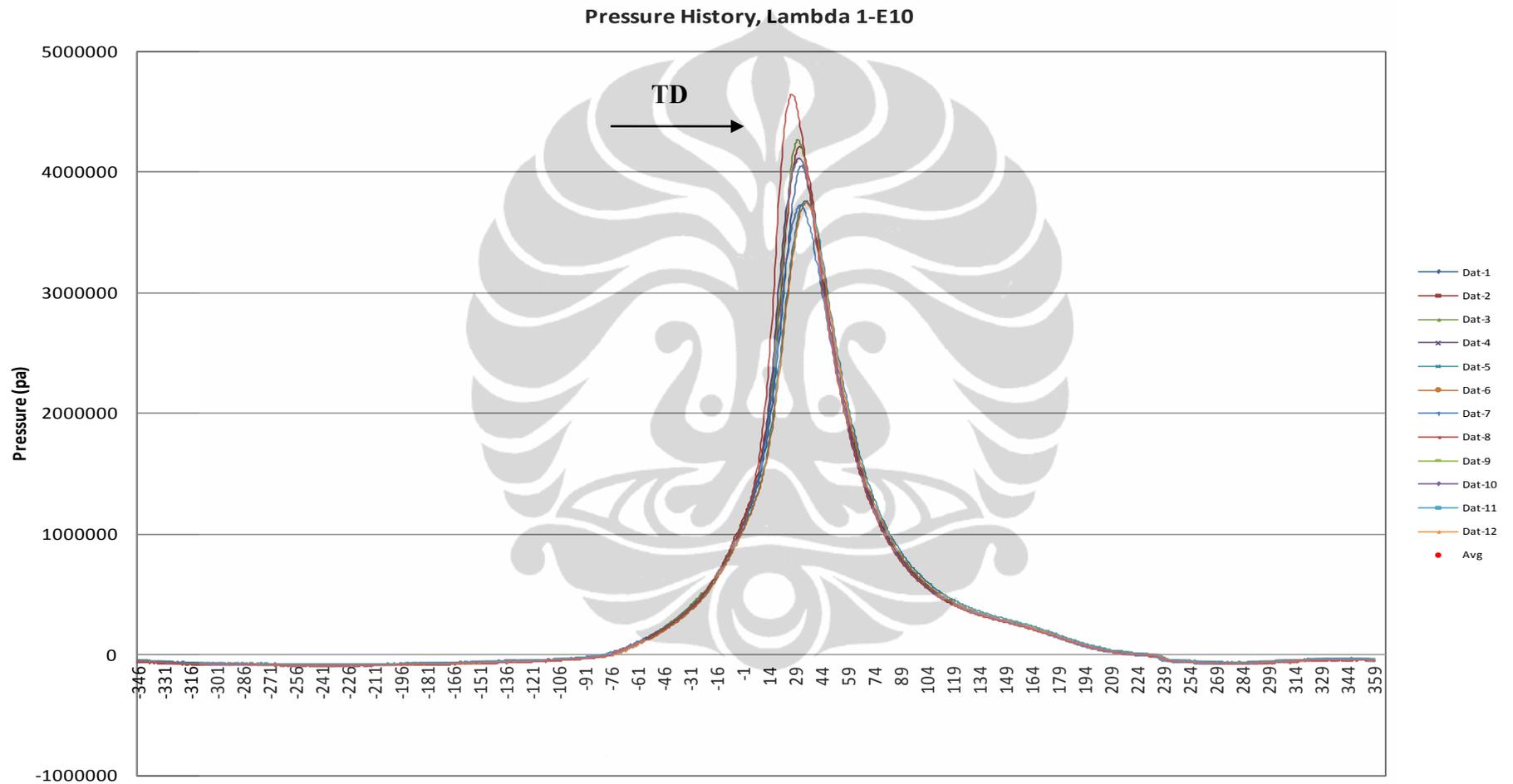
LAMPIRAN VI:
Contoh Heat Release Rate - Lambda 1,1



LAMPIRAN VII:
Contoh Variasi Siklus - Lambda 0,9 – E10



LAMPIRAN VIII:
Contoh Variasi Siklus - Lambda 1 – E10



LAMPIRAN IX:
Contoh Variasi Siklus - Lambda 1,1 – E10

