

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

M5-003 Evaluasi Laju Pelepasan Kalor Campuran Premium-Etanol Dengan Metode Laju Pelepasan massa Dan Konsumsi Oksigen

Atok Setiyawan, Bambang Sugiarto & Yulianto S. Nugroho

Departemen Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424 Indonesia

Tel. (021) 727 0032, Fax. (021) 727 0033,

E-mail: atok_s@me.its.ac.id; bangsugi@eng.ui.ac.id; yulianto.nugroho@ui.edu

ABSTRACT

Properties etanol sangat berbeda dengan gasoline/premium demikian pula dengan campuran keduanya. Sifat anomali (azeotrope effect) dari campuran premium-etanol mempengaruhi karakteristik pembakaran pada kondisi atmosferik khususnya laju pelepasan kalor. Azeotrope effect paling tinggi terjadi pada konsentrasi etanol 5% (E-5), dimana volatilitas meningkat sebesar 11% dibandingkan dengan premium. Penentuan laju pelepasan kalor dengan metode laju pelepasan massa mempunyai harga mendekati pada pembakaran sempurna, sedangkan dengan metode konsumsi oksigen lebih rendah antara 4 – 25% dan lebih mendekati pada proses pembakaran yang aktual.

Keywords : premium, etanol, azeotrope effect, laju pelepasan kalor, konsumsi oksigen

1. Pendahuluan

Pencarian energi yang dapat diperbaharui terus dilakukan untuk: (1) mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, (2) mengurangi konsumsi bahan bakar hidrokarbon dan (3) mengurangi emisi polutan. Dalam *road map* pengembangan bahan bakar nabati (BBN), etanol diharapkan memberikan kontribusi 15% dari total konsumsi gasoline di tahun 2025^[1]. Mulai tahun 2009, pemerintah sudah mewajibkan penyedia/pemasok bahan bakar di dalam negeri (PT Pertamina) untuk menggunakan etanol pada bahan bakar transportasi PSO dan Non-PSO masing-masing sebesar 1% dan 5% dari total konsumsi, meningkat terus hingga pada tahun 2009 menjadi 10% dan 12% pada tahun 2020^[2].

Properties etanol sangat berbeda dengan gasoline/premium demikian pula dengan campuran keduanya^[3]. Pencampuran etanol pada premium menimbulkan *azeotrope effect*, 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, densitas lebih tinggi dan menghasilkan

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

pembakaran yang lebih bersih, sedangkan kekurangannya adalah nilai kalor yang rendah, hanya sekitar hanya 60% dari premium dan energi penguapan hampir tiga kali lebih besar dibandingkan premium.

Untuk bisa digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada motor Otto, campuran premium-etanol (bahan bakar campuran etanol dan gasoline/premium secara umum dinyatakan dengan simbol E-XX, dimana XX merupakan prosentase etanol dalam campuran basis volume) perlu dilakukan uji properties dan karakterisasi pembakaran, utamanya laju pelepasan kalor untuk dibandingkan dengan bahan bakar referensi. Uji karakteristik pembakaran dapat dilakukan dalam kondisi atmosferik maupun bertekanan didalam ruang bakar motor Otto.

Pengujian dalam kondisi atmosferik di kalorimeter api bertujuan untuk mendapatkan laju pelepasan kalor dan massa yang berkaitan dengan properties bahan bakar utamanya volatilitas dan energi penguapan.

Biteau [2008] melakukan perbandingan perhitungan laju pelepasan kalor untuk bahan bakar referensi (metana) dan berbagai jenis bahan bakar lainnya dengan berbagai metode yang tersedia. Disimpulkan bahwa perhitungan laju pelepasan kalor dengan metode konsumsi oksigen memberikan hasil yang cukup akurat dan sederhana dibandingkan dengan metode lainnya dengan deviasi sekitar 5% dibandingkan dengan metode pelepasan massa.

Nugroho et.al. [2005] mengembangkan kalorimeter api dan mengujinya dengan berbagai material untuk mendapatkan karakterisasi sifat bakar material (laju pelepasan kalor) dengan metode konsumsi oksigen. Hasil yang didapat selaras dengan pengujian dari peneliti sebelumnya.

Iwata et.al. [2001] meneliti karakteristik pembakaran – laju pelepasan kalor, laju pelepasan massa, dan fluks panas radiasi - dari 14 jenis *crude oil* pada *cone calorimeter* dengan metode konsumsi oksigen. Laju pelepasan kalor tergantung pada jenis *crude oil* dan berkorelasi dengan densitasnya.

Ostman, et.al. [1985] membandingkan metode uji laju pelepasan kalor untuk berbagai material dengan tiga metode menggunakan prinsip konsumsi oksigen, yaitu *OSU-box modified for O₂-consumption*, *STFI open arrangement* dan *NBS cone calorimeter*. Hasil yang didapat adalah laju pelepasan kalor untuk ketiga metode mempunyai akurasi yang setara dan mendekati dengan hasil peneliti lainnya.

Lindholm et.al. memverifikasi hasil pelepasan kalor berbagai bahan bakar seperti yang dilakukan oleh Hugget dengan peralatan *cone calorimeter* sesuai dengan ISO-5660-1 dan hasilnya sama dengan yang diperoleh Hugget^[4], yaitu kalor yang dilepaskan oleh bahan bakar adalah sebesar 13.1 MJ/kg oksigen yang dikonsumsi.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik pembakaran berupa laju pelepasan kalor dengan metode konsumsi oksigen dan laju pelepasan massa dari premium, etanol dan campurannya berkaitan dengan perubahan properties.

2. Laju Pelepasan Kalor Dengan Metode Pelepasan Massa Dan Konsumsi Oksigen

Laju pelepasan kalor suatu material yang mampu bakar dapat ditentukan dengan berbagai metode antara lain: berdasarkan laju pelepasan/pembakaran massa, konsumsi oksigen, kehilangan kalor sensibel dengan analisa kesetimbangan energi dan produksi komposisi gas buang hasil pembakaran^[5].

Laju pelepasan kalor suatu material dapat ditentukan bila telah diketahui nilai kalor /panas pembakaran material dan laju pelepasan/pembakaran massa sesuai dengan persamaan 1:

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

$$\dot{q}(t) = NKB_{BB} \dot{m}_{BB} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

$\dot{q}(t)$ adalah laju pelepasan kalor (KW), NKB_{BB} adalah nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg) dan \dot{m}_{BB} (kg/sekon) adalah laju pelepasan/ pembakaran massa. Pada pembakaran di *Bomb Calorimeter* terjadi pembakaran sempurna sehingga semua atom C dan H dapat beroksidasi dan melepaskan semua energi yang dikandungnya. Sedangkan pada pembakaran yang aktual terjadi ketidaksempurnaan pembakaran. Pada pembakaran sempurna, maka laju pelepasan kalor dapat dihitung dengan penentuan laju pembakaran massa dengan akurasi kurang dari 10% dan akurasi berkurang bila pembakaran tidak sempurna^[5].

Laju pelepasan kalor dengan konsumsi oksigen yang dikembangkan oleh Hugget^[4] berdasarkan Thornton's Rule^[6] dimana mengukur laju pelepasan kalor berbagai bahan organik berdasarkan prinsip konsumsi oksigen yang digunakan untuk mengoksidasi bahan bakar.

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 $\pm 5\%$ ^[4,5,7,8,9]. 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^[5,10]:

$$\dot{q}(t) = \Delta h_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot \left[\frac{M_{O_2}}{M_a} \right] \left(1 - x_{H_2O}^0 - \phi \cdot x_{O_2}^0 \right) \cdot \dot{V}_A \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

$\dot{q}(t)$ adalah laju pelepasan kalor (MW), $\Delta h_{c,ox}$ adalah kalor pembakaran netto sebesar 13.1 MJ/kgO₂, 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).

Besarnya \dot{V}_A dapat dituliskan^[10,11]:

$$\dot{V}_A = \frac{\dot{V}_s}{1 + \alpha - \phi} \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

\dot{V}_s adalah laju aliran volume gas pada saluran keluar dan α adalah faktor ekspansi untuk fraksi udara yang telah kehilangan komponen oksigennya.

Bila dalam pengukuran gas buang menggunakan pelat orifis, maka nilai \dot{V}_s dapat didekati sebagai berikut:

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

$$\dot{V}_s = C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \dots\dots\dots(4)$$

dengan C adalah konstanta kalibrasi.

Dengan memasukkan pers. (3) dan (4) ke dalam pers. (2), maka diperoleh:

$$\dot{q}(t) = \Delta h_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot \left[\frac{M_{O_2}}{M_a} \right] \left(-x_{H_2O}^0 - x_{O_2}^0 \right) \cdot C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left(\frac{x_{O_2}^0 \phi}{1 + \phi - 1} \right) \dots\dots\dots(5)$$

dengan ΔP adalah perbedaan tekanan aliran pada pelat orifis dan T_e adalah temperatur absolute gas buang pada pelat orifis.

Dengan mengasumsikan pembakaran berlangsung sempurna ($\phi_{CO} = 0$), Parker^[10] juga memberikan persamaan untuk faktor penipisan oksigen, ϕ sebagai:

$$\phi = \frac{x_{O_2}^0 \left(-x_{CO_2} - x_{O_2} \right) \left(-x_{CO_2} \right)}{\left(-x_{O_2} - x_{CO_2} \right) x_{O_2}^0} \dots\dots\dots(6)$$

dimana:

$x_{CO_2}^0$ dan x_{CO_2} masing-masing adalah fraksi mol CO₂ di dalam udara masuk dan di dalam gas buang, x_{O_2} adalah fraksi mol O₂ di dalam gas buang.

Dengan mempertimbangkan bahwa $\left(\frac{M_{O_2}}{M_a} \right) = 0.032/0.02896 \approx 1.10$, udara masuk dalam kondisi kering sehingga factor ekspansi $x_{H_2O}^0$ dapat diabaikan, dan faktor ekspansi oksigen berharga, $\alpha = 1.5$ serta mensubstitusikan bentuk ϕ (pers. 6) maka pers. (5) dapat disederhanakan menjadi:

$$\dot{q}(t) = \Delta h_{c,ox} \cdot \rho_{O_2} \cdot 1.10 \cdot C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left(\frac{x_{O_2}^0 - x_{O_2}}{1.105 - 1.5x_{O_2}} \right) \dots\dots\dots(7)$$

Pers. (7) secara luas telah digunakan sebagai dasar dalam perhitungan laju pelepasan kalor dengan metode konsumsi oksigen untuk berbagai aplikasinya. Pers. (7) mempunyai potensi ketidakpastian yang berasal dari asumsi faktor ekspansi oksigen, nilai efektif kalor pembakaran dan konsentrasi oksigen pada saluran gas buang^[12,13].

3. Metode

3.1. Material

Etanol yang digunakan untuk penelitian adalah *anhydrous ethanol* yang diperoleh langsung dari salah satu produsen etanol di dalam negeri dan belum mengalami proses "denaturasi". Denaturasi adalah proses penambahan sejumlah kecil hydrocarbon (sekitar 3-5%) ke dalam *anhydrous ethanol* dan kemudian dinamakan "*Fuel grade Ethanol*"^[14]. Spesifikasi *anhydrous ethanol* yang dicampurkan ke dalam premium tersaji pada Tabel 1.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Tabel 1. Spesifikasi *anhydrous ethanol*

Parameter	Specification	Test Method
Appearance	clear colorless liquid free of suspended matter	Visual
Strength at 15°C	Min 99.7 % v/v	Alcoholmeter
Total Acid as Acetic Acid	Max 30 ppm	Test by Titrimetry
Moisture Content	Max. 0.30 % w/w	Karl Fischer titration
Density at 20°C (at point of production)	Max. 0.792	Hydrometer
Material non volatile at 105°C (at point of production)	Max. 30 ppm	Gravimetry

Premium yang digunakan untuk penelitian adalah jenis *Indonesian Regular Unleaded Gasoline* (premium) sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh Dirjen MIGAS dan dibeli di SPBU Pertamina yang berlabel "Pasti Pas".

3.2. Peralatan

Peralatan yang digunakan untuk uji pelepasan kalor dan massa bahan bakar premium, etanol dan campurannya adalah kalorimeter api yang dikembangkan oleh Nugroho^[11]. Skematik dan komponen dari kalorimeter api dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peralatan eksperimen

3.3. Prosedur Pengujian

Semua peralatan ukur terlebih dahulu dilakukan kalibrasi, utamanya adalah gas analyser dimana pengukuran udara atmosfer yang ditunjukkan pada display berharga 20.95%^[17]. 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.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

4. Hasil dan Diskusi

4.1. Hasil Uji Properties Campuran Premium-Etanol

Uji properties bahan bakar campuran premium-etanol yang berkaitan dengan proses pembakaran tersaji pada Tabel 2. Uji properties dilakukan sesuai dengan peralatan dan standar uji ASTM.

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 - bila diaplikasikan pada motor bakar sistem injeksi. Semakin besar densitas akan menambah jumlah massa bahan bakar yang masuk kedalam ruang bakar untuk volume injeksi yang sama.

Tekanan uap yang dinyatakan dalam *Reid Vapor Pressure* (RVP) menunjukkan tingkat volatilitas/kemudahan menguap dari suatu bahan bakar. Tekanan uap campuran premium-etanol untuk penambahan etanol sampai dengan 35% basis volume lebih besar dibandingkan dengan tekanan uap zat penyusunannya (*azeotrope effect*) – RVP premium dan etanol masing-masing sebesar 69.99 kPa dan 15.58 kPa. Pencampuran *gasoline* yang mempunyai RVP sekitar 62 kPa, tekanan uap campuran meningkat mencapai maksimum pada prosentase etanol 5% basis volume (E-5), kemudian secara perlahan menurun menuju tekanan uap etanol (E-100)^[20].

Efek *azeotrope* 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 *azeotrope* yang lebih tinggi dibandingkan dengan senyawa *aromatic*^[19]. Struktur hidrokarbon yang membentuk *azeotrope* dengan etanol dalam campuran etanol-*gasoline* masih belum diketahui^[20]. Etanol (senyawa berstruktur polar) bertanggung jawab terhadap peningkatan volatilitas campuran etanol-*gasoline* yang merupakan hasil dari penurunan interaksi molekul antara etanol dan senyawa hidrokarbon (non-polar)^[21].

Tekanan uap yang besar akan memudahkan bahan bakar untuk menguap dan dalam proses pembakaran secara difusi akan meningkatkan kecepatan proses pembakaran.

Etanol merupakan senyawa tunggal dan homogen dengan titik penguapan/pendidihan yang konstan ($\pm 77.5^{\circ}\text{C}$), sedangkan premium tersusun lebih dari 200 senyawa hidrokarbon mulai fraksi ringan (C_4) sampai dengan fraksi berat (C_{12}), dengan titik didih berjenjang dari 38 - 183 $^{\circ}\text{C}$ (Tabel 2).

Nilai kalor etanol hanya sekitar 60% dari premium. Besar dan laju pelepasan kalor dari suatu bahan bakar akan sangat ditentukan oleh besaran nilai kalor selain volatilitas dan energi penguapan. Peningkatan konsentrasi etanol dalam campuran akan menurunkan nilai kalor secara proporsional.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Tabel 2. Hasil uji properties penting dari campuran premium-etanol

No.	Properties	Unit	Method	E-0	E-5	E-10	E-15	E-20	E-25	E-30	E-35	E-40	E-100
				(Premium)									(Ethanol)
1	Density (15/15°C) ^{*)}	gr/cm ³	ASTM D 323	0.7204	0.72	0.72	0.73	0.73	0.74	0.74	0.74	0.75	0.793
2	Vapour Pressure ^{*)}	kPa at 38°C	ASTM D 5191/D	63.9856	71.36	68.88	67.34	66.88	66.47	66.40	65.02	52.13	15.5827
3	Low Heating Value-LHV ^{**)}	MJ/l		29.07	28.67	28.26	27.86	27.46	27.06	26.66	26.26	24.25	21.04
4	Viscosity ^{*)}	cSt at 40°C	ASTM D 445	0.48	0.49	0.5	0.52	0.55	0.57	0.6	0.63	0.72	1.11
5	Distillation ^{*)}		ASTM D 86-99a										
	Initial Boiling Point (IBP)	°C		38	38	39	41	39.5	40.5	44	40.5	43	77.25
	10% Evaporated (v/v)	°C		49	48	48	49	49	49.5	51	50	52.5	77.25
	50% Evaporated (v/v)	°C		73	74	63	63.5	65	66.5	68.5	70.25	71.5	77.25
	90% Evaporated (v/v)	°C		148	159	154	147	144.5	138	143	140.5	78.5	77.5
	Final Boiling Poin (FBP)	°C		183	183	185	182	183.5	182.5	182	180.5	173.3	78
6	RON ^{***)}		ASTM D 2699-86	88.62	90.61	91.89	94.70	97.06	98.35	99.50	102.28	104.21	127.43
7	Heat of Evaporization (KJ/kg)		-	289.00	331.70	374.40	417.10	459.80	502.50	545.20	318.89	630.60	854.00

Note: *) tested at Unit Produksi Pelumas Surabaya Laboratory (UUPS), PT Pertamina

**) tested at ITS-Chemical Engineering Laboratory

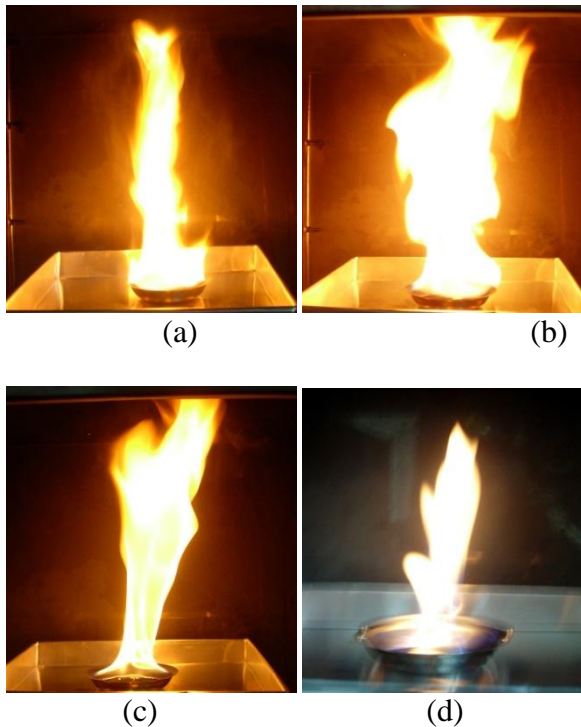
***) tested at Unit Produksi Pelumas Jakarta Laboratory (UPPJ), PT Pertamina

4.2 Hasil Pengujian Laju Pelepasan Kalor dan Massa

Gambar 2 menunjukkan bentuk nyala api dari pembakaran premium (E-0), E-5, E-25 dan etanol (E-100). Pembakaran E-5 dan E-25 yang merupakan campuran premium-etanol memberikan nyala pi yang lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar penyusunnya, yaitu: premium dan etanol.

Nyala api yang besar pada campuran premium-etanol disebabkan oleh volatilitas E-5 dan E-25 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.

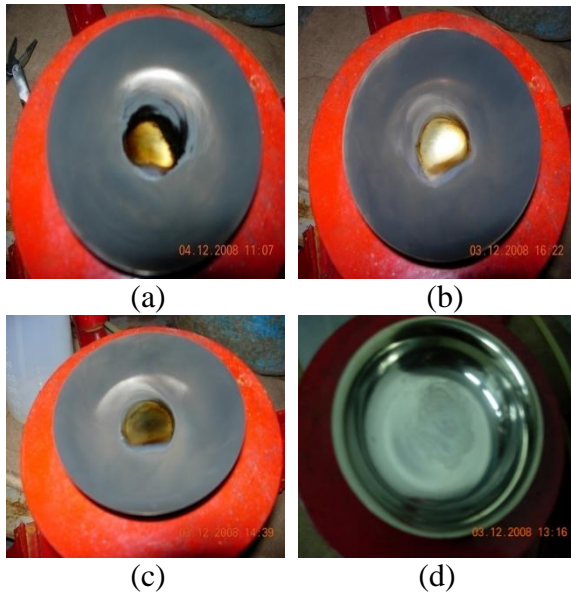
Nyala api juga dipengaruhi oleh tingkat reaktifitas dari bahan bakar. Campuran premium-etanol (E-5 dan E-25) bisa jadi lebih reaktif dibandingkan dengan premium dan etanol, dan ini merupakan salah satu *azeotropic effect* dari campuran premium-etanol. Reaktifitas bahan bakar yang tinggi akan memperbaiki kesempurnaan proses pembakaran.



Gambar 2. Proses pembakaran dan bentuk nyala api dari (a) premium, (b) E-5, (c) E-25 dan (d) etanol

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009



Gambar 3. Deposit hasil pembakaran (a) premium, (b) E-5, (c) E-25 dan (d) etanol

Gambar 3, menunjukkan deposit yang tersisa di cawan uji hasil dari proses pembakaran. Pembakaran premium dan campuran premium-etanol (E-5 dan E-25) menghasilkan deposit, hal ini dimungkinkan dari tersisanya fraksi berat hidrokarbon dari premium sebaliknya etanol mampu terbakar semua tanpa meninggalkan deposit. Dari pengamatan api pembakaran terlihat asap yang hitam untuk premium dan campurannya dengan etanol hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi pembakaran yang sempurna dan sebaliknya yang terjadi pada etanol.

Gambar 4 menunjukkan kurva laju pelepasan/ pembakaran massa bahan bakar premium, etanol dan campurannya. Pada awal pembakaran setelah dilakukan pemantikan pada bahan bakar, jumlah massa yang terbakar cukup rendah sampai dengan detik ke 50, kemudian meningkat secara signifikan dan menurun kembali pada akhir pembakaran. Laju pembakaran yang cepat pada saat awal karena telah terjadi akumulasi campuran uap bahan bakar dan udara – mudah menguap pada kondisi atmosferik – setelah itu laju pembakaran dikendalikan oleh properties volatilitas dan energi penguapan.

Penambahan etanol pada premium berpengaruh terhadap laju pembakaran massa karena *azeoptrope effect*. Pada fase awal, pembakaran berjalan lambat karena pembakaran dikendalikan oleh tersedianya uap bahan bakar yang ditentukan oleh volatilitas pada kondisi atmosferik – hanya fraksi ringan yang bisa menguap. Fase berikutnya, dengan pembakaran yang terjadi sebelumnya pelepasan kalor mulai meningkat sehingga akan terjadi peningkatan temperatur bahan bakar dan selanjutnya volatilitas juga akan meningkat pula.

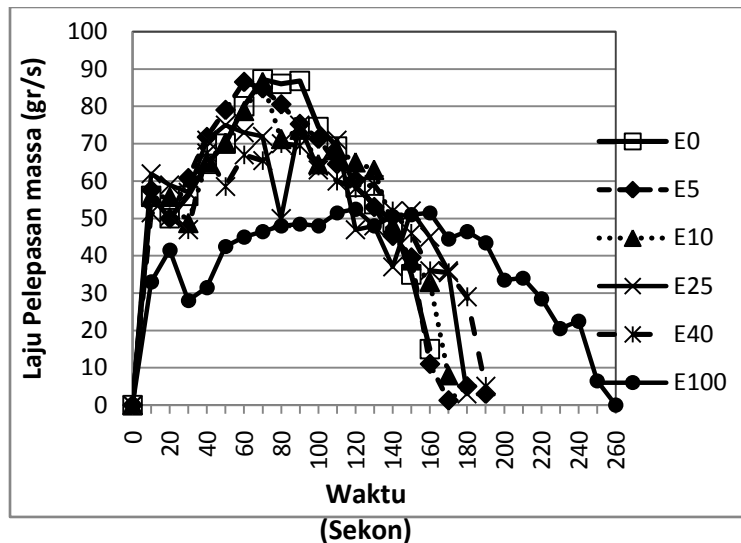
Peningkatan volatilitas berarti akan meningkatkan produksi uap demikian juga halnya dengan laju pembakaran massa. Pada fase ini laju pembakaran massa berlangsung lebih cepat karena sebagian besar bahan bakar (fraksi menengah dari hidrokarbon/premium dan etanol) terbakar pada fase ini.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

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

E-5 dan E-10 menunjukkan laju pembakaran massa yang setara dengan premium. Sedangkan penambahan etanol lebih besar dari 10% cenderung menurunkan laju pembakaran massa. Meskipun volatilitas campuran premium-etanol masih lebih besar dari premium tetapi penambahan etanol membutuhkan energi penguapan yang lebih besar.



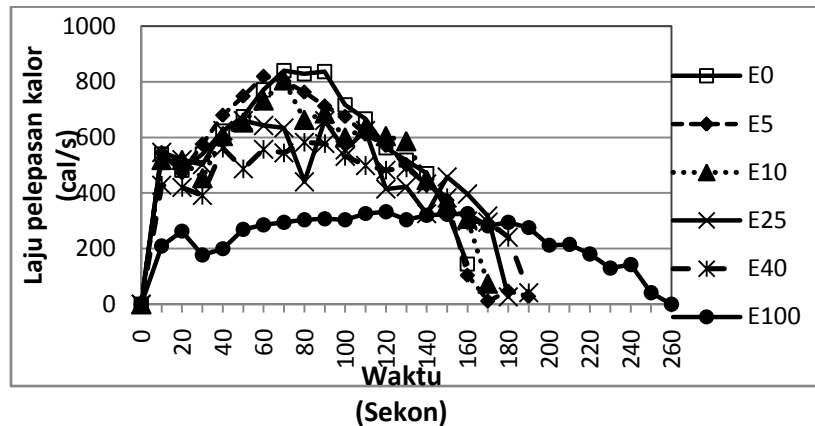
Gambar 4. Kurva laju pembakaran massa campuran premium-etanol terhadap waktu

Laju pembakaran etanol (E-100) lebih lambat dibandingkan dengan premium maupun campuran premium-etanol lainnya karena volatilitasnya lebih rendah dan energi penguapan yang tiga kali lipat dibandingkan dengan premium - Tabel 2.

Gambar 5, menunjukkan kurva laju pelepasan kalor dengan perhitungan berdasarkan laju pelepasan massa. Perhitungan laju pelepasan kalor ini mengacu pada pers. 1, dimana jumlah massa bahan bakar yang lepas/menguap akan terbakar secara sempurna, sehingga laju pelepasan kalor akan sebanding dengan laju pelepasan massa.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

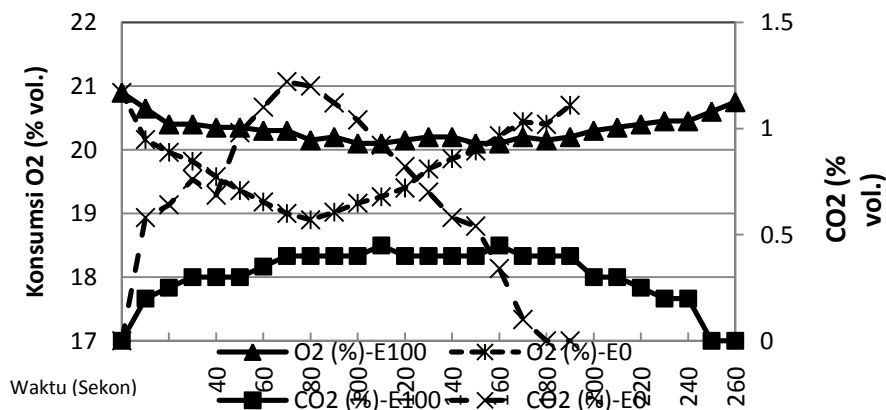
Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009



Gambar 5. Kurva laju pelepasan kalor campuran premium-etanol terhadap waktu

Pada perhitungan laju pelepasan kalor dengan metode konsumsi oksigen, jumlah konsumsi oksigen akan sebanding dengan jumlah CO_2 yang diproduksi. Gambar 6 mendiskripsikan korelasi evolusi penurunan konsentrasi O_2 dengan peningkatan CO_2 yang merupakan gas hasil pembakaran premium (E-0) dan etanol (E-100). Penurunan O_2 dari konsentrasi awal $\pm 20.95\%$ (udara segar) yang terdeteksi di gas buang menunjukkan jumlah oksigen yang dikonsumsi selama proses pembakaran. Sedangkan peningkatan konsentrasi CO_2 akan sebanding dengan jumlah oksigen yang dikonsumsi selama pembakaran – CO_2 merupakan produk dari oksidasi karbon.

Pada pembakaran, kebutuhan oksigen akan sebanding dengan jumlah massa bahan bakar. Seperti pada penjelasan Gambar 4, bahwa pada fase awal pembakaran, konsumsi oksigen masih kecil karena ketersediaan uap bahan bakar masih sedikit kemudian fase berikutnya terjadi peningkatan pembakaran seiring dengan meningkatnya jumlah massa bahan bakar yang menguap dan kemudian menurun lagi pada akhir pembakaran.

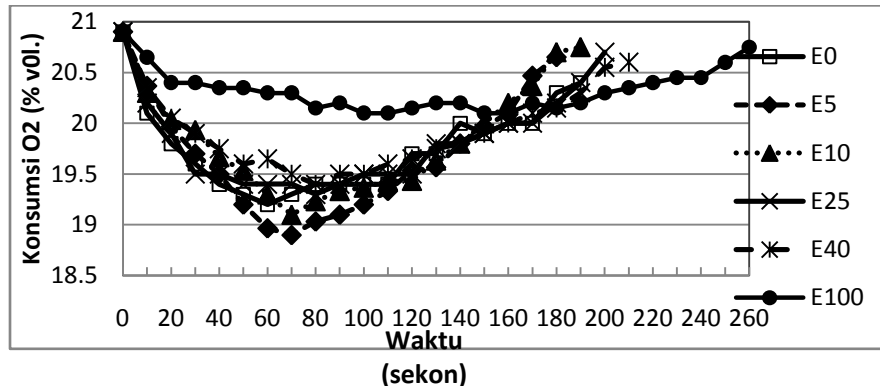


Gambar 6. Evolusi konsentrasi O_2 dan CO_2 terhadap waktu

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

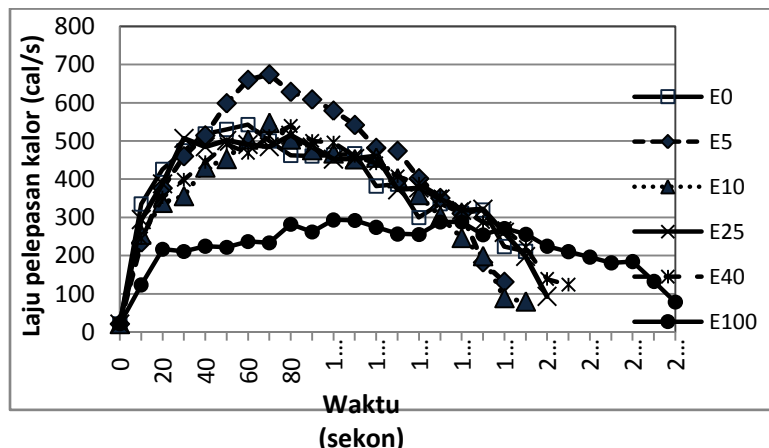
Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Gambar 7, memperlihatkan evolusi konsumsi oksigen pada pembakaran campuran premium-etanol. Konsumsi oksigen oleh E-5 lebih besar dibandingkan dengan premium dan campuran premium-etanol lainnya, sedangkan untuk E-10 dan premium jumlahnya setara. Untuk etanol murni kebutuhan konsumsi oksigen kecil karena tingkat penguapan etanol yang rendah sehingga dengan jumlah volume bahan bakar yang sama dibutuhkan waktu pembakara yang lebih lama.



Gambar 7. Konsumsi oksigen pembakaran campuran premium-etanol

Gambar 8 menunjukkan pola dan laju pelepasan kalor premium, etanol dan campurannya. Kurva laju pelepasan kalor mempunyai pola yang mirip dengan kurva konsumsi oksigen, dimana konsumsi oksigen yang meningkat akan menaikkan laju pelepasan kalor. 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 hal ini sejalan dengan pola penurunan massa (Gambar 4).



Gambar 8. Laju pelepasan kalor campuran premium-etanol berdasarkan metode konsumsi oksigen

Pada laju pelepasan kalor dengan metode konsumsi oksigen, terlihat jelas bahwa E-5 mempunyai harga tertinggi (Gb. 8), sedangkan bila laju pelepasan kalor menggunakan metode laju pembakaran

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

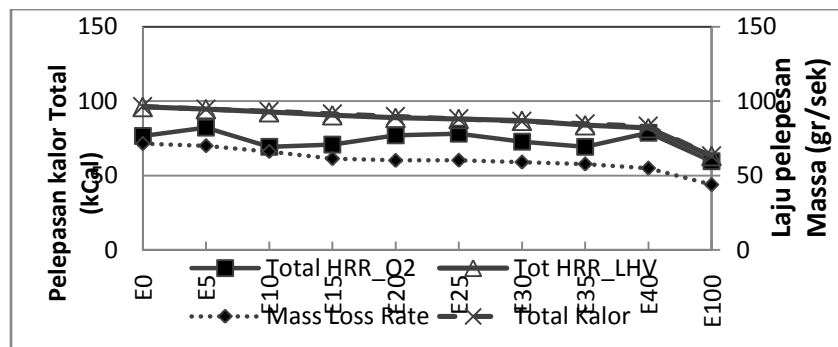
Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

massa, maka E-5, premium dan E-10 mempunyai nilai yang setara (Gb. 7). Yang menarik adalah bahwa nilai dari laju pelepasan kalor yang dihitung dengan metode konsumsi oksigen lebih rendah bila dibandingkan dengan metode laju pembakaran massa. Hal ini menunjukkan bahwa pengasumsian pembakaran terjadi secara sempurna di dalam kalorimeter api tidak tepat karena semua massa yang menguap dan meninggalkan cairan tidak seluruhnya terbakar dan menghasilkan CO₂ – metode laju pelepasan massa. Sedangkan metode konsumsi oksigen, jumlah oksigen yang dikonsumsi akan setara dengan jumlah CO₂ yang akan diproduksi. Hasil ini akan lebih akurat bila juga dipertimbangkan jumlah CO yang dihasilkan dari pembakaran.

Fenomena menarik terjadi pada campuran premium-etanol dengan konsentrasi etanol 5% basis volume. Laju pelepasan kalor E-5 menunjukkan nilai terbesar dibandingkan dengan premium, etanol maupun campuran premium-etanol lainnya (Gb. 8). Laju pelepasan kalor yang berkorelasi dengan volatilitas menunjukkan konsistensi dengan hasil uji tekanan uap (RVP) dimana RVP untuk E-5 naik sebesar 11% dibandingkan premium (*azeotrope effect*).

Gambar 9 memberikan perbandingan pelepasan kalor total dari 10 gram massa bila dihitung dengan metode laju pelepasan massa, konsumsi oksigen dan total kalor yang merupakan perkalian massa dengan nilai kalor bawah (energi yang terkandung di dalam bahan bakar). Pola pelepasan kalor total dengan metode laju pelepasan massa mempunyai nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan konsumsi oksigen, bahkan nilainya mendekati dengan kondisi ideal (energi yang terkandung dalam bahan bakar) hanya berbeda sekitar 0.5% saja. Sedangkan pelepasan kalor total dengan konsumsi energi menghasilkan nilai lebih kecil antara 4 – 25% dibandingkan dengan metode laju pelepasan massa.

Besarnya pelepasan kalor total oleh bahan bakar dengan metode laju pelepasan massa proposional terhadap laju pelepasan massa dan dengan nilai kalor – berbanding terbalik dengan penambahan etanol. Sedangkan dengan metode konsumsi oksigen, pelepasan kalor total relatif berfluktuasi terhadap laju pelepasan kalor dan nilai kalor (konsentrasi etanol pada premium). Hal ini bisa jadi karena sifat yang kontradiktif antara volatilitas dan besarnya energi penguapan.



Gambar 9. Perbandingan Pelepasan kalor

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

5. Kesimpulan

Sifat anomali (*azeotrope effect*) dari campuran premium-etanol mempengaruhi karakteristik pembakaran pada kondisi atmosferik khususnya laju pelepasan kalor. *Azeotrope effect* paling tinggi terjadi pada konsentrasi etanol 5% (E-5), dimana volatilitas meningkat sebesar 11% dibandingkan dengan premium. Penentuan laju pelepasan kalor dengan metode laju pelepasan massa mempunyai harga mendekati pada pembakaran sempurna, sedangkan dengan metode konsumsi oksigen lebih rendah antara 4 – 25% dan lebih mendekati pada proses pembakaran yang aktual. Penghitungan laju pelepasan kalor dengan konsumsi oksigen akan lebih akurat bila CO dipertimbangkan.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Pimpinan dan staf Laboratorium Unit Produksi Pelumas Surabaya (UPPS), Lab. Unit Produksi Pelumas Jakarta (UPPJ) dan Manajer New Product Development (NPD) PT Pertamina (Persero) atas diperkenalkannya menggunakan fasilitas Laboratorium untuk pengujian properties bahan bakar. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional atas pembiayaan penelitian ini melalui dana Penelitian Hibah Bersaing, tahun anggaran 2009.

Daftar Acuan:

- [1] Setiyawan A. & Bambang Sugiarto, 2007, "Studi campuran etanol dan gasoline sebagai bahan bakar motor bensin di Indonesia", Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin VI, UNSYIAH, Banda Aceh.
 - [2] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 32 Th 2008, 2008, "Penyediaan, Pemanfaatan Dan tata Niaga Bahan Bakar nabati (Biofuel) Sebagai Bahan bakar Lain".
 - [3] Setiyawan A., Bambang Sugiarto. & Yulianto S. Nugroho, 2008, "Pengaruh Penambahan Anhydrous Ethanol Pada Premium Terhadap Perubahan Properties", Prosiding Seminar SNTTM VII, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
 - [4] Hugget, C., 1980, "Estimation of rate of heat release by means of oxygen-consumption measurements", Fire and Materials, Vol. 4, pp. 61-65.
 - [5] Drysdale Dougal, 1998, "Introduction to fire Dynamics", 2nd edition., John Wiley & Sons, west Sussex, England.
 - [6] <http://cfbt-us.com/wordpress/?tag=heat-release-rate>, download: 13 April 2009
 - [7] 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 Composition", Fire Safety Science 9, pp. 1165-1176. doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-1165
 - [8] 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.
 - [9] 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>, download: 9 April 2009.
 - [10] 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.
-

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

- [11] Nugroho, S, Yulianto, Achmad Junaedi, & Gandjar Kiswanto, 2005, "Pengembangan Kalorimeter Api Untuk Karakterisasi Sifat Bakar Material", Jurnal Teknologi-Universitas Indonesia, edisi No.4, Tahun XIX, Desember, p. 294-301.
 - [12] Enright, P.A, dan Fleischmann, C.M., "Uncertainty of heat release rate of calculation of the ISO5660-1 Cone Calorimeter Standard Test Method", Fire Tech., Vol. 35 (1999), pp. 153-69.
 - [13] ASTM E 1354-97, "Standard Test Method for heat and visible smoke release rates for materials and products using an oxygen consumption calorimeter", Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, 1997, pp. 672-89.
 - [14] Prihandana Rama, Kartika Noerwijari, P.G. Adinurani, D. Setyaningsih, S. Setyadi, & R. Hendroko, 2007, "Bioetanol Ubi Kayu – Bahan Bakar Masa Depan", AgroMedia Pustaka, Jakarta.
 - [15] Sahu Ranajit, 2007, "Technical paper on the introduction of greater than E10-gasoline blends", <http://www.seearoostook.com/welcome/e10-TechPaper.pdf>, akses: 14 April 2009.
 - [16] Gulder O.L., 1983, "On water-ethanol-gasoline blends as spark ignition engine fuels", Fuel, Vol. 62, pp. 1381-1382.
 - [17] Lindholm 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.
 - [18] American Petroleum Institute (API), 2001, "Alcohol and Ethers: A Technical assessment of their application as fuel and fuel components. API Publication 4261. Third edition.
 - [19] Da Silva R., Renanto Cataluna, E.W. de Menezes [2005], "Effect additives on the antiknock properties and Reid vapour pressure of gasoline", Fuel Vol 84., pp. 951-9, Elsevier.
 - [20] 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.
 - [21] 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 Brazilian gasoline", Fuel Vol 87, pp. 2168-77, Elsevier.
 - [22] 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.
-