

KELAMBATAN WAKTU PENYALAAAN CAMPURAN SOLAR DAN METIL ESTER KELAPA SAWIT PADA MOTOR DIESEL INJEKSI LANGSUNG

Prawoto, L. Shalahuddin dan R. C. Nugroho

Balai Termodinamika, Motor dan Propulsi, BPP Teknologi
Kawasan Puspiptek, Serpong Tangerang 15314
Tel. (021) 756.0539; Fax. (021) 756.0538
email: rcnugroho_19@yahoo.com

Ringkasan

Kelambatan waktu penyalaan merupakan parameter yang sangat penting dalam operasi motor diesel. Di definisikan sebagai waktu antara saat mulai injeksi bahan bakar dan saat mulai terjadinya pembakaran. Kelambatan waktu penyalaan harus sesingkat mungkin, bila terlalu panjang akan terjadi diesel knocking. Telah banyak penelitian menunjukkan bahwa dengan bertambahnya bilangan setana akan memperpendek kelambatan waktu penyalaan. Berkaitan dengan proyek Biodiesel antara BPPT – PPKS dalam pemanfaatan metil ester minyak kelapa sawit (MES) sebagai bahan bakar alternatif, telah dilakukan pengujian dengan berbagai komposisi campuran MES-solar. Dari hasil perhitungan, bilangan setana campuran MES-solar lebih besar dibandingkan dengan solar murni, sehingga dapat diperkirakan bahwa kelambatan waktu penyalaan campuran MES-solar akan lebih pendek. Pengujian yang dilakukan pada mesin diesel dimaksudkan untuk membandingkan unjuk kerja dari berbagai campuran MES-solar. Dari data hasil pengukuran tekanan dalam silinder yang digunakan untuk menentukan kelambatan waktu penyalaan menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil-hasil penelitian ini. Korelasi antara kelambatan waktu penyalaan, bilangan setana dan kecepatan putar motor didapat dalam bentuk persamaan linear sederhana.

Abstract

Ignition delay is an important parameter in diesel engine operation. It is defined as the time (or crank angle degree) between the start of injection and the start of combustion. Ignition delay should be kept as short as possible, otherwise diesel knocking can occur if the delay is too long. Many works have shown that increasing fuel cetane number may shorten the ignition delay. In conjunction with the BPPT – PPKS Biodiesel Project to utilize methyl ester palm oil (sawit) (MES) as an alternative fuel, several compositions of MES-conventional diesel fuel blends were tested. Cetane number of MES-diesel fuel blends were calculated to be higher than that of conventional diesel fuel. Hence, it was expected that the MES-diesel fuel blends would yield shorter ignition delay than pure diesel fuel. Engine tests were conducted to compare the performance of several blends of MES-diesel fuel. The results from in-cylinder pressure data, from which ignition delay was determined have confirmed this work. Furthermore, correlations between ignition delay, cetane number, and engine speed have been obtained in simple linear equations.

Key words: Ignition delay, Cetane number, Biodiesel, Methyl Ester Sawit (MES), Direct injection.

1. PENDAHULUAN

Pembakaran pada Mesin Diesel

Proses pembakaran pada mesin diesel secara mendasar telah dikenal secara luas, dan secara singkat dapat dijabarkan sebagai berikut. Bahan bakar disemprotkan ke dalam silinder beberapa saat menjelang titik mati atas pada langkah kompresi. Bahan bakar yang berfase cair tersebut disemprotkan dalam tekanan dan kecepatan tinggi melalui nozel injector, sehingga mengakibatkan atomisasi bahan bakar menjadi butiran-butiran kecil cair/kabut (droplet). Kabut tersebut kemudian menguap dan berdifusi/bercampur dengan udara yang bertekanan dan bersuhu tinggi. Apabila suhu dan tekanan udara

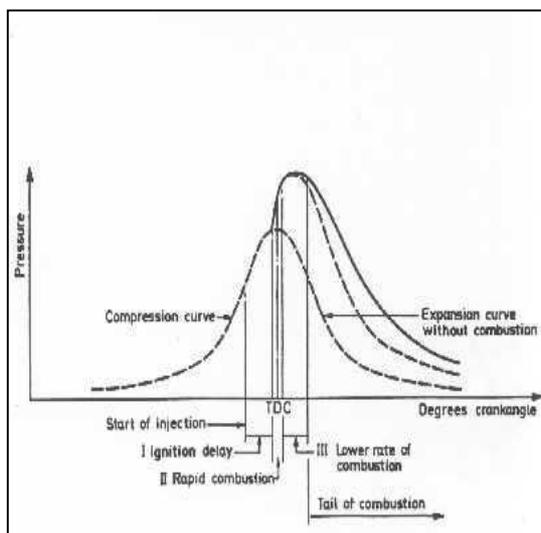
dalam silinder mencapai titik nyala bahan bakar, maka akan terjadi penyalaan secara spontan pada sebagian udara dan bahan bakar yang telah tercampur, setelah melalui suatu periode kelambatan waktu (delay period) selama beberapa derajat putaran poros engkol. Tekanan gas dalam silinder akan bertambah selama proses pembakaran terjadi. Penyemprotan bahan bakar terus berlanjut sampai jumlah yang dibutuhkan terpenuhi. Atomisasi, penguapan, difusi bahan bakar dengan udara dan pembakaran terus berlanjut sampai semua bahan bakar mengalami seluruh proses tersebut. Pencampuran udara yang tersisa dengan gas yang sedang dan sudah terbakar terus berlanjut selama proses pembakaran dan proses ekspansi.

Kelambatan Waktu Penyalaan

Kelambatan waktu penyalaan (*Ignition delay*) pada motor diesel dinyatakan sebagai selang waktu (atau derajat sudut engkol) antara mulainya penyemprotan bahan bakar dan mulai terjadinya pembakaran [1]. Mulainya penyemprotan bahan bakar biasanya ditentukan saat jarum injektor (*needle*) terangkat dari dudukannya. Mulai terjadinya pembakaran dapat ditentukan dari perubahan sudut kemiringan (*slope*) yang tajam pada grafik tekanan terhadap sudut engkol, $p-\theta$ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1

Proses fisis dan kimiawi terjadi sebelum sebagian besar energi kimia bahan bakar dilepaskan. Proses fisisnya terutama adalah: atomisasi bahan bakar, penguapan butiran bahan bakar dan difusi uap bahan bakar dengan udara. Proses kimiawinya terutama adalah: reaksi pra pembakaran dari campuran bahan bakar-udara dan sisa gas, yang akan menyebabkan penyalaan sendiri (*autoignition*). Proses-proses tadi dipengaruhi oleh desain mesin, kondisi operasi dan karakter bahan bakar yang digunakan.

Kelambatan waktu penyalaan dipengaruhi oleh karakteristik penyalaan bahan bakar, sehingga sifat-sifat bahan bakar merupakan hal yang sangat penting untuk menentukan karakter operasi mesin diesel, seperti efisiensi konversi bahan bakar, kehalusan operasi, kegagalan penyalaan (*misfire*), asap gas buang (*smoke*), kebisingan (*noise*), dan kemudahan penyalaan (*start*).



Gambar 1. Proses Pembakaran Pada Motor Diesel, ditunjukkan dalam grafik perubahan vs sudut engkol [2].

Bahan Bakar dan Sifat-Sifatnya

Karena proses fisis dan kimiawi bahan bakar keduanya terjadi selama kelambatan waktu penyalaan, pengaruh perubahan sifat-sifat fisis dan kimiawi bahan bakar juga banyak dipelajari. Karakteristik kimiawi bahan bakar jauh lebih penting. Kualitas penyalaan bahan bakar ditentukan oleh bilangan setananya, yang tentu saja mempengaruhi kelambatan waktu penyalaannya.

Bilangan setana suatu bahan bakar tergantung kepada struktur molekulnya. Untuk bahan bakar diesel (solar), senyawa parafin rantai lurus (normal alkana) memiliki kualitas penyalaan yang lebih bagus, dan akan meningkat bila rantainya bertambah panjang. Senyawa aromatic memiliki kualitas penyalaan yang kurang bagus.

Metil ester sawit yang digunakan selama pengujian diperoleh dari Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) Medan. PPKS membuat MES dari bahan baku minyak sawit mentah (CPO). Sifat kimia fisika MES produksi PPKS dan solar terdapat pada Tabel 1. Solar diperoleh langsung dari PERTAMINA, sehingga diasumsikan mempunyai spesifikasi teknis sama dengan yang dikeluarkan oleh pemerintah melalui Ditjen MIGAS.

Dari Table 1 terlihat bahwa metil ester kelapa sawit produksi PPKS Medan memiliki bilangan setana 62,4, berarti lebih tinggi dibanding dengan bilangan setana solar yang ada di Indonesia yaitu 50 s/d 53 [4].

Tabel 1. Karakteristik MES dan Solar

Parameter	MES	Solar
Methyl Ester (%)	100	-
IsoParafin + Naphthenes(%)	-	55
Parafin	-	20
Aromatik	-	25
Parameter	MES	Solar
Densitas, g/ml	0,8624	0,8520-0,8750
Viskositas, cSt	5,55	3,2-4,0
Flash Point, °C	172	55-176
Cetane Number	62,4	50-53
Kadar Air, %	0,1	0,005-0,3
Pelumasan	Tinggi	Rendah
Bahan Baku	Renewable	Unrenewable

Bilangan setana campuran solar dengan metil ester kelapa sawit (MES) dapat diprediksi dengan rumus sederhana pada Persamaan (1). Perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran cukup dapat diterima [3].

$$CN_{camp} = x_{solar} \cdot CN_{solar} + x_{ME} \cdot CN_{ME} \quad (1)$$

dengan :

CN_{camp} : bilangan setana campuran

CN_{solar} : bilangan setana solar

CN_{ME} : bilangan setana metil ester

x_{solar} : prosentase massa solar

x_{ME} : prosentase massa metil ester

Bilangan setana campuran dari hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2 berikut :

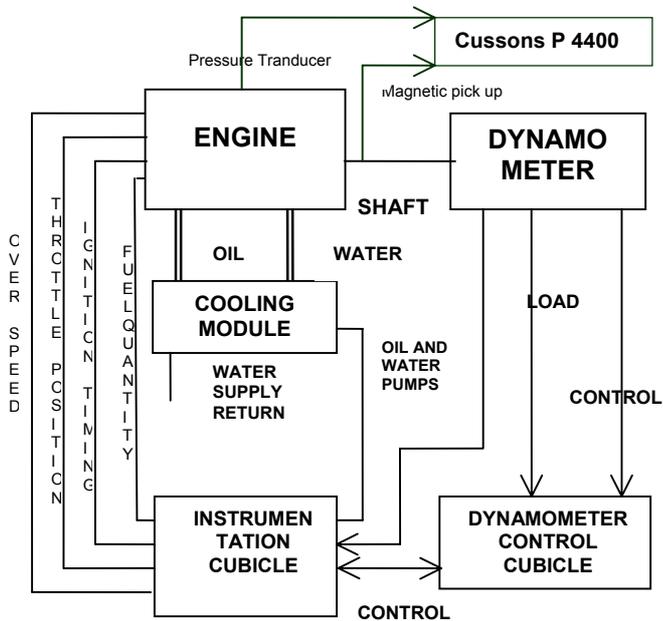
Tabel 2. Hasil Perhitungan Bilangan Setana Bahan Bakar

Bahan Bakar	Bilangan Setana
20% MES	52,48
30% MES	53,72
40% MES	54,96

2. ALAT DAN METODE PENGUJIAN

Alat Uji

Pengujian dilakukan pada mesin diesel silinder tunggal injeksi langsung (*direct injection*) (DI) Hydra Research Engine yang dihubungkan dengan dinamometer jenis DC, dengan layout seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Konfigurasi dasar mesin diberikan dalam Tabel 3.



Gambar 2. Layout sistem pengujian.

Tabel 3. Spesifikasi Mesin Riset Hydra

Jenis	Diesel Injeksi langsung 2 katup/silinder
Diameter silinder x langkah	80,26 mm x 88,9 mm
Kapasitas silinder	450 cc
Perbandingan Kompresi	20,3 : 1
Putaran maksimum	4500 rpm

Uraian lebih detail tentang spesifikasi mesin dapat dilihat pada Pustaka [2]. Sebagai dasar perbandingan, digunakan *setting* optimum mesin dengan bahan bakar solar untuk beberapa putaran mesin, yaitu dari putaran 1200 s/d 4200 rpm dengan selang 600 rpm. *Setting* mesin disini adalah penyetelan besarnya bukaan *rack* (menentukan banyaknya suplai bahan bakar) dan waktu mulai injeksi bahan bakar. *Setting* optimum didasarkan pada daya dan torsi terbesar yang dihasilkan mesin, dengan tingkat ketebalan asap gas buang (*smoke level*) tidak lebih dari 4 berdasar skala FSN (*filter smoke number*). Pengujian dengan komposisi bahan bakar yang lain menggunakan *setting* optimum solar. *Setting* yang digunakan adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Untuk mengukur tekanan gas dalam silinder digunakan kistler *piezo electric presssure transducer*, sedangkan posisi poros engkol diukur dengan *magnetic pick-up*. Kedua pengukuran tersebut dipadukan oleh Engine Electronic Indicating System Cussons P 4400.

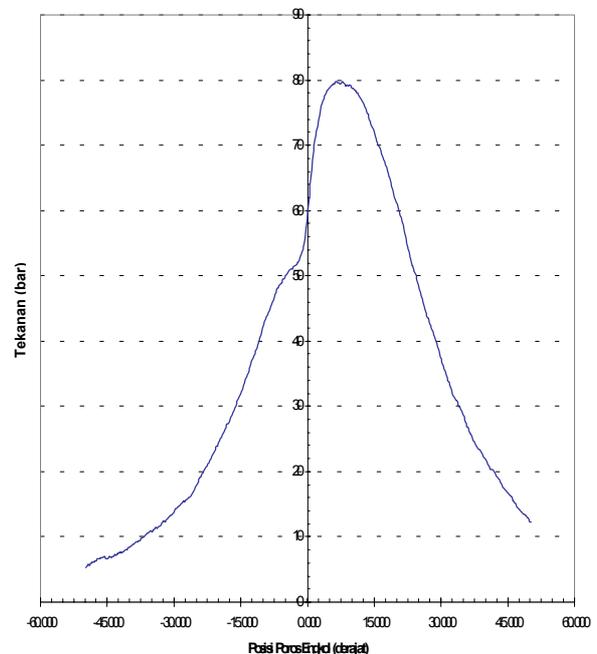
Tabel 4. Setting mesin berdasarkan setting optimum solar

Putaran mesin (rpm)	Saat Injeksi (sebelum TMA) (derajat)	Laju Aliran Bahan bakar (l/jam)
1200	24	0,62
1800	28	1,17
2400	32	1,70
3000	36	2,31
3600	38	2,60
4200	40	2,62

Pengolahan Data

Pencatatan data pada alat ukur dalam bentuk file Excel, terdiri dari dua kolom. Kolom pertama merupakan data waktu dan kolom kedua merupakan data tegangan. Kedua kolom data diatas digunakan untuk membuat grafik $p-\theta$ (tekanan gas dalam silinder vs posisi sudut engkol). Kolom pertama (waktu) diubah menjadi posisi sudut engkol dan digunakan sebagai sumbu x. Kolom kedua (tegangan), dengan kalibrasi diubah menjadi tekanan gas dalam silinder dan digunakan sebagai sumbu y, untuk menghasilkan grafik $p-\theta$ seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Kelambatan waktu penyalaan didefinisikan sebagai selang waktu antara mulainya injeksi bahan bakar sampai saat mulai terjadinya pembakaran.

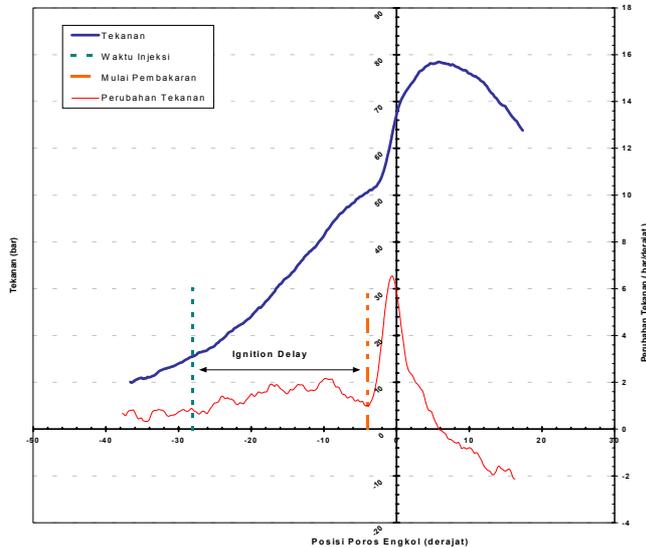


Gambar 3. Grafik Tekanan dalam silinder vs posisi sudut engkol.

Pada grafik $p-\theta$ saat mulai terjadinya pembakaran dapat ditentukan berdasarkan terjadinya perubahan kemiringan (*slope*) pada grafik $p-\theta$ tersebut. Perubahan kemiringan

dapat diketahui dengan membuat data perubahan tekanan terhadap perubahan sudut poros engkol (dp/dθ).

Secara lebih jelas penentuan dan contoh perhitungan hasil pengukuran kelambatan waktu penyalan masing-masing dapat dilihat pada Gambar 4 dan Tabel 5.



Gambar 4. Penentuan Kelambatan Waktu Penyalan dari Tekanan dalam silinder vs posisi sudut engkol.

Tabel 5. Contoh Perhitungan Hasil Pengukuran Kelambatan Waktu Penyalan Pada Putaran 1200 rpm.

Bahan Bakar	SIT	SOC	Kelambatan Waktu Penyalan	
	Sudut engkol (°)	Sudut engkol (°)	Sudut engkol (°)	Waktu (ms)
Solar	-24,0	0	24,000	3,333
20% ME	-24,0	-1,312	22,688	3,151
30% ME	-24,0	-1,456	22,544	3,131
40% ME	-24,0	-1,744	22,256	3,091

SIT : Start of injection
SOC : Start of combustion

3. HASIL DAN ANALISA

Hasil perhitungan

Hasil perhitungan kelambatan waktu penyalan untuk berbagai putaran mesin dapat dilihat pada Tabel 6. Dari perhitungan tersebut dibuat grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Grafik perubahan kelambatan waktu penyalan terhadap bilangan setana untuk berbagai putaran ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

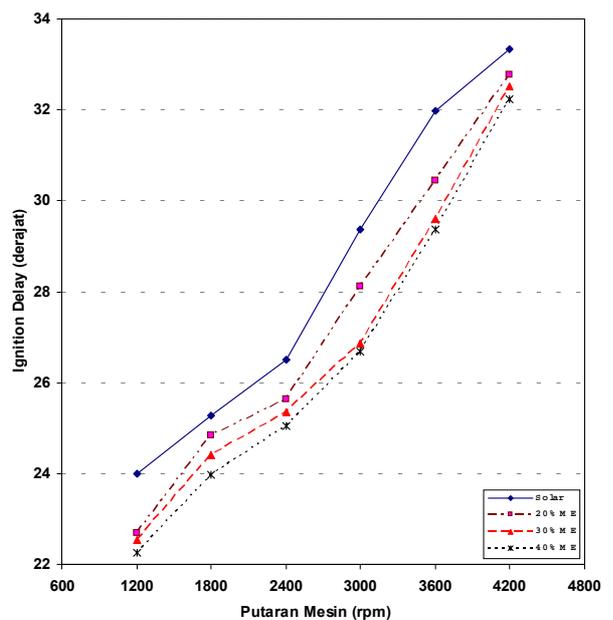
Analisis

Dari Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa pada putaran yang sama kelambatan waktu penyalan motor diesel berbahan bakar solar relatif lebih lama dibanding dengan bahan bakar campuran metil ester sawit dan solar. Semakin besar prosentase metil ester, semakin cepat kelambatan waktu penyalannya.

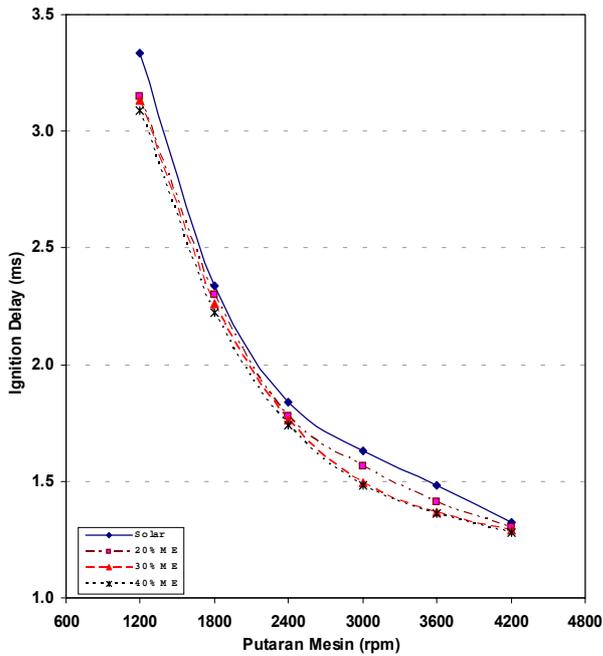
Untuk bahan bakar yang sama, kelambatan waktu penyalan dalam derajat putaran poros engkol akan semakin lama dengan naiknya putaran mesin. Sedangkan kelambatan waktu penyalan dalam ukuran waktu (ms), akan turun dengan naiknya putaran mesin. Hal ini terjadi karena putaran mesin akan mempengaruhi perubahan temperatur dan tekanan terhadap waktu.

Tabel 6. Perhitungan kelambatan waktu penyalan untuk berbagai putaran mesin

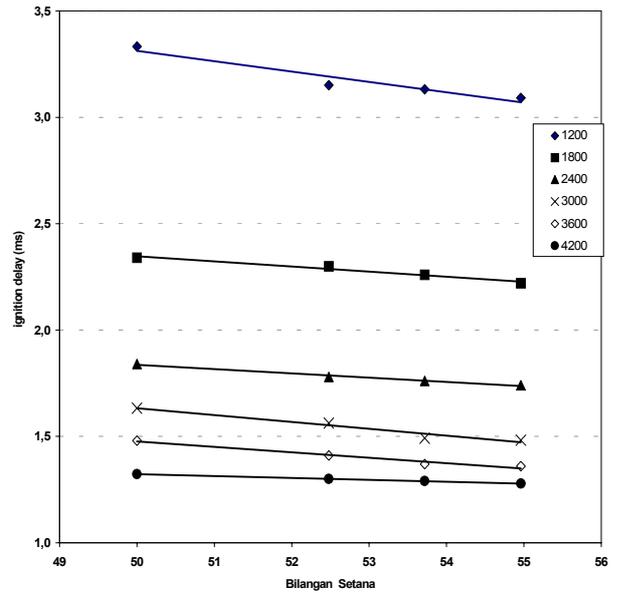
Putaran Mesin (rpm)	Kelambatan Waktu Penyalan							
	Solar Murni		ME 20 %		ME 30 %		ME 40 %	
	Derajat Sudut Engkol	Waktu (ms)	Derajat Sudut Engkol	Waktu (ms)	Derajat Sudut Engkol	Waktu (ms)	Derajat Sudut Engkol	Waktu (ms)
1200	24,000	3,333	22,688	3,151	22,544	3,131	22,256	3,091
1800	25,272	2,340	24,840	2,300	24,408	2,260	23,976	2,220
2400	26,496	1,840	25,632	1,780	25,362	1,761	25,056	1,740
3000	29,380	1,632	28,120	1,562	26,860	1,492	26,680	1,482
3600	31,968	1,480	30,456	1,410	29,592	1,370	29,376	1,360
4200	33,326	1,322	32,760	1,300	32,508	1,290	32,226	1,279



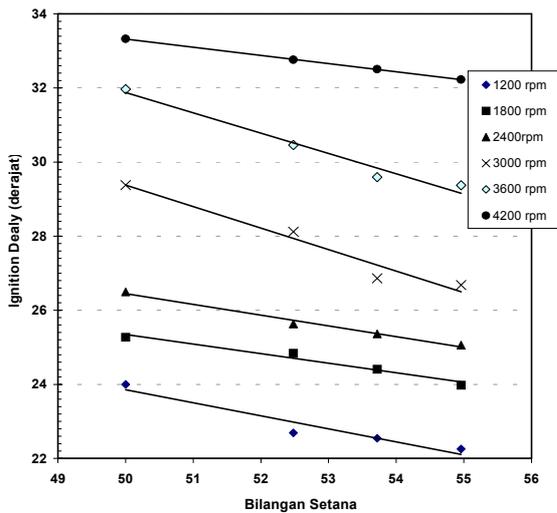
Gambar 5. Grafik Kelambatan Waktu Penyalan (derajat sudut engkol) terhadap Putaran Mesin Untuk Berbagai Komposisi Bahan Bakar



Gambar 6. Grafik Kelambatan Waktu Penyalaan (ms) terhadap Putaran Mesin Untuk Berbagai Komposisi Bahan Bakar.



Gambar 8. Grafik Kelambatan waktu Penyalaan (ms) Terhadap Bilangan Setana Bahan Bakar Untuk Berbagai Putaran Mesin.



Gambar 7. Grafik Kelambatan Waktu Penyalaan (derajat sudut engkol) Terhadap Bilangan Setana Bahan Bakar Untuk Berbagai Putaran Mesin.

Dari Gambar 7 dan 8 dapat dilihat bahwa untuk semua putaran mesin, semakin tinggi bilangan setana maka semakin pendek kelambatan waktu penyalannya, dengan bentuk grafik yang relatif linear.

Berdasar data hasil pengujian dan grafik yang ada, maka dibuat persamaan nilai perkiraan kelambatan waktu penyalaan karena pengaruh putaran mesin dan pengaruh bilangan setana bahan bakar (komposisi campuran bahan bakar) untuk mesin diesel injeksi langsung Hydra. Persamaan ini berlaku paling tidak untuk bilangan setana dari 50 s/d 55 (campuran metil ester sampai dengan 40 %), dan putaran mesin antara 1200 s/d 4200 rpm.

Dari Gambar 7 atau Gambar 8 dapat dibuat persamaan garis linier :

$$y = ax + b \quad (2)$$

dengan :

- y = kelambatan waktu penyalaan dalam derajat sudut engkol atau dalam ms.
- x = bilangan setana
- a = konstanta
- b = konstanta akibat pengaruh putaran mesin.

Sebagai contoh untuk perhitungan dari Gambar 7 harga a dan b diberikan dalam tabel 7.

Tabel 7. Konstanta a dan b dari Persamaan (2)

Putaran	a	B
1200	-0,309	18,727
1800	-0,289	17,541
2400	-0,314	18,723
3000	-0,271	16,380
3600	-0,281	17,033
4200	-0,283	17,162

Konstanta a diambil rata-rata dari seluruh putaran dan dibuat konstanta b baru, sehingga didapat besaran seperti dalam Tabel 8.

Tabel 8. Konstanta a dan b baru Persamaan (2)

Putaran	a'	b'
1200	-0,291	17,782
1800	-0,291	17,646
2400	-0,291	17,516
3000	-0,291	17,430
3600	-0,291	17,558
4200	-0,291	17,582

Konstanta b' merupakan fungsi putaran, oleh karena itu perlu dibuat grafik b' terhadap putaran mesin, untuk mendapatkan persamaan linier,

$$b' = -6,10^{-5} x_1 + 17,759 \quad (3)$$

dimana x_1 disini merupakan putaran mesin, sehingga persamaan (2) menjadi :

$$y = -6,10^{-5} x_1 - 0,291 x + 17,759 \quad (4)$$

atau :

$$\tau_{id\ pred} = -6,10^{-5} n - 0,291 CN + 17,759 \quad (5)$$

dengan :

$\tau_{id\ pred}$ = kelambatan waktu penyalaan perkiraan (ms)

n = putaran mesin (rpm)

CN = bilangan setana.

4. KESIMPULAN

Dari uraian di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan.

Kelambatan waktu penyalaan (dalam derajat sudut engkol) akan bertambah bila putaran mesin naik, sedangkan kelambatan waktu penyalaan dalam waktu (ms) akan turun dengan bertambahnya putaran mesin.

Kelambatan waktu penyalaan yang dihasilkan motor diesel injeksi langsung Hydra dengan bahan bakar campuran metil ester dan solar relatif lebih pendek dibandingkan kelambatan waktu penyalaan solar murni. Penurunan yang terjadi berbanding lurus dengan kenaikan prosentase campuran metil ester.

Dari data hasil pengujian dapat dibuat persamaan linier kelambatan waktu penyalaan (τ_{id}) dalam derajat sudut engkol maupun dalam waktu (ms) yang merupakan fungsi bilangan setana (CN) dan putaran mesin (n). Persamaan ini berlaku untuk motor diesel injeksi langsung Hydra dengan menggunakan bahan bakar yang mempunyai bilangan setana 50 s.d 55. Dari persamaan yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa pengaruh terbesar terhadap kelambatan waktu penyalaan adalah bilangan setana, yang berarti berkaitan dengan sifat-sifat dan karakteristik bahan bakar yang digunakan. Sedangkan pengaruh putaran mesin tidak terlalu signifikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. John B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamental*, Mc Graw Hill Series in Mechanical Engineering, 1988.

2. R. C. Nugroho, "Ignition Delay Mesin Diesel Berbahan Bakar Campuran MES-Solar", Tesis S2 Program Pasca Sarjana, Teknik Mesin UI, 2002.
3. Risqon Fajar, *Validasi Model Minyak Kelapa Sawit*, Jurnal Termodinamika dan Fluida LTMP, Juli 1999.
4. Rizqon Fajar et all., *Indonesian Experience in Using Biodiesel, Emission and Performance Testing on Engine Test Bed and Chassis Dynamometer*, International Oil Palm Conference and Exhibition, Nusa Dua, Bali, July 2002.
5. *Biodiesel Sebuah Harapan baru*, Kompas 21 Oktober 2001.
6. Darnoko dan Tjahyono Herawan, *Teknologi Produksi Biodiesel dan Prospek Pengembangannya di Indonesia*, Pusat penelitian Kelapa Sawit, Medan.
7. Jon Van Gerpen, *Cetane Number Testing of Biodiesel*, Iowa States University, Iowa, September 1996.
8. L Davis Clements, *Blending Ruler for Formulating Biodiesel Fuel*, University of Nebraska, Lincoln, September 1996.
9. Masjuki, H., Abdulmuin, MZ., *Investigation on Preheated Palm Oil Methyl Ester in The Diesel Engine*, A00195 I Mech E 1995.
10. Randal von Weddel, *Technical Handbook for Marine Biodiesel In Recreational Boats*, Cyto Culture International Inc Point Richmond, April 1999.
11. Sapuan, S M., Masjuki, H H, *The Use of Palm Oil as Diesel Fuel Substitute*, A04994 I Mech E 1995.
12. Schumacher et al., "Fueling a diesel engine with methyl ester in a direct injection diesel engine", SAE paper No. 930934, Warrendale, PA

RIWAYAT SINGKAT PENULIS

Prawoto, lahir di Madiun pada tanggal 10 Juni 1958. Lulus sarjana teknik mesin ITB tahun 1985. Menyelesaikan S2 bidang Aeronautika (Teknik Propulsi) dan bidang Motor Bakar masing-masing pada tahun 1988 dan 1989. S3 bidang Motor Bakar diselesaikan tahun 1993. Program S2 dan S3 dilakukan di Perancis. Tahun 1997 mengikuti program training manajemen penelitian di Inggris. Saat ini sebagai peneliti bidang motor bakar di BTMP-BPPT.

Lukman Shalahuddin, lahir di Mojokerto tanggal 10 September 1967. Menyelesaikan seluruh pendidikan tingginya di Inggris dalam bidang Mechanical Engineering. Dimulai dari S1 di UMIST, Manchester (1988-1991), S2 di University of Salford (1991-1992), dan S3 di University of Leeds (1996-2000). Mulai bekerja di BPPT tahun 1992 di Deputi Pengkajian Industri, dan sejak tahun 2000 bergabung dengan BTMP-BPPT.

Rudi Cahyo Nugroho, lahir di Yogyakarta tanggal 14 Juni 1969. Menyelesaikan pendidikan sarjana teknik mesin di UGM tahun 1995 dan Magister Teknik Mesin di UI tahun 2001. Tahun 1997 mengikuti program training Automotif di Ricardo dan MIRA Inggris selama 7 bulan. Sejak tahun 1996 bekerja di BTMP-BPPT.