

## Karakteristik Pembakaran Palm Methyl Ester Pada Ruang Bakar Motor diesel KAMA 178 FS

**Bambang Sudarmanta\*, Djoko Sungkono\*\* M. Rachimoellah\* Sugeng Winardi\***

**\* Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS**

**\*\* Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS**

**Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya 60111**

E-mail : sudarmanta2001@yahoo.com

### Abstrak

*Dalam penelitian ini dikaji pemakaian palm methyl ester sebagai bahan bakar alternatif mesin diesel injeksi langsung dengan sasaran pokok adalah untuk menginvestigasi karakteristik pembakaran dari bahan bakar palm methyl ester. Pembakaran pada mesin diesel, prinsipnya diawali dengan initial premixed stage dan dilanjutkan dengan main diffusion-combustion stage. Premixed combustion stage terjadi pada durasi yang pendek dengan laju pelepasan panas yang tinggi. Proses heat release selama stage ini dipengaruhi secara kuat oleh persiapan pencampuran bahan bakar-udara selama ignition delay period. Sedangkan main diffusion combustion stage berkaitan dengan laju pelepasan panas yang lebih rendah dibandingkan dengan premixed-combustion stage. Stage ini terdiri dari diffusion combustion dan late combustion. Late combustion merupakan kelanjutan diffusion combustion dengan kecepatan lebih rendah.*

*Kajian secara eksperimental dan numerik dilakukan untuk menginvestigasi karakteristik pembakaran bahan bakar palm methyl ester menggunakan injektor diesel type pintel. Secara eksperimental, penelitian dilakukan dengan pemasangan pressure transducer type piezzo electric pada ruang bakar mesin diesel KAMA 178 FS untuk merekam perilaku tekanan selama siklus dengan kondisi putaran mesin konstan sebesar 1800 rpm. Data tekanan didalam ruang bakar selanjutnya digunakan untuk menginvestigasi start of combustion, ignition delay period dan duration of combustion. Proses spray spreading, diameter dan kecepatan droplet selama proses atomisasi dan distribusi suhu, tekanan dan flame propagation selama proses pembakaran serta proses pembentukan emisi didapat secara numerik menggunakan FLUENT 6.2.16. code dengan pemodelan pencampurannya secara turbulen RNG k- $\epsilon$ , proses break-up droplet secara KH break-up droplet serta proses pembakaran secara probability density function.*

*Pemakaian palm methyl ester dibandingkan dengan diesel fossil menunjukkan kecenderungan tekanan lebih dahulu naik dan ignition delay period lebih pendek. Sedangkan tahapan pembakaran, untuk premixed combustion dan diffusion combustion lebih pendek, sedangkan late combustion menunjukkan kecenderungan lebih panjang. Durasi pembakaran keseluruhan untuk palm methyl ester menunjukkan kecenderungan lebih panjang. Pemakaian bahan bakar palm methyl ester secara umum menghasilkan unjuk kerja(Torsi dan BMEP) lebih rendah, pemakaian bahan bakar spesifik lebih tinggi, suhu exhaust gas lebih rendah serta emisi partikulat yang lebih rendah.*

**Kata kunci :** Palm Methyl Ester, Diesel fossil, Mesin diesel, ignition delay period, premixed dan diffusion combustion.

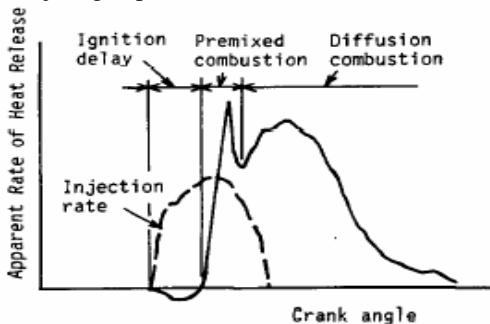
### Pendahuluan

Gagasan pemakaian bahan bakar berbasiskan biomas khususnya yang berasal dari minyak nabati sebagai bahan bakar alternatif mesin diesel pertama kali disampaikan oleh *Rudolf Diesel*, yaitu saat menjalankan mesin dieselnnya dengan bahan bakar minyak nabati dari kacang tanah pada tahun 1897. Sejak itu, berbagai macam minyak nabati diuji coba sebagai bahan bakar alternatif mesin diesel. Tetapi dengan ketersediaan bahan bakar *diesel fossil* saat itu, maka penelitian-penelitian kearah penggunaan minyak nabati kurang diminati. Baru setelah terjadi krisis bahan bakar fossil minyak pada tahun 1970-an, minat dalam pemakaian minyak nabati sebagai bahan bakar alternatif mulai muncul lagi ke permukaan. Sasaran awal, terutama pada keamanan suplai bahan bakar, tetapi akhirnya lebih difokuskan pada penggunaan bahan bakar renewable dalam rangka mereduksi produksi netto CO<sub>2</sub> hasil pembakaran.

Pembakaran pada motor diesel prinsipnya merupakan pembakaran diffusi unsteady yang ditentukan oleh proses pencampuran antara bahan bakar dan udara diruang bakar. Oleh karena itu, karakteristik semprotan bahan bakar dan aliran udara mempunyai pengaruh yang besar terhadap proses pencampuran bahan bakar-udara di ruang bakar, disamping geometri ruang bakar (Kamimoto et al, 1991). Sedangkan Hohmann et al (2003) menambahkan bahwa proses atomisasi dan penetrasi semprotan bahan bakar berpengaruh pada proses pembentukan emisi. Sedangkan karakteristik semprotan bahan bakar dipengaruhi oleh properties fisik bahan bakar berupa densitas, viskositas dan tegangan permukaan. Untuk semprotan pada ruang terbuka (*ambient atmospheric pressure*), semakin tinggi properties fisik bahan bakar (berupa viskositas, densitas dan tegangan permukaan) akan menghasilkan penetrasi semprotan yang semakin panjang (Lee et al, 2002 dan Sudarmanta et al, 2004). Sedangkan kenaikan tekanan dan suhu ambient menyebabkan phase cairan semprotan menjadi lebih

pendek dan tipis. Hal ini disebabkan oleh terjadinya kenaikan momentum dan perpindahan panas dari droplet ke udara ambient (Lee et al, 2001 dan Sudarmanta et al, 2005).

Type diagram heat release dari sebuah mesin diesel injeksi langsung dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 1. Dalam mesin diesel injeksi langsung, bahan bakar diinjeksikan secara langsung kedalam ruang bakar pada tekanan 20 – 1500 Mpa melalui multi-hole nozzle yang mempunyai beberapa orifice dengan diameter 0,15 – 0,35 mm. Suhu dan tekanan pada proses kompresi mencapai titik mati atas adalah dalam interval 1000 – 1200 K dan 4–12 Mpa. Setelah *ignition delay period* sekitar 1 ms pada kondisi operasi normal, maka mulai terjadi pembakaran. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2., Pembakaran pada mesin diesel prinsipnya diawali dengan *initial premixed stage* dan dilanjutkan dengan *main diffusion-combustion stage*. *Premixed combustion stage* terjadi pada durasi yang pendek dengan laju pelepasan panas yang tinggi. Histori dari heat release selama stage ini didapatkan dipengaruhi secara kuat oleh persiapan pencampuran bahan bakar-udara selama *ignition delay period*. Sementara itu cahaya dari flame selama stage ini adalah sangat lemah. Sedangkan *diffusion combustion stage* berkaitan dengan laju pelepasan panas yang lebih rendah dibandingkan dengan *premixed-combustion stage*. Flame selama stage ini menunjukkan sangat berbahaya terang, yaitu dengan karakteristik sebagai *diffusion flame*. Semprotan bahan bakar secara kontinyu terbakar secara quasi-steady selama terjadi injeksi bahan bakar. Setelah selesai injeksi bahan bakar, flame secara bertahap berkurang aktivitasnya, dan warna flame berubah dari kuning menjadi gelap.



Gambar 1. Type laju heat release pada mesin diesel

Pengujian unjuk kerja dan emisi gas buang motor diesel memakai bahan bakar *biodiesel* telah banyak dilakukan. Secara umum hasilnya menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar spesifik (*specific fuel consumption, sfc*) untuk bahan bakar *biodiesel* lebih tinggi dibandingkan dengan solar dan emisi *HC* untuk bahan bakar *biodiesel* lebih rendah dibandingkan solar (Altin et al, 2001; Kalam et al, 2002; Machacon et al, 2001; Nwafor et al, 2004, 2000; Reksowardojo et al, 2004). Scholl et al (1996) meneliti proses pembakaran *Soybean Methyl Ester (SME)* pada motor diesel sistem injeksi langsung dengan variasi diameter nozzle. Tekanan dan kenaikan laju tekanan didalam silinder untuk bahan bakar *SME* lebih sensitif terhadap variasi diameter nozzle dibandingkan solar. *Ignition delay period* untuk bahan bakar *SME* kurang sensitif terhadap variasi diameter nozzle dibandingkan solar. Bahan bakar solar mempunyai kelambatan penyalaan sedikit lebih panjang dan laju pembakaran maksimum sedikit lebih tinggi selama pembakaran tingkat “*premixed*”.

Untuk memodelkan sebuah mesin diesel injeksi langsung (*direct injection, DI*), dari hukum pertama Termodinamika untuk kesetimbangan energi didalam ruang bakar dapat diturunkan bahwa laju pelepasan panas bersih,  $\frac{dQ}{dt}$  dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt}$$

dimana,

- $\gamma$  = Rasio kapasitas panas
- $p$  = Tekanan gas didalam silinder
- $V$  = Volume silinder saat  $t$

Dalam Persamaan diatas, variabel waktu  $t$  dapat dinyatakan dalam variabel poros engkol,  $\theta$  dengan mengalikan kecepatan putar mesin. Volume silinder sesaat pada sudut poros, dihitung dari hubungan yang sudah diketahui antara sudut poros, panjang batang penghubung radius engkol dan diameter bore sebagai berikut :

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi}{4} D^2 r \left[ (1 - \cos \theta) + \frac{r}{4l} (1 - \cos 2\theta) \right]$$

dimana,

$$V_c = \text{Volume clearance}$$

$L$  = Panjang batang penghubung

$r$  = Radius poros engkol

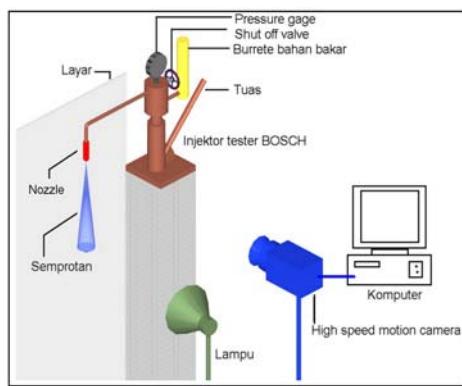
$D$  = Diameter bore

Bentuk tipikal dari kurva heat release rate adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Dari bentuk kurva tersebut dapat ditentukan 4 tahap proses pembakaran pada mesin diesel, yaitu A. *ignition delay*, yaitu saat dari start of injection sampai dengan perubahan gradien kurva heat release yang meningkat tajam. B. *Premixed Combustion*, yaitu fase kedua dalam kurva heat release yang ditandai dengan suatu puncak yang jelas dan cukup tajam. C. *Diffusion combustion*, yaitu fase berikutnya lagi yang ditandai dengan puncak kedua, dan biasanya lebih rendah dan landai. D. Fase berikutnya adalah late combustion pembakaran secara diffusi dengan gradien kecepatan lebih rendah lagi.

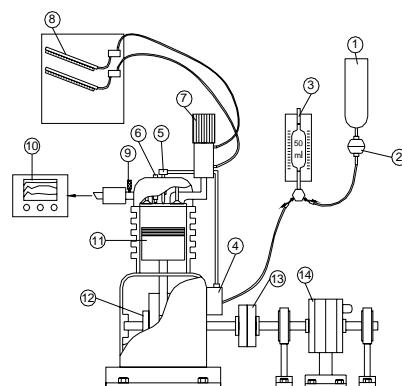
Tujuan utama dari penulisan ini adalah untuk menginvestigasi karakteristik pembakaran dari bahan bakar *palm methyl ester* yang dibandingkan dengan bahan bakar *diesel fossil* sebagai bahan bakar pada motor diesel injeksi langsung, KAMA 178 FS. Bahan bakar digunakan secara langsung pada mesin diesel tanpa adanya modifikasi mesin. Ingin diketahui beberapa perbedaan perilaku bahan bakar *palm methyl ester* dibandingkan dengan *diesel fossil* selama pembakaran didalam ruang bakar sampai menghasilkan unjuk kerja mesin.

## Metodologi

Rancangan peralatan uji terdiri dari peralatan uji atomisasi semprotan dan peralatan uji unjuk kerja dan emisi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, dengan spesifikasi mesin selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 1.



a. Peralatan uji atomisasi semprotan



b. Peralatan uji Unjuk kerja dan emisi

Gambar 2. Rancangan Peralatan uji

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Uji

Item	Spesifikasi
Merk/Tipe	KAMA/KM 178 FS, 4-langkah
silinder	Tunggal dan posisi vertikal
Sistem pendingin	Udara
Sist. pembakaran	Direct Injection Combustion
Dia. x langkah	78 mm x 64 mm
Volume langkah	305,7 cc
Power	4 kW/1.800 rpm

Dalam kajian ini, mesin dijalankan secara putaran konstan sebesar 1800 rpm dengan waktu injeksi pada 26<sup>0</sup> BTDC. Bahan bakar yang digunakan adalah *diesel fossil* dan *palm methyl ester* serta campuran 20 % volume *palm methyl ester*. Selanjutnya kondisi operasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi Operasi

Waktu injeksi	26 <sup>0</sup> BTDC
Putaran Engine	1800 rpm

Beban Engine	12,5%; 25%; 37,5%; 50%; 62,5%; 75%; 87,5%; 100%
Bahan Bakar	Diesel fossil 100% ( $B_0$ ); Campuran 20 % palm methyl ester dan 80 diesel fossil ( $B_{20}$ ) dan 100% palm methyl ester ( $B_{100}$ )

Emisi partikulat dari gas buang yang diukur hanyalah smoke, yaitu diukur menggunakan smoke meter type Bosch.

Tabel 3. menunjukkan properti dari kedua macam bahan bakar *diesel fossil* dan *palm methyl ester*. Uji properti bahan bakar menunjukkan bahwa *palm methyl ester* menunjukkan perbedaan dalam properti fisik seperti densitas, viskositas dan tegangan permukaan dibandingkan dengan *diesel fossil*. Hal ini akan mempengaruhi karakteristik semprotan yang dihasilkan sehingga memerlukan pengujian dan analisis.

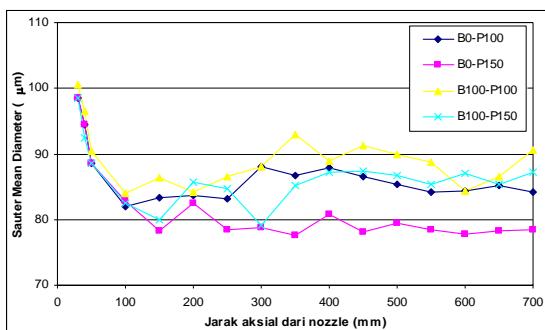
Tabel 3. Perbandingan properti *diesel fossil* dan *palm methyl ester*

Properti	Bahan Bakar	
	Diesel fossil	Palm methyl ester
Densitas, $kg/m^3$	838	866
Viskositas, cSt	4,083	4,531
Teg. Permukaan, N/cm	0,144	0,146
Flash point, $^{\circ}C$	64	180
CCI, [ - ]	53,22	61,51
HHV, kJ/kg	44780	40660

## Hasil dan Pembahasan

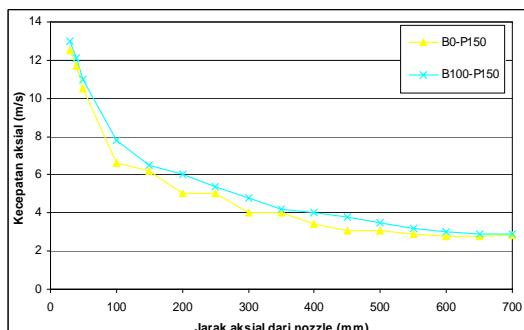
### a. Karakteristik Atomisasi Semprotan Bahan Bakar

Gambar 3. dan 4. menunjukkan distribusi SMD kearah aksial pada tekanan injeksi 150 bar secara pengukuran maupun numerik. Pada Gambar 3. terlihat bahwa setelah bahan bakar diinjeksikan, SMD berkurang secara tajam seiring dengan bertambahnya jarak aksial sampai jarak 100 mm. Hal ini disebabkan dominasi break-up droplet terlalu tinggi dibandingkan collision droplet. Setelah jarak 100 mm dari injektor, dominasi break-up droplet semakin berkurang sehingga gradien penurunan SMD relatif rendah yang diikuti proses penguapan.



Gambar 3. SMD droplet sepanjang lintasan aksial chamber

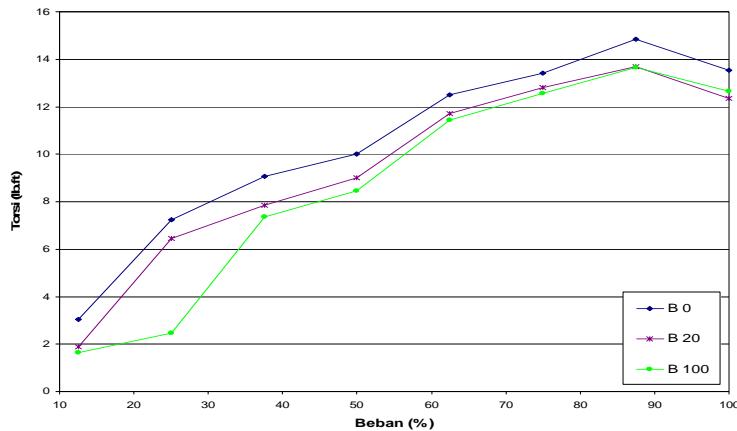
Kecepatan rata-rata kearah aksial sepanjang lintasan pada tekanan injeksi 150 bar ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil menunjukkan bahwa gradien kecepatan menurun secara tajam sampai jarak 100 mm, seterusnya penurunan gradien kecepatan lebih rendah. Untuk kecepatan injeksi 100 bar dihasilkan kecen-derungan yang sama dengan tekanan injeksi 150 bar.



Gambar 4. Kecepatan aksial droplet sepanjang lintasan

#### b. Torsi

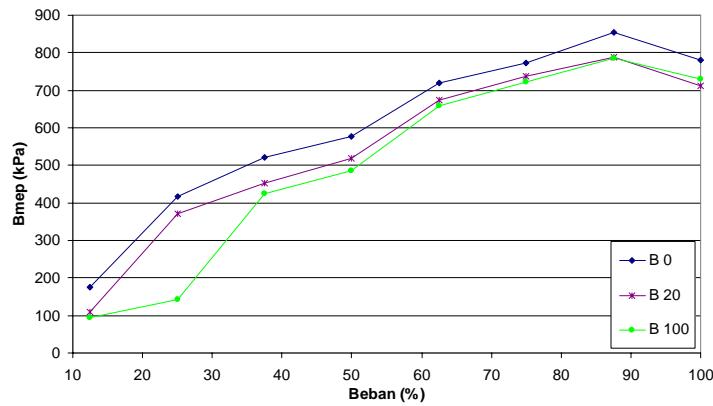
Dari Gambar 5. terlihat bahwa terjadi sedikit penurunan torsi dengan menggunakan bahan *bakar palm methyl ester* dibandingkan *diesel fossil*. Pemakaian *palm methyl ester* menurunkan torsi pada setiap beban, begitu juga pada campuran B20. Hal ini berkaitan dengan kandungan nilai kalor *palm methyl ester* yang lebih kecil dibandingkan *diesel fossil*, serta setting waktu injeksi bahan bakar yang kurang optimum. Sebagaimana diketahui bahwa *palm methyl ester* mempunyai bilangan setana yang lebih tinggi dibandingkan dengan *diesel fossil* sehingga memerlukan *ignition delay* yang lebih pendek.



Gambar 5. Torsi terhadap perubahan beban

#### c. BMEP

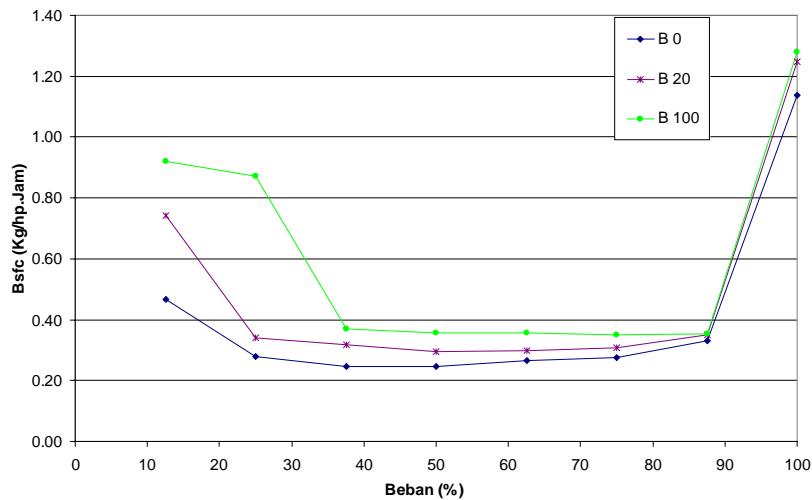
Dari Gambar 6. juga terlihat bahwa pemakaian *palm methyl ester* akan terjadi penurunan BMEP dibandingkan dengan *diesel fossil*. Hal ini merupakan konsekuensi dari turunnya torsi, oleh karena itu penurunan BMEP kurang lebih sama dengan penurunan besarnya penurunan torsi.



Gambar 6. BMEP terhadap perubahan beban

#### d. Pemakaian Bahan Bakar Spesifik

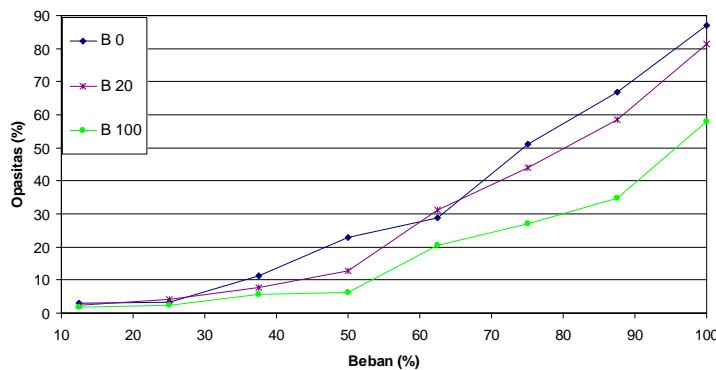
Kecenderungan pemakaian bahan bakar spesifik, *Bsfc* untuk kedua jenis bahan bakar adalah sama, yaitu awalnya tinggi kemudian cenderung menurun sampai sekitar 50% beban kemudian cenderung naik lagi. Pada Gambar 7. terlihat bahwa, pemakaian bahan bakar *palm methyl ester* akan terjadi kenaikan konsumsi bahan bakar spesifik dibandingkan *diesel fossil*. Sedangkan pemakaian bahan bakar campuran B20 menunjukkan konsumsi bahan bakar spesifik diantara keduanya (*diesel fossil* dan *palm methyl ester*). Hal ini disebabkan oleh nilai kalor bahan bakar *diesel fossil* lebih tinggi dibandingkan nilai kalor *palm methyl ester*.



Gambar 7. Bsfc terhadap perubahan beban

#### e. Opasitas

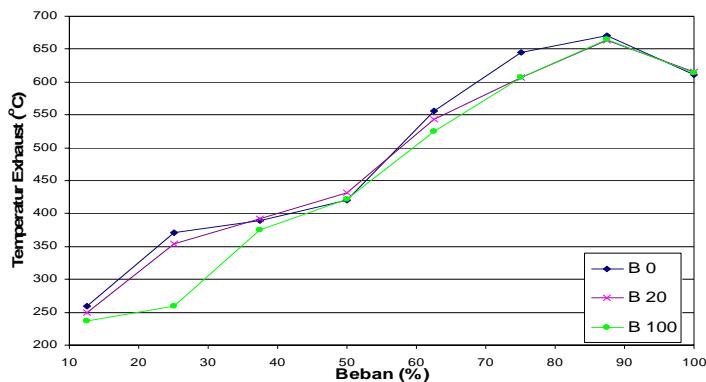
Hasil pengukuran emisi partikulat (opasitas) dinyatakan dengan bilangan smoke dan ditunjukkan pada Gambar 8. Secara umum terlihat bahwa pemakaian bahan bakar *palm methyl ester* menghasilkan kepekatan yang lebih rendah dibandingkan diesel fossil. Hal ini sesuai dengan prediksi sebelumnya sebagaimana diketahui bahwa *palm methyl ester* tidak mengandung senyawa aromatik dan sangat sedikit sulfur. Kedua senyawa terkandung pada bahan bakar *diesel fossil* dan merupakan penyusun dari emisi partikulat. Faktor penyebab yang lebih penting adalah bahwa kandungan oksigen dalam *palm methyl ester* lebih banyak dibandingkan *diesel fossil*. Partikulat terbentuk pada daerah/zone kaya bahan bakar yang bertemperatur dan tekanan tinggi. Kehadiran molekul *palm methyl ester* yang beroksigen tinggi akan mengurangi daerah kaya bahan bakar dan membatasi pembentukan partikulat.



Gambar 8. Opasitas terhadap perubahan beban

#### f. Suhu Gas Buang

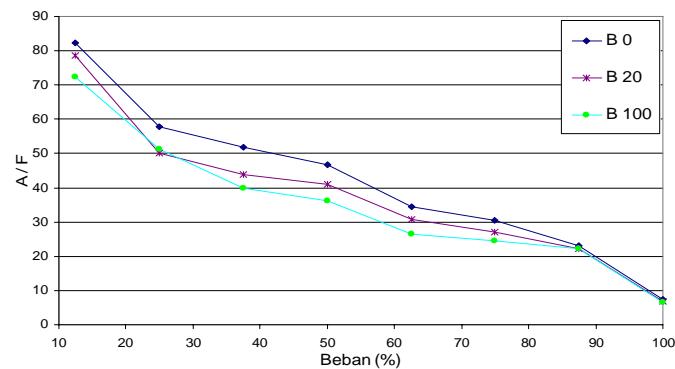
Pengukuran suhu gas buang pada Gambar 9. menunjukkan kecenderungan yang semakin meningkat dengan penambahan beban. Pemakaian bahan bakar *palm methyl ester* menunjukkan suhu gas buang yang lebih rendah dibandingkan dengan diesel fossil.



Gambar 9. Suhu gas buang terhadap perubahan beban

#### g. Air Fuel Rasio

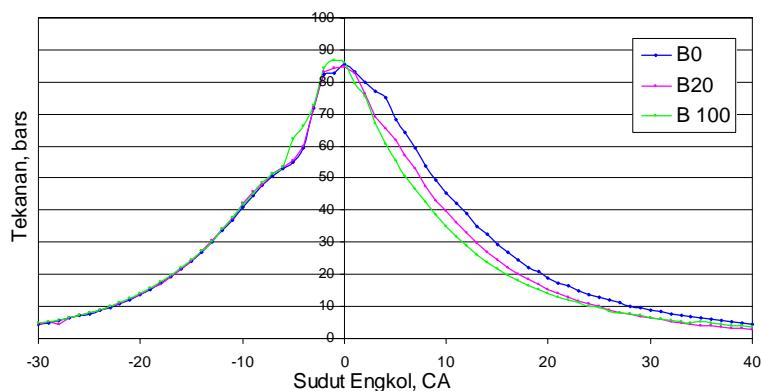
Gambar 10. menunjukkan bahwa kecenderungan air fuel rasio yang menurun dengan kenaikan beban. Sedangkan pemakaian bahan bakar palm methyl ester menunjukkan air fuel rasio yang lebih kecil dibandingkan dengan diesel fossil. Hal ini terkait dengan adanya kandungan oksigen dalam *palm methyl ester*.



Gambar 10. Air fuel rasio terhadap perubahan beban

#### h. Distribusi Tekanan Didalam silinder

Pada Gambar 11. menunjukkan historis perubahan tekanan terhadap perubahan sudut engkol mulai langkah kompresi  $-30^{\circ}\text{CA}$  sebelum TMA sampai langkah ekspansi  $30^{\circ}\text{CA}$  setelah TMA. Pemakaian bahan bakar palm methyl ester menunjukkan kenaikan tekanan yang lebih awal, tekanan maksimum yang lebih tinggi dan penurunan tekanan setelah *top dead center* yang lebih tajam. Kandungan *palm methyl ester* berkaitan dengan fase pembakaran diffusion combustion, yang merupakan faktor dominan dalam mekanisme proses pembakaran dalam mesin diesel. Hasil ini konsisten dengan studi karakteristik semprotan yang dilakukan Sudarmanta (2004 & 2005) yang menyimpulkan bahwa properti fisik yang lebih besar menghasilkan sudut penyebaran yang lebih sempit dan penetrasi yang lebih panjang, sehingga menyebabkan *entrainment induced air* lebih lemah dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk proses difusi antara bahan bakar dan udara.



Gambar 11 . Distribusi tekanan Vs sudut engkol

#### 4. KESIMPULAN

1. Distribusi SMD sepanjang lintasan aksial mengindikasikan bahwa terjadi break-up yang tinggi pada daerah dekat injektor sampai jarak 100 mm. Hal ini ditandai dengan besarnya penurunan gradien SMD terhadap lintasan aksial. Sedangkan pada jarak diatas 100 mm penurunan gradien relatif kecil.
2. Pada pengujian kondisi mesin diesel standar, pemakaian bahan bakar *palm methyl ester* menyebabkan penurunan unjuk karja (torsi, BMEP) sebesar 4,2 % dan untuk B20 menyebabkan penurunan unjuk karja (torsi, BMEP) sebesar 2,6 % dibandingkan dengan pemakaian bahan bakar *diesel fossil*.
3. Pemakaian bahan bakar *palm methyl ester* menunjukkan kecenderungan kenaikan tekanan lebih awal, tekanan maksimum lebih tinggi dan penurunan tekanan setelah *top dead center* lebih tajam dibandingkan pemakaian bahan bakar *diesel fossil*.
4. Pemakaian bahan bakar *palm methyl ester* menunjukkan emisi partikulat yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar *diesel fossil*.
5. Penurunan BMEP dan torsi dapat diatasi dengan pengaturan waktu injeksi dan menaikkan tekanan injeksi.

#### Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Dirjen Dikti yang telah memberikan Beasiswa Program Pasca Sarjana (BPPS) kepada penulis untuk melanjutkan studi S3 di Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS. Selanjutnya penulis juga mengucapkan terima kasih pada team biodiesel mesin (Arif, Effendi, Agung, dll) yang telah membantu dalam pengambilan data.

#### Daftar Pustaka

1. Bhattacharyya, B., Reddy, C.S., “*Vegetable oils as fuels for internal combustion engine : a review*”, Agric. Eng. Res. Journal, pp. 157 – 166, 1994.
2. Hohmann, S., Renz, U., “*Numerical simulation of fuel sprays at high ambient pressure: the influence of real gas effects and gas solubility on droplet vaporization*”, International journal of heat and mass transfer, Vol. 46, pp. 3017 – 3028, 2003.
3. Kalam, M.A., Masjuki, H.H., “*Biodiesel from palmoil-an analysis of its properties and potential*”, Journal Biomass and Bioenergy, Vol. 23, pp. 471 – 479, 2002.
4. Kamimoto, T., Kobayashi H., “*Combustion processes in diesel engines*”, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 17, pp 163-189, 1991
5. Lee C.S., Park S.W., “*An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays*”, Journal Fuel, Vol. 81, pp. 2417–2423, 2002.
6. Lee , S.W., Tanaka., D., Kusaka, J., Daisho, Y., “*Effect of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine*”, JSAE Review 23, pp. 407 – 414, 2002.
7. Lefebvre, H., Artur, “*Fuel Atomization, Droplet Evaporation and Spray Combustion*”, Fosil Fuel Combustion, John Willley & Sons, Inc., pp. 529-642, 1991.
8. Machacon, H.T.C., Shiga, S., Karasawa, T., Nakamura, H., “*Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with coconut oil-diesel fuel blend*”, Biomass and bioenergy, Vol. 20, pp. 63-69, 2001.
9. Nwafor, O.M.I., “*Emission characteristics of diesel engine operating on rapeseed methyl ester*”, Renewable energy, Vol. 29, pp. 119-129, 2004.
10. Nwafor, O.M.I., Rice, G., Ogbonna, A.I., “*Effect of advanced injection timing on the performance of rapeseed oil in diesel engines*”, Renewable energy, Vol. 21, pp. 433-444, 2000.
11. Rekswardojo, I.K., Nurudin, Brodjonegoro, T.P., Soerawidjaja, T.H., Dewi, R.G., Syaharuddin, I., Arismunandar, W., “*Pengaruh bahan bakar biodiesel minyak goreng dari kelapa sawit (refined bleached deodorized palm oil) pada sebuah motor diesel penyemprotan langsung (direct injection)*”, Proseding seminar nasional tahunan Teknik Mesin III, Universitas Hassanuddin, Makassar, 2004.
12. Scholl, K.W., Sorenson, S.C., “*Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a direct Injection Diesel Engine*”, SAE Paper, 1996.
13. Sudarmanta, B., Sungkono, D., “*Transesterifikasi crude palm oil dan uji karakteristik semprotan menggunakan injektor motor diesel*”, Jurnal Teknik Mesin FTI-ITS, Vol. 2, Mei, 2005.
14. Sudarmanta, B., “*Pemodelan numerik Penetrasi semprotan bahan bakar*”, Jurnal Teknik Mesin FTI-ITS, Vol. 1, Januari, 2005.
15. Sudarmanta, B., Sungkono, D., “*Pemodelan numerik karakteristik semprotan biodiesel minyak sawit dg. type injektor pressurized swirl atomizer*”, proseding seminar nas. Pasca Sarjana IV, ITS-Surabaya, 2004.
16. Turns, S. R., “*An Introduction To Combustion; Concepts and Application*”, 2<sup>nd</sup> Edition, Mc. Graw Hill, 2000.