

# ANALISA LAJU PELEPASAN PANAS TERHADAP PERUBAHAN TEKANAN INJEKSI BAHAN BAKAR MOTOR DIESEL

**Arifin Nur**<sup>1)</sup>, **Widodo Budi Santoso**<sup>2)</sup>

Bidang Peralatan Transportasi<sup>1)</sup>

Bidang Sarana Peralatan Transportasi<sup>2)</sup>

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik

Jl. Sangkuriang (Komplek LIPI Gd 10), Bandung 40135 INDONESIA

Telp: (022)2503055 ext 1415. fax: (022)2504773.

E mail: arif008@lipi.go.id<sup>1)</sup>, widodo.budi.santoso@lipi.go.id<sup>2)</sup>

## Abstrak

*Sebuah motor diesel penelitian satu silinder 667 cc telah dimodifikasi agar dapat beroperasi pada tekanan injeksi bahan-bakar sebesar 200, 250, dan 300 bar. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan tekanan injeksi terhadap laju pelepasan panas di dalam ruang bakar motor diesel. Pengujian dilakukan dengan menempatkan motor diesel pada perangkat Eddy Current Dynamometer. Sebuah sensor tekanan Kistler 6067B berpendingin air yang ditanamkan didalam ruang bakar digunakan untuk mengukur tekanan ruang bakar, Crank Angle Encoder buatan COM digunakan untuk mengukur sudut poros engkol, Konsumsi bahan-bakar diukur dengan menggunakan perangkat AVL Fuel Balance, konsumsi udara diukur dengan menggunakan hotwire anemometer. Pada penelitian ini akan ditunjukkan pengaruh tekanan injeksi bahan bakar pada 200, 250, dan 300 bar terhadap peningkatan tekanan ruang bakar dan laju pelepasan panas motor diesel yang diujikan pada putaran 1500, 2000, 2500, dan 3000 rpm. Peningkatan tekanan injeksi bahan bakar secara signifikan memberikan kestabilan penginjeksian bahan bakar ke dalam ruang bakar, dimana nilai lambda yang dihasilkan cenderung lebih ideal jika dibandingkan dengan motor diesel yang bekerja pada tekanan injeksi yang lebih rendah. Nilai lambda rata-rata pada 200 adalah sebesar 1,11, pada 250 dan 300 bar, meningkat berturut turut sebesar 4,27% dan 7,12%, dan nilai lambda ini secara signifikan menurunkan opasitas yang dihasilkan berturut-turut sebesar 19,71% dan 10,20%, terhadap tekanan injeksi yang lebih rendah. Terjadi penurunan rata-rata heat release (laju pelepasan panas) antara 0,9% sampai 53,13%. Penurunan heat release yang signifikan terjadi pada motor diesel yang bekerja pada tekanan 250 bar terhadap motor diesel yang bekerja pada tekanan injeksi 200 bar sebesar 53,13% sementara pada tekanan injeksi 250 bar terhadap tekanan injeksi 300 bar, maksimum penurunan tekanan ruang bakar adalah sebesar 20,35% yang terjadi pada putaran 1500 rpm. Peningkatan tekanan injeksi bahan bakar akan menurunkan nilai rata-rata laju pelepasan panas pada motor diesel. Semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar maka puncak rate of heat release akan semakin mendekati titik mati atas yang diakibatkan oleh ignition delay.*

*Kata kunci: Laju Pelepasan Panas, Motor Diesel, Tekanan Injeksi, Eddy Current Dynamometer.*

## PENDAHULUAN

Motor diesel merupakan salah satu jenis motor bakar yang paling efisien dan banyak digunakan pada sektor transportasi maupun penggunaan stasioner. Proses paling penting yang menentukan prestasi motor diesel adalah proses pembakaran. Sejak ditemukan lebih dari seabad yang lalu, pengetahuan tentang proses pembakaran pada motor penyalaan kompresi ini meningkat dengan pesat. Kompleksitas proses

pembakaran yang terjadi pada motor diesel membuat masih banyak hal yang belum diketahui.

Secara umum, proses pembakaran pada motor diesel terdiri dari empat tahap. Tahap satu, mulai dari terangkatnya jarum injektor sampai mulai pelepasan panas disebut periode *ignition delay*. Pada tahap ini bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar mengalami proses persiapan secara fisika dan kimia untuk pembakaran. Pada tahap dua, campuran udara-bahan bakar yang terakumulasi selama periode *ignition delay* dan dalam rentang campuran yang bisa terbakar,

terbakar secara spontan. Tahap tiga, mulai dari akhir tahap dua sampai akhir injeksi bahan bakar merupakan periode pembakaran difusi. Pada periode ini bahan bakar disemprotkan pada *flame* yang sudah ada. Tahap empat merupakan periode difusi dan akhir pembakaran dari bahan bakar yang tersisa di ruang bakar [1].

Analisis termodinamika data tekanan ruang bakar merupakan perangkat yang sangat berguna untuk analisis pembakaran. Terdapat dua pendekatan yang dapat dilakukan, yaitu "analisis laju pembakaran" (*burn rate analysis*) dan "analisis pelepasan panas" (*heat release analysis*). Analisis laju pembakaran terutama digunakan untuk menentukan sudut pembakaran pada motor bensin dan untuk mendapatkan fraksi massa yang terbakar yang dinyatakan dengan skala antara 0 dan 1. Analisis pelepasan panas biasanya digunakan untuk studi pembakaran motor diesel. Laju pelepasan panas merupakan parameter yang penting karena berpengaruh terhadap kebisingan pembakaran (*combustion noise*), laju kenaikan tekanan, dan emisi NOx. Proses pembakaran dinyatakan sebagai laju pelepasan panas pada setiap posisi sudut engkol. Perhitungan pelepasan panas didapat dari diagram tekanan ruang bakar dan volume ruang bakar fungsi sudut engkol. Nilai kumulatif (integral) dari laju pelepasan panas mengindikasikan efisiensi pembakaran [2].

## LANDASAN TEORI

Pada pendesainan motor diesel, tekanan injeksi bahan bakar merupakan faktor utama yang menentukan unjuk kerja. Salah satu batasan utama dalam meningkatkan output motor diesel adalah emisi smoke (opasitas), dimana opasitas itu sangat dipengaruhi oleh akhir dari waktu injeksi fungsi poros engkol. Apabila akhir durasi waktu injeksi berada sangat dekat dengan saat katup buang untuk terbuka, maka opasitas akan meningkat yang disebabkan belum terbakar dengan sempurna campuran bahan bakar dengan oksigen.

Konsep penelitian ini adalah bagaimana menginjeksikan jumlah bahan bakar yang sama tanpa harus merubah durasi waktu injeksi. Cara yang ditempuh adalah dengan meningkatkan tekanan injeksi bahan bakar. Tekanan injeksi bahan bakar dapat diubah dengan berbagai cara seperti; memperbesar diameter plunger pompa, memperkecil diameter lubang injektor, meningkatkan kecepatan poros bubungan pompa bahan bakar, dan meningkatkan kekerasan pegas injektor. Memodifikasi perangkat tersebut secara signifikan dapat mempengaruhi karakteristik penyempotan bahan bakar yang secara langsung akan mempengaruhi proses pembakaran. Perubahan proses pembakaran akan mempengaruhi unjuk kerja motor diesel tersebut. Keuntungan lain dari meningkatkan tekanan injeksi adalah dapat memperpendek waktu ignition delay dan menurunkan opasitas karena droplet bahan bakar cenderung lebih kecil [2].

Analisis proses pembakaran pada motor diesel dapat dilakukan dengan menganalisa laju pelepasan panas (*rate of heat release/ROHR*). Proses pembakaran dinyatakan sebagai laju pelepasan panas pada setiap posisi sudut engkol. Perhitungan dilakukan pada langkah kompresi dan langkah kerja. Pada kondisi ini, kedua katup isap dan katup buang dalam kondisi tertutup. Analisis pelepasan panas menghitung berapa jumlah energi panas yang ditambahkan ke dalam ruang bakar agar didapat variasi besar tekanan di dalam ruang bakar [2].

Persamaan pelepasan panas netto berdasarkan hukum pertama termodinamika satu zona yang digunakan pada makalah ini adalah [3]:

$$\frac{dq_{net}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (1)$$

$\gamma$  merupakan rasio panas spesifik,  $c_p/c_v$ . Rentang nilai  $\gamma$  yang sesuai untuk analisis *heat release* motor diesel adalah 1,3 sampai 1,35 [3].  $p$  adalah tekanan ruang bakar, dan  $V$  adalah volume silinder (*volume clearance* pada TMA ditambah volume langkah). Volume silinder fungsi sudut engkol dinyatakan sebagai [3]:

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + r - r \cdot \cos\theta - \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2\theta}) \quad (2)$$

dengan

$r$  : crank throw =  $\frac{1}{2}$  panjang langkah torak

$l$  : panjang *connecting rod*

$V_c$  : volume *clearance*

$B$  : diameter silinder

$\theta$  : sudut engkol

## METODOLOGI

Untuk melakukan perhitungan laju pelepasan panas diperlukan data tekanan ruang bakar dan perhitungan volume ruang bakar untuk setiap sudut engkol. Data tekanan ruang bakar didapat dari pengujian motor diesel satu silinder. Adapun langkah langkah pengujian yang dilakukan diantaranya adalah :

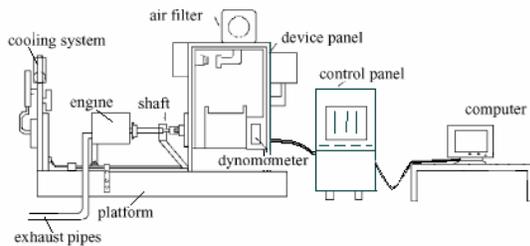
1. Melakukan pengujian motor diesel satu silinder yang telah dilengkapi dengan sensor tekanan ruang bakar pada *eddy current dynamometer*.
2. Merekam data tekanan ruang bakar dengan *engine indicating system* serta kondisi operasi saat pengujian.
3. Melakukan perhitungan volume silinder tiap derajat pergerakan poros engkol sebanyak 2 putaran poros engkol.
4. Mengukur geometri silinder motor diesel, meliputi; *Bore, stroke, compression ratio*, panjang *connecting rod* dan gap piston dengan *cylinder liner*.
5. Melakukan perhitungan rate of heat release dengan spreadsheet.
6. Membandingkan perhitungan heat release untuk pemodelan yang telah dilakukan.

Spesifikasi teknik motor diesel ditunjukkan pada tabel 1, sedangkan skema pengujian ditampilkan pada gambar 1 sampai gambar 3.

Tabel 1. Spesifikasi motor bakar diesel Hatz

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| Type                   | Diesel 4 langkah, 2 katup |
| Sistem pengisian udara | Pengisian alamiah         |
| Silinder / tipe        | 1 / Vertikal              |
| Volume (cc)            | 667 cc                    |
| Diameter x langkah     | 100 x 85 mm               |
| Rasio kompresi         | 20 : 1                    |
| Torsi maksimum         | 28 Nm pada 2000 rpm       |
| Daya maksimum          | 11 kW pada 3000 rpm       |
| Sistem bahan-bakar     | Direct Injection          |
| Sensor tekanan         | Kistler6061B              |
| Sensor Crank angle     | COM optical encoder       |

Pengujian dilakukan pada putaran 1500, 2000, 2500, dan 3000 rpm, dengan tekanan injeksi bahan bakar sebesar 200, 250, dan 300 bar. Tekanan ruang bakar diukur untuk setiap  $1^\circ$  sudut engkol dan direkam selama 36 siklus. Data tekanan yang didapat dari peralatan *engine indicating system* ini berupa file ASCII yang berisi 720 data tekanan untuk siklus empat langkah. Untuk perhitungan laju pelepasan panas, digunakan data rata-rata tekanan dari 36 siklus yang direkam. Perhitungan volume silinder dilakukan dengan menggunakan persamaan 2. Nilai  $\gamma$  diasumsikan konstan selama proses pembakaran.



Gambar 1. Skema Instalasi Pengujian



Gambar 2. Instalasi pada Dynamometer



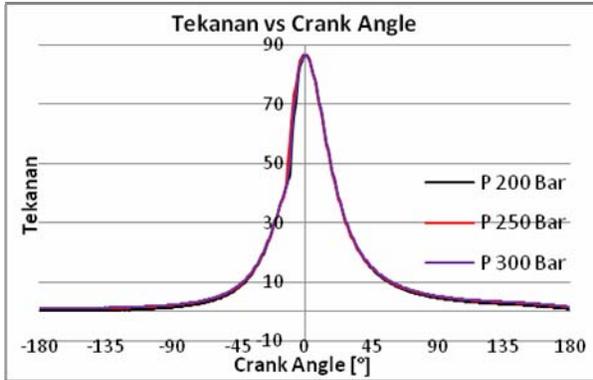
Gambar 3. Control Panel dan DAQ

Perhitungan dilakukan pada langkah kompresi dan langkah kerja. Pada kondisi ini, kedua katup isap dan katup buang dalam kondisi tertutup. Analisis pelepasan panas menghitung berapa jumlah energi panas yang ditambahkan ke dalam ruang bakar agar didapat variasi besar tekanan di dalam ruang bakar [2].

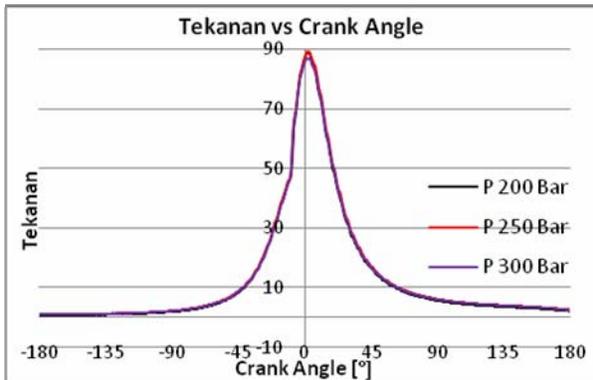
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada motor diesel, tekanan injeksi bahan bakar merupakan faktor utama yang menentukan unjuk kerja. Uji unjuk kerja yang telah dilakukan di laboratorium menghasilkan rekaman data tekanan ruang bakar sebanyak 36 siklus, dimana 1 siklusnya terdiri dari 720 data tekanan fungsi sudut engkol, dari ke 36 siklus tersebut kemudian dirata-ratakan. Adapun nilai rata-rata tekanan ruang bakar hasil pengujian terhadap tekanan injeksi 200, 250, dan 300 bar diperlihatkan pada grafik 1 sampai grafik 4.

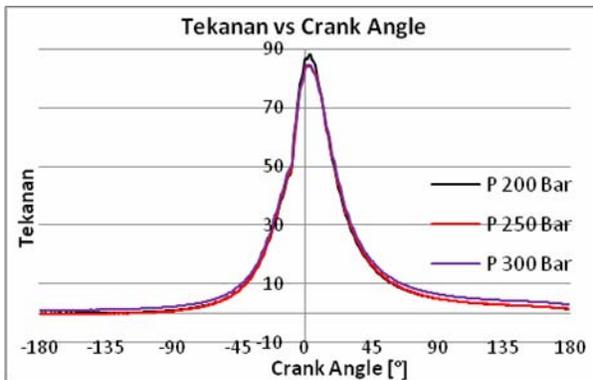
Pada grafik 1, peningkatan tekanan ruang bakar terhadap tekanan injeksi bahan bakar yang bervariasi tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Hal ini terlihat dari grafik tekanan yang dihasilkannya masih berhimpit, hal ini di mungkinkan karena pada putaran rendah ketiga injektor masih memberikan suplai bahan bakar yang relatif sama karena pegas injektor masih bekerja pada kondisi tekanan optimalnya, hal ini terlihat juga dari grafik 10 yang menunjukkan nilai lambda fungsi putaran mesin, dimana pada putaran 1500 rpm nilai lambda yang dihasilkan cenderung sama. Pada grafik 2, 3, dan 4, terlihat pengaruh peningkatan tekanan injeksi bahan bakar terhadap peningkatan tekanan ruang bakar, dimana pada tekanan injeksi yang lebih tinggi, tekanan puncak ruang bakarnya justru cenderung lebih rendah hal ini di mungkinkan karena pada tekanan injeksi bahan bakar dan putaran motor yang lebih tinggi, injektor dengan tekanan yang lebih tinggi cenderung lebih unggul dari segi kestabilan penyemprotan bahan bakar.



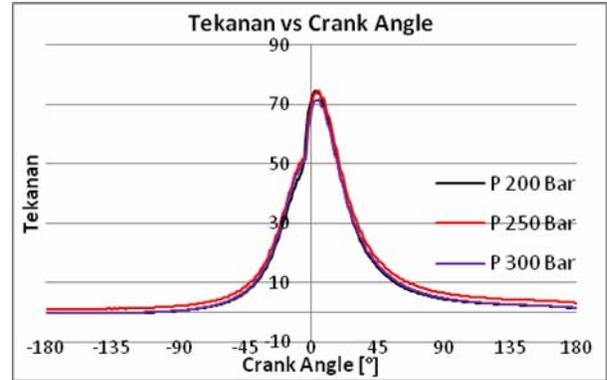
Grafik 1. Tekanan pada 1500 rpm



Grafik 2. Tekanan pada 2000 rpm



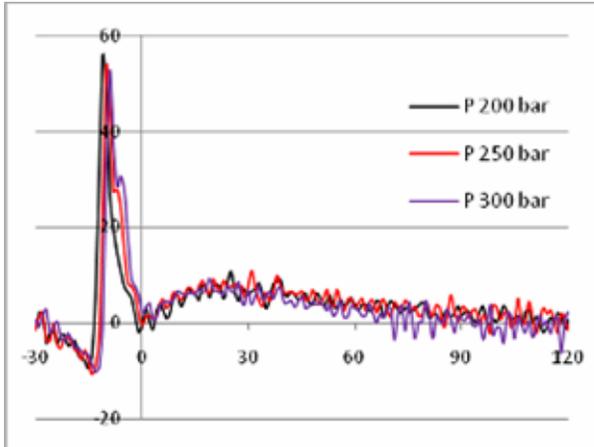
Grafik 3. Tekanan pada 2500 rpm



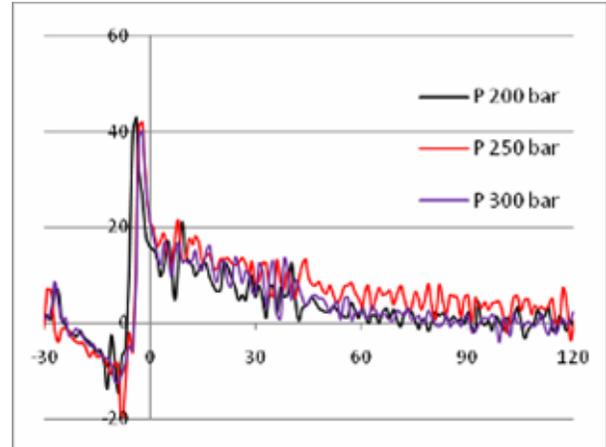
Grafik 4. Tekanan pada 3000 rpm

Pada grafik 5 sampai dengan grafik 8 diperlihatkan pengaruh peningkatan tekanan injeksi bahan bakar terhadap nilai laju pelepasan panas. Grafik 5 memperlihatkan, *ignition delay* (keterlambatan pembakaran) yang disebabkan oleh semakin meningkatnya tekanan injeksi bahan bakar, peningkatan tekanan injeksi dengan cara memperkeras kerja pegas secara tidak langsung akan mengakibatkan waktu yang dibutuhkan untuk awal penyemprotan bahan bakar menjadi lebih lama sehingga mengakibatkan *ignition delay*, dilain sisi peningkatan tekanan injeksi akan membuat butiran bahan bakar yang diinjeksikan menjadi lebih kecil sehingga pembakaran cenderung lebih homogen dan sebagai akibatnya emisi gas buang terutama opasitas akan cenderung lebih rendah seperti terlihat pada grafik 9 opasitas fungsi putaran mesin pada tekanan injeksi yang bervariasi. Peningkatan tekanan injeksi bahan bakar secara signifikan mempengaruhi besarnya nilai rata-rata laju pelepasan panas.

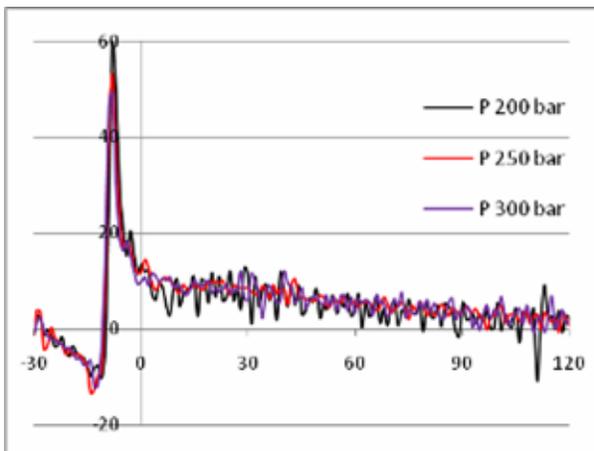
Semakin tinggi tekanan injeksi, nilai rata-rata laju pelepasan panasnya justru cenderung turun. Penurunan nilai rata-rata laju pelepasan panas minimum terjadi pada putaran 2000 rpm pada tekanan injeksi 250 bar terhadap tekanan injeksi 200 bar yaitu sebesar 0,94%. Sementara penurunan nilai rata-rata laju pelepasan panas maksimum terjadi pada tekanan 250 bar terhadap tekanan injeksi 200 bar yaitu sebesar 53,13%. Grafik 5 sampai grafik 8, memperlihatkan karakteristik *rate of heat release*, semakin tinggi tekanan injeksi maka *peak rate of heat release* akan semakin rendah, rendahnya *peak rate of heat release* dimungkinkan karena pembakaran di dalam ruang bakar lebih homogen.



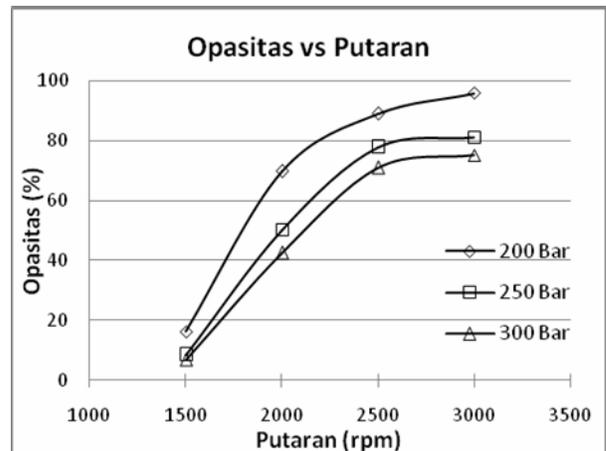
Grafik 5. ROHR vs Crank Angle pada 1500 rpm



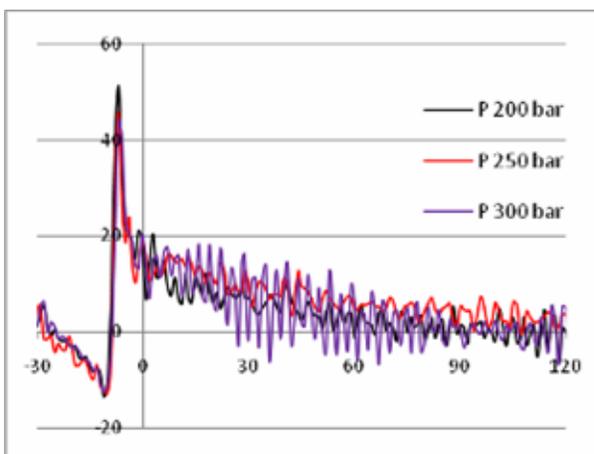
Grafik 8. ROHR vs Crank Angle pada 3000 rpm



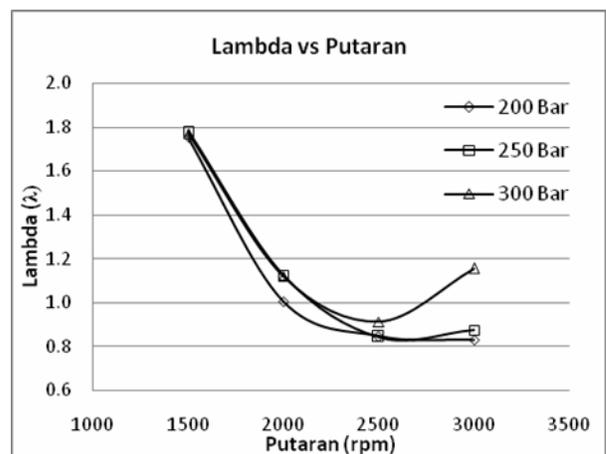
Grafik 6. ROHR vs Crank Angle pada 2000 rpm



Grafik 9. Opasitas vs Putaran pada tekanan injeksi yang bervariasi [4]



Grafik 7. ROHR vs Crank Angle pada 2500 rpm



Grafik 10. Lambda vs Putaran pada Tekanan Injeksi yang Bervariasi

## **KESIMPULAN**

Peningkatan tekanan injeksi dari 200 bar ke 250 bar kemudian ke 300 bar tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada putaran motor yang rendah (1500 rpm), sementara pada putaran motor yang lebih tinggi yaitu antara 2000 rpm sampai 3000 rpm cukup memberikan pengaruh pada proses pembakaran motor diesel.

Puncak nilai rata-rata laju pelepasan panas menurun sejalan dengan peningkatan putaran motor.

Peningkatan tekanan injeksi mempengaruhi *ignition delay* pada proses pembakaran motor diesel, dimana semakin tinggi tekanan injeksi bahan bakar maka puncak *rate of heat release* akan semakin mendekati titik mati atas [5].

Peningkatan tekanan injeksi secara signifikan mempengaruhi peningkatan tekanan ruang bakar yang secara tidak langsung akan mengakibatkan penurunan nilai laju pelepasan panas pada motor diesel.

Dengan tekanan injeksi yang lebih tinggi, standar deviasi *rate of heat release* menjadi semakin besar, oleh karena itu perlu dilakukan kajian lebih mendalam terhadap efek peningkatan tekanan injeksi terhadap kekasaran proses pembakaran (*combustion roughness*).

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT, Pak Achmad, Pak Yani, Yanuandri, Mulia dan semua staf Laboratorium Motor Bakar Telimek LIPI yang telah membantu dalam melakukan penelitian motor diesel.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Widodo B. Santoso, Arifin Nur, Achmad Praptijanto., 2008., *Analisis Proses Pembakaran pada Motor Diesel dengan Off-Line Combustion Analyzer.*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Simulasi IV., Universitas Gadjah Mada., Yogyakarta., ISBN 978-979-18703-0-6.
- [2] Hsu, B. D., 2002, *Practical Diesel Engine Combustion Analysis*, SAE International, Amerika Serikat.
- [3] Heywood, J. B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamental*, McGraw-Hill Book Company, Singapura
- [4] Arifin Nur., 2008., *Analisa Pengaruh Tekanan Injeksi Bahan Bakar pada Motor Diesel Konvensional.*, Prosiding Seminar Nasional VII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri., Institut Teknologi Nasional., Bandung., ISSN 1693-3168.
- [5] Yusuf Ali., Milford A., Hanna., Joseph E. Borg., *Effect of Alternative Diesel Fuels on Heat Release Curves for Cummins N14-410 Diesel Engine.*, Journal Series Number 11128 of the University of Nebraska Agricultural Research Division., Nebraska-Lincoln.