

## Pengaruh Rasio Tekanan Kompresor *Turbocharger* Terhadap Kinerja Mesin Diesel dan Emisi NO<sub>x</sub>

Yeremias M. Pell, Matheus M. Dwinanto\*

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adi Sucipto, Penfui, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85001 Indonesia

\*E-mail: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

### Abstract

The use of a turbocharger in large diesel engines has become a demand because it can increase engine output and efficiency by utilizing exhaust gas from combustion (exhaust gas). Turbocharger is a device to increase the intake of air into the cylinder by utilizing the energy of exhaust gases from combustion. The purpose of this study is to analyze the effect of differences in the turbocharger pressure ratio on diesel engine performance using Diesel-RK software. The diesel engine under study is model 4D56 2.5L which uses a single turbocharger with maximum power of 136 PS at 4000 rpm and maximum torque of 324 N.m at 2000 rpm. The compressor pressure ratio under study was only 1.5 and 2.5 compared to a diesel engine without a turbocharger or natural aspirated engine (NA). The engine capacity is 2477 cc, 4 cylinders, and the compression ratio is 18:1. The fuel used is SME Biodiesel (Soya Methyl Ester, C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>) with a cetane number of 56.5. The results of this study indicate that the use of a turbocharger will lead to an increase in engine power, especially at a high compressor pressure ratio due to the larger air filling when compared to the NA diesel engine for the engine speed range of 750 rpm to 5000 rpm. For diesel engines that use a turbocharger, the BSFC will decrease with increasing engine speed. NO<sub>x</sub> emissions increase with increasing turbocharger compressor pressure ratio when compared to NA diesel engines, and this occurs over the entire engine speed range (750 rpm – 5000 rpm). NO<sub>x</sub> emissions decrease as engine speed increases.

**Keywords:** compressor pressure ratio, turbocharger, diesel engine, performance, nitrogen oxides

### Abstrak

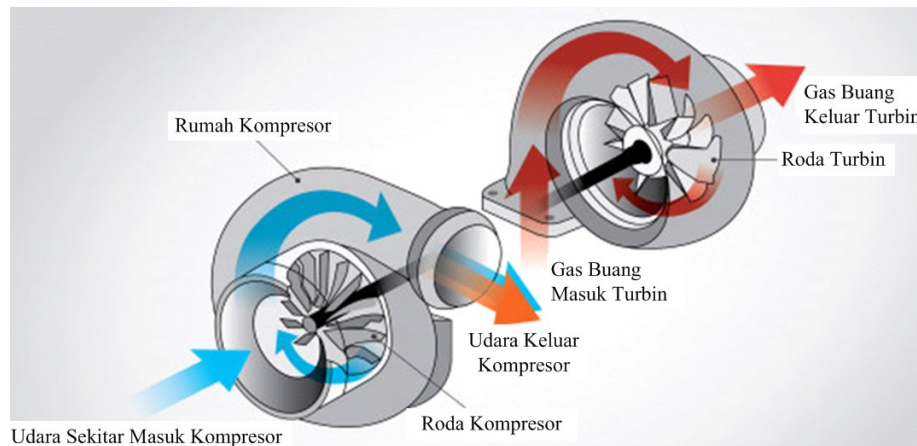
Penggunaan *turbocharger* di mesin-mesin diesel berukuran besar telah menjadi tuntutan karena dapat meningkatkan daya keluaran dan efisiensi mesin dengan memanfaatkan gas buang sisa hasil pembakaran (*exhaust gas*). *Turbocharger* merupakan sebuah peralatan untuk menambah asupan udara yang masuk ke dalam silinder dengan memanfaatkan energi gas buang hasil pembakaran. Adapun tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh perbedaan rasio tekanan *turbocharger* terhadap kinerja mesin diesel menggunakan perangkat lunak Diesel-RK. Mesin diesel yang diteliti adalah tipe 4D56 2.5L yang menggunakan *turbocharger* tunggal dengan maksimum daya 136 PS pada putaran 4000 rpm, dan torsi maksimum 324 Nm pada 2000 rpm. Rasio tekanan kompresor yang diteliti hanya 1,5 dan 2,5 yang dibandingkan dengan mesin diesel tanpa *turbocharger* (*Natural Aspirated/NA*). Kapasitas mesin 2477 cc, 4 silinder, dan rasio kompresi 18:1. Bahan bakar yang digunakan adalah Biodiesel SME (Soya Methyl Ester, C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>) dengan angka setana 56,5. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *turbocharger* akan menyebabkan peningkatan daya mesin, terutama pada rasio tekanan kompresor yang tinggi karena pengisian udara yang lebih besar bila dibandingkan dengan mesin diesel NA untuk rentang putaran mesin 750 rpm sampai dengan 5000 rpm. Untuk mesin diesel yang menggunakan *turbocharger*, BSFC akan berkurang dengan meningkatnya putaran mesin. Emisi NO<sub>x</sub> meningkat dengan meningkatnya rasio tekanan kompresor *turbocharger* bila dibandingkan dengan mesin diesel NA, dan ini terjadi pada seluruh rentang putaran mesin (750 rpm – 5000 rpm). Emisi NO<sub>x</sub> menurun seiring dengan meningkatnya putaran mesin.

**Kata kunci:** rasio tekanan kompresor, *turbocharger*, mesin diesel, kinerja, nitrogen oksida

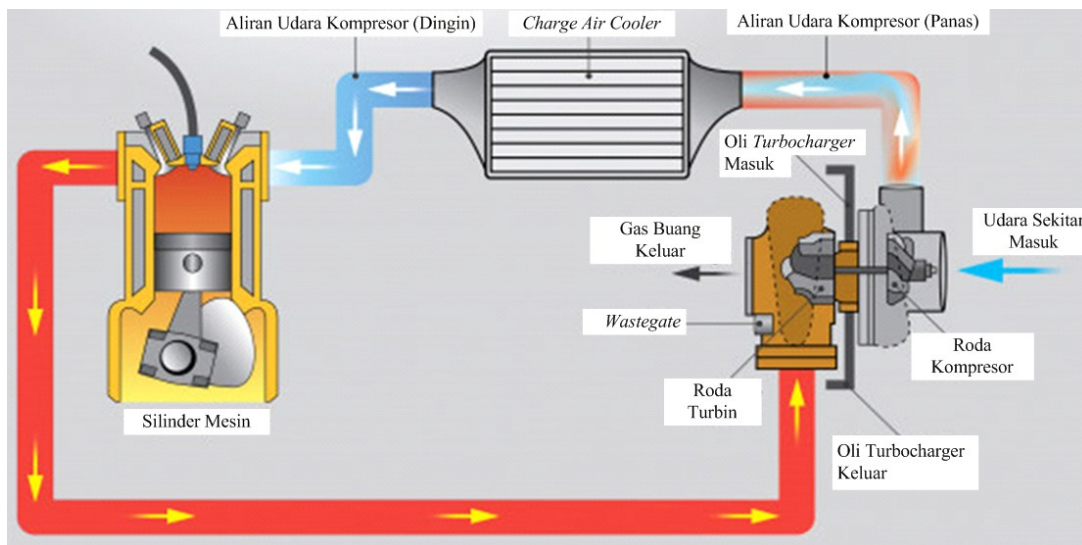
### 1. Pendahuluan

Penggunaan *turbocharger* di mesin-mesin diesel berukuran besar telah menjadi tuntutan karena dapat meningkatkan daya keluaran dan efisiensi mesin dengan memanfaatkan gas buang sisa hasil pembakaran (*exhaust gas*). *Turbocharger* merupakan sebuah peralatan untuk menambah asupan udara yang masuk ke dalam silinder dengan memanfaatkan energi gas buang hasil pembakaran. Jika sebelumnya udara yang akan dimasukkan ke dalam silinder hanya mengandalkan kevakuman yang dibentuk dari pergerakan piston saat bergerak dari TMA (Titik Mati Atas) ke TMB (Titik Mati Bawah) atau saat langkah hisap, maka dengan *turbocharger* udara ditekan masuk ke dalam silinder menggunakan kompresor yang diputar oleh turbin yang digerakkan oleh energi dari gas buang hasil pembakaran [1, 2].

*Turbocharger* memberikan lebih banyak udara ke dalam ruang bakar sehingga pada akhirnya, menghasilkan lebih banyak daya dan torsi ketika piston diekspansi ke bawah oleh ledakan yang dihasilkan dari pembakaran. Hal ini dilakukan dengan mengompresi udara, sehingga udara lebih padat saat ditarik. *Turbocharger* adalah kompresor udara, yang meningkatkan tekanan udara di mesin dengan mengambil udara dari atmosfer sehingga rasio tekanan kompresor *turbocharger* sangat berpengaruh terhadap daya mesin diesel [3, 4].



**Gambar 1.** Komponen utama *turbocharger*



**Gambar 2.** Prinsip kerja *turbocharger*

*Turbocharger* merupakan salah satu perangkat dasar yang digunakan untuk meningkatkan daya keluaran dan sangat penting untuk digunakan di mesin diesel tugas berat (*heavy duty diesel engine*). Oleh karena itu, beberapa peneliti terdahulu telah mengkaji penggunaan *turbocharger* di mesin diesel diantaranya, Yusuf, dkk. (2019) menganalisis kinerja penggunaan *turbocharger* di mesin mobil diesel juga telah dilakukan menggunakan *dynamometer*. Hasil studi ini menunjukkan bahwa penggunaan *turbocharger* akan menghasilkan torsi maksimum 18,31 N.m pada 2000 rpm dan tanpa *turbocharger* torsi maksimumnya 16,52 N.m pada 1800 rpm. Untuk maksimum daya dengan *turbocharger* dicapai 3800 rpm yaitu 57,24 kW dan tanpa *turbocharger* pada 3800 rpm yaitu 52,15 kW. Untuk konsumsi bahan bakar spesifik pada torsi maksimum dengan *turbocharger* sebesar 154,8 gr/ps.h dan tanpa *turbocharger* yaitu 172,3 gr/ps.h. Dengan *turbocharger* tekanan efektif rata-rata maksimum dicapai pada 2000 rpm yaitu 9,20 kg/cm<sup>2</sup> dan tanpa *turbocharger* pada 1800 rpm sebesar 8,30 kg/cm<sup>2</sup>. Batas asap maksimum mesin yang menggunakan *turbocharger* adalah 2,07 g/m<sup>3</sup> sedangkan pada mesin tanpa *turbocharger* hasilnya adalah 4,53 g/m<sup>3</sup> [5].

Studi eksperimen juga telah dilakukan oleh Emara, dkk (2016) di mesin diesel 6 silinder dengan *turbocharger* yang bertujuan untuk meningkatkan daya mesin melalui penggantian *turbocharger* yang terpasang dengan yang dipilih, dan disesuaikan dengan benar. Hasil studi ini menunjukkan pemilihan dan/atau pencocokan *turbocharger* sangat penting untuk meningkatkan rasio daya terhadap berat juga untuk mengurangi biaya dan waktu evaluasi. Pencapaian teknis utama dari studi ini dapat diringkas sebagai berikut *turbocharger* tipe HX80 yang dipilih dan dicocokkan dengan benar untuk menggantikan *turbocharger* yang dipasang sebelumnya, memberikan parameter kinerja mesin yang lebih baik dan emisi yang relatif lebih rendah. Peningkatan tekanan maksimum di dalam silinder sebanyak 20% untuk semua

beban. Peningkatan daya mesin maksimum sekitar 16,7% dan torsi mesin maksimum sekitar 17,2% sehingga mengarah ke traksi yang lebih baik, dan juga menurunkan BSFC mesin sebesar 5,8% [6].

Studi eksperimen tentang pengaruh penggunaan *turbocharger* terhadap kinerja mesin diesel Mitsubishi tipe L300 oleh Kusnadi (2014). Disimpulkan bahwa penggunaan *turbocharger* di mesin diesel tersebut akan menghasilkan torsi dan daya yang lebih besar daripada tanpa *turbocharger* [7]. Pada tahun 2020, Hendrawan dan Nugroho melakukan studi penggunaan *turbocharger* di mesin diesel 6 silinder untuk mengetahui peningkatan daya mesin tersebut. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemakaian *turbochager* akan meningkatkan kinerja mesin, karena panas buang dapat dimanfaatkan kembali. Penggunaan *turbocharger* dapat menaikkan tekanan dan temperatur pembakaran yang tinggi. Untuk dapat meningkatkan daya motor diesel dapat digunakan *turbocharger* [8].

Simulasi pengaruh rasio tekanan kompresor *turbocharger* terhadap kinerja mesin diesel tipe 4D56 2.5L telah dilakukan oleh Dwinanto, dkk. (2022). Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan *turbocharger* akan menyebabkan peningkatan daya mesin karena pengisian udara yang lebih besar bila dibandingkan dengan mesin diesel tanpa *turbocharger* untuk rentang putaran mesin 750 rpm sampai dengan 5000 rpm. Untuk mesin diesel yang menggunakan *turbocharger*, BSFC akan berkurang dengan meningkatnya putaran mesin [9].

*Turbocharger* memberikan lebih banyak udara ke dalam ruang bakar sehingga pada akhirnya, menghasilkan lebih banyak daya dan torsi ketika piston diekspansi ke bawah oleh ledakan yang dihasilkan dari pembakaran. Di sisi lain, gas buang hasil pembakaran mesin diesel menghasilkan emisi  $\text{NO}_x$  lebih tinggi dibandingkan dengan karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) baik itu menggunakan solar atau biodiesel. Hal ini, salah satunya disebabkan oleh perbandingan campuran bahan bakar dan udara dalam motor diesel cenderung lebih kurus [10]. Penyebab akurat terbentuknya emisi  $\text{NO}_x$  pada pembakaran dalam mesin diesel masih belum jelas. Namun, jelas bahwa nitrogen oksida yang terjadi ketika panas pembakaran menyebabkan bersatunya oksigen dan nitrogen yang terdapat di udara memberikan berbagai ancaman bahaya. Zat nitrogen oksida ini sendiri menyebabkan kerusakan paru-paru. Setelah bereaksi di atmosfer, zat ini membentuk partikel-partikel nitrat amat halus yang menembus bagian terdalam paru-paru. Partikel-partikel nitrat ini pula, jika bergabung dengan air baik air di paru-paru atau uap air di awan akan membentuk asam. Selain itu, zat-zat oksida ini juga bereaksi dengan asap bensin yang tidak terbakar dan zat-zat hidrokarbon lain di sinar matahari dan membentuk ozon rendah atau "smog" atau kabut berwarna coklat kemerahan yang menyelimuti sebagian besar kota di dunia.  $\text{NO}_2$  pada manusia dapat meracuni paru-paru, kadar 100 ppm dapat menimbulkan kematian, 5 ppm setelah 5 menit menimbulkan sesak nafas [11, 12]. Hal inilah yang mendorong dilakukan simulasi ini untuk menganalisis pengaruh rasio tekanan kompresor *turbocharger* terhadap kinerja mesin diesel dan emisi nitrogen oksida dengan menggunakan perangkat lunak Diesel-RK.

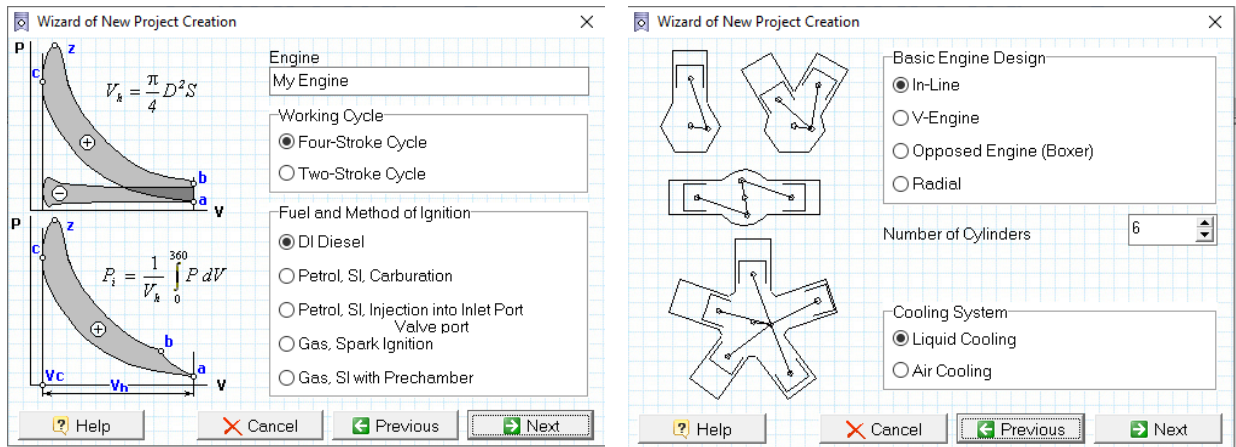
## 2. Metode penelitian

Simulasi pengaruh rasio tekanan kompresor *turbocharger* terhadap kinerja mesin diesel dan emisi nitrogen oksida dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Diesel-RK. Untuk menunjang penelitian ini maka dilakukan pengumpulan data dari berbagai sumber berupa jurnal dan katalog tentang spesifikasi mesin diesel yang diteliti, yaitu tipe 4D56 2.5L. Dalam penelitian ini dipilih *biofuel* SME B20 sebagai bahan bakar mesin diesel yang dianalisis sedangkan spesifikasi mesin diesel disajikan pada Tabel 1 berikut ini:

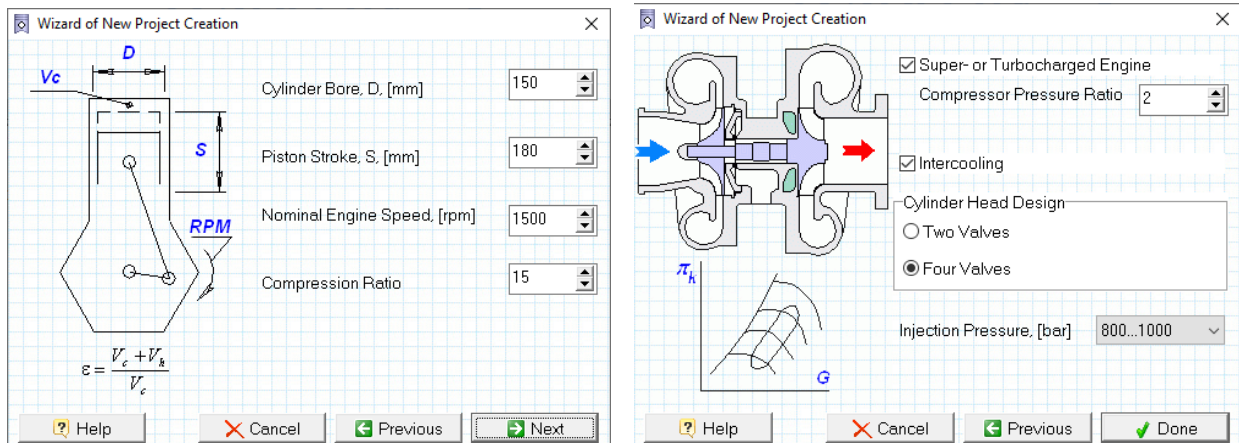
**Tabel 1.** Spesifikasi mesin diesel yang disimulasikan

Spesifikasi	Nilai	
Jumlah Silinder	4	
Jumlah Katup	8	
Volume silinder ( $\text{cm}^3$ )	2477	
Diameter x Panjang Langkah (mm)	91,1 x 95	
Tipe Mesin	Mesin Segaris ( <i>in-line</i> )	
Rasio Kompresi	18 : 1	
Maksimum Daya Luaran	100 kW (136 PS) pada 4000 rpm	
Maksimum Torsi	324 N.m (33 kg.m) pada 2000 rpm	
Jumlah Injektor per Silinder	1	
Combustion Chamber	<i>Vortex chamber type</i>	
Valve Timing	Intake Opening	BTDC 20°
	Exhaust Closing	ABDC 49°
	Intake Opening	BBDC 55°
	Exhaust Closing	ATDC 22°
Fuel System	2nd Generation Common Rail Direct Injection (CRDi)	

Data yang telah diperoleh dari berbagai sumber baik cetak maupun elektronik dipilih sesuai dengan yang diperlukan. Kemudian data yang diperlukan tersebut dijadikan data masukan (*input*) pada perangkat lunak Diesel-RK. Detail pengisian semua parameter sangat mempengaruhi hasil dari simulasi sehingga untuk data detail mesin diesel yang disimulasikan harus diisi pada jendela-jendela pada perangkat lunak Diesel-RK.

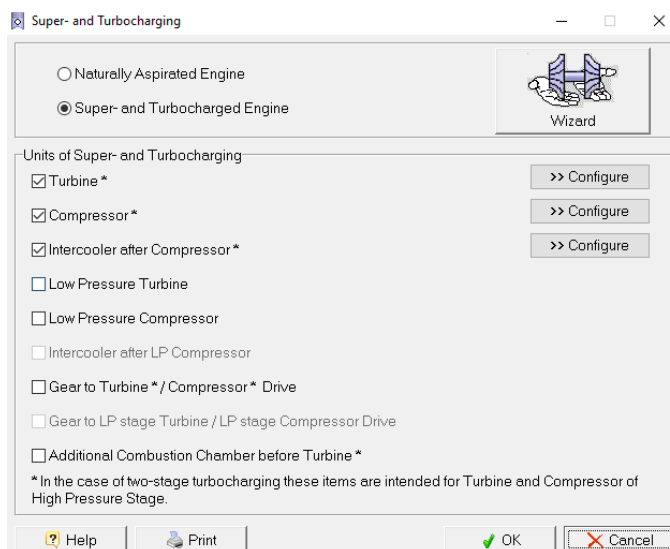


Gambar 3. Pemilihan tipe mesin



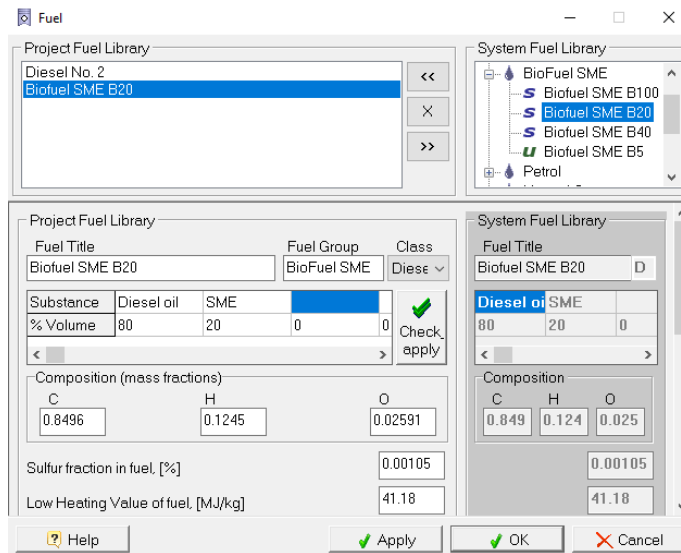
Gambar 4. Penentuan spesifikasi mesin dan turbocharger

Parameter-parameter kinerja *turbocharger* berisi metode dan geometri turbin, kompresor dan *intercooler*. Parameter-parameter ini harus ditentukan berdasarkan data spesifikasi *turbocharger* yang ada dan yang digunakan dalam analisis. Hal ini sangat berpengaruh terhadap kinerja dan emisi gas buang mesin diesel (Gambar 5).



Gambar 5. Parameter kinerja turbocharger

Biodiesel merupakan jenis bahan bakar baru dan terbarukan yang terus dikembangkan penggunaannya di mesin diesel sehingga dapat menurunkan efek rumah kaca. Dalam penelitian ini dipilih *biofuel* SME B20 sebagai bahan bakar mesin diesel yang dianalisis. B20 merupakan pencampuran 20% biodiesel dengan 80% solar (Gambar 6).

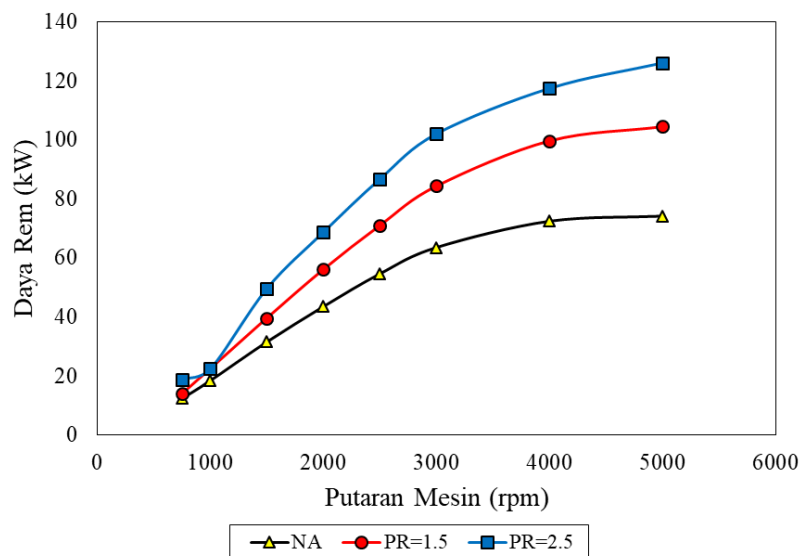


Gambar 6. Parameter bahan bakar mesin diesel

Parameter-parameter kinerja hasil simulasi yang dianalisis adalah daya rem (*brake horse power*), konsumsi bahan bakar spesifik (*brake specific fuel consumption*), efisiensi termal (*brake thermal efficiency*), dan emisi NO<sub>x</sub>.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 7 menunjukkan pengaruh perubahan rasio tekanan kompresor turbocharger terhadap daya mesin. Terlihat bahwa dengan meningkatnya rasio tekanan kompresor maka daya mesin diesel juga akan mengalami peningkatan. Misalnya mesin diesel tanpa *turbocharger* (*Natural Aspirated* = NA) pada 3000 rpm, daya mesin yang dihasilkan 63,6 kW, dan bila menggunakan *turbocharger* dengan PR = 1,5 maka daya mesin akan meningkat menjadi 84,4 kW atau dayanya meningkat sekitar 32,7%. Peningkatan daya mesin yang lebih besar dapat dicapai dengan meningkatkan rasio tekanan *turbocharger* menjadi 2,5 di mana daya mesin akan meningkat menjadi 102,1 kW atau meningkat sekitar 60,5% bila dibandingkan dengan mesin NA pada putaran mesin yang sama. Dengan peningkatan rasio tekanan kompresor maka akan lebih banyak udara yang terisi untuk proses pembakaran, yang selanjutnya akan cenderung meningkatkan efisiensi pembakaran.

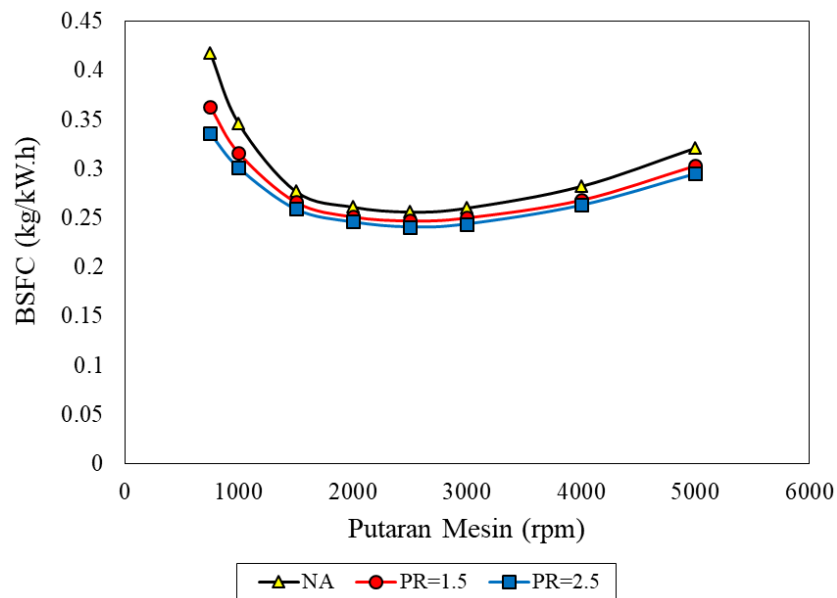


Gambar 7. Hubungan daya mesin dan putaran mesin



Gambar 7 juga menunjukkan bahwa ketika putaran mesin meningkat maka daya mesin akan meningkat secara kontinyu, terutama pada putaran mesin 750 rpm sampai dengan 4000 rpm. Daya mesin cenderung stabil pada putaran mesin 4000 rpm sampai dengan 5000 rpm. Dengan kata lain, efisiensi volumetrik mesin akan meningkat dengan meningkatnya putaran mesin, dan akan mencapai nilai maksimum pada 4000 rpm dan setelah itu nilainya cenderung stabil. Sebenarnya, efisiensi volumetrik yang lebih besar berarti udara segar berlebih akan dimasukkan ke dalam silinder sehingga akan lebih banyak oksigen yang tersedia untuk proses pembakaran. Efisiensi volumetrik tinggi akan meningkatkan daya mesin.

Gambar 8 menunjukkan pengaruh perubahan rasio tekanan kompresor *turbocharger* terhadap BSFC, di mana terlihat bahwa dengan meningkatnya rasio tekanan kompresor maka BSFC akan mengalami penurunan. Misalnya, pada 4000 rpm untuk mesin diesel NA, BSFC adalah 0,282 kg/kW.h, dan bila menggunakan *turbocharger* dengan rasio tekanan kompresor 1,5 maka BSFC akan menurun menjadi 0,268 kg/kW.h atau berkurang sekitar 4,96%. Penurunan lebih lanjut untuk BSFC dapat dicapai dengan meningkatkan rasio tekanan kompresor *turbocharger* menjadi 2,5 di mana BSFC akan menjadi 0,263 kg/kW.h atau berkurang sekitar 6,73% bila dibandingkan dengan mesin NA pada putaran mesin yang sama. Konsumsi bahan bakar spesifik tertinggi terjadi pada putaran mesin rendah dan tinggi.



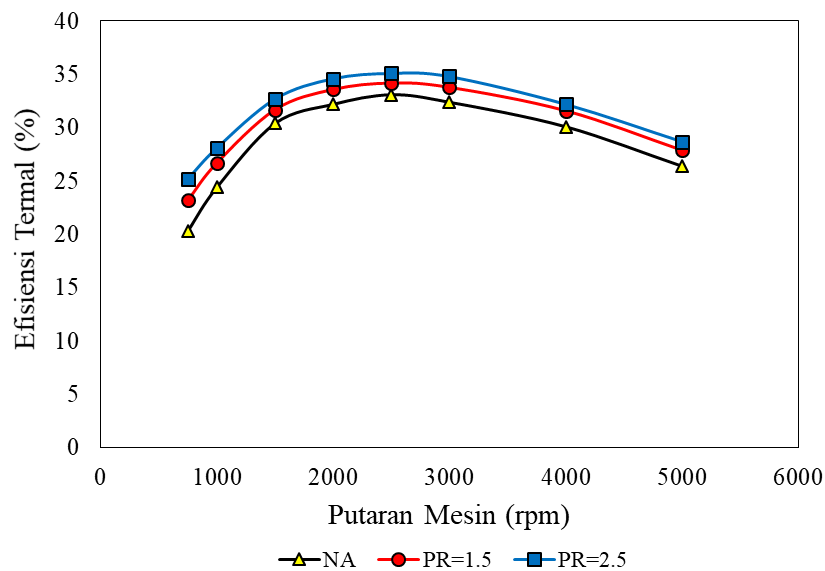
**Gambar 8.** Hubungan konsumsi bahan bakar spesifik dan putaran mesin

Konsumsi bahan bakar spesifik berbeda dengan daya mesin diesel, dan berbanding terbalik. Dari Gambar 7 dan 8 terlihat bahwa BSFC meningkat dengan penurunan daya mesin, dan pada putaran mesin rendah, daya mesin adalah minimum tetapi BSFC adalah yang tertinggi. Pada putaran mesin menengah, daya mesin yang dihasilkan adalah yang paling tinggi tetapi BSFC adalah yang paling rendah. Kecenderungan ini sama terlihat pada putaran mesin tinggi. Namun, ketika daya mesin yang dihasilkan meningkat, BSFC menurun tajam untuk semua rasio tekanan kompresor *turbocharger*. Sebagai contoh, daya mesin untuk PR = 1,5 dan 1500 rpm. Daya mesin sama dengan 39,7 kW dan BSFC adalah 0,266 kg/kW.h. Pada putaran mesin 3000 rpm, daya mesin meningkat menjadi 84,4 kW sedangkan BSFC menurun menjadi 0,25 kg/kW.h. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pada daya mesin tinggi akan menghasilkan BSFC yang lebih rendah. Pada rasio tekanan yang sama yaitu PR = 1,5 daya mesin pada 5000 rpm akan berkurang menjadi 104,5 kW, sedangkan BSFC meningkat menjadi 0,303 kg/kW.h.

Gambar 9 menunjukkan pengaruh putaran mesin terhadap efisiensi termal pada rasio tekanan kompresor *turbocharger* yang berbeda. Gambar ini menunjukkan kondisi pengaturan mesin terbaik adalah pada PR = 2,5. Misalnya, mesin diesel NA pada 3000 rpm, efisiensi termal memiliki nilai 32,4%, dan pada PR = 1,5 efisiensi termal meningkat menjadi 33,8% sedangkan pada PR = 2,5 menjadi 34,8%. Efisiensi termal terbesar dicapai pada pengaturan PR = 2,5 yang nilainya adalah 34,8%, di mana kenaikannya sekitar 7,4% jika dibandingkan dengan mesin diesel NA. Dari hasil yang disajikan pada Gambar 9 jelas bahwa ketika rasio tekanan kompresor *turbocharger* meningkat, efisiensi termal juga akan meningkat. Secara umum, mesin diesel dengan *turbocharger* menunjukkan efisiensi termal yang lebih tinggi daripada mesin diesel NA karena udara yang diisi lebih banyak sehingga daya keluaran dan efisiensi pembakaran juga meningkat.

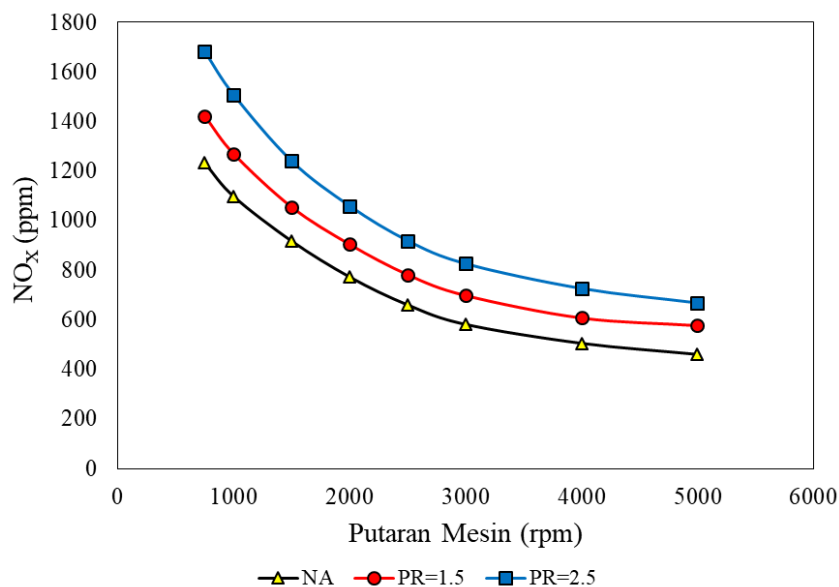
Gambar 9 juga menunjukkan bahwa pada putaran mesin rendah (kurang dari 2000 rpm) efisiensi termal meningkat seiring dengan peningkatan putaran mesin, sehingga daya rem juga meningkat. Misalnya, pada pengaturan mesin diesel dengan PR = 1,5 dan 1000 rpm, efisiensi termalnya 26,7% dan pada 2000 rpm efisiensi termalnya meningkat menjadi 33,6% dan mencapai maksimum pada 2500 rpm yaitu 34,2%. Pada putaran mesin yang lebih tinggi (lebih besar dari

2500 rpm) efisiensi termal cenderung menurun di mana pada 5000 rpm efisiensi termalnya menjadi 27,9%. Pengurangan efisiensi termal pada putaran mesin yang lebih tinggi disebabkan oleh pengurangan efisiensi volumetrik silinder, juga pada putaran mesin yang tinggi, waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pembakaran menjadi berkurang.



Gambar 9. Hubungan efisiensi termal dan putaran mesin

Gambar 10 menunjukkan hubungan pengaruh putaran mesin terhadap emisi nitrogen oksida yang dihasilkan pada rasio tekanan kompresor *turbocharger* yang berbeda. Pada putaran mesin rendah, emisi  $\text{NO}_x$  ditemukan lebih besar jika dibandingkan dengan kecepatan mesin yang lebih tinggi. Pada putaran mesin yang lebih tinggi tidak ada cukup waktu untuk pembentukan  $\text{NO}_x$  dan juga penurunan efisiensi volumetrik mengurangi jumlah udara segar (nitrogen dan oksigen). Misalnya, pada pengaturan PR = 1,5 dan 750 rpm, emisi  $\text{NO}_x$  ditemukan 1422,4 ppm, sedangkan pada 5000 rpm, pembentukan  $\text{NO}_x$  sama dengan 576,7 ppm, tingkat pengurangan sekitar 59,4% karena peningkatan putaran mesin dari 750 menjadi 5000 rpm.



Gambar 10. Hubungan emisi  $\text{NO}_x$  dan putaran mesin

Gambar 10 juga menunjukkan bahwa pembentukan  $\text{NO}_x$  meningkat seiring dengan peningkatan rasio tekanan kompresor *turbocharger*, baik faktor adanya udara berlebih maupun temperatur tinggi menyebabkan terbentuknya  $\text{NO}_x$ . Misalnya, pada mesin diesel NA dan 3000 rpm didapatkan  $\text{NO}_x$  sebesar 581,6 ppm, dan pada penggunaan *turbocharger* dengan PR = 1,5 dan pada putaran mesin yang sama  $\text{NO}_x$  meningkat menjadi 698,1 ppm sedangkan pada PR = 2,5 pembentukan  $\text{NO}_x$  meningkat menjadi 826,7 ppm di mana peningkatan ini hanya karena peningkatan rasio tekanan kompresor *turbocharger*.

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil simulasi ini menunjukkan bahwa penggunaan *turbocharger* akan meningkatkan daya mesin, terutama pada rasio tekanan kompresor yang tinggi karena pengisian udara yang lebih besar bila dibandingkan dengan mesin diesel NA untuk rentang putaran mesin 750 rpm sampai dengan 5000 rpm. Untuk mesin diesel yang menggunakan *turbocharger*, BSFC akan berkurang dengan meningkatnya putaran mesin. Emisi NO<sub>x</sub> meningkat dengan meningkatnya rasio tekanan kompresor *turbocharger* bila dibandingkan dengan mesin diesel tanpa turbocharger (Naturaal Aspirated), dan ini terjadi pada seluruh rentang putaran mesin (750 rpm – 5000 rpm). Emisi NO<sub>x</sub> menurun seiring dengan meningkatnya putaran mesin diesel.

#### Daftar Pustaka

- [1] Gwehenberger, T., Thiele, M., Seiler, M., Robinson, D., 2010, "Single-Stage High Pressure Turbocharging", ASME Conference Proceeding Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, February 16: 103 - 113.
- [2] Zhang, H., Zhang, H., Wang, Z., 2017, "Effect on Vehicle Turbocharger Exhaust Gas Energy Utilization for the Performance of Centrifugal Compressors Under Plateau Conditions", *Energies*, 10 (2121): 1 - 18.
- [3] Subramami, D. A., Dhinakaran, R., Prasanth, V. R., 2020, "Introduction to Turbocharging - A Perspective on Air Management System", Chapter 4 in Design and Development of Heavy Duty Diesel Engines (A Handbook), Springer, Singapore.
- [4] Nguyen-Schäfer, H., 2015, "Rotordynamics of Automotive Turbochargers", Second Edition, Springer, Switzerland, 1 - 20.
- [5] Yusuf, Y., Caturwati, Ni K., Rosyadi, I., Haryadi, Aswata, Abdullah, S., 2019, "Analisis Prestasi Mesin Mobil Diesel Turbocharger yang Diuji dengan Dynamometer", *Jurnal Sains dan Teknologi*, 15 (2): 92 - 101.
- [6] Emara, K., Emara, A., Razek, E. S. A., 2016, "Turbocharger Selection and Matching Criteria in a Heavy Duty Diesel Engine", *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 7 (12): 1 - 8.
- [7] Kusnadi, 2014, "Pengaruh Penggunaan Turbocharger Terhadap Unjuk Kerja Mesin Diesel Tipe L300", *Nozzle: Journal Mechanical Engineering*, 3 (1): 1 - 6.
- [8] Hendrawan, A., Nugroho, A. J., 2020, "Pengaruh Turbocharger Terhadap Daya Mesin Induk KN. Prajapati", *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, 22 (1): 44 - 48.
- [9] Dwinanto, M. M., Pell, Y. M., Wadu, A. B. J., 2022, "Studi Pengaruh Rasio Tekanan Kompresor Turbocharger Terhadap Kinerja Mesin Diesel", *Lontar: Jurnal Teknik Mesin Undana*, 9 (1): 21 - 27.
- [10] Hoekman, S. K., Robbins, C., 2012, "Review of the Effects of Biodiesel on NO<sub>x</sub> Emissions", *Fuel Processing Technology*, 96: 237 - 249.
- [11] Velmurugan, K., Sathiyagnanam, A. P., 2016, "Effect of biodiesel fuel properties and formation of Nox emissions: A Review", *International Journal of Ambient Energy*, 38 (6): 1 - 6.
- [12] Bhave, N. A., Gupta, M. M., Agrawal, K. N., Bissa, B. B., Gudadhe, N. P., 2019, "The Performance and Emission Predictions of Direct Injection Diesel Engine", *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9: 32 - 37.