



Analisis Penggantian *Exhaust System* terhadap *Performance Engine* type 2NR-VE

Ahmad Fahmi^{1*}, Tatang Permana²

¹⁻² Pendidikan Teknik Otomotif, FPTI, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

afahmi@upi.edu¹, permana@upi.edu²

*Penulis Korespondensi: afahmi@upi.edu

Abstract. *Engine performance is a critical parameter in automotive engineering as it directly affects power output, torque characteristics, and overall vehicle efficiency. One of the components that significantly influences engine performance is the exhaust system, which regulates exhaust gas flow and back pressure. This study aims to experimentally analyze the effect of replacing a standard exhaust system with an aftermarket exhaust system on the performance of a 2NR-VE engine. The research employed an experimental method using a comparative design with two testing conditions: a factory-standard exhaust system and an aftermarket exhaust system. Engine performance testing was conducted using a dynamometer (dyno test) to measure horsepower and torque across various engine speed ranges (RPM). Each testing condition was performed repeatedly, and the resulting data were averaged to reduce measurement errors and minimize the influence of operational fluctuations. The experimental results indicate that the aftermarket exhaust system significantly improves engine performance. The maximum power increased from 82.5 HP to 91.6 HP, while the maximum torque rose from 131.2 Nm to 154.4 Nm. These improvements suggest that the aftermarket exhaust configuration effectively reduces exhaust back pressure and enhances exhaust gas flow efficiency. Therefore, replacing the exhaust system can be considered an effective approach to improving engine performance, provided that the modification is technically appropriate and complies with applicable emission and noise regulations.*

Keywords: 2NR-V Engine; Aftermarket Exhaust System; Dynamometer Test; Engine Performance; Horsepower.

Abstrak. Performa engine merupakan parameter utama dalam evaluasi kinerja kendaraan bermotor karena berpengaruh terhadap daya, torsi, dan efisiensi operasional. Sistem pembuangan (*exhaust system*) berperan penting dalam mengendalikan aliran gas buang dan tekanan balik yang secara langsung memengaruhi efisiensi volumetrik engine. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh penggantian *exhaust system* standar dengan *exhaust system* aftermarket terhadap performa engine tipe 2NR-VE. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan desain perbandingan dua perlakuan, yaitu penggunaan *exhaust* standar pabrikan dan *exhaust* aftermarket. Pengujian performa dilakukan menggunakan dynamometer (*dyno test*) untuk mengukur daya (*horsepower*) dan torsi (*torque*) pada berbagai tingkat putaran mesin (RPM). Setiap pengujian dilakukan secara berulang untuk memperoleh nilai rata-rata guna meminimalkan kesalahan pengukuran dan fluktuasi kondisi pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *exhaust* aftermarket mampu meningkatkan performa engine secara signifikan, dengan daya maksimum meningkat dari 82,5 HP menjadi 91,6 HP serta torsi maksimum meningkat dari 131,2 Nm menjadi 154,4 Nm. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa konfigurasi *exhaust* aftermarket mampu menurunkan tekanan balik dan memperbaiki karakteristik aliran gas buang. Dengan demikian, penggantian *exhaust system* terbukti berpengaruh positif terhadap performa engine, selama dilakukan dengan spesifikasi teknis yang tepat dan tetap memenuhi regulasi emisi serta kebisingan.

Kata kunci: Daya; Mesin 2NR-VE; Performa Mesin; Sistem Knalpot Purna Jual; Uji dynamometer.

1. LATAR BELAKANG

Performa *engine* kendaraan bermotor merupakan aspek fundamental dalam dunia otomotif yang menentukan efisiensi, daya jelajah, responsivitas, serta kenyamanan berkendara. Dalam era modern yang ditandai oleh urbanisasi cepat, mobilitas tinggi, dan tuntutan efisiensi energi, baik produsen maupun konsumen memiliki perhatian besar terhadap performa kendaraan. Produsen berlomba mengembangkan teknologi powertrain yang lebih efisien,

sementara konsumen mengharapkan kendaraan yang irit bahan bakar, namun tetap mampu memberikan tenaga optimal dan akselerasi yang baik, terutama di kondisi lalu lintas padat.

Data dari International Energy Agency (IEA) menunjukkan bahwa pada tahun 2023, lebih dari 1,4 miliar kendaraan bermotor digunakan secara global, dan sektor transportasi menyumbang sekitar 24% dari total emisi CO₂ dunia, sebagian besar berasal dari kendaraan berbahan bakar fosil. Oleh karena itu, peningkatan performa *engine* tidak hanya bertujuan pada kenyamanan dan kecepatan, tetapi juga menyangkut efisiensi energi dan pengurangan emisi gas buang. Upaya ini sering melibatkan modifikasi komponen hilir seperti *catalytic converter* untuk menyeimbangkan performa dan standar lingkungan (Setiadi & Yudhanto, 2021). Salah satu elemen penting yang mendukung performa *engine* sekaligus berperan dalam manajemen emisi adalah sistem pembuangan atau *exhaust system*.

Sistem *exhaust* bukan sekadar saluran pembuangan gas hasil pembakaran, tetapi menjadi komponen vital yang mempengaruhi dinamika aliran gas buang dan efisiensi volumetrik *motor*. Desain dan konfigurasi sistem ini, termasuk panjang dan diameter pipa, jenis *muffler*, hingga bentuk header, memiliki dampak signifikan terhadap tekanan balik (*back pressure*) dan fenomena pulsasi gas. Tekanan balik yang terlalu tinggi dapat menghambat pembilasan silinder dan menurunkan performa *motor*, sedangkan tekanan yang terlalu rendah bisa menyebabkan *over-scavenging* dan mengganggu pengisian bahan bakar-udara secara efisien (Heywood, 1988; Norhisam, 2021).

Seiring berkembangnya teknologi dan budaya otomotif, tren modifikasi kendaraan bermotor, terutama pada sistem knalpot, semakin meluas. Knalpot aftermarket hadir sebagai alternatif pengganti knalpot standar pabrikan, dengan klaim mampu meningkatkan performa *engine*, mengubah karakter suara, dan bahkan meningkatkan estetika kendaraan. Popularitas knalpot aftermarket terlihat dari meningkatnya permintaan global, yang menurut laporan *Grand View Research* diperkirakan akan tumbuh sebesar 5,6% CAGR hingga 2030. Modifikasi ini biasanya melibatkan penggantian manifold (header), perubahan diameter dan material pipa, serta penggunaan *muffler* berdesain khusus yang ditujukan untuk mengoptimalkan aliran gas buang.

Beberapa studi menunjukkan bahwa penggantian knalpot standar dengan aftermarket dapat mempengaruhi performa *engine* secara nyata. Penelitian oleh Wahyudin et al. (2024) menemukan bahwa variasi desain *exhaust pipe* secara signifikan mengubah kurva torsi dan daya *motor* pada kendaraan roda dua. Penelitian lain oleh Rian et al. (2021) mencatat bahwa penggunaan *muffler* tipe straight-through dapat meningkatkan daya maksimum hingga 6%, namun dengan potensi peningkatan tingkat kebisingan yang cukup besar. Di sisi lain, penelitian

oleh Salim et al. (2022) pada kendaraan roda empat menunjukkan bahwa modifikasi tanpa perhitungan matang dapat menurunkan efisiensi bahan bakar dan meningkatkan emisi karbon monoksida.

Meskipun terdapat studi mengenai sistem knalpot dalam konteks performa tinggi atau kendaraan balap, masih sedikit penelitian yang secara sistematis mengkaji dampak knalpot aftermarket terhadap performa kendaraan harian. Kendaraan harian umumnya dioperasikan dalam kondisi lalu lintas bervariasi, dengan kebutuhan efisiensi dan kenyamanan yang berbeda dari kendaraan performa tinggi. Sayangnya, pengguna kendaraan sering kali melakukan modifikasi tanpa pemahaman teknis memadai, hanya mengandalkan opini komunitas atau pemasaran produk, yang dapat menimbulkan risiko performa tidak optimal atau bahkan kerusakan komponen *engine* dalam jangka panjang (Zulkarnain et al., 2023).

Perlu dilakukan kajian ilmiah yang mendalam dan berbasis data eksperimental untuk mengetahui sejauh mana sistem knalpot aftermarket dapat mempengaruhi performa motor kendaraan harian. Kajian ini tidak hanya akan mengukur variabel daya (*horsepower*) dan torsi (*torque*), tetapi juga mempertimbangkan parameter tambahan seperti konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC), suhu gas buang, dan kebisingan suara. Penelitian semacam ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknik modifikasi kendaraan yang lebih terukur, aman, dan sesuai dengan regulasi lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggantian sistem knalpot standar dengan sistem knalpot aftermarket terhadap performa *engine* kendaraan, khususnya dalam hal output daya dan torsi. Dengan pendekatan eksperimental yang terukur dan analisis data yang komprehensif, hasil dari studi ini diharapkan dapat menjadi rujukan ilmiah dan praktis bagi pengguna kendaraan, teknisi bengkel, serta pelaku industri modifikasi otomotif dalam membuat keputusan yang rasional dan berbasis bukti.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem *exhaust* pada *engine* pembakaran dalam berfungsi tidak hanya sebagai jalur pembuangan gas hasil pembakaran, tetapi juga menentukan karakter aliran gas buang yang berdampak signifikan pada efisiensi pengosongan silinder (*scavenging*) dan tekanan balik (*back-pressure*). Konsep efisiensi volumetrik dan kontrol tekanan balik adalah prinsip utama yang mendasari desain sistem *exhaust* pada mesin pembakaran dalam (Pulkrabek, 2004). Sistem *exhaust* standar pabrikan, seperti yang diatur oleh TEM (2005), dirancang secara komprehensif untuk memenuhi standar performa, efisiensi bahan bakar, kebisingan, dan regulasi emisi secara simultan. Tekanan balik yang dihasilkan dari sistem *exhaust*

mempengaruhi kemampuan piston mengosongkan ruang bakar, dan selanjutnya memengaruhi volume udara-bahan bakar masuk pada langkah isap, yang berdampak langsung pada performa *engine* (daya dan torsi) serta konsumsi bahan bakar (Zetai Ma et al., 2024).

Desain *header*, termasuk diameter pipa, panjang, konfigurasi *header* (misalnya 4-2-1 atau 4-1), serta desain *muffler* menjadi determinan utama karakteristik aliran gas buang dan besar tekanan balik (Worsztynowicz & Perek, 2024). Analisis detail terhadap sifat perpindahan panas dan distribusi suhu pada *exhaust manifold* sangat penting dalam rekayasa sistem pembuangan, terutama untuk menjaga durabilitas material dan memastikan efisiensi *scavenging* pada putaran mesin tinggi (Wakid et al., 2024). Penelitian simulasi menunjukkan bahwa *header* yang dirancang secara optimal (*tuned*) dapat memanfaatkan gelombang tekanan balik negatif untuk meningkatkan efisiensi *scavenging* dan mengisi silinder lebih baik, sebuah konsep yang krusial pada mesin *naturally aspirated* (Senčić et al., 2022). Penerapan analisis elemen hingga (*CFD*) semakin umum digunakan untuk memvalidasi desain *manifold* yang menghasilkan peningkatan performa dengan meminimalkan hambatan gas buang (Sadhasivam et al., 2021). Kontribusi *muffler* juga signifikan, di mana desain internalnya harus dioptimalkan untuk menekan kebisingan sambil meminimalkan peningkatan *back-pressure* yang merugikan performa (Huang et al., 2021). Oleh karena itu, modifikasi sistem *exhaust* pada *engine* tipe 2NR-VE dapat secara teoritis memengaruhi performa *engine* melalui mekanisme dinamika aliran gas dan kontrol *back-pressure*.

Tekanan balik yang terlalu tinggi menyebabkan gas sisa pembakaran tidak sepenuhnya keluar, sehingga mengurangi ruang untuk udara-bahan bakar segar dan menurunkan efisiensi volumetrik. Efek ini telah dibuktikan oleh Joarder (2011) melalui pengujian pada mesin CI, yang menunjukkan bahwa peningkatan *back-pressure* menyebabkan penurunan daya dan peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakter *back-pressure* harus dikendalikan pada batas optimal untuk mempertahankan performa *engine*.

Konfigurasi *header* dan komponen *exhaust* lainnya juga memengaruhi aliran gas buang. Penelitian Navadagi & Sangamad (2014) menemukan bahwa geometri *header* yang tidak optimal menghasilkan turbulensi dan peningkatan tekanan balik, sedangkan desain yang baik dapat menurunkan *back-pressure* dan memperbaiki aliran gas buang. Perancangan yang cermat terhadap geometri *exhaust manifold* pada mesin multi-silinder sangat menentukan untuk mencapai kondisi pembilasan yang seragam dan optimal pada setiap silinder, yang secara langsung berdampak pada performa keseluruhan (Desai et al., 2022). Selain performa, aspek penting lain dari modifikasi knalpot adalah dampaknya terhadap suhu operasional mesin, di mana sistem yang tidak optimal dapat menyebabkan peningkatan suhu yang berisiko pada

durabilitas komponen (Saepuddin et al., 2023). Artinya, modifikasi *exhaust sytem* tidak hanya memengaruhi tingkat kebisingan, tetapi juga berpotensi meningkatkan performa *engine* apabila desainnya mampu menjaga aliran gas tetap bebas hambatan.

Dengan demikian, kajian teori memberikan landasan kuat bahwa penggantian *exhaust system* pada *engine* 2NR-VE berpotensi meningkatkan performa melalui pengurangan tekanan balik dan peningkatan efisiensi pengisian silinder.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen. Sugiyono (2014) menyatakan bahwa eksperimen adalah suatu metode penelitian yang digunakan untuk mengetahui pengaruh suatu perlakuan terhadap variabel lain dalam kondisi yang terkendali. Eksperimen dilakukan dengan cara memberikan perlakuan terhadap objek atau subjek untuk melihat dampaknya terhadap fenomena yang diamati. Dalam hal ini yang diamati ialah pengaruh perubahan *exhaust system* terhadap daya (*power*) dan torsi (*torque*) pada *engine* 2NR-VE. Tahapan pertama dimulai dengan menyiapkan kendaraan ber kode *engine* 2NR-VE serta *exhaust aftermarket* yang ingin di uji, dan *dyno test* yang mampu menganalisa RPM, *horsepower* hingga torsi. Dimana analisis data menentukan karakteristik yang akan diuji, khususnya dalam meneliti pengaruh perubahan saluran gas buang terhadap *performance*. Adapun variabel yang diamati yaitu sebagai berikut:

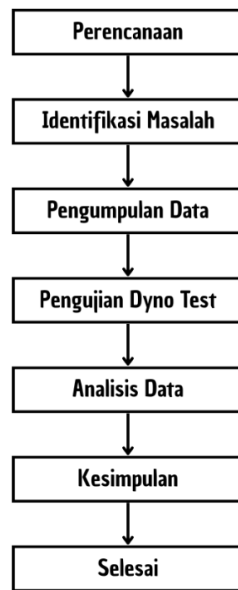
Variable Terikat

Variabel terikat pada pengujian ini adalah uji daya dan uji torsi.

Varianle Bebas

Variable bebas pada pengujian ini Adalah *exhaust system* standar dan *exhaust system* aftermarket dengan header 4-2-1 beserta ukuran pipa header 41mm, resonator 50,8 mm, diameter pipe 50,8 mm, *exhaust in* 50,8 mm dan *exhaust out* 87 mm.

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama, seperti yang diilustrasikan pada Gambar berikut:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Adapun deskripsi dari tahapan penelitian:

- a. Perencanaan: Pada tahap ini, perencanaan dilakukan untuk penelitian yang berfokus pada analisis dampak penggantian sistem pembuangan (*exhaust system*) terhadap performa *engine* Type 2NR-VE. Perencanaan ini melibatkan penentuan tujuan penelitian, metode yang akan digunakan, serta pengaturan waktu dan sumber daya yang dibutuhkan.
- b. Identifikasi Masalah: Langkah ini mencakup identifikasi masalah yang akan diselesaikan dalam penelitian ini, yaitu bagaimana penggantian *exhaust system* dapat mempengaruhi performa *engine* Type 2NR-VE. Biasanya, masalah yang diidentifikasi berkaitan dengan aspek seperti efisiensi bahan bakar, daya, atau emisi gas buang.
- c. Pengumpulan Data: Pada tahap ini, data terkait dengan performa *engine* sebelum dan sesudah penggantian *exhaust system* dikumpulkan. Data ini bisa mencakup pengukuran daya *engine*, torsi, efisiensi bahan bakar, serta parameter lain yang relevan dengan performa *engine*.
- d. Pengujian Dyno Test: Pengujian dyno dilakukan untuk mengukur performa *engine* secara akurat dengan menggunakan dynamometer. Pengujian ini dilakukan baik sebelum maupun setelah penggantian *exhaust system* untuk melihat perubahan yang terjadi pada performa *engine* (daya dan torsi).
- e. Analisis Data: Data yang dikumpulkan selama pengujian dianalisis untuk mengetahui dampak penggantian *exhaust system* terhadap performa *engine* Type 2NR-VE. Analisis ini akan membandingkan data sebelum dan setelah penggantian, serta memberikan wawasan mengenai perbedaan yang terjadi.

- f. Kesimpulan: Berdasarkan hasil analisis, kesimpulan ditarik mengenai seberapa besar pengaruh penggantian *exhaust system* terhadap performa *engine*. Kesimpulan ini akan mencakup rekomendasi atau hasil yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja *engine* atau efisiensi kendaraan.
- g. Selesai: Setelah kesimpulan diambil dan semua analisis selesai, proses penelitian dianggap selesai. Ini dapat diakhiri dengan laporan atau dokumentasi hasil penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data dari penelitian ini di ambil melalui pengujian performa *engine* secara langsung pada mesin *dyno*, Penelitian ini dilakukan di Bengkel Garage Autowerks yang berlokasi di Jl. Naripan No.49, Kota Bandung. Data yang dikumpulkan meliputi daya (horsepower) dan torsi (Nm). Proses pengujian dilakukan dalam dua tahap utama:

- a. Pengujian *baseline*, yaitu pengukuran performa *engine* menggunakan *exhaust* standar pabrik.
- b. Pengujian setelah modifikasi, yaitu pengukuran performa *engine* setelah pemasangan *exhaust aftermarket* dengan konfigurasi baru.

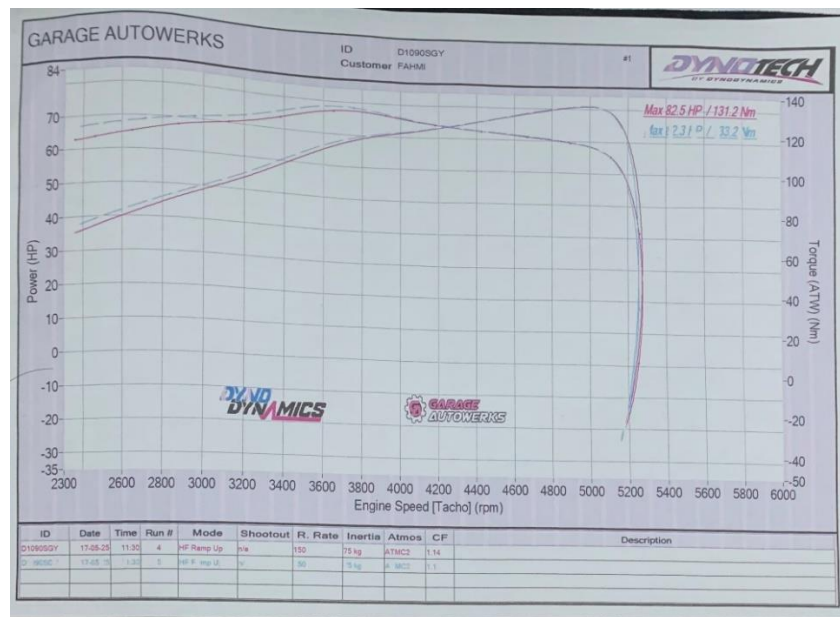
Setiap tahap pengujian dilakukan sebanyak lima kali, dan hasil akhir diperoleh dari nilai rata-rata untuk meminimalkan kesalahan pengukuran, variasi temperatur, serta fluktuasi pembacaan alat. Seluruh pengujian dilaksanakan pada kondisi *engine* yang telah mencapai temperatur operasi optimal, guna memastikan data yang diperoleh stabil dan representatif. Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu sekitar empat minggu, dimulai pada:

- a. Minggu pertama: Persiapan alat, studi lokasi bengkel, dan pengecekan kondisi *engine*
- b. Minggu kedua: Pengujian performa baseline (*exhaust* standar), dokumentasi data, dan verifikasi ulang keakuratan alat.
- c. Minggu ketiga: Penggantian *exhaust system*, pengecekan kebocoran, serta uji coba awal untuk memastikan sistem bekerja optimal.
- d. Minggu keempat: Pengujian performa setelah modifikasi menggunakan metode yang sama dengan baseline, kemudian dilanjutkan dengan pengolahan data dan analisis perbandingan.

Pembahasan

Pembahasan lengkap mengenai perubahan angka daya, torsi, serta kurva performa akan dijabarkan sebagai berikut:

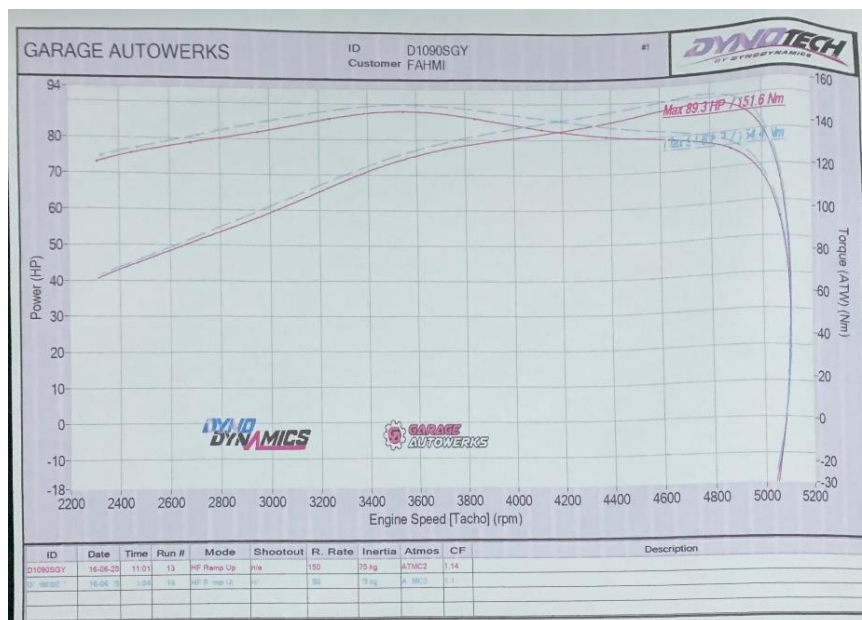
Pengambilan Data Dyno Exhaust Standar



Gambar 2. Hasil Dyno Daya.

Berdasarkan hasil uji menggunakan *dyno test* dengan *exhaust* standar, kedua data tersebut adalah puncak daya maupun torsi dan rata – rata daya maupun torsi. Daya puncak pada *exhaust* standar adalah 82,5 HP pada 5000 rpm dan torsi maksimum ialah 131,2 Nm pada 3800 rpm.

Pengambilan Data Dyno Exhaust Aftermarket



Gambar 3. Hasil Dyno Torsi.

Berdasarkan hasil data yang diperoleh dari *dyno test exhaust aftermarket*, didapatkan dua data yaitu daya puncak sebesar 91,6 HP pada 4800 rpm dan torsi maksimum 154,4 Nm pada 3600 rpm.

Analisa Daya

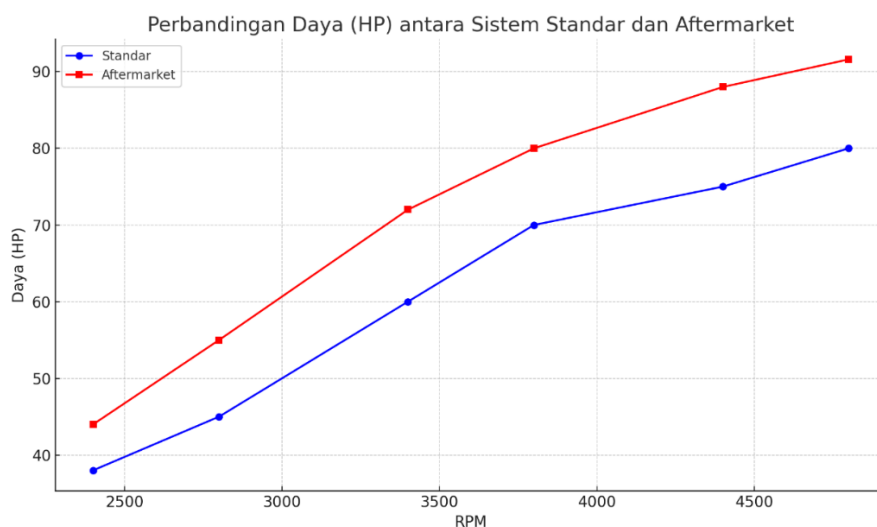
Pengujian dilakukan terhadap kendaraan berengine 2NR-VE (Toyota Avanza Veloz 2019) untuk mengetahui perubahan daya. Pengujian dilakukan dua kondisi, menggunakan *exhaust* standar dan menggunakan *exhaust aftermarket*. Data yang dianalisis meliputi perubahan daya tiap RPM. Hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut;

Tabel 1. Perbandingan Daya.

RPM	Standar	Aftermarket
2400	38 HP	44 HP
2800	45 HP	55 HP
3400	60 HP	72 HP
3800	70 HP	80 HP
4400	75 HP	88 HP
4800	80 HP	91,6 HP

Tabel tersebut menunjukkan perbandingan daya (horse power/HP) yang dihasilkan oleh perubahan *exhaust* sistem dengan Standar dan *Aftermarket* pada berbagai tingkat putaran *engine* (RPM), yaitu mulai dari 2400 hingga 4800 RPM. Secara umum, terlihat bahwa sistem *Aftermarket* selalu menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan *exhaust* standar di setiap tingkat RPM. Pada 2400 RPM, *exhaust* standar menghasilkan daya sebesar 38 HP, sedangkan *exhaust aftermarket* menghasilkan 44 HP. Selisih ini terus meningkat seiring bertambahnya RPM. Misalnya, pada 2800 RPM terjadi peningkatan dari 45 HP (Standar) menjadi 55 HP (*Aftermarket*), sedangkan pada 3400 RPM meningkat dari 60 HP menjadi 72 HP.

Tren peningkatan daya ini berlanjut hingga ke putaran tertinggi yang ditampilkan, yaitu 4800 RPM. Pada titik ini, *exhaust* standar menghasilkan 80 HP, sementara *exhaust aftermarket* mencatat daya sebesar 91,6 HP. Dengan demikian, *exhaust aftermarket* memberikan tambahan daya sebesar 11,6 HP pada putaran tertinggi.



Gambar 4. Perbedaan Daya *Exhaust* Standar dan *Aftermarket*.

Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan *exhaust aftermarket* mampu meningkatkan performa *engine*, terutama pada RPM menengah hingga tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi *exhaust aftermarket* dapat menjadi salah satu cara efektif untuk meningkatkan output daya *engine* kendaraan.

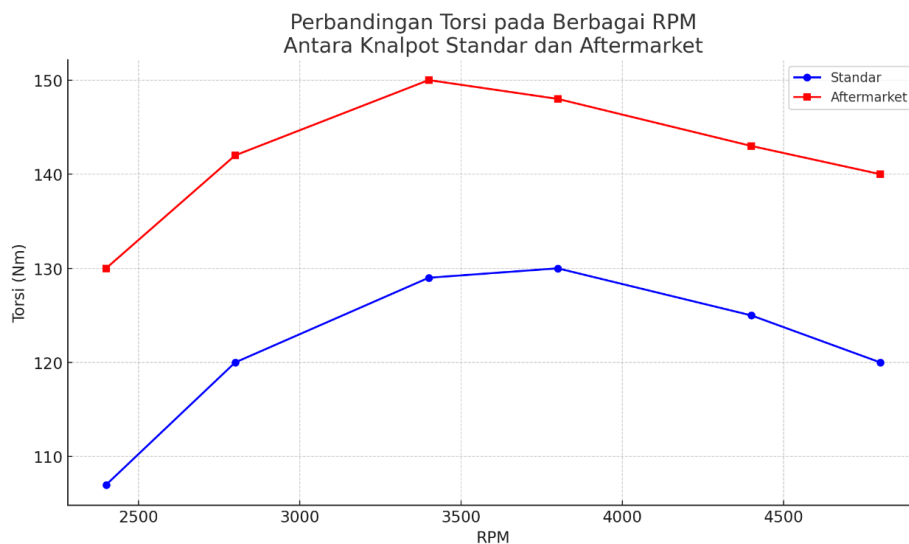
Analisa Torsi

Pengujian dilakukan terhadap kendaraan berengine 2NR-VE (Toyota Avanza Veloz 2019) untuk mengetahui perubahan torsi. Pengujian dilakukan dua kondisi, menggunakan *exhaust* standar dan menggunakan *exhaust aftermarket*. Data yang dianalisis meliputi perubahan daya tiap RPM. Hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut;

Tabel 2. Perbandingan Torsi.

RPM	Standar	Aftermarket
2400	107 Nm	130 Nm
2800	120 Nm	142 Nm
3400	129 Nm	150 Nm
3800	130 Nm	148 Nm
4400	125 Nm	143 Nm
4800	120 Nm	140 Nm

Dari hasil uji korelasi torsi antara 2 *exhaust* yaitu *exhaust* standar dan *aftermarket* tersebut memiliki hubungan yang sangat kuat sehingga dapat disimpulkan bahwa penggantian ini memiliki pengaruh.



Gambar 5. Perbedaan Torsi *Exhaust* Standar dan *Aftermarket*.

Grafik di atas menunjukkan perbandingan nilai torsi (dalam satuan Newton meter, Nm) yang dihasilkan oleh *engine* kendaraan pada berbagai putaran *engine* (RPM), yaitu mulai dari 2400 hingga 4800 RPM, antara penggunaan sistem knalpot standar dan *aftermarket*. Secara

umum, terlihat bahwa knalpot *aftermarket* menghasilkan torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan knalpot standar di seluruh rentang RPM yang diuji.

Pada 2400 RPM, torsi yang dihasilkan dengan knalpot standar adalah 107 Nm, sedangkan dengan knalpot *aftermarket* mencapai 130 Nm. Perbedaan ini terus berlanjut pada 2800 RPM, di mana knalpot standar mencatatkan torsi sebesar 120 Nm, sedangkan knalpot *aftermarket* menghasilkan 142 Nm. Puncak torsi tercatat pada 3400 RPM dengan nilai 150 Nm pada knalpot *aftermarket*, dibandingkan dengan 129 Nm pada knalpot standar.

Setelah mencapai 3400 RPM, nilai torsi dari kedua sistem menunjukkan penurunan, namun *aftermarket* tetap lebih unggul. Pada 3800 RPM, knalpot *aftermarket* menghasilkan 148 Nm, sedangkan standar hanya 130 Nm. Di 4400 RPM, nilai torsi masing-masing adalah 143 Nm untuk *aftermarket* dan 125 Nm untuk standar. Penurunan berlanjut di 4800 RPM, dengan *aftermarket* mencatatkan 140 Nm dan standar hanya 120 Nm.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian menggunakan dyno test pada kendaraan ber-*engine* 2NR-VE (Toyota Avanza Veloz 2019), dapat disimpulkan bahwa penggantian sistem *exhaust* standar dengan *exhaust aftermarket* memberikan peningkatan signifikan terhadap performa *engine*, baik dari segi daya (horsepower) maupun torsi (torque).

Exhaust aftermarket menghasilkan daya maksimum sebesar 91,6 HP pada 4800 RPM, lebih tinggi dibandingkan *exhaust* standar yang hanya mencapai 82,5 HP pada 5000 RPM. Selain itu, torsi maksimum juga meningkat dari 131,2 Nm (standar) menjadi 154,4 Nm (*aftermarket*) pada RPM yang lebih rendah (3600 RPM).

Peningkatan ini menunjukkan bahwa *exhaust aftermarket* mampu mengurangi tekanan balik dan meningkatkan efisiensi aliran gas buang, yang berdampak langsung pada peningkatan efisiensi volumetrik *motor*. Tren peningkatan performa terlihat konsisten di hampir seluruh rentang RPM yang diuji, terutama pada RPM menengah hingga tinggi.

Agar hasil penelitian lebih bervariasi, penelitian lanjutan sebaiknya melibatkan kendaraan dengan variasi usia *engine*, tingkat keausan, atau pengaturan ECU yang berbeda, sehingga dapat dilihat seberapa besar pengaruh modifikasi *exhaust* terhadap populasi *engine* 2NR-VE secara lebih luas.

Dengan demikian, modifikasi *exhaust system* dapat menjadi alternatif yang efektif untuk meningkatkan performa kendaraan harian, asal dilakukan dengan perhitungan teknis yang matang dan mempertimbangkan aspek regulasi kebisingan serta emisi.

DAFTAR REFERENSI

- Desai, A. R., Buradi, A., Gowthami, L., Praveena, B. A., Madhusudhan, A., & Bora, B. J. (2022). Computational investigation of engine exhaust manifold with different alternative fuels using CFD. *Proceedings of the Mysore Sub Section International Conference*.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- Huang, P., Wu, P., Su, H., Xue, J., Zhang, H., Zhang, Y., & Guo, Y. (2021). Research on the acoustic attenuation performance and optimization of split-stream rushing exhaust mufflers in the presence of acoustic–structure coupling effects. *Applied Sciences*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/app15094722>
- Joarder, M. U. H. (2011). Effect of engine backpressure on the performance and emissions of a CI engine. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering (ICME 2011)*.
- Ma, Z., Zhang, K., Xiang, H., Gu, J., Yang, M., & Deng, K. (2024). Experimental study on the influence of high exhaust backpressure on diesel engine performance via energy and exergy analysis. *Energy*.
- Navadagi, V., & Sangamad, S. (2014). CFD analysis of exhaust manifold of multi-cylinder petrol engine for optimal geometry to reduce back pressure. *International Journal of Engineering Research & Technology*.
- Norhisam, M. (2021). Effects of muffler configuration on engine performance and exhaust emission. *Applied Mechanics and Materials*, 890, 213–220.
- Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Pearson Prentice Hall.
- Rian, D. A., Santoso, B., & Yulianto, E. (2021). Performance evaluation of different muffler configurations on engine output. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(2), 2341–2352.
- Sadhasivam, C., Murugan, S., Vairamuthu, J., & Priyadharshini, S. M. (2021). Design and analysis of two-cylinder exhaust manifold with improved performance using CFD. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2141–2144.
- Saepuddin, A., Tjiptady, B. C., Pradhana, C., Rohman, M., & Meditama, R. F. (2023). Pengaruh modifikasi knalpot terhadap performa dan suhu engine pada sepeda motor Satria F150. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(1), 280–288.

- Salim, A., Fitriadi, A., & Herlambang, B. (2022). Influence of aftermarket exhaust systems on fuel efficiency and emissions in passenger cars. *Automotive Science and Engineering Journal*, 6(3), 87–94.
- Senčić, T., Mrzljak, V., Medica-Viola, V., & Wolf, I. (2022). CFD analysis of a large marine engine scavenging process. *Processes*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/pr10010141>
- Setiadi, B., & Yudhanto, S. A. (2021). Pengaruh variasi model catalytic converter berbahan kuningan terhadap emisi gas buang dan performa engine. *Jurnal Turbo*, 1(2).
- Sugiyono. (2014). *Metode penelitian pendidikan: Pendekatan kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- TEM. (2005). *Emission control system step 2*. PT Toyota Astra Motor.
- Wahyudin, F. H., Khambali, K., & Winoko, Y. A. (2024). The effect of exhaust manifold diameter variation on engine performance of a 1300 cc gasoline engine. *Indonesian Journal of Advanced Research*, 3(7), 1141–1152.
- Wakid, M., Widyianto, A., & Widowati, A. (2024). Karakteristik panas pada exhaust manifold dengan variasi putaran mesin menggunakan computational fluid dynamics. *Jurnal Pendidikan Vokasi Otomotif*, 6(2), 51–70.
- Worsztynowicz, B., & Perek, M. (2024). Numerical analysis of the influence of exhaust system design on the volumetric efficiency of a combustion engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Zulkarnain, F., Yusuf, M., & Haris, A. (2023). The risk of improper exhaust modifications on engine longevity and environmental impact. *Indonesian Journal of Automotive Technology*, 10(1), 12–20.