

## Karakteristik Panas pada *Exhaust manifold* dengan Variasi Putaran Mesin menggunakan *Computational Fluid Dynamics*

Muhkamad Wakid<sup>1</sup>, Agus Widyianto<sup>2\*</sup>, Asri Widowati<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departemen Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta, Kampus UNY Karang Malang 55281

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin dan Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta, Kampus UNY Wates 55652

<sup>3</sup>Departemen Pendidikan IPA, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, Kampus UNY Karang Malang 55281

\*Corresponding Author: [aguswidyianto@uny.ac.id](mailto:aguswidyianto@uny.ac.id)

### Abstract

*The use of technology in the automotive industry has had a significant impact on vehicle engine efficiency. One of the critical aspects of the combustion system is heat management in the exhaust manifold. This research aims to characterize the distribution of heat, pressure, and exhaust gas flow velocity in the exhaust manifold with variations in engine speed using Computational Fluid Dynamics (CFD). This research used four engine speed variations, namely 750 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, and 2000 rpm. Each engine speed variation has a different temperature and exhaust gas flow speed at each inlet. An engine speed of 750 rpm raises the exhaust manifold material temperature to 235°C. The surface temperature of the material increases significantly with the machine's speed. A comparison between the exhaust gas temperature profile and the surface temperature of the exhaust manifold material reveals a close relationship between engine activity and surface temperature. The increase in temperature as engine speed increases reflects the intensification of combustion activity, directly impacting manifold temperature stability. Exhaust gas pressure analysis highlights the increase in pressure as engine speed increases. Pressure spikes at high engine speeds indicate an exhaust gas flow volume and velocity intensification during the combustion phase. The exhaust gas flow velocity profile shows an increase in line with increasing engine speed.*

*Key Words: Exhaust manifold, Flow speed, Nitrogen oxide, Computational Fluid Dynamics*

### Abstrak

Pemanfaatan teknologi dalam industri otomotif telah memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi mesin kendaraan. Salah satu aspek kritis dalam sistem pembakaran adalah manajemen panas pada *exhaust manifold*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkararakteristikan distribusi panas, tekanan dan kecepatan aliran gas buang pada *exhaust manifold* dengan variasi putaran mesin menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dalam penelitian ini menggunakan empat variasi putaran mesin yaitu 750 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm dan 2000 rpm. Setiap variasi putaran mesin memiliki suhu serta kecepatan aliran gas buang yang berbeda pada setiap saluran masuknya. Putaran mesin 750 rpm menaikkan suhu material manifold buang hingga 235°C. Suhu permukaan material meningkat secara signifikan seiring dengan kecepatan mesin. Perbandingan antara profil suhu gas buang dan suhu permukaan bahan *exhaust manifold* mengungkapkan hubungan erat antara aktivitas mesin dan suhu permukaan. Peningkatan suhu seiring dengan kenaikan putaran mesin mencerminkan intensifikasi aktivitas pembakaran, memiliki dampak langsung pada kestabilan suhu manifold. Analisis tekanan gas buang menyoroti peningkatan tekanan seiring dengan peningkatan putaran mesin. Lonjakan tekanan pada putaran mesin tinggi mengindikasikan intensifikasi dalam volume dan kecepatan aliran gas buang selama fase pembakaran. Profil kecepatan aliran gas buang menunjukkan peningkatan sejalan dengan penambahan putaran mesin.

Kata Kunci: *Exhaust manifold*, Kecepatan aliran, Nitrogen oksida, Komputasi Dinamika Fluida

## **PENDAHULUAN**

Sistem pembuangan memainkan peran krusial dalam mengeluarkan gas buang dari ruang bakar kendaraan secara terkontrol. Seiring meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak ekologi akibat gas buang dan adanya pembatasan emisi polutan berdasarkan norma British Standard (BS), persyaratan terhadap sistem pembuangan kendaraan telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir (Bral, Tripathi, Dewangan, & Mahato, 2022). Dalam konteks sistem pembuangan, dua parameter kunci yang perlu dievaluasi dari sudut pandang emisi adalah tekanan balik dan kecepatan pembuangan. Tekanan balik merujuk pada tekanan gas buang yang diperlukan untuk mengatasi hambatan pelepasan gas ke atmosfer, diukur sebagai tekanan pengukur di outlet manifold buang. Gas buang tidak dihasilkan dalam aliran yang kontinu atau lancar; sebaliknya, gas buang dihasilkan dalam bentuk pulsa, dan kecepatannya disebut sebagai kecepatan pembuangan (Kumar et al., 2022).

Peningkatan tingkat tekanan balik memberikan beban tambahan pada mesin, melibatkan kerja mekanis tambahan, dan dapat mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar, emisi (partikulat matter atau PM), karbon monoksida (CO), suhu gas buang, serta potensi kegagalan segel. Namun, kecepatan pembuangan yang lebih tinggi dapat membuang lebih banyak gas buang selama proses tumpang tindih katup. Dengan kata lain, meskipun peningkatan tekanan balik dapat berdampak negatif pada performa mesin, kecepatan pembuangan yang optimal dapat membantu dalam pengelolaan emisi dengan memastikan pengeluaran gas buang yang efisien selama fase tumpang tindih katup (Sulistyo, Sofyan, Sukardi, & Widyianto, 2023). Oleh karena itu, keseimbangan antara tekanan balik dan kecepatan pembuangan menjadi kunci dalam merancang sistem pembuangan yang efisien, mempertimbangkan tantangan ekologis dan regulasi emisi yang semakin ketat (Sadhasivam, Murugan, Vairamuthu, & Priyadharshini, 2021).

Analisis CFD terhadap berbagai sistem pembuangan telah menjadi fokus penelitian dalam beberapa karya terbaru. Sejumlah penelitian mendalam telah dilakukan untuk memahami dan meningkatkan performa manifold buang serta mengevaluasi karakteristik panas pada berbagai kondisi operasional mesin. Sebagai contoh, dalam penelitian (Alphonse & Kumar, 2021), analisis CFD difokuskan pada perancangan manifold buang dengan tujuan untuk memahami berapa banyak panas yang hilang dan bagaimana cara menyimpannya. Penelitian lain (Desai et al.) melakukan investigasi menggunakan CFD untuk menganalisis pengaruh kecepatan, temperatur, dan tekanan balik pada manifold buang mesin dengan bahan bakar alternatif berbeda. Hasilnya memberikan wawasan tentang bagaimana berbagai faktor ini memengaruhi kinerja sistem pembuangan.

Sebuah penelitian (Pathak & Deshmukh, 2021) mengeksplorasi karakteristik perpindahan panas dari manifold buang yang digabungkan dengan sirip, menunjukkan peningkatan kemampuan pembuangan panas sebesar 3,01% dan penurunan suhu maksimum sebesar 2,42%. Penelitian (Teja, Ayyappa, Katam, & Anusha, 2016) pada mesin bensin empat silinder menekankan pentingnya desain yang tepat untuk kinerja mesin secara keseluruhan melalui studi numerik pada dua manifold buang yang berjalan pada kecepatan konstan 2800 rpm. Selanjutnya, penelitian (Bajpai, Chandrakar, Agrawal, & Shekhar, 2017) membahas transformasi desain *exhaust manifold* dan dampaknya terhadap analisis, desain, dan kinerja *exhaust manifold*, dengan mempertimbangkan penggunaan bahan bakar alternatif. Sebuah penelitian (Manohar & Krishnaraj) lebih lanjut melakukan analisis dinamika fluida komputasi untuk mempelajari karakteristik aliran *exhaust manifold*, termasuk tekanan, kecepatan, dan suhu. Terakhir, dalam konteks manajemen termal kendaraan, sebuah penelitian (Guoquan, Huaming, Lin, & Xiaobin, 2021) menyoroti prediksi efek perpindahan panas yang tidak stabil menggunakan metode setara kecepatan stabil. Metode ini membantu dalam memahami denyut suhu gas buang dan aliran udara eksternal, memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem manajemen termal yang efisien.

Dalam penelitian sebelumnya (Maheshappa, Pravin, Umesh, & Veena, 2013), analisis CFD terhadap konverter katalitik dilakukan dengan tujuan menurunkan tekanan balik pada sistem pembuangan mesin diesel melalui pengurangan partikel. Dalam penelitian yang serupa, analisis CFD digunakan untuk menentukan geometri manifold buang yang ideal pada mesin SI multi-silinder untuk mengurangi emisi (Umesh & Rajagopal, 2013). Untuk meningkatkan sistem pembuangan, perilaku konverter katalitik tiga arah diteliti dalam kondisi aliran aksial dan radial (Taibani & Kalamkar, 2012). Analisis sistem manifold buang bagian Y untuk meningkatkan kinerja mesin telah ditawarkan oleh Seenikannan dkk. (Seenikannan, Periyasamy, & Nagaraj, 2008) sebagai contoh penggunaan khusus. Analisis CFD-FE digunakan dalam penelitian Deger dan rekannya (Deger, Simperl, & Jimenez) untuk mempelajari perilaku manifold buang untuk meningkatkan kinerja mesin diesel. Dalam penelitian lain (Al-Khishali, Mashkour, & Omaraa, 2010), metode eksperimental dan teoritis digunakan untuk mempelajari fitur aliran manifold buang mesin bensin satu silinder. Selain itu, studi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) digunakan untuk mempelajari tekanan balik pada manifold buang. Penelitian ini berfokus pada mesin CONTESSA yang memiliki kapasitas 20 HP dengan kecepatan maksimum 2000 rpm (Gopal, Kumar, & Kumaragurubaran, 2009). Studi ini menggunakan analisis CFD untuk memberikan gambaran yang lebih mendalam tentang bagaimana perubahan geometri, desain, dan kondisi operasional pada berbagai komponen sistem pembuangan dapat memengaruhi

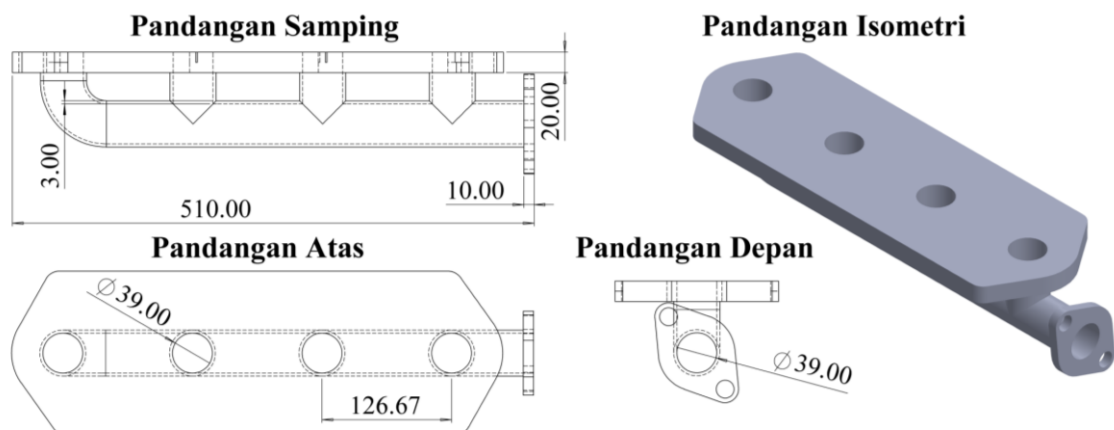
kinerja dan emisi mesin.

Berdasarkan serangkaian penelitian sebelumnya, metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tetap menjadi pilihan utama untuk simulasi aliran gas buang. Penggunaannya yang luas dan efektif telah memotivasi penelitian ini dengan tujuan utama mengkarakterisasi distribusi panas, tekanan, dan kecepatan aliran gas buang pada berbagai kondisi putaran mesin. CFD memberikan kemampuan untuk memodelkan secara rinci dan akurat dinamika aliran gas buang, memungkinkan pemahaman mendalam tentang bagaimana perubahan putaran mesin dapat memengaruhi sifat-sifat termal dan hidrodinamika dari sistem pembuangan. Studi ini mengisi celah pengetahuan dengan fokus pada karakterisasi distribusi panas untuk memahami transfer panas di dalam sistem *exhaust manifold*. Selain itu, pemahaman tentang distribusi tekanan dan kecepatan aliran gas buang diharapkan memberikan wawasan yang lebih kaya terkait dengan dinamika aliran dan pengaruhnya terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Dengan menggabungkan aspek-aspek ini, penelitian ini bertujuan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan solusi desain yang optimal untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem pembuangan, serta mengidentifikasi potensi masalah terkait suhu, tekanan, dan aliran gas buang.

## METODE

### *Model Exhaust Manifold*

Model sistem *exhaust manifold* yang disederhanakan dirancang dengan fokus pada unit pipa, yang terdiri dari bagian saluran masuk dan saluran keluar, sebagaimana terlihat dalam ilustrasi pada Gambar 1. Konfigurasi ini melibatkan empat saluran masuk dan satu saluran keluar. Saluran masuk berfungsi sebagai jalur masuk untuk gas buang sisa pembakaran dari ruang bakar, yang selanjutnya dialirkan melalui pipa *exhaust manifold* menuju saluran keluar. Dengan memusatkan perhatian pada pipa unit ini, kita dapat mengamati perpindahan panas dari pipa yang dipanaskan ke udara yang mengalir melalui pipa tersebut.

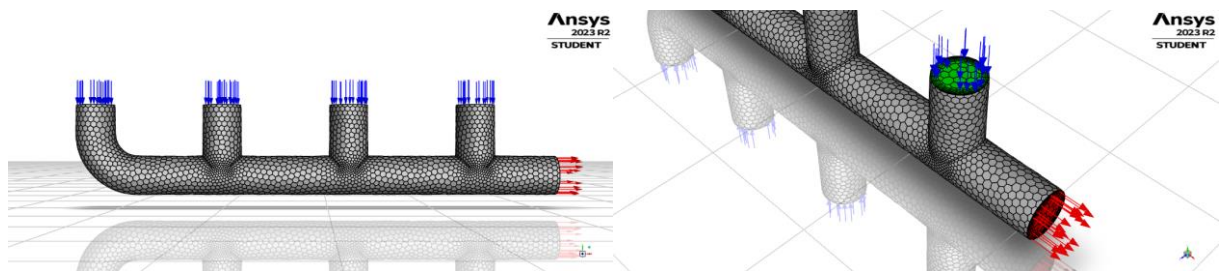


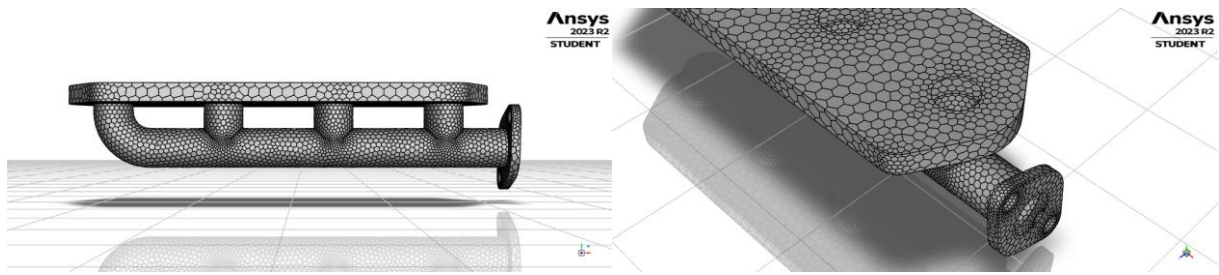
Gambar 1. Dimensi model *exhaust manifold* (satuan dalam mm)

Ketika mempertimbangkan model penyederhanaan ini, diameter saluran masuk dan keluar dipertahankan pada dimensi yang sama, yakni sebesar 39 mm. Panjang total *exhaust manifold* mencapai 510 mm dengan ketebalan pipa sebesar 3 mm. Jarak antara lubang saluran masuk diatur pada 126,67 mm, sementara bagian atas manifold memiliki ketebalan sebesar 20 mm. Bagian saluran keluar, sebagai akhir jalur, dibuat dengan ketebalan 10 mm. Pemilihan dimensi dan bentuk ini dipertimbangkan secara cermat untuk mensimulasikan aliran gas buang berupa nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) yang memasuki saluran masuk dan mengalir melalui seluruh sistem *exhaust manifold*. Penting untuk mencatat bahwa gambaran lengkap mengenai dimensi model ini dapat ditemukan pada Gambar 1, memberikan pandangan visual yang jelas terhadap struktur dan proporsi *exhaust manifold* yang digunakan dalam simulasi. Dimensi yang dipilih dengan hati-hati ini membentuk dasar yang kuat untuk memahami dan mensimulasikan perpindahan panas di dalam sistem ini, memungkinkan analisis yang mendalam terhadap karakteristik panas pada *exhaust manifold*.

### Pengaturan Mesh

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menjadi pilihan utama dalam mempelajari perpindahan panas dari sistem yang diinvestigasi, dan telah menjadi alat yang sangat digunakan oleh peneliti sebelumnya (Alphonse & Kumar, 2021; Desai et al.; Pathak & Deshmukh, 2021). Simulasi CFD menghasilkan *mesh* yang memungkinkan perhitungan perpindahan panas dalam sistem secara numerik. Dalam penelitian ini, elemen *poly-hexcore* dipilih sebagai dasar struktur *mesh*. Untuk memastikan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi, ukuran elemen maksimum diatur sebesar 12,5 mm, sementara ukuran elemen minimum ditetapkan sebesar 0,5 mm. Pengaturan tingkat pertumbuhan sebesar 1,2 diterapkan pada *mesh* untuk memastikan transisi yang lancar antara elemen yang lebih kecil dan lebih besar. Kualitas jaringan dijaga dengan menjaga target kemiringan sebesar 0,8. Teknik *smoothing mesh* dilakukan dengan menggunakan tingkat kehalusan sedang, sehingga hasil *mesh* yang dihasilkan tetap konsisten dan dapat diandalkan.



Gambar 2. Hasil *mesh* model *exhaust manifold*

Metode inflasi digunakan pada permukaan pipa karena pergerakan udara di dalam pipa sangat penting. Dengan tingkat pertumbuhan 1,2 dan rasio transisi 0,272, lima lapisan inflasi diterapkan. Bahkan di sekitar area yang mengalami perubahan geometris yang signifikan, *mesh* tetap akurat berkat penerapan peralihan lapisan inflasi yang mulus. Gambar 2 menunjukkan hasil simulasi yang menghasilkan *mesh* dengan 36.899 node dan 259.968 elemen. Analisis kualitas *mesh* menyimpulkan bahwa hasilnya sangat mirip dengan perilaku model dalam dunia nyata. Akibatnya, *mesh* yang dibuat dapat diandalkan untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang perpindahan panas pada sistem yang dipelajari.

#### *Pengaturan Kondisi Batas*

Kondisi batas yang diterapkan pada model *exhaust manifold* dijelaskan dalam Tabel 1. Terdapat empat variasi putaran mesin (rpm), yaitu putaran *idle* (750 rpm), 1000 rpm, 1500 rpm, dan 2000 rpm, yang memainkan peran penting dalam simulasi ini. Perlu dicatat bahwa terjadi sedikit penurunan suhu dari saluran masuk 1 hingga saluran masuk 4 pada setiap putaran mesin, mencerminkan variasi dalam kondisi operasional mesin. Kecepatan aliran gas buang dijaga konstan untuk setiap saluran masuk, memberikan kestabilan pada variabel ini dalam seluruh simulasi. Suhu minimum yang diaplikasikan pada model adalah 300°C pada putaran mesin 750 rpm, sementara suhu maksimum mencapai 560°C pada putaran mesin 2000 rpm. Kecepatan aliran gas buang minimum pada putaran mesin 750 rpm adalah 6 m/s, sedangkan pada putaran mesin 2000 rpm, mencapai kecepatan aliran gas buang maksimum sebesar 13 m/s. Tekanan pada saluran keluar diatur pada 0 Pa, memberikan kondisi pembuangan yang bebas.

Tabel 1. Pengaturan kondisi batas simulasi

Putaran mesin (rpm)	Saluran masuk 1		Saluran masuk 2	
	Suhu (°C)	Kecepatan (m/s)	Suhu (°C)	Kecepatan (m/s)
750	300	6	285	6
1000	380	7	368	7
1500	490	9	480	9
2000	560	13	553	13
	Saluran masuk 3		Saluran masuk 4	

Putaran mesin (rpm)	Suhu (°C)	Kecepatan (m/s)	Suhu (°C)	Kecepatan (m/s)
750	270	6	255	6
1000	356	7	344	7
1500	470	9	460	9
2000	546	13	539	13

Dalam situasi ini, panas yang berasal dari gas buang berpindah ke permukaan bahan *exhaust manifold* adalah jenis konveksi. Dalam simulasi ini, baja digunakan sebagai bahan *exhaust manifold* karena memiliki koefisien perpindahan panas 25,32 W/m<sup>2</sup>K. Suhu aliran bebas *exhaust manifold* diatur pada 26,85°C, yang memberikan kondisi awal yang realistis untuk simulasi perpindahan panas dimulai. Tabel 1 memberikan struktur dan detail yang diperlukan untuk mewakili kondisi batas dalam simulasi ini. Ini memberikan landasan yang kuat untuk melihat dan menganalisis karakteristik perpindahan panas pada *exhaust manifold* dalam berbagai kondisi operasional mesin.

*Sifat Bahan*

Simulasi melibatkan material yang berbeda untuk nitrogen oksida dan baja, menciptakan suatu model yang merepresentasikan dengan akurat sifat-sifat termal dan mekanik dari kedua bahan tersebut. Seluruh model padatnya terbuat dari baja dengan massa jenis sebesar 8.030 kg/m<sup>3</sup>. Baja, sebagai bahan struktural utama, memiliki konduktivitas termal sebesar 16,27 W/m-K dan kalor jenis 502,48 J/kg-K. Pilihan ini mencerminkan sifat-sifat material yang umumnya ditemukan pada komponen mesin dan sistem pembuangan kendaraan. Sebaliknya, sifat material standar untuk fluida gas buang, dalam hal ini nitrogen oksida (Wang et al.), disimulasikan dengan memperhitungkan massa jenis sebesar 1 kg/m<sup>3</sup> dan konduktivitas termal sebesar 0,0454 W/m-K. Viskositas nitrogen oksida diatur pada nilai 1,72e-05 kg/m-s. Pengaturan sifat material ini membantu menciptakan representasi yang akurat terhadap perilaku gas buang dalam *exhaust manifold*.

Tabel 2. Sifat material baja dan nitrogen oksida

Properti Bahan	Kepadatan (kg/m <sup>3</sup> )	Konduktivitas termal (W/m-K)	Panas Spesifik (J/kg-K)	Viskositas (kg/m-s)
Baja	8030	16,27	502,48	-
Nitrogen oksida	1	0,0454	-	1,72e-05

Sifat material lainnya, baik untuk baja maupun nitrogen oksida, diterapkan pada nilai konstan sepanjang simulasi untuk menjaga konsistensi hasil. Rangkuman dari sifat-sifat material yang terlibat dapat ditemukan dalam Tabel 2, menyajikan informasi yang dibutuhkan untuk mensimulasikan perpindahan panas antara kedua material tersebut dalam kondisi yang

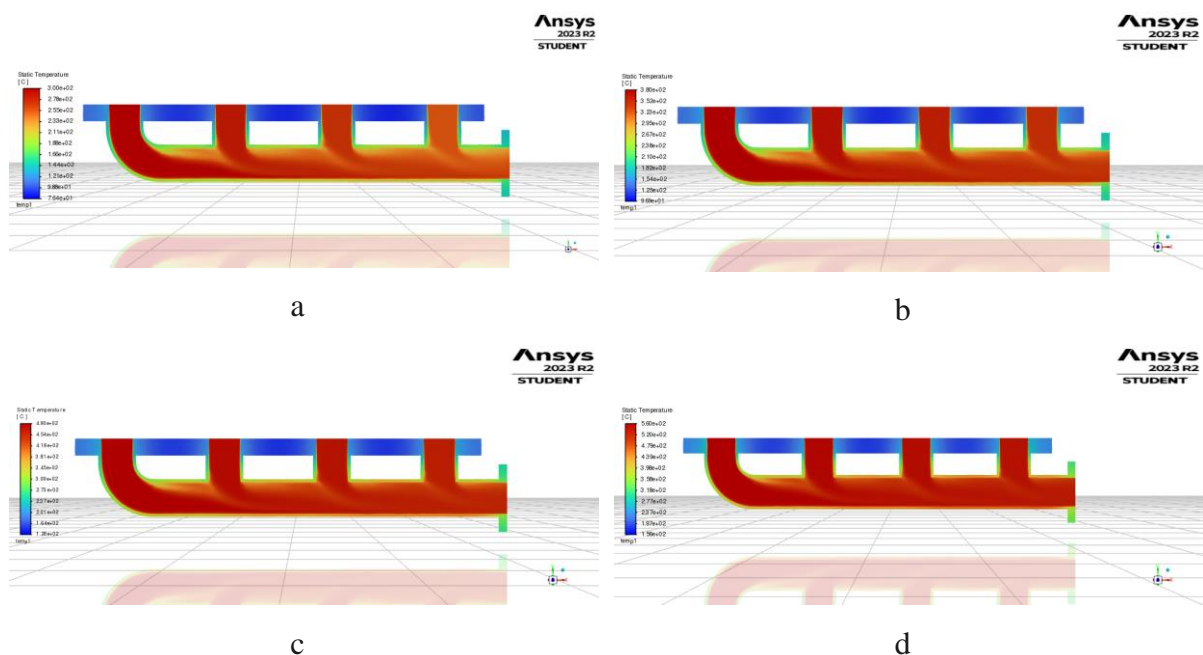
mewakili sistem *exhaust manifold*. Dengan mempertimbangkan karakteristik material yang akurat dan terdefinisi dengan baik, simulasi ini dapat memberikan pemahaman mendalam tentang bagaimana nitrogen oksida berinteraksi dengan dan memengaruhi perpindahan panas pada komponen baja dalam *exhaust manifold*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

#### Karakteristik Suhu Gas Buang

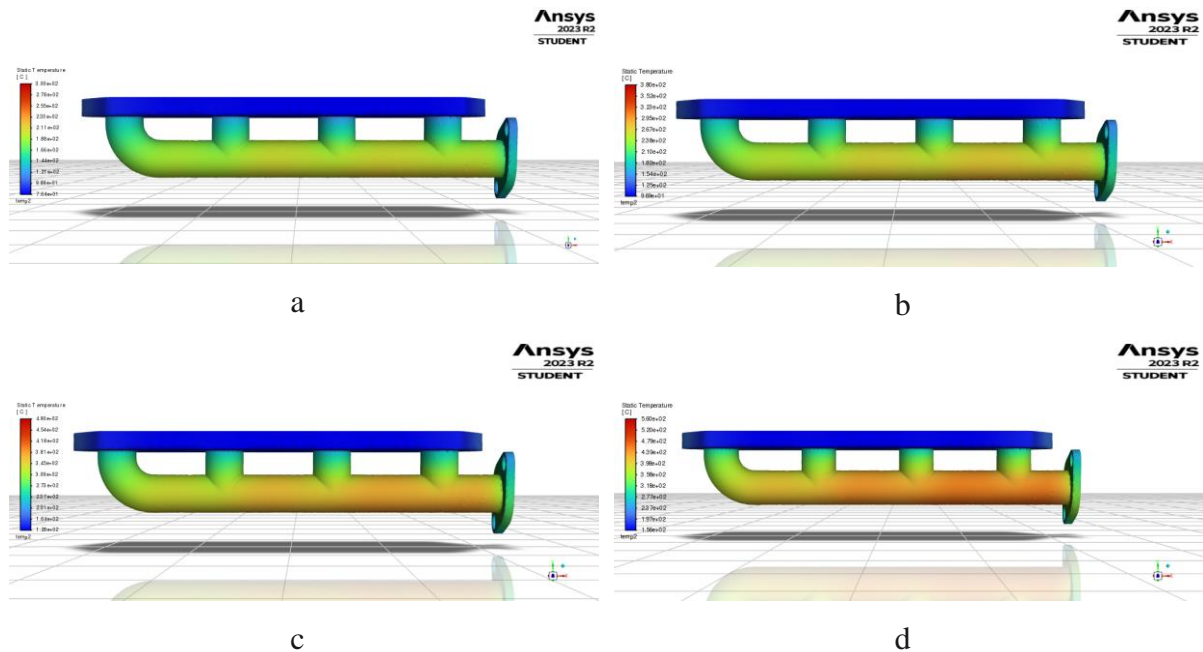
Aliran gas buang yang mengalir di dalam *exhaust manifold* tergambar secara visual dalam Gambar 3. Perbedaan suhu dari saluran masuk 1 hingga saluran masuk 4 terlihat jelas melalui variasi warna. Intensitas warna semakin merah mengindikasikan daerah dengan suhu tertinggi, sementara warna biru menandakan daerah dengan suhu lebih rendah. Pada putaran mesin 750 rpm (lihat Gambar 3a), terlihat bahwa saluran masuk 1 memiliki suhu tertinggi, ditunjukkan oleh warna merah tua, sementara saluran masuk 2 hingga saluran masuk 4 mengalami penurunan suhu, ditandai oleh perubahan warna menuju jingga. Sama seperti pada putaran mesin 750 rpm, pola yang serupa terlihat pada putaran mesin 1000 rpm hingga 2000 rpm, sebagaimana terlihat dalam Gambar 3b-d. Namun, pada putaran mesin 2000 rpm, perhatikan bahwa warna yang hampir seragam terlihat pada setiap saluran masuk, menunjukkan adanya homogenitas suhu di seluruh manifold. Pemahaman ini memberikan wawasan yang berharga tentang distribusi suhu yang dapat menjadi kunci untuk menganalisis efisiensi dan kinerja sistem *exhaust manifold* pada berbagai tingkat putaran mesin.



Gambar 3. Suhu aliran gas buang pada putaran mesin a) 750 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm dan d) 2000 rpm



Proses dinamis perpindahan panas dari aliran gas buang ke permukaan bahan *exhaust manifold* memberikan gambaran yang jelas melalui profil suhu pada Gambar 4. Dengan penekanan pada karakteristik visual, terlihat bahwa bagian atas *exhaust manifold* menunjukkan suhu yang relatif lebih rendah, fenomena ini diperkuat oleh ketebalan bahan yang mencapai 20 mm. Sebaliknya, pada bagian pipa, perubahan warna yang transisi ke nuansa jingga menandakan peningkatan suhu yang signifikan, terutama mengingat ketebalan pipa yang lebih tipis, yakni 3 mm. Pada putaran mesin 750 rpm (lihat Gambar 4a), panas merambat terutama pada bagian pipa bagian bawah, mendekati saluran keluar. Pola yang serupa terlihat pada putaran mesin 1000 hingga 2000 rpm, sebagaimana terlihat dalam Gambar 4b-d. Perhatikan bahwa pada putaran mesin 2000 rpm, suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold* mencapai puncaknya, ditandai dengan warna jingga tua yang mencerminkan suhu yang paling tinggi. Analisis ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang distribusi panas pada berbagai bagian *exhaust manifold* selama berbagai tingkat putaran mesin.



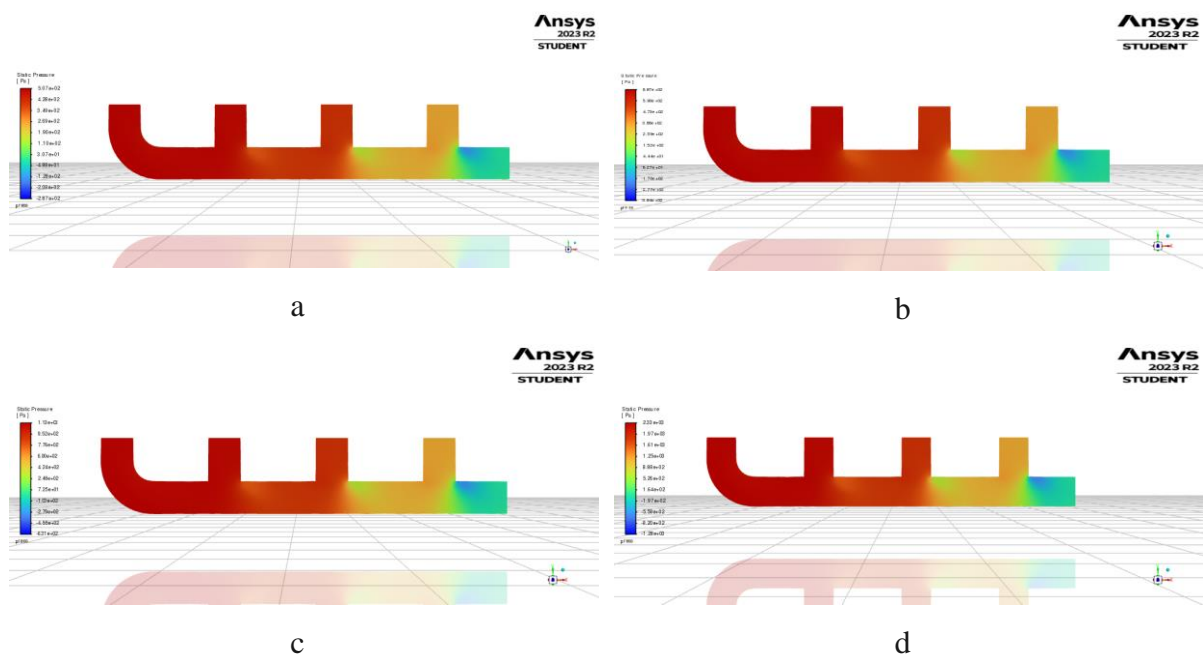
Gambar 4. Suhu permukaan bahan *exhaust manifold* pada putaran mesin a) 750 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm dan d) 2000 rpm

Profil suhu ini mencerminkan perjalanan panas melalui material *exhaust manifold*, memperlihatkan bagaimana ketebalan berbeda dari komponen tersebut dapat memengaruhi distribusi panasnya. Bagian atas, dengan ketebalan yang lebih besar, mampu menjaga suhu pada tingkat yang lebih rendah, sementara pada bagian pipa yang lebih tipis, terjadi peningkatan suhu yang lebih cepat. Analisis ini memberikan wawasan yang kaya akan mekanisme perpindahan panas internal pada *exhaust manifold*, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk pemahaman mendalam terhadap kinerja dan potensi pengembangan desain yang lebih efisien. Penting untuk

dicatat bahwa pemahaman mengenai perpindahan panas ini dapat menjadi kunci untuk mengoptimalkan desain *exhaust manifold*, meningkatkan efisiensi, dan mengurangi potensi kerusakan akibat suhu yang berlebihan.

### Karakteristik Tekanan Gas Buang

Profil tekanan dalam aliran gas buang secara jelas tergambar pada Gambar 5. Saluran masuk 1 menunjukkan tekanan paling tinggi, dengan penurunan tekanan yang terjadi secara bertahap hingga mencapai saluran masuk 4. Pola ini konsisten pada setiap tingkat putaran mesin, baik pada 750 rpm (Gambar 5a), 1000 rpm (Gambar 5b), 1500 rpm (Gambar 5c), maupun 2000 rpm (Gambar 5d). Penting untuk dicatat bahwa saluran keluar menunjukkan tekanan gas buang yang paling rendah. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa gas buang, setelah melalui proses pembakaran dalam ruang bakar, mengalami peningkatan tekanan yang signifikan. Namun, ketika gas buang mengalir melalui saluran masuk *exhaust manifold*, ia mengalami ekspansi yang menyebabkan penurunan tekanan secara alamiah.



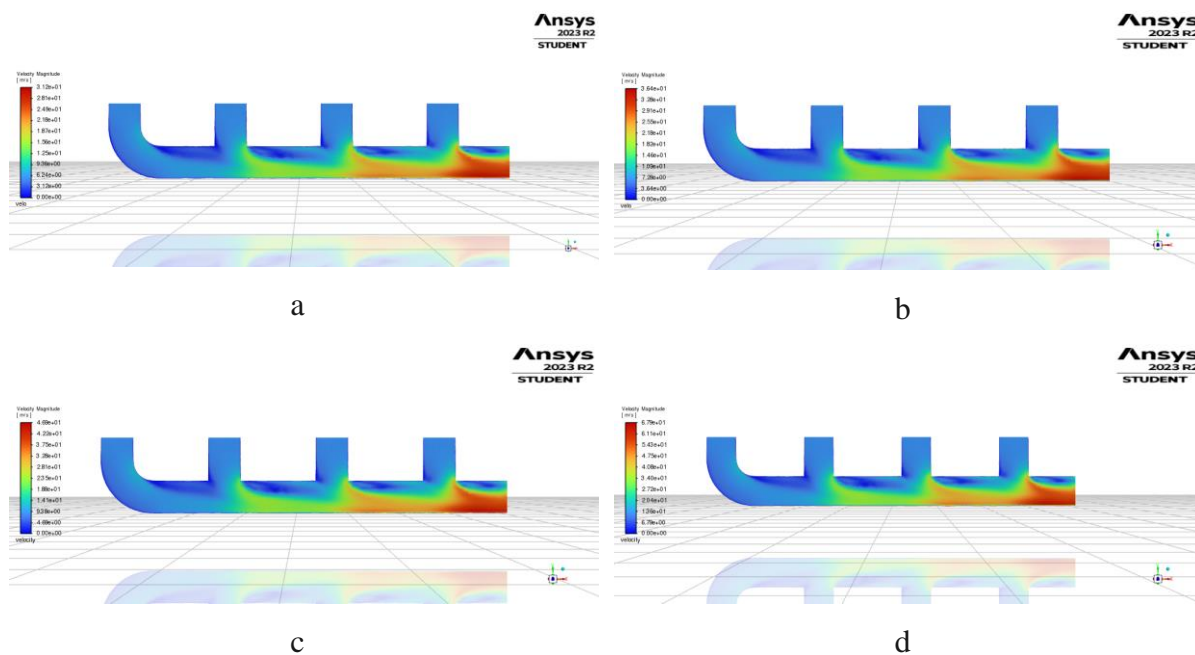
Gambar 5. Tekanan aliran gas buang pada putaran mesin a) 750 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm dan d) 2000 rpm

Pola tekanan ini mencerminkan perjalanan gas buang melalui sistem pembuangan kendaraan dan memberikan wawasan tentang dinamika aliran dalam ruang manifold. Tekanan tinggi di saluran masuk 1 mengindikasikan titik masuknya gas buang yang berasal dari ruang bakar, sementara penurunan tekanan yang terlihat pada saluran keluar menunjukkan efek ekspansi gas buang seiring dengan perjalanan melalui manifold. Analisis ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang distribusi tekanan dalam *exhaust manifold* pada berbagai tingkat putaran mesin, yang esensial untuk evaluasi kinerja dan efisiensi sistem pembuangan.

Dengan memahami pola tekanan ini, desainer dan insinyur dapat membuat keputusan informatif untuk memperbaiki desain dan meningkatkan kinerja keseluruhan sistem.

### Karakteristik Kecepatan Aliran Gas Buang

Profil kecepatan aliran gas buang, sebagaimana terlihat pada Gambar 6, memberikan gambaran yang menarik tentang dinamika aliran dalam sistem *exhaust manifold*. Meskipun kecepatan aliran pada setiap saluran masuk memperlihatkan nilai yang serupa, perubahan yang signifikan terjadi seiring dengan perjalanan gas buang melalui saluran masuk 2 hingga saluran masuk 4. Terlihat dengan jelas bahwa bagian bawah pipa menunjukkan peningkatan yang berkelanjutan dalam kecepatan aliran gas buang, mencapai puncaknya menuju saluran keluar. Pola kecepatan aliran yang terbentuk konsisten pada setiap tingkat putaran mesin (lihat Gambar 6a-d). Pada putaran mesin 750 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, dan 2000 rpm, perubahan kecepatan yang terlihat menggambarkan dinamika yang stabil dan dapat diulang. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh suhu tinggi gas buang setelah melewati ruang bakar. Suhu yang tinggi memicu ekspansi gas, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kecepatan aliran.



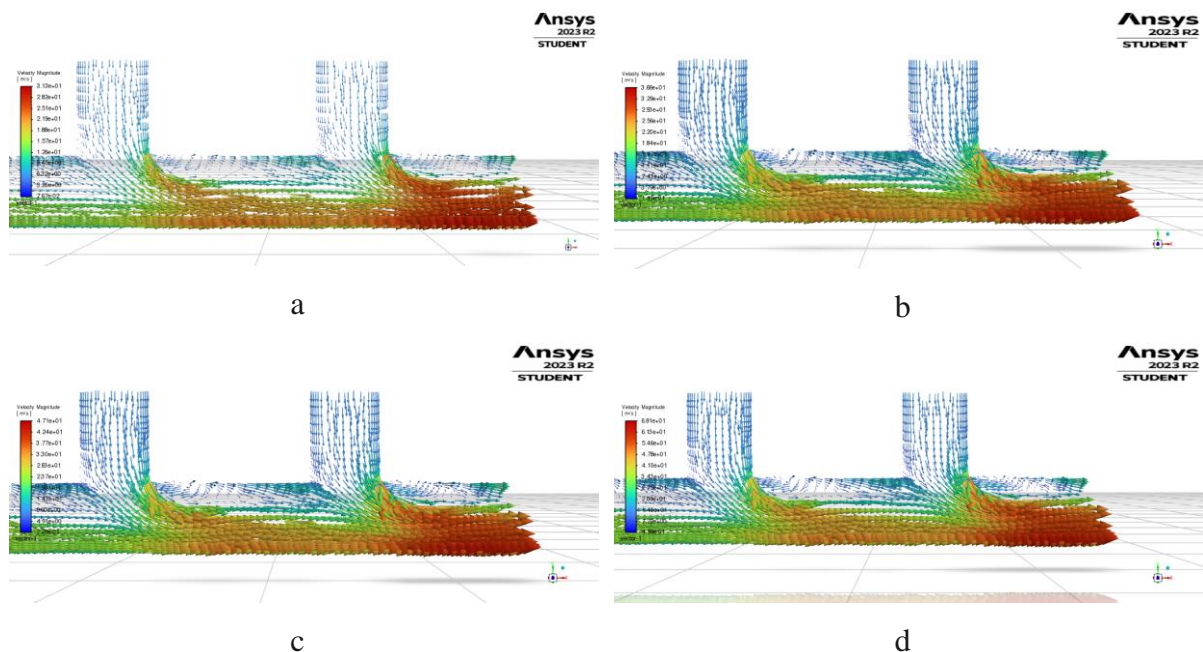
Gambar 6. Kecepatan aliran gas buang pada putaran mesin a) 750 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm dan d) 2000 rpm

Penting untuk diingat bahwa kecepatan aliran yang meningkat pada bagian bawah pipa, terutama di dekat saluran keluar, menandakan bahwa gas buang mengalami perubahan kondisi yang substansial sepanjang perjalanan melalui manifold. Fenomena ini memiliki implikasi signifikan terhadap efisiensi dan kinerja keseluruhan sistem pembuangan kendaraan. Perubahan kecepatan ini dapat disebabkan oleh sejumlah faktor, termasuk perubahan suhu, tekanan, dan

volume gas buang. Seiring dengan ekspansi gas buang dan perjalanan melalui manifold, interaksi kompleks ini memainkan peran dalam membentuk pola kecepatan yang diamati. Memahami dinamika perubahan ini adalah kunci untuk mengoptimalkan desain manifold.

Efisiensi sistem pembuangan, yang mencakup pengurangan *back pressure* (tekanan kembali) dan peningkatan perpindahan panas, dapat ditingkatkan dengan merinci karakteristik kecepatan aliran ini. Desainer dapat menggunakan wawasan ini untuk menyesuaikan geometri manifold, seperti bentuk saluran, panjang pipa, dan sudut tikungan, sehingga mengoptimalkan aliran gas buang dan meminimalkan kerugian energi. Selain itu, pemahaman pola kecepatan membantu dalam mengoptimalkan distribusi panas di dalam sistem, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi mesin. Kecepatan yang dikelola dengan bijak dapat membantu mengoptimalkan pembakaran dan mengurangi emisi, menghasilkan kinerja mesin yang lebih baik secara keseluruhan.

Dengan kejelasan yang lebih besar, karakteristik kecepatan aliran gas buang dapat divisualisasikan melalui representasi vektor, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 7. Observasi terperinci mengungkapkan bahwa kumpulan vektor pada bagian bawah pipa terbentuk setiap kali gas buang melewati saluran masuk. Fenomena ini memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kecepatan aliran gas buang setelah melintasi saluran masuk. Sebagai hasilnya, saluran keluar menunjukkan kecepatan aliran gas buang yang sangat tinggi.



Gambar 7. Kecepatan aliran gas buang dalam vektor pada putaran mesin a) 750 rpm, b) 1000 rpm, c) 1500 rpm dan d) 2000 rpm

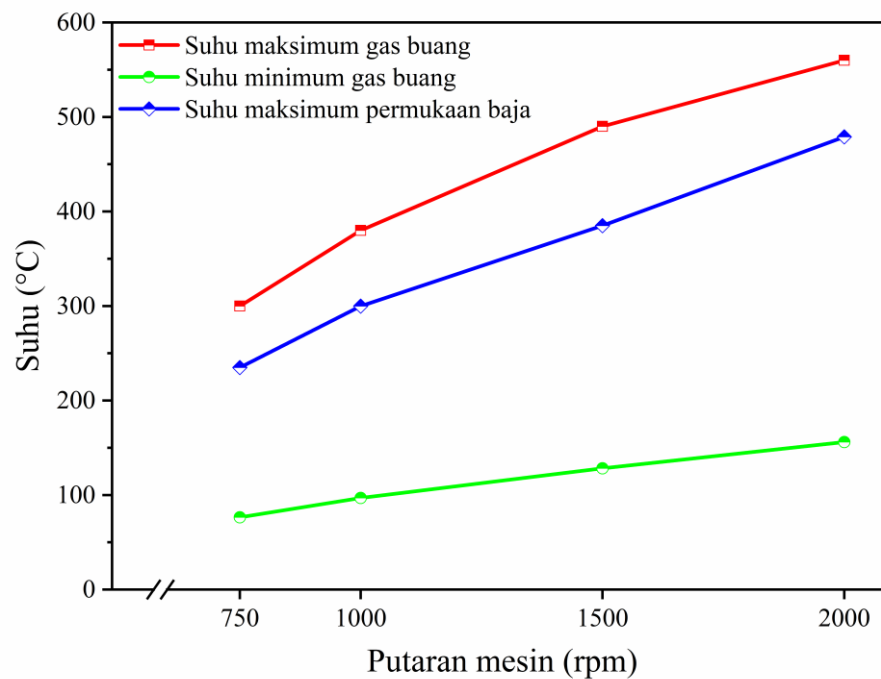
Pola vektor kecepatan aliran gas buang tetap konsisten pada setiap putaran mesin, mulai dari 750 rpm hingga 2000 rpm, sebagaimana tergambar pada Gambar 7a-7d. Kumpulan vektor yang terbentuk secara seragam menggambarkan perubahan dinamis dalam aliran gas buang

melalui manifold pada setiap fase pembakaran. Kecepatan aliran yang meningkat, terutama mendekati saluran keluar, menandakan adanya perubahan kondisi dan ekspansi yang signifikan sepanjang perjalanan gas buang. Dengan memahami pola vektor ini, para desainer dapat lebih mendalam menyelidiki dinamika aliran gas buang, memberikan dasar untuk optimalisasi desain manifold. Faktor-faktor seperti arah vektor, kepadatan, dan distribusi kecepatan dapat membimbing upaya desain untuk mengurangi resistensi aliran dan memaksimalkan perpindahan panas, menciptakan sistem pembuangan yang efisien dan berkinerja tinggi secara holistik.

## **Pembahasan**

### *Karakteristik Suhu Gas Buang*

Perbandingan antara profil suhu gas buang dan suhu pada permukaan bahan (baja) *exhaust manifold* tergambar dengan jelas pada Gambar 8. Suhu maksimum pada gas buang mencapai nilai yang setara dengan kondisi batas yang diterapkan pada saluran masuk. Sebaliknya, suhu minimum gas buang mencerminkan nilai minimum yang dicapai selama setiap putaran mesin. Perambatan panas yang terjadi hingga mencapai permukaan bahan *exhaust manifold* memperlihatkan nilai suhu yang berada di antara suhu maksimum dan suhu minimum dari gas buang. Penting untuk dicatat bahwa ketika putaran mesin ditingkatkan, terjadi peningkatan suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold*. Peningkatan suhu ini sejalan dengan peningkatan aktivitas mesin pada setiap tingkat putaran mesin. Dalam konteks ini, perubahan suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold* tidak hanya mencerminkan karakteristik aliran gas buang, tetapi juga menunjukkan pengaruh langsung dari intensitas dan frekuensi aktivitas mesin. Analisis terperinci pada Gambar 8 memperlihatkan secara visual bagaimana perubahan putaran mesin dapat memengaruhi suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold*. Pemahaman ini dapat menjadi kunci untuk evaluasi performa sistem pembuangan dan membantu dalam pengembangan solusi desain yang optimal untuk menjaga kestabilan suhu pada manifold dan mencegah potensi masalah terkait panas, termasuk deformasi atau degradasi material.



Gambar 8. Perbandingan suhu maksimum dan minimum pada gas buang

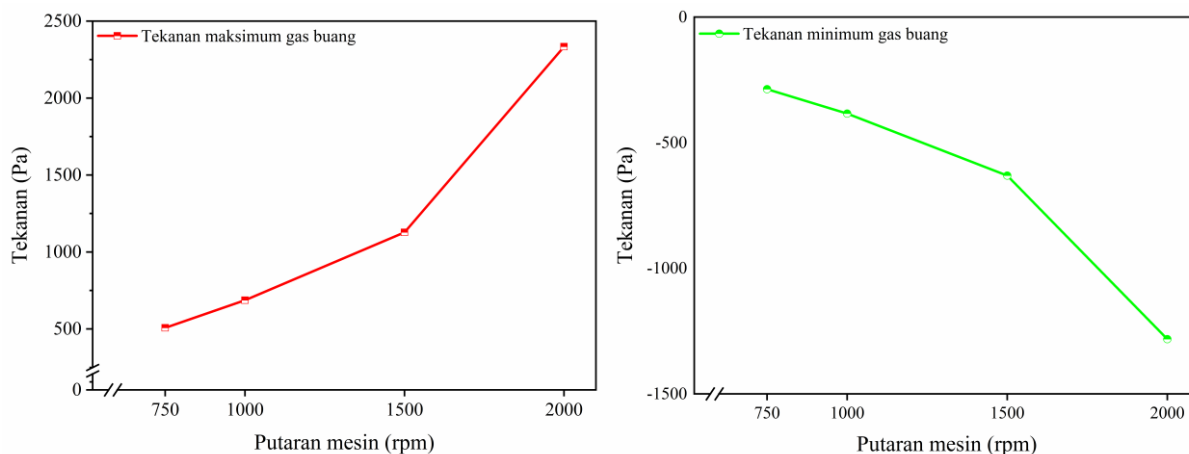
Dengan putaran mesin sebesar 750 rpm, suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold* mencapai 235°C. Saat putaran mesin ditingkatkan, terlihat peningkatan yang signifikan dalam suhu permukaan bahan. Pada putaran mesin 1000 rpm, suhu meningkat menjadi 300°C, menggambarkan respons yang jelas terhadap intensifikasi aktivitas mesin. Kenaikan lebih lanjut terjadi pada putaran mesin 1500 rpm, dengan suhu mencapai 385°C, menunjukkan peningkatan yang berkelanjutan seiring dengan peningkatan kecepatan putaran mesin. Pada tingkat putaran mesin tertinggi, yaitu 2000 rpm, suhu mencapai titik tertinggi sebesar 479°C, mencerminkan puncak intensitas panas yang dihasilkan oleh mesin pada kondisi operasional yang lebih tinggi.

Pola peningkatan suhu ini mencerminkan keterkaitan yang erat antara aktivitas mesin dan suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold*. Semakin tinggi putaran mesin, semakin besar energi yang dihasilkan oleh proses pembakaran, yang pada gilirannya meningkatkan suhu permukaan bahan manifold (Park, Kim, Choi, Lee, & Lim, 2019). Pemahaman ini penting untuk memahami dan mengelola perpindahan panas di dalam sistem, serta merancang solusi yang efektif untuk menjaga suhu pada level yang dapat diterima, mencegah potensi kerusakan atau masalah kinerja yang berkaitan dengan suhu berlebih.

#### *Karakteristik Tekanan Gas Buang*

Karakteristik tekanan gas buang dapat diamati pada Gambar 9a untuk tekanan maksimum dan Gambar 9b untuk tekanan minimum. Peningkatan tekanan sejalan dengan peningkatan putaran mesin, mencerminkan dinamika yang terkait dengan intensitas aktivitas mesin pada

setiap fase pembakaran. Pada putaran mesin 750 rpm, tekanan maksimum mencapai 507,45 Pa, menunjukkan tekanan yang sesuai dengan tingkat aktivitas mesin pada kecepatan tersebut. Saat putaran mesin ditingkatkan menjadi 1000 rpm, terlihat peningkatan signifikan dalam tekanan maksimum, mencapai 687,17 Pa. Peningkatan ini sejalan dengan peningkatan energi yang dihasilkan oleh mesin pada tingkat putaran yang lebih tinggi.



Gambar 9. Perbandingan tekanan gas buang pada setiap putaran mesin a) tekanan maksimum dan b) tekanan minimum

Pada tingkat putaran mesin 1500 rpm, terlihat lonjakan yang cukup besar dalam tekanan maksimum, mencapai 1128,01 Pa. Fenomena ini mencerminkan adanya peningkatan signifikan dalam volume dan kecepatan aliran gas buang selama fase pembakaran pada putaran mesin tersebut. Lonjakan tekanan ini dapat dihubungkan dengan peningkatan intensitas aktivitas mesin pada kecepatan putaran yang lebih tinggi, yang menghasilkan jumlah gas buang yang lebih besar dan dengan kecepatan yang lebih tinggi.

Pada putaran mesin tertinggi, yaitu 2000 rpm, terjadi peningkatan tekanan yang paling signifikan, mencapai 2333,94 Pa. Peningkatan yang sangat mencolok ini mencerminkan adanya puncak intensitas dalam proses pembakaran. Dengan putaran mesin yang lebih tinggi, jumlah gas buang yang dihasilkan menjadi maksimal, dan kecepatan aliran gas buang mencapai tingkat tertinggi selama siklus pembakaran (Cerdoun, Farsaoui, Khalfallah, Lankri, & Carcasci). Dengan demikian, tekanan dalam sistem pembuangan mengalami peningkatan dramatis. Peningkatan tekanan yang berkesinambungan ini menggambarkan bagaimana perubahan putaran mesin memiliki dampak langsung pada keseimbangan tekanan dalam sistem. Analisis karakteristik tekanan gas buang ini memberikan wawasan yang mendalam tentang dinamika sistem pembuangan, dan pemahaman ini menjadi dasar yang kritis dalam merancang sistem yang dapat menangani fluktuasi tekanan gas buang yang terjadi selama operasi mesin. Desain yang efisien dan efektif akan memungkinkan pengelolaan tekanan dengan baik, mendukung

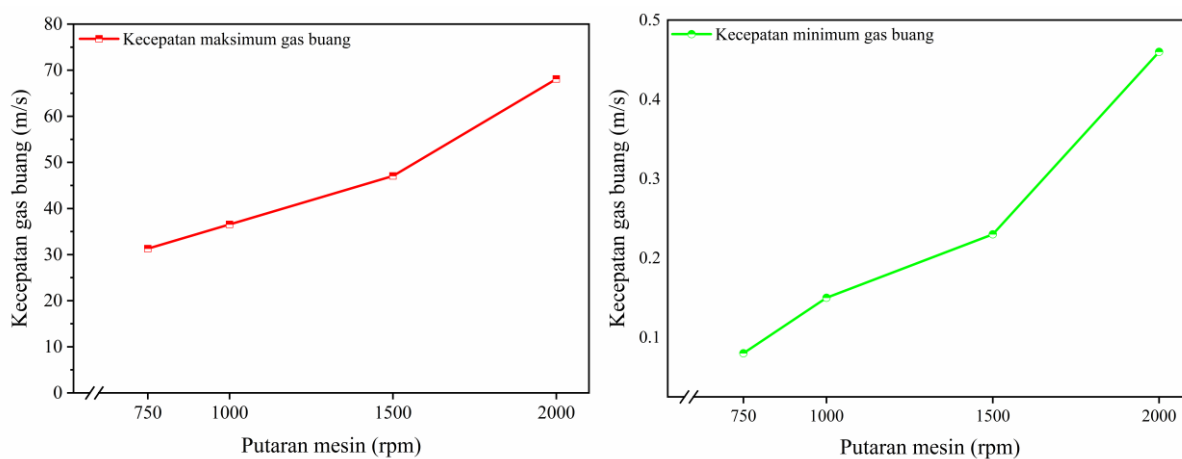
kinerja mesin optimal, dan meningkatkan keberlanjutan operasional.

Tekanan minimum gas buang pada setiap putaran mesin menunjukkan nilai negatif. Tekanan minimum gas buang pada setiap putaran mesin menunjukkan nilai negatif bukan karena nilai tekanan sebenarnya negatif, tetapi lebih sebagai hasil dari pemilihan referensi tekanan dalam konteks simulasi atau pengukuran. Dalam banyak kasus, nilai tekanan direferensikan terhadap tekanan atmosfer atau tekanan lingkungan. Ketika tekanan minimum dicatat sebagai nilai negatif, ini menunjukkan bahwa tekanan gas buang pada titik tersebut berada di bawah tekanan atmosfer atau tekanan lingkungan. Ini adalah pendekatan umum dalam analisis tekanan untuk mengukur perubahan tekanan relatif terhadap tekanan atmosfer. Dengan demikian, nilai negatif tidak mengindikasikan adanya tekanan negatif absolut, tetapi lebih merupakan perbandingan terhadap tekanan referensi yang ditetapkan. Jadi, pada umumnya, tekanan minimum yang bernilai negatif pada setiap putaran mesin adalah indikator bahwa tekanan gas buang pada titik tersebut lebih rendah daripada tekanan atmosfer atau tekanan lingkungan setempat (Abdullah et al., 2013).

#### *Karakteristik Kecepatan Aliran Gas Buang*

Karakteristik kecepatan aliran gas buang pada setiap putaran mesin dapat dilihat dalam Gambar 10a untuk kecepatan maksimum dan Gambar 10b untuk kecepatan minimum. Dalam gambar tersebut, tergambar jelas bahwa kecepatan aliran gas buang meningkat seiring dengan peningkatan putaran mesin. Fenomena ini terlihat pada titik kecepatan maksimum dan minimum, mencerminkan dinamika aliran yang dipengaruhi oleh perubahan aktivitas mesin. Pada putaran mesin 750 rpm, kecepatan maksimum gas buang mencapai 31,31 m/s, menggambarkan kecepatan yang sesuai dengan kecepatan putaran mesin pada level tersebut. Seiring dengan peningkatan putaran mesin, terlihat peningkatan yang signifikan dalam kecepatan maksimum gas buang. Pada putaran mesin 1000 rpm, kecepatan mencapai 36,56 m/s, menandakan respons yang cepat terhadap peningkatan aktivitas mesin. Peningkatan ini berlanjut pada putaran mesin 1500 rpm, dengan kecepatan maksimum mencapai 47,07 m/s, dan mencapai puncaknya pada putaran mesin tertinggi, yaitu 2000 rpm, dengan kecepatan maksimum sebesar 68,11 m/s.





Gambar 10. Perbandingan kecepatan gas buang pada setiap putaran mesin, a) kecepatan maksimum dan b) kecepatan minimum

Sementara kecepatan maksimum gas buang mencerminkan puncak intensitas aliran selama putaran mesin, kecepatan minimum memberikan gambaran tentang kondisi aliran gas buang saat aktivitas mesin mencapai titik paling rendah. Meskipun nilai kecepatan minimum berada di bawah 0,5 m/s, pola perubahannya tetap sejalan dengan kecepatan maksimum, mengindikasikan konsistensi dalam dinamika aliran. Pada putaran mesin 750 rpm, kecepatan minimum gas buang mencapai 0,08 m/s, mencerminkan keadaan aliran paling tenang pada titik putaran mesin tersebut. Meskipun nilai ini mungkin terlihat rendah, tetapi pola perubahan kecepatan minimum sejalan dengan pola kecepatan maksimum, menunjukkan respons yang koheren terhadap perubahan aktivitas mesin.

Pada putaran mesin tertinggi, yaitu 2000 rpm, kecepatan minimum mengalami peningkatan menjadi 0,46 m/s. Meskipun masih berada di kisaran kecepatan yang rendah, peningkatan ini mencerminkan intensifikasi aliran gas buang bahkan pada kondisi paling minimal aktivitas mesin. Peningkatan ini bisa dipahami sebagai efek dari peningkatan volume dan kecepatan gas buang, meskipun tetap pada tingkat yang lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan maksimum pada titik tersebut. Pemahaman tentang kecepatan minimum memberikan wawasan lebih lanjut tentang spektrum dinamika aliran gas buang selama siklus mesin. Meskipun kecepatan ini mungkin terlihat rendah pada titik minimum, pola perubahannya memberikan pemahaman yang penting dalam mengoptimalkan desain manifold untuk mengelola aliran gas buang pada berbagai tingkat aktivitas mesin.

Peningkatan kecepatan aliran gas buang sejalan dengan perubahan volume dan tekanan gas buang selama fase pembakaran, mencerminkan dinamika kompleks yang terlibat dalam proses tersebut. Saat putaran mesin meningkat, aktivitas pembakaran juga intensif, menghasilkan peningkatan suhu dan tekanan gas buang. Peningkatan intensitas panas dan volume gas buang yang dihasilkan selama fase pembakaran menyebabkan aliran gas buang mencapai kecepatan

yang lebih tinggi saat melewati sistem pembuangan. Perubahan putaran mesin menjadi faktor kunci dalam memahami bagaimana dinamika aliran gas buang berevolusi. Pada putaran mesin yang lebih tinggi, mesin menghasilkan energi yang lebih besar, menghasilkan lebih banyak gas buang, dan menciptakan tekanan yang lebih tinggi dalam sistem (Iortyer & Bwonsi, 2017). Hal ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan kecepatan aliran gas buang, yang dapat memengaruhi kinerja keseluruhan mesin.

## SIMPULAN

Penelitian ini meneliti karakteristik suhu, tekanan, dan kecepatan aliran gas buang dalam *exhaust manifold* telah dianalisis secara mendalam untuk berbagai tingkat putaran mesin dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Peningkatan suhu pada permukaan bahan *exhaust manifold* sejalan dengan peningkatan aktivitas mesin pada setiap tingkat putaran. Dengan putaran mesin dari 750 rpm hingga 2000 rpm, terlihat peningkatan yang signifikan, mencapai titik tertinggi sebesar 479°C. Analisis ini menyoroti keterkaitan erat antara aktivitas mesin dan suhu permukaan bahan manifold, yang menjadi kunci untuk evaluasi performa sistem pembuangan dan pengembangan solusi desain yang optimal. Karakteristik tekanan gas buang mencerminkan dinamika yang terkait dengan intensitas aktivitas mesin selama fase pembakaran. Pada putaran mesin 750 rpm, tekanan maksimum mencapai 507,45 Pa, menunjukkan tekanan yang sesuai dengan tingkat aktivitas mesin pada kecepatan tersebut. Pada putaran mesin tertinggi, yaitu 2000 rpm, terjadi peningkatan tekanan yang paling signifikan, mencapai 2333,94 Pa. Peningkatan tekanan sejalan dengan peningkatan putaran mesin, menunjukkan dampak langsung pada keseimbangan tekanan dalam sistem pembuangan. Analisis tekanan maksimum dan minimum memberikan pemahaman yang mendalam tentang fluktuasi tekanan gas buang selama operasi mesin, esensial untuk merancang sistem yang dapat menangani variasi tekanan dengan baik. Profil kecepatan aliran gas buang memberikan gambaran dinamika aliran dalam sistem *exhaust manifold*. Pada putaran mesin 750 rpm, kecepatan maksimum gas buang mencapai 31,31 m/s, menggambarkan kecepatan yang sesuai dengan kecepatan putaran mesin pada level tersebut. Pada putaran mesin 1000 rpm, kecepatan mencapai 36,56 m/s, menandakan respons yang cepat terhadap peningkatan aktivitas mesin. Peningkatan ini berlanjut pada putaran mesin 1500 rpm, dengan kecepatan maksimum mencapai 47,07 m/s, dan mencapai puncaknya pada putaran mesin tertinggi, yaitu 2000 rpm, dengan kecepatan maksimum sebesar 68,11 m/s. Kecepatan yang meningkat seiring dengan peningkatan putaran mesin mencerminkan kompleksitas perubahan volume, tekanan, dan suhu gas buang selama fase pembakaran. Analisis vektor kecepatan menyoroti perubahan dinamis dalam aliran gas buang melalui manifold, memberikan landasan untuk pengoptimalan desain

yang dapat mengelola aliran gas buang dengan efisien.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam atas dukungan keuangan yang diberikan untuk penelitian ini melalui skema Penelitian R&D, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta. Nomor kontrak yang terkait dengan pendanaan ini adalah T/6.1.29/UN34.9/PT.01.03/2023.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, N. R., Shahrudin, N. S., Mamat, A. M. I., Kasolang, S., Zulkifli, A., & Mamat, R. (2013). Effects of air intake pressure to the fuel economy and exhaust emissions on a small SI engine. *Procedia Engineering*, 68, 278-284.
- Al-Khishali, K. J. M., Mashkour, M. A., & Omar, E. S. (2010). Analysis of Flow Characteristics In Inlet And Exhaust Manifolds of Experimental Gasoline Combustion In A VCR Engine. *Engineering and Technology Journal*, 28(7).
- Alphonse, M., & Kumar, R. (2021). Investigation of heat dissipation in exhaust manifold using computational fluid dynamics. *International Journal of Ambient Energy*, 42(9), 999-1004.
- Bajpai, K., Chandrakar, A., Agrawal, A., & Shekhar, S. (2017). CFD analysis of exhaust manifold of SI engine and comparison of back pressure using alternative fuels. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, 14(01), 23-29.
- Bral, P., Tripathi, J. P., Dewangan, S., & Mahato, A. C. (2022). CFD analysis of an exhaust manifold for emission reduction. *Materials Today: Proceedings*, 63, 354-361.
- Cerdoun, M., Farsaoui, B., Khalfallah, S., Lankri, R., & Carcasci, C. (2019). *Effect of the engine speed and loading on the heat transfer within exhaust valves*.
- Deger, Y., Simperl, B., & Jimenez, L. P. (2004). *Coupled CFD-FE-analysis for the exhaust manifold of a diesel engine*.
- 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 By Using CFD*.
- Gopal, P., Kumar, T. S., & Kumaragurubaran, B. (2009). Analysis of flow through the exhaust manifold of a multi cylinder petrol engine for improved volumetric efficiency. *International Journal of Dynamics of Fluids*, 5(1), 15-27.
- Guoquan, X., Huaming, W., Lin, C., & Xiaobin, H. (2021). Predicting unsteady heat transfer effect of vehicle thermal management system using steady velocity equivalent method. *Science Progress*, 104(2), 00368504211025933.
- Iortyer, H. A., & Bwonsi, L. (2017). Energy and Exergy Analysis of a CI engine fuelled with biodiesel fuel from palm kernel oil and its blends with petroleum diesel. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 4(7), 237214.
- Kumar, R. R., Razak, A., Alshahrani, S., Sharma, A., Thakur, D., Shaik, S., . . . Afzal, A. (2022). Vibration analysis of composite exhaust manifold for diesel engine using CFD. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101853.
- Maheshappa, H., Pravin, V. K., Umesh, K. S., & Veena, P. H. (2013). Design analysis of catalytic converter to reduce particulate matter and achieve limited back pressure in diesel engine by CFD. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3(1), 998-1004.
- Manohar, D. S., & Krishnaraj, J. (2018). *Modeling and analysis of exhaust manifold using CFD*.

- Park, C., Kim, Y., Choi, Y., Lee, J., & Lim, B. (2019). The effect of engine speed and cylinder-to-cylinder variations on backfire in a hydrogen-fueled internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(39), 22223-22230.
- Pathak, A., & Deshmukh, S. (2021). Thermal analysis of Exhaust manifold system using computational fluid dynamics. *Spectrum of Emerging Sciences*, 1(1), 50-55.
- Sadhasivam, C., Murugan, S., Vairamuthu, J., & Priyadharshini, S. M. (2021). Design and analysis of two-cylinder exhaust manifold with improved performance in CFD. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2141-2144.
- Seenikannan, P., Periyasamy, V. M., & Nagaraj, P. (2008). An experimental analysis of a Y section exhaust manifold system with improved engine performance. *International Journal of Product Development*, 6(1), 50-56.
- Sulistyo, B., Sofyan, H., Sukardi, T., & Widyianto, A. (2023). Performance and Emission Characteristics Using Dual Injection System of Gasoline and Ethanol. *Automotive Experiences*, 6(2), 245-258.
- Taibani, A. Z., & Kalamkar, V. (2012). Experimental and computational analysis of behavior of three-way catalytic converter under axial and radial flow conditions. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 5(3), 134-142.
- Teja, M. A., Ayyappa, K., Katam, S., & Anusha, P. (2016). Analysis of exhaust manifold using computational fluid dynamics. *Fluid Mech Open Acc*, 3(1), 1000129.
- Umesh, K. S., & Rajagopal, V. P. K. (2013). Cfd Analysis Of Exhaust Manifold Of Multi-Cylinder Si Engine Todetermine Optimal Geometry For Reducing Emissions. *International Journal of Automobile Engineering Research and Development*, 45-56.
- Wang, D., Zhang, W., Liu, D., Chen, X., Tang, G., Okosun, T., . . . Zhou, C. Q. (2015). *CFD Simulation of a 6-Cylinder Diesel Engine Intake and Exhaust Manifold*.