ANALISIS DISTRIBUSI ALIRAN PADA KATALIS MUFFLER MESIN DIESEL DENGAN VARIASI SUDUT LARGE ANGLE DIFFUSER (LAD) MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Fathir Moh. Dzulfikar[1], Mhd Chairul Ridho Chandra[1], Hilmi Rizky Putra[1], Yohanes Gunawan[1, *]

[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, 58315

**E-mail*: yohanes.gunawan@esdm.go.id

ABSTRAK

Distribusi aliran gas buang yang merata pada substrat katalis pada *diesel oxidation catalyst* (DOC) menentukan keefektivitas proses *adsorbtion* material pada *flue gas* yang keluar dari mesin diesel. Penelitian ini menganalisis pengaruh sudut bukaan *large angle diffuser* (LAD) terhadap karakteristik distribusi aliran pada *muffler* genset diesel menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak SolidWorks Flow Simulation. Pipa masuk *muffler* berdiameter 38 mm diperluas menjadi ruang katalis berdiameter 150 mm (rasio luas penampang = 15,6). Empat konfigurasi dievaluasi, yaitu LAD dengan sudut bukaan total 14° dan 45°, serta desain tanpa LAD pada sudut bukaan yang sama. Udara bertemperatur 300 °C dengan debit masuk 0,03 m³/s (kecepatan rata-rata = 26,5 m/s) disimulasikan dalam kondisi tunak dengan tekanan keluar atmosferik dan model turbulensi k–ε. Hasil dievaluasi secara kualitatif melalui lintasan aliran dan secara kuantitatif melalui kecepatan maksimum dan tekanan balik total maksimum. Pada sudut 14°, aliran terarah dan menyebar relatif merata menuju ruang katalis, baik dengan maupun tanpa LAD, berdasarkan lintasan aliran. Tekanan balik total pada sudut 14° (371 Pa dengan LAD dan 392 Pa tanpa LAD) lebih rendah daripada 45° (614 Pa dengan LAD dan 705 Pa tanpa LAD), dan penambahan LAD pada 45° menurunkannya sekitar 13%. Pada sudut 45°, aliran menjadi kompleks dan cenderung membentuk zona aliran balik (*backflow*), ditandai kecepatan maksimum yang lebih tinggi (= 35,8 m/s dibandingkan = 31 m/s pada konfigurasi lain). Konfigurasi LAD 14° dipilih sebagai desain karena aliran terarah dengan tekanan balik rendah (371 Pa) dan dijadikan dasar fabrikasi *muffler* untuk pengujian efektivitas DOC pada mesin diesel.

Kata kunci: *Large angle diffuser* (LAD), *computational fluid dynamics* (CFD), *diesel oxidation catalyst* (DOC), *muffler*, distribusi aliran, emisi gas buang *diesel*.

1. PENDAHULUAN

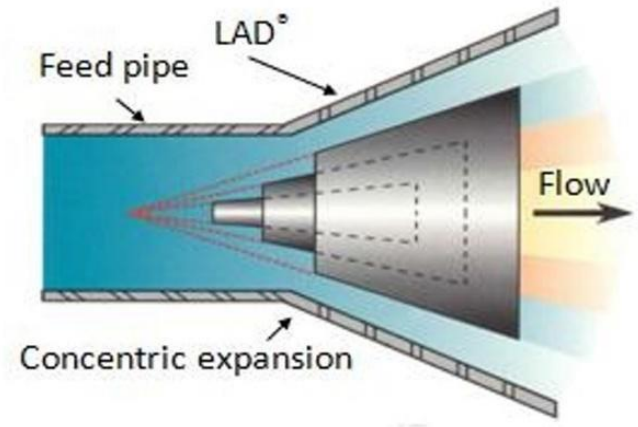
Peningkatan penggunaan mesin *diesel* pada sektor industri, pembangkit listrik, dan transportasi menyebabkan meningkatnya perhatian terhadap pengendalian emisi gas buang. Gas buang mesin *diesel* mengandung karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), nitrogen oksida (NOx), dan partikulat yang berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia [1]. Salah satu teknologi *after-treatment* yang banyak digunakan untuk mengurangi emisi tersebut adalah *diesel oxidation catalyst* (DOC). Kinerja DOC sangat dipengaruhi oleh keseragaman distribusi aliran gas buang yang memasuki media katalis [2]. Distribusi aliran yang tidak merata menyebabkan sebagian kanal monolit menerima debit aliran lebih besar dibandingkan kanal lainnya sehingga efisiensi konversi emisi menurun, *back pressure* meningkat, dan umur pakai katalis dapat berkurang [3], [4].

Pengaruh geometri *diffuser* terhadap distribusi aliran telah banyak dikaji secara numerik. Lee dan Chung [5] menginvestigasi secara numerik pengaruh parameter desain, yaitu sudut ekspansi, panjang saluran, dan rasio luas penampang, terhadap distribusi kecepatan dan tekanan

pada *diffuser* gas buang turbin. Simulasi CFD mereka memperlihatkan bahwa sudut *diffuser* yang terlalu besar memicu separasi aliran dan menciptakan zona resirkulasi yang mengganggu homogenitas aliran, sementara sudut yang terlalu kecil menghasilkan *diffuser* yang terlalu panjang dan berat. Temuan ini menjadi dasar ilmiah dalam pemilihan sudut corong LAD pada penelitian ini.

Salah satu metode untuk meningkatkan homogenitas distribusi aliran adalah penerapan LAD pada bagian masuk *muffler* sebelum media katalis [6]. LAD berfungsi sebagai komponen transisi yang mengubah aliran dari pipa berdiameter kecil menuju ruang katalis berdiameter lebih besar sehingga distribusi kecepatan menjadi lebih seragam. Geometri *diffuser* harus dirancang secara tepat karena sudut yang terlalu besar memicu *flow separation*, sedangkan sudut yang terlalu kecil membuat dimensinya lebih panjang dan kurang efisien. Oleh karena itu, optimasi geometri *diffuser* merupakan faktor penting dalam meningkatkan performa sistem *after-treatment* mesin *diesel* [7].

Seperti dapat dilihat pada Gambar 1, LAD adalah saluran transisi berbentuk kerucut atau lonceng yang berfungsi memperlambat kecepatan aliran *fluida* sekaligus meningkatkan tekanan statisnya, mengacu pada prinsip Bernoulli dan persamaan kontinuitas. Dalam konteks sistem *after-treatment* mesin *diesel*, LAD ditempatkan di antara pipa gas buang (diameter kecil, 38 mm) dan substrat katalis (diameter besar, 150 mm) untuk memastikan distribusi aliran yang merata sebelum gas memasuki DOC [8].



Gambar 1. *Design* LAD pada *Muffler*

Perkembangan simulasi CFD memungkinkan evaluasi desain *diffuser* dilakukan secara numerik sebelum fabrikasi. Simulasi CFD mampu memberikan informasi mengenai distribusi kecepatan, tekanan, pola aliran, daerah resirkulasi, serta tingkat homogenitas aliran pada permukaan katalis. Menjelaskan bahwa *pressure loss* pada *catalytic converter* terutama terjadi pada bagian *diffuser* dan substrat, sehingga pengendalian karakteristik aliran pada *diffuser* diperlukan untuk memperoleh distribusi kecepatan yang lebih seragam sekaligus mengurangi kehilangan tekanan [9].

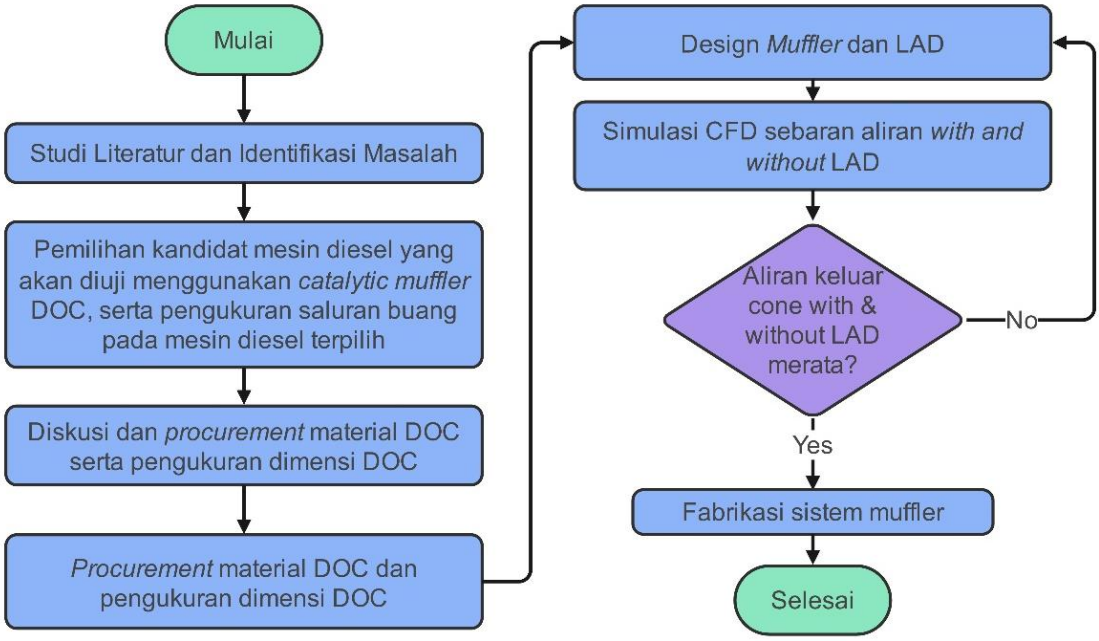
Pada penelitian ini, LAD diaplikasikan sebagai komponen penyebar aliran di dalam *muffler*. LAD ditempatkan setelah *area inlet cone* dan sebelum ruang media katalis untuk mengatur perubahan luas penampang sekaligus mendistribusikan gas buang secara merata ke seluruh permukaan substrat DOC. Untuk menguji efektivitas komponen tersebut, penelitian ini mengevaluasi empat konfigurasi geometri, yaitu LAD dengan sudut bukaan 14° dan 45°, serta desain tanpa LAD dengan sudut bukaan yang sama (14° dan 45°).

Pemilihan sudut *diffuser* merupakan aspek penting karena perubahan luas penampang yang terlalu ekstrem menimbulkan gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*) yang memicu

pemisahan aliran. Pada *diffuser* bersudut besar, lapisan batas rentan terlepas dari dinding saluran sehingga terbentuk zona aliran balik (*recirculation zone* atau *backflow*) yang membuat distribusi aliran tidak seragam [10]. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan karakteristik distribusi aliran pada keempat konfigurasi *muffler* tersebut melalui simulasi CFD, secara kualitatif dan kuantitatif (kecepatan maksimum dan tekanan balik total maksimum). Hasil analisis menentukan konfigurasi yang dipilih dan selanjutnya dijadikan dasar fabrikasi *muffler* untuk pengujian efektivitas DOC pada mesin *diesel* secara langsung.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik (CFD) untuk mengevaluasi distribusi aliran pada *muffler* yang dilengkapi LAD, dilanjutkan dengan fabrikasi prototipe berdasarkan desain terpilih. Tahapan penelitian disusun secara sistematis dan disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. *Flowchart* Penelitian

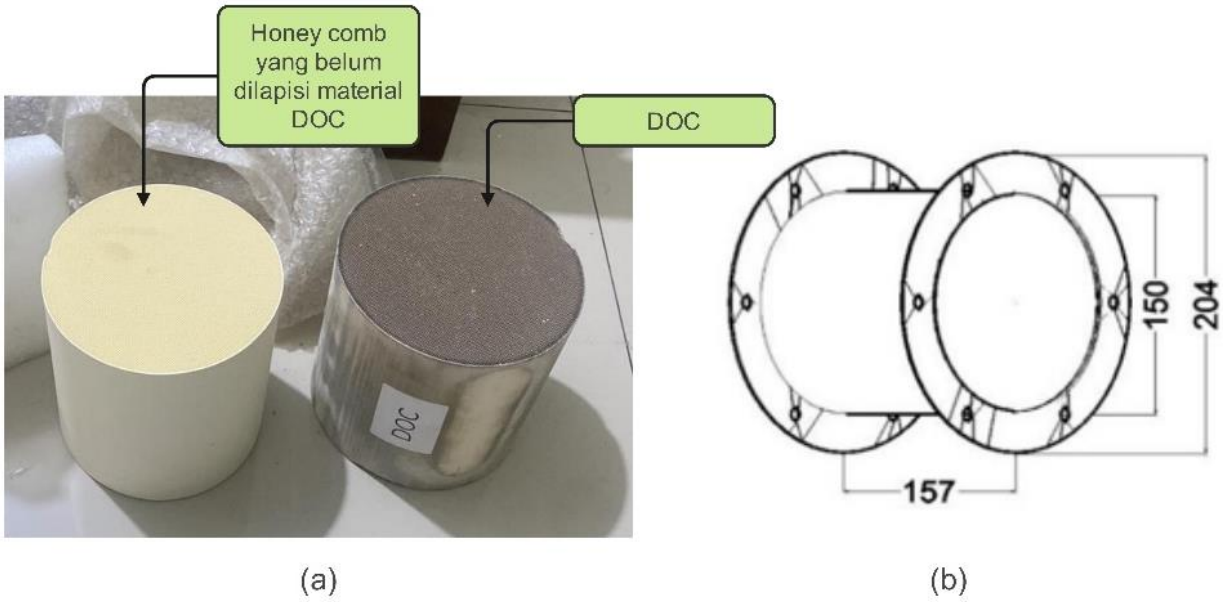
Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pemilihan kandidat mesin *diesel* yang akan diuji dengan *catalytic muffler*, *procurement* DOC, perancangan geometri *muffler*, simulasi CFD, analisis hasil, serta fabrikasi prototipe *muffler*. Informasi dari berbagai referensi, hasil pengukuran pada saluran buang mesin *diesel*, dan dimensi DOC yang dipilih digunakan sebagai dasar penentuan parameter desain dan metode analisis. Validasi eksperimental pada mesin merupakan tahap lanjutan di luar cakupan naskah ini.

Pengukuran saluran buang dilakukan pada mesin *diesel* terpilih, yaitu genset Winpower model WP12SP berdaya nominal 8,5 kW (maksimum 9,0 kW) pada 3.000 rpm dan 50 Hz, dengan mesin *diesel* tipe 1100FE sebagaimana tertera pada pelat nama. Pipa gas buang mesin berdiameter 38 mm. Hasil pengukuran, seperti dapat dilihat pada Gambar 3, digunakan sebagai referensi perancangan *muffler* untuk memastikan ukurannya sesuai dengan ruang yang tersedia pada mesin tersebut.



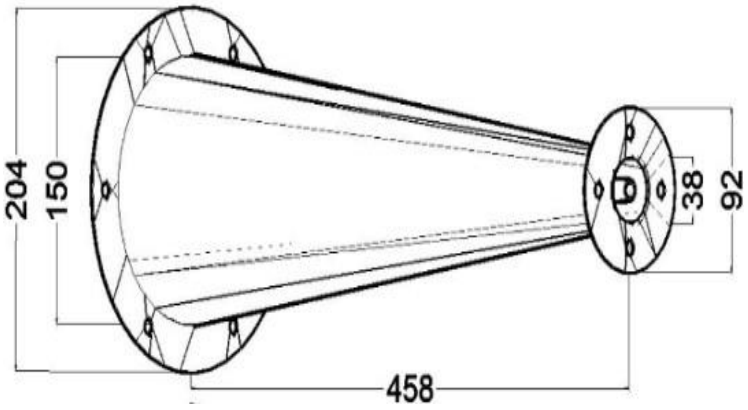
Gambar 3. Pengukuran Dimensi pada *Muffler Genset*

Katalis yang digunakan adalah DOC komersial hasil *procurement*, berupa substrat monolit keramik berstruktur *honeycomb* yang umumnya dilapisi katalis logam mulia untuk mengoksidasi CO dan HC menjadi CO_2 dan H_2O [11]. Dimensi DOC pada Gambar 4a menjadi acuan utama perancangan *cover catalytic converter*, yaitu casing pelindung berbentuk selubung luar yang menyelubungi seluruh substrat katalis beserta komponen internalnya (Gambar 4b). *Cover* tersebut dihubungkan dengan sisi *outlet cone muffler* pada bagian *inlet* dan dengan pipa tengah menuju *silencer* pada bagian *outlet*, sehingga membentuk satu unit katalitik yang tertutup dan terlindungi.



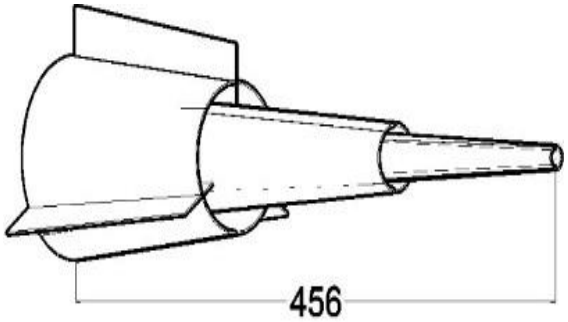
Gambar 4. (a) DOC dan *Honeycomb*, (b) *Cover Catalytic* DOC

Setelah pengukuran, perancangan *muffler* mengacu pada prinsip pengendalian emisi gas buang dengan penambahan DOC (Gambar 4a). Desain *muffler* ini tidak ditujukan untuk peredaman suara karena mesin *diesel* sudah dilengkapi *silencer*. Gambar 5 menunjukkan *cone muffler* dengan sudut bukaan 14° (panjang 458 mm) yang terletak di antara pipa *header* dan rumah katalis, dirancang sesuai dimensi *cover catalytic converter* DOC.



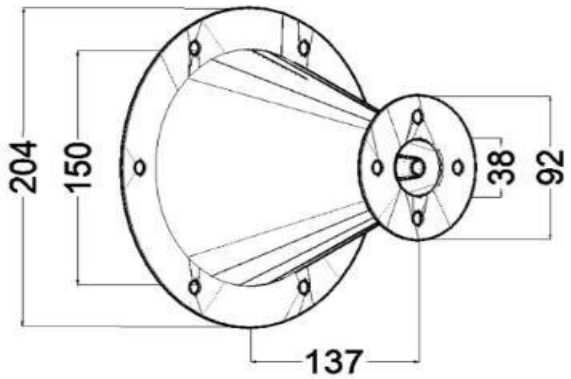
Gambar 5. *Cone Muffler* Sudut 14˚

Gambar 6 menunjukkan komponen LAD untuk *muffler* 14°. Komponen ini berperan penting dalam sistem katalitik knalpot, yakni sebagai penyebar aliran gas buang secara merata ke seluruh permukaan substrat DOC.



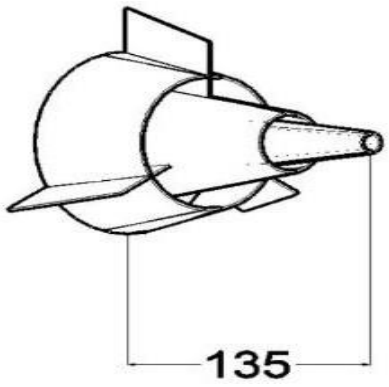
Gambar 6. LAD *Muffler* Sudut 14˚

Gambar 7 menunjukkan *cone muffler* dengan sudut bukaan 45° (panjang 137 mm) yang terletak di antara pipa *header* dan rumah katalis pada desain *muffler* DOC. Sudut bukaan yang dimaksud adalah sudut total (*included angle*) kerucut, yang dihitung dari dimensi pada Gambar 5 dan Gambar 7, yaitu $2\cdot\tan^{-1}[(150-38)/(2\times458)] = 14{,}0°$ dan $2\cdot\tan^{-1}[(150-38)/(2\times137)] = 44{,}4°$, yang selanjutnya dinyatakan sebagai 14° dan 45° sesuai nilai nominal desain. Rasio luas penampang ruang katalis terhadap pipa masuk adalah $(150/38)^2 = 15{,}6$ untuk keempat konfigurasi.



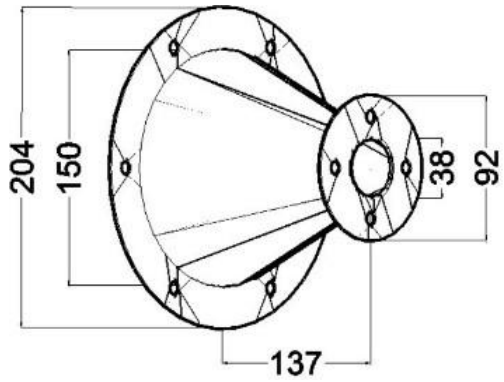
Gambar 7. *Cone Muffler* Sudut 45˚

Gambar 8 menunjukkan komponen LAD untuk *muffler* 45° yang berperan sebagai penyebar aliran gas buang ke seluruh permukaan substrat DOC.



Gambar 8. LAD Muffler 45°

Gambar 9 menunjukkan *cone after catalytic* yang berfungsi mengarahkan aliran gas dari katalis menuju pipa *outlet*.



Gambar 4. *Cone After* Katalis

Untuk mengevaluasi serta memvisualisasikan aliran, apakah aliran yang dihasilkan dari beberapa alternatif design menghasilkan aliran yang merata, dilakukan dengan simulasi CFD menggunakan SolidWorks Flow Simulation 2024 SP1.0 pada model tiga dimensi keempat konfigurasi (Gambar 5–8) yang dirangkai dengan pipa masuk, rumah katalis (Gambar 4b), dan *cone after catalytic* (Gambar 9). Perangkat lunak ini menyelesaikan persamaan Navier–Stokes rata-rata Reynolds (RANS) dengan metode volume hingga [12], sedangkan aliran turbulen dimodelkan dengan model k–ε [13]. Aliran dianalisis sebagai aliran internal pada domain yang dibatasi dinding *muffler*. Parameter dan kondisi batas simulasi dirangkum pada Tabel 1 dan diterapkan sama untuk keempat konfigurasi sehingga perbedaan hasil hanya disebabkan oleh geometri.

Tabel 1. Parameter dan Kondisi Batas Simulasi CFD

Parameter	Pengaturan
Perangkat lunak	SolidWorks Flow Simulation 2024 SP1.0
Jenis analisis	Aliran internal, tunak (*steady state*); konduksi panas pada padatan, radiasi, gravitasi, dan rotasi tidak diaktifkan
Fluida kerja	Udara (gas ideal) sebagai pendekatan gas buang; tipe aliran *laminar and turbulent*
Model turbulensi	k–ε (bawaan Flow Simulation)
Kondisi awal	101.325 Pa, 20,05 °C, kecepatan 0 m/s
Kondisi batas *inlet*	*Inlet volume flow* 0,03 m^3/s pada bidang masuk pipa Ø38 mm (kecepatan rata-rata = 26,5 m/s), *fully developed flow*; temperatur 300 °C; tekanan statis *inlet* dihitung oleh *solver*
Kondisi batas *outlet*	*Environment pressure* 101.325 Pa pada bidang keluar pipa *outlet*
Dinding	*No-slip*, adiabatik, halus (bawaan)
Representasi substrat DOC	Tidak dimodelkan (ruang kosong tanpa hambatan aliran)
Bilangan Reynolds (pipa masuk)	$2{,}1 \times 10^4$ (turbulen), dihitung dengan $\rho = 0{,}62$ kg/m^3 dan $\mu = 2{,}9 \times 10^{-5}$ Pa·s untuk udara 300 °C
Goals (variabel pemantau)	*Maximum total pressure*, *maximum velocity*, *average temperature*, *volume flow rate*
Mesh	Manual: *basic mesh* 10 × 10 × 10; level penghalusan sel fluida 2 dan sel parsial 4; *channel refinement* 5 sel dengan level maksimum 2; *small solid features* level 3. Total 328.096 sel pada LAD 14°
Konvergensi	LAD 14°: 149 iterasi; NO LAD 14°: 156 iterasi; LAD 45°: 157 iterasi; NO LAD 45°: 196 iterasi. Pada ketiganya seluruh *goal* memenuhi kriteria konvergensi, dengan debit keluar 0,0299–0,0301 m^3/s (selisih ≤ 0,35% terhadap *inlet*) dan temperatur rata-rata 296,9–300,0 °C

Aliran dianggap tunak dan tanpa pengaruh gravitasi, radiasi, maupun konduksi panas pada padatan. Udara dipakai sebagai pendekatan gas buang *diesel* karena sifat fisiknya pada temperatur tinggi tidak jauh berbeda dengan campuran N_2, CO_2, dan H_2O yang dominan pada gas buang. Temperatur masuk 300 °C diasumsikan sebagai temperatur gas buang representatif pada beban menengah. Debit 0,03 m^3/s ditetapkan sebagai nilai representatif; berdasarkan persamaan $Q = V_d(N/120) \cdot \eta_v \cdot (T_{exh}/T_{amb})$ [18] dengan $N = 3.000$ rpm, $\eta_v = 0{,}9$–$1{,}0$, $T_{amb} = 303$ K, dan $T_{exh} = 573$ K, debit tersebut setara dengan mesin *diesel* bervolume langkah sekitar 0,63–0,71 L, yaitu ukuran yang lazim untuk mesin satu silinder pada kelas daya genset ini. Debit ini menghasilkan kecepatan rata-rata 26,5 m/s pada pipa Ø38 mm dan bilangan Reynolds = $2{,}1 \times 10^4$, sehingga aliran masuk berada pada rezim turbulen.

Hasil divisualisasikan dalam bentuk lintasan aliran (*flow trajectories*) berwarna kecepatan. Selain pengamatan kualitatif tersebut, evaluasi kuantitatif dilakukan melalui kecepatan maksimum dan tekanan balik total maksimum. Tekanan balik total (ΔP_b) didefinisikan sebagai selisih antara tekanan total maksimum pada domain, yang umumnya terjadi di pipa masuk, dan tekanan lingkungan di sisi keluar, sehingga mewakili tekanan yang harus diatasi gas buang untuk melewati *muffler* (persamaan 1):

$$\Delta P_b = P_{t,maks} - P_{lingk} \tag{1}$$

dengan $P_{t,maks}$ tekanan total maksimum pada domain komputasi (*goal Maximum Total Pressure*, Pa) dan P_{lingk} tekanan lingkungan di sisi keluar (101.325 Pa). Karena substrat DOC tidak dimodelkan, ΔP_b hanya mencerminkan hambatan geometri *muffler* sehingga merupakan batas

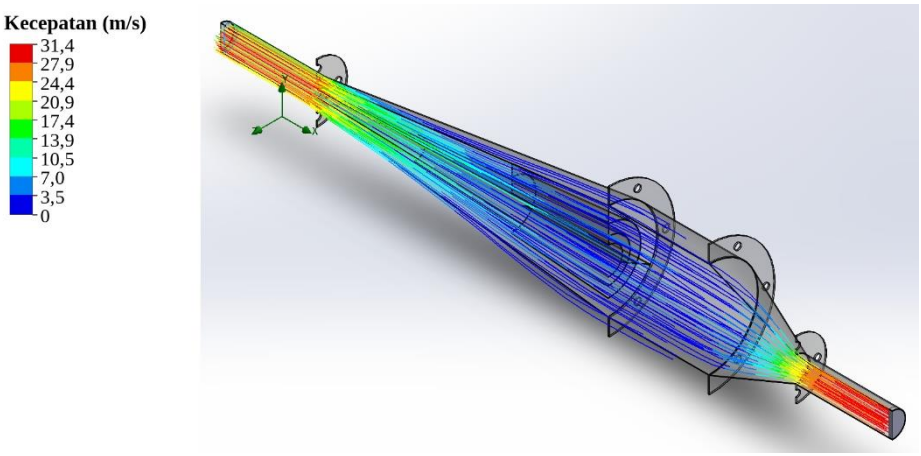
bawah tekanan balik sesungguhnya. Nilai ini juga sedikit lebih besar (sekitar $\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2$ = 215 Pa) daripada selisih tekanan total *inlet–outlet* karena tekanan total di sisi keluar mencakup tekanan dinamis. Keseragaman aliran pada bidang masuk substrat dinilai secara kualitatif dari lintasan aliran; perhitungan indeks keseragaman (misalnya *flow uniformity index*) tidak dicakup dalam penelitian ini karena substrat DOC tidak dimodelkan, dan menjadi pekerjaan lanjutan.

3. HASIL

Bagian ini menyajikan hasil simulasi CFD keempat konfigurasi *muffler* dan hasil fabrikasi prototipe. Skala kecepatan (m/s) pada Gambar 10–13 telah diperbesar agar nilai minimum dan maksimum dapat dibaca dengan jelas.

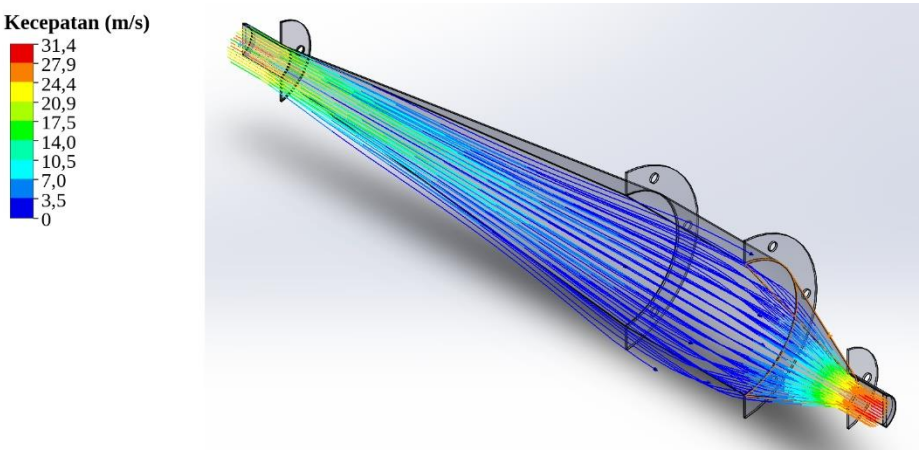
A. Hasil Simulasi CFD

Gambar 10 menunjukkan hasil CFD *muffler* dengan LAD 14°. Kecepatan tertinggi (= 31,4 m/s, warna merah) terjadi pada pipa masuk dan menurun bertahap sepanjang *cone* hingga di bawah 7 m/s (warna biru) di ruang katalis. Lintasan aliran tampak sejajar dan menyebar ke seluruh penampang menuju ruang katalis, tanpa pusaran yang terlihat.



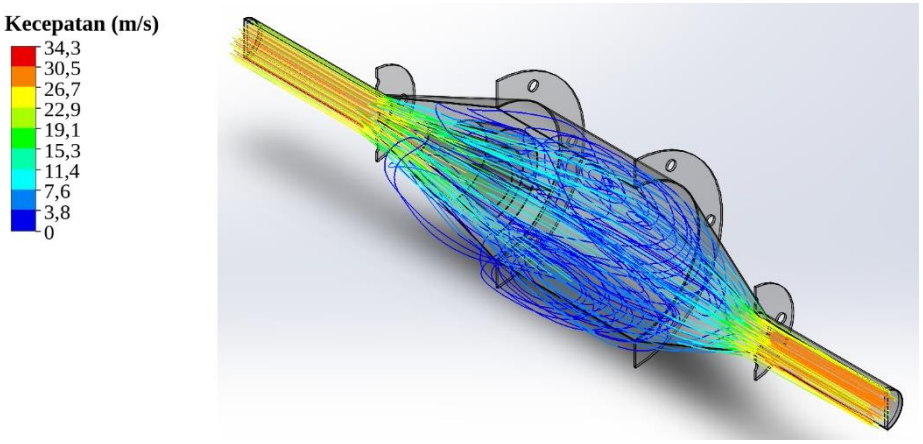
Gambar 5. Hasil CFD *Muffler* LAD 14˚

Gambar 11 menunjukkan hasil CFD pada desain *muffler* NO LAD 14°. Pola aliran sangat mirip dengan LAD 14° (kecepatan maksimum = 31,4 m/s): lintasan sejajar, menyebar bertahap, dan tanpa pusaran yang terlihat. Perbedaan visual antara kedua konfigurasi 14° kecil.



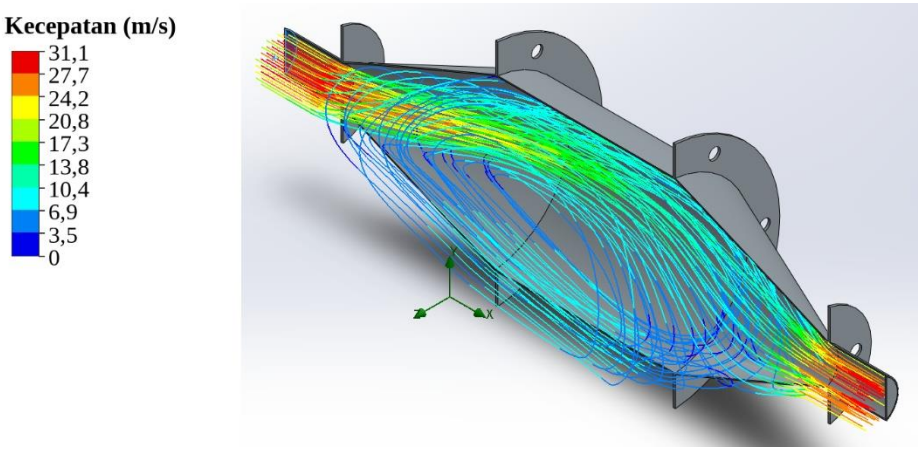
Gambar 6. Hasil CFD *Muffler* NO LAD 14˚

Gambar 12 menunjukkan hasil CFD pada LAD 45°. Lintasan aliran melengkung dan berputar di dalam ruang ekspansi sehingga mengindikasikan zona aliran balik (*recirculation zone*). Kecepatan maksimum domain meningkat menjadi = 35,8 m/s (Tabel 2), sekitar 14% lebih tinggi daripada konfigurasi lain.



Gambar 7. Hasil CFD *Muffler* LAD 45˚

Gambar 13 menunjukkan hasil CFD pada NO LAD 45°. Aliran utama berupa jet cepat di sekitar sumbu saluran yang dikelilingi pusaran besar di ruang ekspansi, sehingga bagian tepi ruang katalis menerima aliran utama yang jauh lebih kecil (kecepatan maksimum = 31,1 m/s).



Gambar 8. Hasil CFD *Muffler* NO LAD 45˚

Ringkasan parameter geometri dan hasil kuantitatif keempat konfigurasi disajikan pada Tabel 2. Pada tiga konfigurasi selain LAD 45°, kecepatan maksimum domain setara kecepatan maksimum profil masuk berkembang penuh (sekitar 31 m/s, 1,18 kali kecepatan rata-rata), sehingga tidak terjadi percepatan lokal yang melampaui kecepatan masuk. Kecepatan maksimum pada Tabel 2 adalah nilai *goal maximum velocity* pada seluruh domain, sedangkan skala warna Gambar 10–13 menunjukkan rentang kecepatan sepanjang lintasan aliran yang ditampilkan sehingga nilai maksimumnya dapat sedikit berbeda (misalnya 34,3 m/s pada Gambar 12).

Tabel 2. Parameter Geometri dan Hasil Kuantitatif Simulasi CFD

Parameter	LAD 14°	NO LAD 14°	LAD 45°	NO LAD 45°
Sudut bukaan total (°)	14,0	14,0	44,4	44,4
Panjang *cone* (mm)	458	458	137	137
Panjang komponen LAD (mm)	456	–	135	–
Rasio luas penampang $(150/38)^2$	15,6	15,6	15,6	15,6
Kecepatan maksimum (m/s)	31,4	31,4	35,8	31,1
Tekanan total maksimum, $P_{t,\,maks}$ (Pa)	101.696	101.717	101.939	102.030
Tekanan balik total, ΔP_b (Pa)	371	392	614	705

B. Hasil Fabrikasi Prototipe

Berdasarkan desain yang telah dibuat, dilakukan fabrikasi dengan tahapan yang mencakup pemotongan, pengelasan, dan perakitan komponen *muffler*. Gambar 14 menampilkan lembaran pelat logam (*stainless steel*) yang telah dipotong berdasarkan pola bentangan sebagai tahap awal fabrikasi.



Gambar 9. Bahan yang siap fabrikasi setelah proses pemotongan

Tahap pasca pembentukan pelat ditunjukkan pada Gambar 15, yaitu bagian silinder lurus dan kerucut *cone muffler* yang masing-masing ujungnya dilengkapi flensa melingkar untuk sambungan baut (*bolted joint*).



Gambar 10. *Muffler* setelah selesai fabrikasi

Hasil akhir fabrikasi ditunjukkan pada Gambar 16, yaitu struktur vertikal *muffler* utuh yang siap dipasang pada dudukan pipa *header* sistem eksperimen.



Gambar 11. *Muffler assembly* dengan pipa *header*

4. PEMBAHASAN

A. *Prototipe Muffler* Model *Detachable* dan *Moveable*

Dalam upaya menghadirkan solusi teknologi yang efektif dan aplikatif untuk menekan dampak pencemaran udara akibat emisi gas buang mesin *genset* berbahan bakar solar, penelitian ini merancang dan mengembangkan prototipe *muffler* katalitik berbasis DOC dengan desain *detachable* dan *moveable*. Sistem ini merupakan inovasi rekayasa yang memadukan oksidasi katalitik gas berbahaya (CO dan HC) dengan rancangan yang modular, *fleksibel*, efisien, serta mudah diterapkan tanpa modifikasi permanen pada sistem pembuangan mesin.

Prototipe muffler detachable dan *moveable* ini dirancang agar dapat dipasang, dilepas, serta dipindahkan dengan mudah pada saluran buang (*exhaust pipe*) genset tanpa proses pengelasan maupun perubahan struktur asli knalpot. Desain tersebut menjadi salah satu keunggulan utama karena memungkinkan alat digunakan secara praktis dan *fleksibel* pada berbagai jenis genset yang telah beroperasi, baik di sektor industri kecil, rumah tangga, maupun fasilitas pelayanan umum yang memanfaatkan genset sebagai sumber daya cadangan.

B. Struktur Umum dan Konfigurasi Desain

Prototipe *muffler* ini berstruktur silinder berbahan pelat *stainless steel* yang dibentuk kerucut dan silindris. Dimensinya disesuaikan dengan pipa gas buang genset Winpower WP12SP 1 *phase* berdaya nominal 8,5 kW yang berdiameter 38 mm dengan panjang sekitar 1.700 mm. Desain *muffler* terdiri dari beberapa komponen utama:

- Pipa *Header*
  Merupakan komponen awal dalam sistem *exhaust* yang berfungsi mengumpulkan gas buang dari silinder mesin dan mengarahkannya menuju *cone muffler*.
- *Cone Muffler*
  Komponen yang di dalamnya terdapat *Large Angle Diffuser* dan sangat memengaruhi pergerakan fluida gas buang dari silinder mesin menuju ruang katalis.
- *Large Angle Diffuser* (LAD)
  Large Angle Diffuser (LAD) merupakan komponen pengarah aliran yang dirancang untuk memperbesar luas penampang aliran secara bertahap dengan sudut difusi yang relatif besar. Pada penelitian ini, LAD digunakan sebagai penyebar aliran gas buang agar distribusi aliran menjadi lebih homogen dan merata sebelum memasuki substrat DOC. Prinsip kerja LAD didasarkan pada proses difusi aliran, yaitu mengubah aliran berkecepatan tinggi menjadi aliran yang lebih lambat dan tersebar pada area yang lebih luas.
- *Cover Catalytic*
  Cover catalytic merupakan bagian pelindung pada sistem katalitik yang berfungsi menjaga substrat DOC dari pengaruh lingkungan luar maupun gangguan selama operasi. Pada penelitian ini, *cover catalytic* melindungi substrat DOC agar tetap berada pada posisi yang stabil serta terhindar dari kontaminasi partikel asing, debu, kelembapan, dan kerusakan mekanis akibat getaran dan aliran gas buang. *Cover* dibuat berbentuk silinder mengikuti bentuk dan ukuran substrat DOC keramik.
- Media Katalis
  Media katalis merupakan komponen utama sistem pengendalian emisi yang berfungsi mengoksidasi polutan hasil pembakaran mesin *diesel*. Media yang digunakan adalah DOC komersial berupa substrat monolit keramik berstruktur *honeycomb* dengan lapisan katalis, bukan adsorben zeolit. Perbedaan ini penting: DOC bekerja melalui reaksi oksidasi CO dan HC pada permukaan katalis yang dilalui gas melalui kanal-kanal sejajar, sedangkan adsorben zeolit menangkap polutan di dalam pori. Karakteristik penurunan tekanan dan

sensitivitas terhadap distribusi aliran keduanya pun berbeda, sehingga seluruh analisis pada naskah ini mengacu pada DOC. Media katalis ditempatkan setelah LAD agar aliran yang masuk ke substrat telah tersebar merata dan kontak gas dengan permukaan katalis menjadi lebih homogen.

- *Cone After* Katalis
  Cone after katalis merupakan komponen transisi yang ditempatkan setelah ruang media katalis. Komponen ini menghubungkan ruang katalis dengan pipa *outlet* yang berbeda diameter penampangnya, dan menjaga kontinuitas aliran gas buang agar tetap stabil saat terjadi perubahan luas penampang menuju saluran keluar.
- Pipa *Outlet Muffler*
  Merupakan bagian akhir saluran gas buang yang mengalirkan gas hasil pembakaran yang telah melewati DOC menuju lingkungan, dengan harapan kandungan CO dan HC pada emisi lebih rendah dibandingkan sebelum melalui katalis.

C. Analisis dan Perbandingan Distribusi Aliran

Hasil CFD menunjukkan perbedaan karakteristik distribusi aliran di antara keempat konfigurasi, yang dirangkum secara kualitatif pada Tabel 3 dan secara kuantitatif pada Tabel 2.

Tabel 3. Karakteristik Distribusi Aliran

Parameter	LAD 14°	NO LAD 14°	LAD 45°	NO LAD 45°
Pola aliran	Terarah, sejajar	Terarah, sejajar	Kompleks, berputar	Jet di tengah dengan pusaran besar
Penyebaran aliran	Merata	Merata	Kurang merata	Tidak merata
Ekspansi penampang	Bertahap (458 mm)	Bertahap (458 mm)	Lebih tajam (137 mm)	Tajam (137 mm)
Potensi *flow separation*	Relatif lebih rendah	Relatif lebih rendah	Relatif lebih tinggi	Relatif lebih tinggi
Distribusi menuju katalis	Baik	Baik	Kurang optimal	Kurang optimal

Perbedaan tersebut dapat dijelaskan dengan prinsip kontinuitas dan persamaan Bernoulli [15]. Dengan rasio luas penampang = 15,6, kecepatan rata-rata ideal pada ruang katalis hanya sekitar 6,4% (1/15,6) dari kecepatan pada pipa masuk. Pada debit 0,03 m^3/s, kecepatan rata-rata di pipa masuk 26,5 m/s sehingga kecepatan rata-rata di ruang katalis berorde 1,7 m/s, sesuai dengan dominasi warna biru pada ruang katalis di Gambar 10. Penurunan energi kinetik ini dikonversi menjadi kenaikan tekanan statis sepanjang *diffuser*, sehingga terbentuk gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*) searah aliran. Lapisan batas pada dinding, yang telah kehilangan momentum akibat gesekan, tidak mampu melawan gradien tersebut; bila sudut bukaan terlalu besar, lapisan batas terlepas dari dinding (separasi) dan menimbulkan aliran balik serta zona resirkulasi [16], [17].

Pada *diffuser* kerucut konvensional, separasi mulai muncul pada kisaran sudut bukaan total 10°–15° (bergantung pada rasio panjang dan kondisi masuk), berkembang penuh pada sudut yang lebih besar, dan pada sudut sangat besar (di atas ± 40°–50°) aliran cenderung terlepas dari dinding dan berperilaku sebagai jet [16], [17]. Sudut 14° berada dekat batas awal separasi, tetapi pada panjang *cone* 458 mm kedua konfigurasi 14° menunjukkan lintasan sejajar tanpa pusaran yang terlihat (Gambar 10 dan 11) dengan tekanan balik yang setara, sehingga penambahan LAD tidak memberikan perbedaan yang nyata pada sudut ini. Fungsi LAD tampak pada sudut besar,

yaitu menurunkan tekanan balik pada 45° (Tabel 2), sejalan dengan upaya pengendalian aliran pada *diffuser* yang dilaporkan pada [8], [9].

Pada sudut 45°, perluasan penampang terjadi dalam jarak hanya 137 mm (dibandingkan 458 mm pada 14°), sehingga gradien tekanan balik jauh lebih tajam. Lintasan aliran yang melengkung dan berputar pada Gambar 12, serta kenaikan kecepatan maksimum domain dari 31,4 menjadi = 35,8 m/s (14%), mengindikasikan separasi dan resirkulasi yang menyempitkan penampang efektif aliran sehingga aliran utama dipercepat secara lokal. Hal ini konsisten dengan temuan Lee dan Chung [5] bahwa sudut ekspansi yang terlalu besar memicu separasi dan zona resirkulasi yang mengganggu homogenitas aliran. Tanpa LAD (Gambar 13), aliran terlepas dari dinding dan membentuk jet pada sumbu saluran sehingga hanya kanal monolit di bagian tengah yang menerima aliran dominan, perilaku yang sejalan dengan kajian eksperimental pada *diffuser* sudut lebar [10] dan studi kerucut penghubung ke reaktor monolit [6].

Secara kuantitatif (Tabel 2), tekanan balik total pada NO LAD 14°, LAD 14°, LAD 45°, dan NO LAD 45° masing-masing 392, 371, 614, dan 705 Pa. Pada sudut 14°, penambahan LAD tidak menambah hambatan secara berarti (371 dibandingkan 392 Pa); selisih sekitar 5% berada dalam rentang perbedaan numerik dan perbedaan definisi nilai sehingga kedua konfigurasi dianggap setara. Pada sudut 45°, penambahan LAD menurunkan tekanan balik dari 705 Pa menjadi 614 Pa (13%), sejalan dengan fungsi LAD menahan separasi aliran [8], [9], sedangkan pembesaran sudut dari 14° ke 45° tanpa LAD menaikkannya dari 392 Pa menjadi 705 Pa (80%). Seluruh nilai tekanan belum memasukkan hambatan substrat DOC sehingga tekanan balik sesungguhnya akan lebih tinggi. Konsekuensi lain adalah dimensi: *cone* 14° memerlukan panjang 458 mm, sekitar 3,3 kali lebih panjang daripada 45° (137 mm). Pada genset dengan ruang terbatas, LAD 14° membutuhkan ruang lebih besar, tetapi karena distribusi aliran menentukan pemanfaatan seluruh substrat, umur pakai katalis, dan konversi emisi [3], [7], penambahan panjang tersebut dinilai sebanding dengan manfaatnya.

D. Implikasi bagi Kinerja DOC dan Keterbatasan Penelitian

Distribusi aliran yang merata membuat seluruh kanal monolit DOC terpakai sehingga luas permukaan katalitik efektif meningkat, risiko titik panas dan penuaan termal lokal berkurang, serta *back pressure* dapat ditekan [2] – [4]. Pada konfigurasi 45°, kanal di bagian tengah menerima beban aliran berlebih dengan waktu tinggal yang diperkirakan lebih singkat, sedangkan kanal tepi kurang dimanfaatkan, sehingga laju konversi CO dan HC berpotensi menurun.

Beberapa keterbatasan perlu dicatat. Pertama, simulasi dilakukan pada satu kondisi operasi (debit 0,03 m^3/s dan temperatur 300 °C, kondisi tunak) dengan udara sebagai pendekatan gas buang, sehingga pengaruh variasi beban genset dan komposisi gas buang belum dikaji. Kedua, kajian ketergantungan *mesh* (*mesh independence*) dan validasi eksperimental terhadap distribusi kecepatan maupun penurunan tekanan belum dilakukan. Ketiga, substrat DOC tidak dimodelkan (ruang kosong) sehingga tekanan balik yang dilaporkan hanya mencerminkan hambatan geometri dan efek pemerataan aliran oleh substrat belum tercakup. Keempat, keseragaman aliran dinilai dari lintasan aliran dan belum dihitung secara kuantitatif karena substrat DOC tidak dimodelkan, misalnya dengan *flow uniformity index* pada bidang masuk substrat. Tahap selanjutnya adalah pengujian prototipe pada genset (Gambar 16) untuk mengukur penurunan tekanan dan efisiensi konversi CO dan HC menggunakan *gas analyzer*, kemudian membandingkannya dengan hasil CFD.

5. SIMPULAN

Berdasarkan simulasi CFD pada *muffler* dengan LAD dan tanpa LAD pada sudut bukaan total 14° dan 45° (rasio luas penampang = 15,6), sudut bukaan *diffuser* terbukti memengaruhi distribusi aliran menuju substrat DOC. Pada sudut 14°, baik dengan maupun tanpa LAD, aliran terarah dan tersebar relatif merata secara visual dengan kecepatan maksimum 31,4 m/s (setara kecepatan maksimum profil masuk), sehingga LAD tidak menimbulkan perbedaan yang nyata pada sudut ini. Tekanan balik total pada 14° sebesar 371 Pa dengan LAD dan 392 Pa tanpa LAD (setara), sedangkan pada 45° sebesar 614 Pa dengan LAD dan 705 Pa tanpa LAD, sehingga LAD menurunkan tekanan balik sekitar 13% pada 45° tanpa menambah hambatan pada 14°. Pada sudut 45°, perluasan penampang yang tajam (137 mm) memicu separasi dan resirkulasi, ditandai kecepatan maksimum = 35,8 m/s pada LAD 45° dibandingkan = 31 m/s pada konfigurasi lain, sedangkan tanpa LAD aliran terpusat di bagian tengah. Dengan demikian, LAD 14° dipilih sebagai konfigurasi desain karena aliran terarah dengan tekanan balik rendah (371 Pa), dengan konsekuensi panjang *cone* 458 mm; manfaat LAD pada sudut ini perlu diuji lebih lanjut pada mesin. Penelitian selanjutnya perlu melakukan kajian ketergantungan *mesh*, validasi eksperimental, dan pengujian efektivitas DOC (konversi CO dan HC serta *back pressure*) pada mesin *diesel*.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] E. Meloni and V. Palma, "Most recent advances in diesel engine catalytic soot abatement: Structured catalysts and alternative approaches," *Catalysts*, vol. 10, no. 7, pp. 1–27, 2020, doi: 10.3390/catal10070745.

[2] E. Kritsanaviparkporn, F. M. Baena-Moreno, and T. R. Reina, "Catalytic converters for vehicle exhaust: Fundamental aspects and technology overview for newcomers to the field," *Chemistry*, vol. 3, no. 2, pp. 630–646, 2021, doi: 10.3390/chemistry3020044.

[3] P. Chanda Nagarajan, H. Ström, and J. Sjöblom, "Transient flow uniformity evolution in realistic exhaust gas aftertreatment systems using 3D-CFD," *Emission Control Science and Technology*, vol. 8, no. 3–4, pp. 154–170, 2022, doi: 10.1007/s40825-022-00217-6.

[4] G. Park, H. Bang, and S. Lee, "Flow analysis of PM/NOx aftertreatment system for emergency generator," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 9, Art. no. 4404, 2022, doi: 10.3390/app12094404.

[5] B. J. Lee and J. T. Chung, "Numerical investigation into the effects of design parameters on the flow characteristics in a turbine exhaust diffuser," *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 5171, 2021, doi: 10.3390/en14165171.

[6] M. Mu, J. Sjöblom, H. Ström, and X. Li, "Analysis of the flow field from connection cones to monolith reactors," *Energies*, vol. 12, no. 3, Art. no. 455, 2019, doi: 10.3390/en12030455.

[7] C. P. Om Ariara Guhan, G. Arthanareeswaran, K. N. Varadarajan, and S. Krishnan, "Numerical optimization of flow uniformity inside an under body-oval substrate to improve emissions of IC engines," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 198–214, 2016, doi: 10.1016/j.jcde.2016.02.001.

[8] Cheng Fluid Systems, "LAD® Large Angle Diffuser," product brochure, pp. 1–5, 2015.

[9] K. Hirata, M. Ota, R. Oda, H. Tanigawa, and J. Funaki, "On a novel diffuser for efficient automotive catalytic converters," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, vol. 73, no. 4, pp. 996–1001, 2007, doi: 10.1299/kikaib.73.996.

[10] M. D. Shende, K. C. More, and R. D. Rakhade, "An experimental investigation to control the flow emerging from a wide angle diffuser," pp. 27–32, Dec. 2021.

[11] R. M. Heck, R. J. Farrauto, and S. T. Gulati, *Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009.

[12] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Harlow, U.K.: Pearson Education, 2007.

[13] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
[14] H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier, and D. Rammoser, "Optimisation of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction," SAE Technical Paper 930780, 1993, doi: 10.4271/930780.
[15] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2016.
[16] I. E. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.
[17] L. R. Reneau, J. P. Johnston, and S. J. Kline, "Performance and design of straight, two-dimensional diffusers," *Journal of Basic Engineering*, vol. 89, no. 1, pp. 141–150, 1967.
[18] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.