Pengaruh Variasi Sudut Konvergen dan Divergen Tabung Venturi terhadap *Throat Mass Flow* dan *Velocity*

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

[1] Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Indonesia

ABSTRAK

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut konvergen dan divergen pada tabung Venturi terhadap laju massa dan kecepatan pada bagian *throat*. Tabung Venturi tersebut akan diaplikasikan sebagai sarana uji visualisasi kerataan aliran pada rancangan *cone muffler Diesel Oxidation Catalyst* (DOC) menggunakan medium asap *dry ice*. Tabung Venturi dirancang dengan diameter *throat* tetap sebesar 11,8 mm menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD). Variasi rancangan meliputi sudut konvergen (25°, 37,5°, dan 45°) serta sudut divergen (11° dan 15°). Desain tersebut kemudian diverifikasi melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan model turbulensi k-omega SST. Guna memvalidasi hasil simulasi, rancangan purwarupa difabrikasi menggunakan teknik *3D printing* berbahan *polylactic acid* (PLA) untuk pengujian eksperimental di laboratorium. Pengujian aktual dilakukan menggunakan suplai udara dari kompresor sentrifugal dengan variasi bukaan daya kompresor (25%, 50%, 75%, dan 100%), sedangkan proses *suction* diuji menggunakan asap hasil sublimasi *dry ice* di dalam gelas ukur yang berisi air panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rancangan venturi dengan kombinasi sudut konvergen 37,5° dan divergen 11° menghasilkan *throat mass flow* maksimum di bagian *throat* sebesar 47,3 g/min pada kondisi aliran turbulen. Sebaliknya, *throat mass flow* terendah (3,5 g/min) terjadi pada kombinasi sudut 25° dan 15° dengan profil aliran laminar. Dari segi *velocity* aliran, kombinasi sudut 37,5° dan 15° mencapai nilai *velocity* maksimum sebesar 11,7 m/s, sedangkan kombinasi 45° dan 11° menghasilkan *velocity* minimum sebesar 1,8 m/s. Secara keseluruhan, studi ini menyimpulkan bahwa geometri venturi dengan sudut konvergen 37,5° dan divergen 11° merupakan desain yang paling efektif untuk menghasilkan daya hisap optimal pada sistem uji visualisasi aliran.

Kata Kunci: *3D printing*, *dry ice*, tabung venturi, *throat mass flow*, *velocity*

yohanes.gunawan@esdm.go.id

1. Pendahuluan

Dalam mekanika fluida, tabung Venturi adalah alat penting yang banyak diterapkan di industri, terutama untuk pengukuran debit aliran, pencampuran cairan, dan sistem vakum [1]. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada *Venturi Effect*, yakni fenomena fisika di mana aliran fluida yang melewati area *throat* akan mengalami percepatan yang berbanding lurus dengan penurunan tekanan statis di titik tersebut [2]. Konfigurasi geometri tabung, terutama dimensi sudut konvergen dan divergen, memegang peranan krusial dalam menentukan efisiensi operasional serta karakteristik aliran fluida di dalam sistem. Ber-

bagai studi terdahulu telah mengkaji optimasi bentuk geometris venturi, dengan temuan yang mengindikasikan bahwa modifikasi pada sudut konvergen dan divergen memengaruhi indikator performa aliran secara signifikan, seperti pada *discharge coefficient* dan efektivitas nosel [3], [4]. Desain geometri penampang ini sangat terkait dengan fenomena pengurangan tekanan yang dapat dijelaskan melalui Hukum Bernoulli [5], [6]. Selain itu, perhitungan parameter fluida seperti *Reynolds Number* merupakan hal yang penting untuk mengklasifikasikan karakteristik aliran yang terjadi, baik itu laminar maupun turbulen [7]. Karakteristik aliran ini sangat berkaitan dengan viskositas dinamis [8] dan densitas massa udara [9] pada kondisi suhu kerja yang tertentu.

Di sisi lain, seiring dengan regulasi lingkungan yang semakin ketat di sektor industri kilang, pengendalian emisi gas buang yang bersumber dari proses pembakaran pada *furnace* maupun instalasi *diesel engine* menjadi prioritas utama. Dalam sistem kontrol emisi tersebut, teknologi *Diesel Oxidation Catalyst* (DOC) memegang peranan yang sangat penting. DOC berfungsi mereduksi kandungan gas berbahaya melalui prinsip adsorpsi dan reaksi katalitik pada struktur internal yang berbentuk *honeycomb*. Agar proses adsorpsi polutan ini berjalan secara maksimal dan merata pada seluruh penampang katalis, parameter kerataan aliran gas buang yang memasuki area *honeycomb* menjadi sangat krusial. Tingkat pemerataan distribusi aliran ini sangat ditentukan oleh ketepatan desain geometri *cone* pada *muffler*, yang bertindak sebagai zona transisi perpindahan fluida sebelum memasuki ruang katalitik.

Berdasarkan landasan teoritis tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi dan menemukan desain geometri venturi yang paling efektif untuk diaplikasikan sebagai media uji visualisasi kerataan aliran pada rancangan *cone muffler* DOC. Pemanfaatan tabung venturi dalam studi ini difungsikan untuk menghisap dan mendistribusikan medium asap dari *dry ice* secara presisi agar profil kerataan aliran gas pada *muffler* dapat diamati secara visual. Evaluasi kinerja difokuskan pada pengujian komparatif dari kombinasi tiga variasi sudut *konvergen* (25°, 37,5°, dan 45°) serta dua variasi sudut divergen (11° dan 15°), dengan mempertahankan ukuran diameter *throat* secara konstan pada 11,8 mm. Tolok ukur utama yang dianalisis mencakup parameter *throat mass flow* di bagian *throat* dan nilai *velocity* absolut pada sisi keluaran. Guna memastikan keandalan hasil, pendekatan penelitian ini memadukan verifikasi numerik melalui CFD dan validasi eksperimental menggunakan purwarupa venturi yang difabrikasi melalui teknologi pencetakan 3D berbahan dasar PLA.

2. Metodologi

2.1 Perancangan dan fabrikasi venturi

Geometri 3D dari enam variasi tabung Venturi dibuat menggunakan perangkat lunak AutoCAD. Proses *lofting* dilaksanakan dengan peralihan yang lancar antara *inlet*, *throat*, dan *outlet*. Diameter *throat* ditentukan dengan memperluas rumus Bernoulli sesuai dengan referensi dari literatur [5], [6], menggunakan persamaan (1).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (1)$$

Sementara itu, penentuan kondisi turbulensi aliran dihitung dengan menggunakan parameter empiris *Reynolds Number* sesuai dengan persamaan (2), [7].

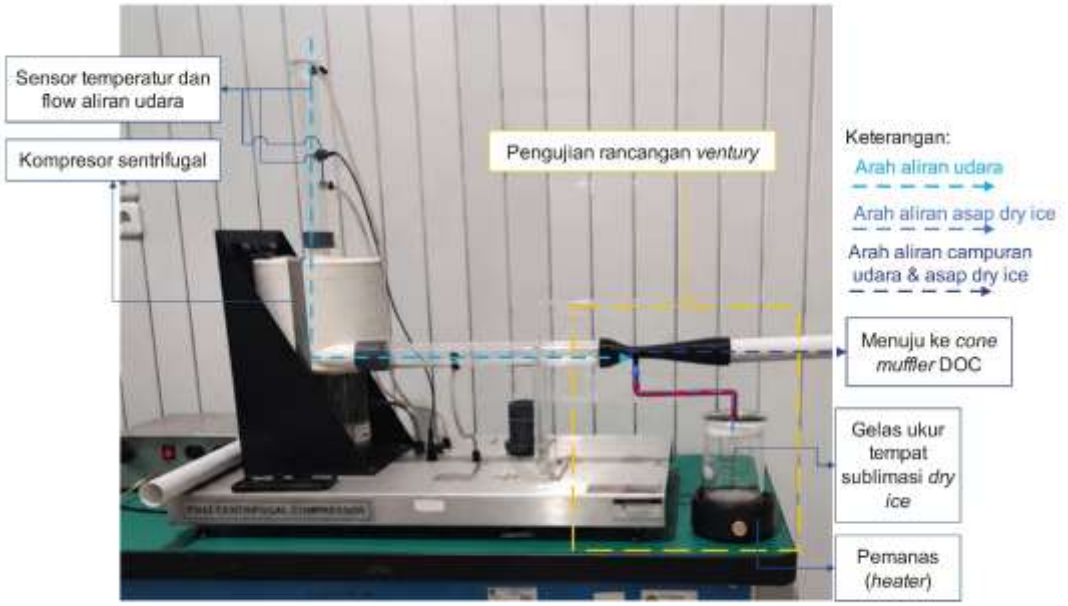
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Hasil rancangan dari *software* CAD selanjutnya divalidasi dengan simulasi CFD *SimScale* yang menggunakan pemodelan aliran turbulen k-omega SST, dinilai tepat untuk memodelkan *adverse pressure gradient* pada venturi [10]. Venturi hasil rancangan selanjutnya diproduksi menggunakan teknik pencetakan 3D merk Creality dengan bahan polimer PLA, di mana proses pemotongan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Creality Print*. Parameter cetak disesuaikan dengan tinggi lapisan 0,2 mm, *infill* 30%, *wall*

loops 2 lapis, dan suhu nosel 200 °C, berdasarkan pada standar fabrikasi dalam penelitian pencampuran multifase [11]. Pipa hisap berukuran 60 mm dengan diameter setengah dari diameter *Throat* dipasang sejajar dengan area penampang terkecil venturi, mengacu pada desain konfigurasi Thompson [12].

2.2 Pengujian eksperimental

Pengujian eksperimental dilakukan menggunakan instalasi alat uji hidrodinamika gas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem ini secara khusus dirancang untuk menyimulasikan aliran fluida dan mengevaluasi efektivitas daya hisap dari berbagai variasi rancangan geometri tabung venturi. Sistem beroperasi dengan memanfaatkan suplai udara utama yang ditiupkan oleh kompresor sentrifugal dengan model FM42. Udara ditarik melalui pipa saluran masuk yang telah diintegrasikan dengan instrumen pembacaan berupa sensor temperatur dan sensor laju aliran. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa *boundary conditions* fluida udara yang masuk dapat dipantau dan direkam secara presisi. Udara bertekanan tersebut kemudian disalurkan secara horizontal melewati instalasi pipa transparan menuju ke *test section* tempat purwarupa venturi dipasang. Sebagai media *visual tracer*, pengujian ini memanfaatkan asap pekat yang dihasilkan dari proses sublimasi *dry ice* yang ditempatkan di dalam sebuah gelas ukur yang diposisikan di atas bantalan *heater* guna menstabilkan dan mempercepat laju sublimasi fluida visualisasi.



Gambar 1. Skema instalasi pengujian eksperimental rancangan venturi menggunakan metode visualisasi sublimasi *dry ice*

Proses injeksi asap ke dalam sistem mengandalkan pemanfaatan *Venturi Effect* murni tanpa bantuan pompa tambahan. Ketika aliran udara utama dari kompresor melewati bagian *throat* venturi yang menyempit, *velocity* aliran akan meningkat secara drastis sehingga menciptakan zona tekanan statis yang *vacuum*. Zona tekanan rendah ini akan menghisap asap *dry ice* dari gelas ukur untuk naik masuk ke dalam *throat* venturi. Keefektifan venturi, diukur dari kecepatan penurunan volume dalam gelas ukur yang berisi asap hasil sublimasi 400 gram *dry ice* dalam 400 ml air panas (90 °C) [13], [14]. Gelas ukur ditutup rapat dengan menggunakan komponen penutup *3D printing* untuk mengurangi kebocoran uap sebelum dihisap oleh venturi. Asap tersebut kemudian bercampur secara

dinamis dengan aliran udara utama dan didorong keluar menuju penampang *cone muffler* DOC. Campuran udara dan asap inilah yang selanjutnya digunakan untuk mengamati secara visual profil kerataan distribusi aliran yang memasuki area *honeycomb* pada sistem DOC.

Uji coba dilaksanakan dengan variasi daya kompresor sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100% yang diatur melalui *Variable Speed Drive* (VSD). Uji coba dilaksanakan selama 1 menit per siklus, dengan 4 kali pengulangan. Parameter operasional utama untuk setiap pengujian ditampilkan dalam Tabel 1. Selisih berat pada gelas beker diukur dengan timbangan digital (akurasi 0,1 gram) guna menentukan aliran massa *Throat*. *Velocity* maksimal diukur dengan menempatkan anemometer di sisi keluaran *divergen*.

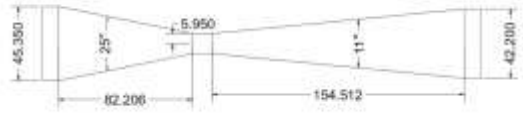
Tabel 1. Parameter operasional pengujian venturi

Keterangan Operasional	Nilai / Spesifikasi
Diameter *Inlet* Venturi	45,35 mm
Diameter *Throat* Venturi	11,8 mm
Diameter *Outlet* Venturi	42,2 mm
Suhu Udara Kompresor	32 °C
Suhu Air Panas	90 °C
Debit *Discharge* (Tanpa Venturi)	5,8 l/s (25%), 10,5 l/s (50%), 15,3 l/s (75%), 20,7 l/s (100%)

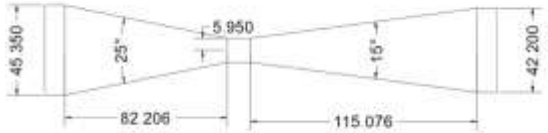
3. Hasil

3.1 Hasil rancangan geometri venturi

Hasil rancangan CAD dari enam variasi tabung venturi dibuat menggunakan perangkat lunak AutoCAD, ditampilkan secara berurutan pada Gambar 2 sampai Gambar 7. Diameter *Throat* ditentukan menggunakan persamaan (1).



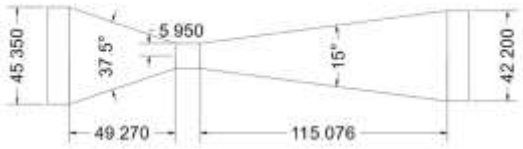
Gambar 2. Dimensi tabung venturi dengan sudut *konvergen* 25° dan *divergen* 11°



Gambar 3. Dimensi tabung venturi dengan sudut *konvergen* 25° dan *divergen* 15°



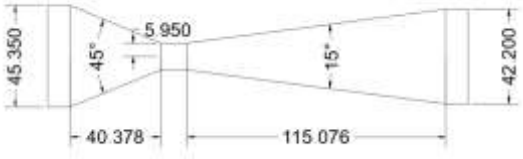
Gambar 4. Dimensi tabung venturi dengan sudut *konvergen* 37,5° dan *divergen* 11°



Gambar 5. Dimensi tabung venturi dengan sudut *konvergen* 37,5° dan *divergen* 15°



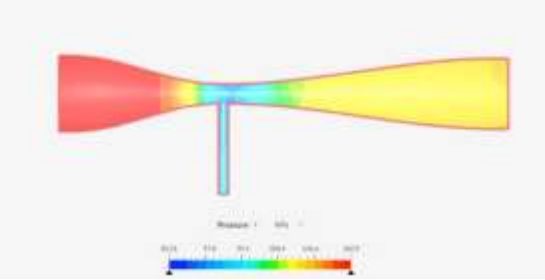
Gambar 6. Dimensi tabung venturi dengan sudut *konvergen* 45° dan *divergen* 11°



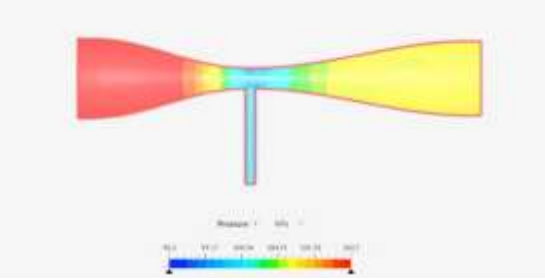
Gambar 7. Dimensi tabung venturi dengan sudut *konvergen* 45° dan *divergen* 15°

3.2 Hasil simulasi CFD

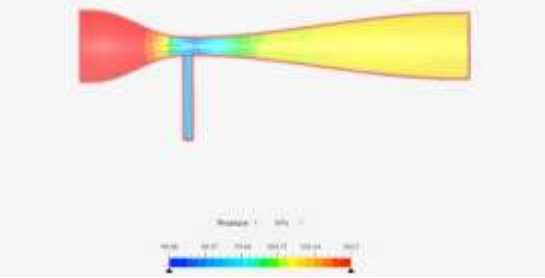
Hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) SimScale yang menggunakan pemodelan aliran turbulen k-omega SST, untuk enam variasi dapat dilihat pada Gambar 8 sampai Gambar 13.



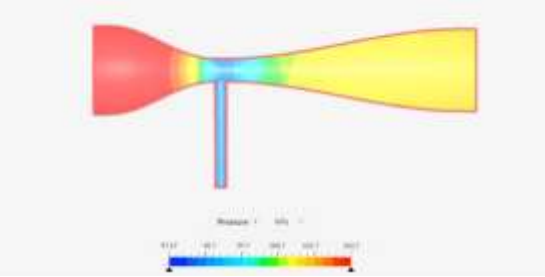
Gambar 8. Hasil simulasi CFD pada tabung venturi sudut *konvergen* 25° dan *divergen* 11°



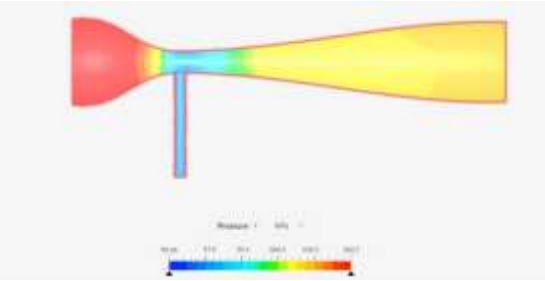
Gambar 9. Hasil simulasi CFD pada tabung venturi sudut *konvergen* 25° dan *divergen* 15°



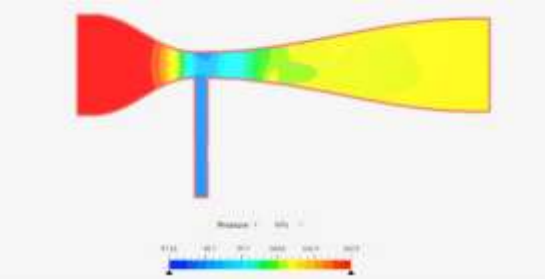
Gambar 10. Hasil simulasi CFD pada tabung venturi sudut *konvergen* 37,5° dan *divergen* 11°



Gambar 11. Hasil simulasi CFD pada tabung venturi sudut *konvergen* 37,5° dan *divergen* 15°



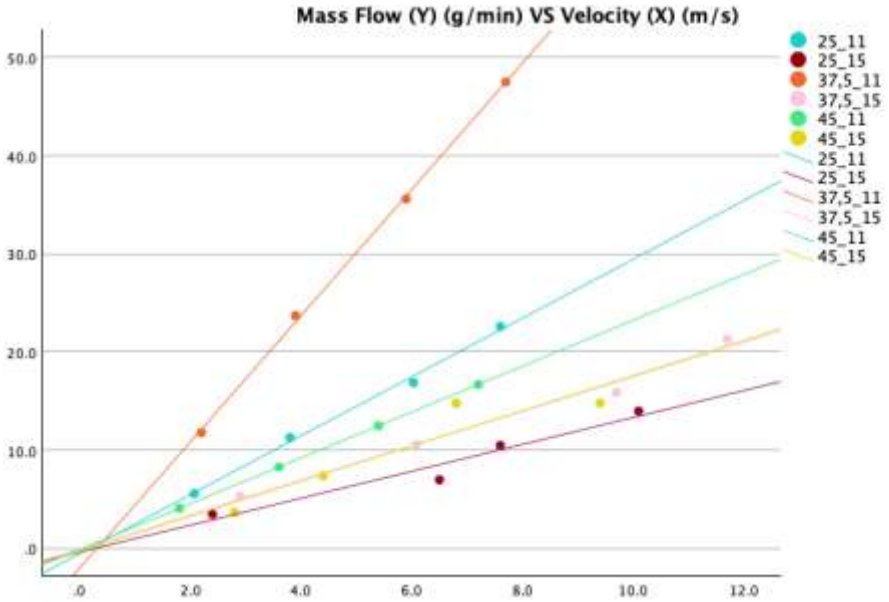
Gambar 12. Hasil simulasi CFD pada tabung venturi sudut *konvergen* 45° dan *divergen* 11°



Gambar 13. Hasil simulasi CFD pada tabung venturi sudut *konvergen* 45° dan *divergen* 15°

3.3 Hasil pengujian eksperimental

Hasil uji performa enam konfigurasi venturi hasil fabrikasi, yang dilakukan di dalam instalasi pengujian pada Gambar 1, menunjukkan deviasi yang signifikan pada daya hisap cairan dan nilai velocity ditunjukkan secara grafis pada Gambar 14. Legenda pada Gambar 14 ditulis dengan format konvergen_divergen, yaitu sudut konvergen diikuti oleh sudut divergen dalam satuan derajat. Dengan demikian, 25_11 menyatakan venturi dengan sudut konvergen 25° dan divergen 11°; 25_15 menyatakan sudut konvergen 25° dan divergen 15°; 37,5_11 menyatakan sudut konvergen 37,5° dan divergen 11°; 37,5_15 menyatakan sudut konvergen 37,5° dan divergen 15°; 45_11 menyatakan sudut konvergen 45° dan divergen 11°; serta 45_15 menyatakan sudut konvergen 45° dan divergen 15°. Enam entri legenda yang pertama menunjukkan titik data hasil pengujian pada setiap kombinasi sudut, sedangkan enam entri berikutnya menunjukkan garis tren linear dari masing-masing kombinasi tersebut. Sumbu horizontal menyatakan *velocity* (m/s) dan sumbu vertikal menyatakan *throat mass flow* (g/min).



Gambar 14. Grafik perbandingan *throat mass flow* dan *velocity* pada berbagai variasi sudut venturi

Berdasarkan data yang terkumpul, tabung Venturi dengan geometri sudut *konvergen* 37,5° dan sudut *divergen* 11° berhasil mencatatkan *throat mass flow* tertinggi, yaitu mencapai 47,3 g/min. Profil aliran yang melalui penampang sempit ini diidentifikasi sebagai aliran turbulen dengan *Reynolds Number* sebesar 5648,9. Sebaliknya, performa *throat mass flow* terendah tercatat pada variasi sudut *konvergen* 25° dan sudut *divergen* 15°, di mana *throat mass flow* yang dihasilkan hanya mencapai 3,5 g/min dengan pola aliran yang cenderung laminar dengan *Reynolds Number* sebesar 1760,6.

Dalam hal pengukuran anemometer, *velocity* linear tertinggi dicapai pada pengaturan tabung Venturi dengan sudut *konvergen* 37,5° dan sudut *divergen* 15°. Pengaturan ini menghasilkan *velocity* absolut sebesar 11,7 m/s dengan aliran yang turbulen dan *Reynolds Number* sebesar 8583,4. *Velocity* keluaran terendah teramati pada variasi geometri sudut *konvergen* 45° dan sudut *divergen* 11°, yang hanya menghasilkan *velocity* sebesar 1,8 m/s ini diidentifikasi sebagai aliran laminar dengan *Reynolds Number* sebesar 1320,5.

4. Analisis & Pembahasan

Penemuan keunggulan kinerja pada sudut konvergen 37,5° ini sesuai dengan hasil simulasi teoritis yang diajukan oleh Alili dkk. [3], dimana perubahan pada rentang sudut ini bisa menekan gelombang kejut dengan efektif dan memicu koefisien dorong maksimum. Perbedaan derajat kelebaran sudut divergen secara langsung memengaruhi pola pengembangan fluida setelah melewati area *suction*. Pada bagian konvergen, aliran dipercepat dengan gradien tekanan *favorable* sehingga lapisan batas tetap menempel pada dinding. Perbedaan performa ditentukan di bagian divergen, tempat terbentuknya *adverse pressure gradient* (APG) akibat pemulihan tekanan. Sudut *divergen* 11° menghasilkan APG yang moderat sehingga aliran cenderung tetap menempel, *pressure recovery* efisien, dan tekanan statis *throat* tetap rendah. Kondisi ini memperbesar perbedaan tekanan yang menarik medium asap *dry ice.*

Sebaliknya, sudut *divergen* 15° menghasilkan APG yang lebih curam sehingga lapisan batas berpotensi *flow separation*, membentuk zona resirkulasi, dan menurunkan *pressure recovery*. Namun, ekspansi yang lebih cepat tetap menjaga kecepatan aliran inti menuju penampang *cone.* Dugaan separasi pada 15° bersifat

inferensial dan belum dikonfirmasi secara langsung.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, variasi geometri sudut konvergen dan divergen pada tabung Venturi berpengaruh signifikan terhadap kemampuan sistem menghasilkan efek *suction* dan mempercepat laju aliran fluida. Kombinasi konvergen 37,5° dan divergen 11° menghasilkan *throat mass flow* tertinggi dan paling optimal untuk kebutuhan *suction* pada visualisasi aliran *muffler Diesel Oxidation Catalyst* (DOC). Kombinasi *konvergen* 37,5° dan *divergen* 15° lebih direkomendasikan bila *velocity* maksimal menjadi prioritas, dengan konsekuensi rugi tekanan lebih besar. Pada riset mendatang, rentang sudut *konvergen* dan *divergen* perlu diperluas, termasuk sudut di antara 11° dan 15°, serta divalidasi melalui visualisasi aliran atau CFD untuk memastikan posisi dan tingkat separasi.

Daftar Pustaka

[1] "What Are the Common Applications of Venturi Tubes?" Accessed: Jul. 30, 2026. [Online]. Available: https://flowell.net/what-are-the-common-applications-of-venturi-tubes

[2] "The Venturi Effect explained." Accessed: Jul. 30, 2026. [Online]. Available: https://mechanical-engineering.com/the-venturi-effect-explained/

[3] N. Alili, K. Kaddouri, S. Mokadem, and A. Alami, "Numerical Analysis of Konvergen-Divergen Angles and Operating Conditions Impact on Rocket Nozzle Performance Parameters," *INCAS BULLETIN*, vol. 16, pp. 3–14, Mar. 2024, doi: 10.13111/2066-8201.2024.16.1.1.

[4] Z. A. Khan and N. Jain, "Optimization of konvergen angle of the Venturi meter for best coefficient of discharge," *Water Supply*, vol. 22, no. 12, pp. 9023–9040, Dec. 2022, doi: 10.2166/ws.2022.381.

[5] R. Qin and C. Duan, "The principle and applications of Bernoulli equation," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Oct. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/916/1/012038.

[6] P. R. Shinde *et al.*, "Modelling and Simulation of Venturi Parameters in Relation to Geometries and Discharge Coefficient with Computational Fluid Dynamics Technique," May 05, 2020. [Online]. Available: www.ijert.org

[7] Yunus A. Cengel and John M. Cimbala, "Fluid Mechanics : Fundamentals and Applications," 2006, *New York*.

[8] "Air Viscosity: Dynamic and Kinematic Viscosity at Various Temperatures and Pressures," The Engineering ToolBox. Accessed: Jul. 30, 2026. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html#gsc.tab=0

[9] "Air Density, Specific Weight, and Thermal Expansion Coefficients at Varying Temperatures and Pressures," The Engineering ToolBox. Accessed: Jul. 30, 2026. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html#gsc.tab=0

[10] N. Nadumaran, E. A. Alias, M. H. Hamidi, and N. H. Johari, "Effect of divergen angle and water flowrate on mean bubble size in venturi-type generator: An experimental and computational approach," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, pp. 10667–10675, Jun. 2025, doi: 10.15282/jmes.19.2.2025.8.0836.

[11] K. A. Thompson, "Venturi Meter: Design, Simulate, and Test," Jun. 2022, *Minnesota*. [Online]. Available: www.slayte.com

[12] T. S. Kuntzleman, N. Ford, J. H. No, and M. E. Ott, "A molecular explanation of how the fog is produced when dry ice is placed in water," Apr. 14, 2015, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/ed400754n.

[13] Y. Kobayashi, K. Lenz, T. Ito, Y. Takeshima, and T. Kikuchi, "Sublimation of Dry Ice in Water and Visual Simulation of Fog," Mar. 05, 2025.

[14] T. Belhadad, A. Kanna, T. El Rhafiki, and N. E. El Kadri Elyamani, "CFD Validation of Wall Laws in K-ω SST Model for Adverse Pressure Gradient-Free Downward Flow," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202346900081.

Daftar Simbol

P_1	=	Tekanan statis pada titik 1 (*inlet*), Pa
P_2	=	Tekanan statis pada titik 2 (*throat*), Pa
ρ	=	Densitas udara, kg/m^3
v_1	=	*Velocity* fluida pada titik 1, m/s
v_2	=	*Velocity* fluida pada titik 2, m/s
g	=	Percepatan gravitasi, m/s^2
h_1	=	Ketinggian atau elevasi pada titik 1, m
h_2	=	Ketinggian atau elevasi pada titik 2, m
Re	=	Angka Reynolds, tak berdimensi
D	=	Diameter penampang (*throat* / pipa), m
μ	=	Viskositas dinamis, Ns/m^2