

KAJIAN KOMPUTASI DAN EKSPERIMENTAL PENGARUH KONTROL AKTIF TERHADAP HAMBATAN AERODINAMIKA MODEL KENDARAAN

**Wawan Rauf¹, Mohamad Rifal², Rahmad Hidayat Boli³*

^{1,2,3}Fakultas Teknik, Universitas Gorontalo, Indonesia

** wawanrauf241193@yahoo.com, rh668132@gmail.com, rivalr48@gmail.com*

Abstrak: Kajian Komputasi dan Eksperimental Pengaruh Kontrol Aktif terhadap Hambatan Aerodinamika Model Kendaraan. Dinamika aliran udara sangat dipengaruhi oleh pembentukan separasi di sekitar bodi kendaraan. Separasi aliran menjadi pemicu perbedaan tekanan yang signifikan antara sisi depan dan belakang sehingga muncul efek tarikan ke arah belakang sebagai kontributor utama besarnya hambatan aerodinamika yang diterima kendaraan. Penelitian ini fokus pada kajian hambatan aerodinamika dengan memperhatikan karakteristik pola aliran yang terbentuk dan distribusi tekanan pada dinding belakang model kendaraan melalui metode simulasi komputasi dan eksperimental laboratorium. Kontrol aktif tiupan ditempatkan pada sisi atas dinding belakang Ahmed model dan diatur pada kecepatan 1.5 m/s. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan kontrol aktif tiupan pada sisi belakang mampu menunda separasi, meningkatkan koefisien tekanan, dan mengurangi hambatan aerodinamika model kendaraan.

Kata kunci: Karakteristik Aliran; Koefisien Tekanan; Hambatan Aerodinamika

Abstract: Computational and Experimental Studies of the Effect of Active Control on Aerodynamic Drag of Vehicle Models. The dynamics of air flow is strongly influenced by the formation of separations around the vehicle body. The flow separation triggers a significant pressure difference between the front and rear sides so that a rearward pull effect appears as the main contributor to the amount of aerodynamic drag received by the vehicle. This research focuses on the study of aerodynamic resistance by paying attention to the characteristics of the flow pattern formed and the pressure distribution on the rear wall of the vehicle model through computational simulation methods and laboratory experiments. The blowing active control is located on the upper side of the back wall of the Ahmed model and is set at a speed of 1.5 m/s. The results show that the use of blowing active control on the rear side is able to delay separation, increase the pressure coefficient, and reduce the aerodynamic drag of the vehicle model.

Keywords: Flow Characteristics; Pressure Coefficient; Aerodynamics Drag

History & License of Article Publication:

Received: 17/06/2022 Revision: 26/07/2022 Published: 01/07/2022

DOI: <https://doi.org/10.37971/radial.v10i1.268>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Dinamika aliran udara sangat dipengaruhi oleh pembentukan separasi di sekitar bodi kendaraan. Separasi aliran ini menghasilkan struktur pusaran pada sisi belakang sehingga mempengaruhi performa kendaraan saat melaju (Prمود & Krishnani, 2009). Salah satu

struktur dimaksud berupa pusaran longitudinal yang berkontribusi 20% dari total hambatan aerodinamika. Pusaran longitudinal terjadi akibat perbedaan kecepatan aliran antara sisi tengah dan samping bagian belakang kendaraan (Achmad Kosasih et al., 2012). Hal ini merupakan pemicu perbedaan tekanan yang signifikan antara sisi depan dan belakang sehingga muncul efek tarikan ke arah belakang sebagai kontributor utama besarnya hambatan aerodinamika yang diterima kendaraan.

Kajian pengurangan hambatan aerodinamika sangat penting dilakukan mengingat besarnya dampak terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang yang berbahaya. Total kerugian energi bahan bakar akibat hambatan aerodinamika kendaraan tersebut mencapai 50-60% (Rakibul Hassan et al., 2014). Upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut berupa minimalisasi tekanan negatif pada dinding belakang melalui penundaan separasi. Dengan mengurangi hambatan 2-3%, kendaraan mengalami penghematan konsumsi bahan bakar sebanyak 700-1000 liter per tahun (Kumar B et al., 2021).

Melalui berbagai penelitian telah ditemukan bahwa titik awal separasi aliran dengan intensitas besar terjadi pada sisi atas bagian belakang kendaraan (Gilliéron & Kourta, 2010). Penundaan separasi dapat diperoleh melalui modifikasi aliran pada daerah awal munculnya separasi tersebut melalui penerapan kontrol aktif aliran berupa tiupan.

Tarakka *dkk* meneliti terkait pengaruh penerapan kontrol aktif blowing terhadap aerodinamika model kendaraan melalui pendekatan komputasi dan eksperimental. Penelitian menggunakan modifikasi Ahmed model dengan kemiringan kaca depan 25°. Kontrol aktif diletakkan pada sisi atas bagian belakang dengan kecepatan tiupan 1.0 m/s. Untuk pendekatan komputasi, model turbulensi yang digunakan masing-masing k-epsilon standar, k-epsilon realizable, k-omega standar, dan k-omega SST. Hasil penelitian menunjukkan terjadi pengurangan hambatan aerodinamika pada semua model turbulensi. Masing-masing dituliskan 11.15% untuk k-epsilon standar, 9.01% untuk k-epsilon realizable, 8.85% untuk k-omega standar, dan 11.98% untuk model turbulensi k-omega SST. Validasi pengujian eksperimental memberikan pengurangan hambatan aerodinamika sebesar 9.56% (Tarakka et al., 2015).

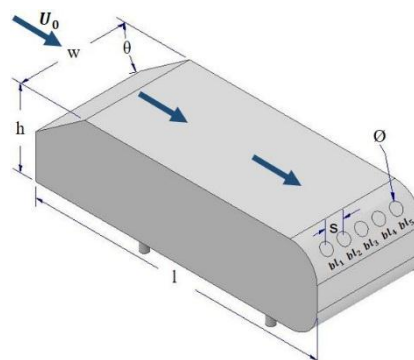
Wassen & Thiele melakukan penelitian terkait pengaruh penerapan kombinasi kontrol aktif suction dan blowing terhadap Ahmed model yang memiliki kemiringan geometri depan 25°. Riset menggunakan pendekatan komputasi numerik dengan model turbulensi Large Eddy. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan tekanan rata-rata, area separasi aliran berkurang secara signifikan, dan reduksi hambatan aerodinamika sebesar 9.4% (Wassen & Thiele, 2009).

Pengujian aerodinamika model kendaraan secara eksperimental memanfaatkan terowongan angin dilakukan Geropp & Odenthal. Model kendaraan dilengkapi dengan kontrol aliran berupa blowing yang diletakkan pada sisi belakang. Hasil penelitian menyimpulkan terjadi peningkatan tekanan dasar hampir 50%, hilangnya daerah resirkulasi, dan total reduksi hambatan aerodinamika sebesar 10% (Geropp & Odenthal, 2000).

Harinaldi dkk meneliti tentang pengaruh pengaplikasian kontrol aktif separasi aliran dengan teknik tiupan terhadap hambatan aerodinamika model Ahmed yang dimodifikasi. Penelitian menggunakan pendekatan simulasi numerik dengan model turbulensi k-epsilon standar dan hasilnya divalidasi dengan pengujian eksperimental laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan terjadi pengurangan hambatan aerodinamika sebesar 13.92% untuk pendekatan komputasi dan 11.11% untuk pendekatan eksperimental (Harinaldi et al., 2013).

METODE

Jenis model uji yang digunakan adalah Ahmed body yang dimodifikasi arah alirannya. Model tersebut diyakini memiliki kemiripan dengan mobil keluarga sebagai reverensi utama. Dimensi model uji diskalakan 1:6 terhadap Ahmed body sesungguhnya dengan kemiringan geometri depan, $(\theta) = 35^\circ$. Dimensi model dituliskan, panjang (l) = 174 mm, tinggi (h) = 48 mm, dan lebar (w) = 64.83 mm. Kontrol aktif separasi aliran berbentuk lingkaran diletakkan pada sudut atas bagian belakang model. Posisi kontrol aktif disusun secara horizontal sebanyak 5 lingkaran, dimana masing-masing berdiameter, $(\varnothing) = 7$ mm dan jarak antar lingkaran, $(s) = 10.81$ mm. Secara berurutan setiap lingkaran didefinisikan sebagai blowing 1 (bl_1), blowing 2 (bl_2), blowing 3 (bl_3), blowing 4 (bl_4), dan blowing 5 (bl_5). Kecepatan blowing ditentukan $U_{bl} = 1.5$ m/s dan kecepatan upstream $U_{0_1} = 11.1$ m/s, $U_{0_2} = 13.9$ m/s, dan $U_{0_3} = 16.7$ m/s. Sehingga perbandingan kecepatan blowing terhadap kecepatan upstream didefinisikan $U_{bl}/U_{0_1} = 0.14$, $U_{bl}/U_{0_2} = 0.11$, $U_{bl}/U_{0_3} = 0.09$. Model uji ditampilkan pada gambar 1.



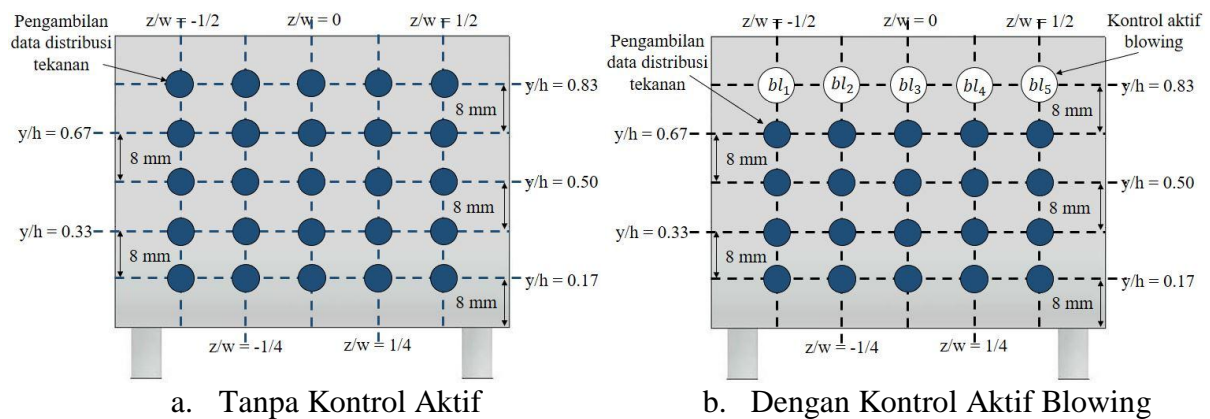
Sumber: Hasil desain model uji
Gambar 1. Model uji

Penelitian difokuskan pada tiga aspek utama berupa dinamika aliran udara yang melewati bagian belakang, distribusi tekanan pada dinding belakang model kendaraan (C_p), dan hambatan aerodinamika (C_d) baik model tanpa kontrol aktif maupun model dengan penerapan kontrol aktif blowing. Untuk aspek dinamika aliran dan distribusi tekanan, hasil yang ditampilkan berupa simulasi numerik. Khusus untuk data hambatan aerodinamika, hasil komputasi numerik divalidasi dengan pengujian eksperimental laboratorium.

Riset sebelumnya menunjukkan bahwa daerah separasi aliran yang berkontribusi besar terhadap total hambatan aerodinamika berada pada sisi atas bagian belakang

kendaraan (Rauf et al., 2020). Separasi aliran tersebut menciptakan aliran balik sehingga muncul tekanan negatif pada dinding belakang yang berkontribusi 80% dari total hambatan aerodinamika kendaraan (Nizam Sudin et al., 2014). Hal ini menjadi alasan utama penempatan kontrol aktif blowing pada daerah awal terjadinya separasi aliran.

Pengambilan data distribusi tekanan untuk masing-masing model ditentukan sebanyak 25 titik untuk model tanpa kontrol dan 20 titik untuk model dengan penerapan kontrol aktif blowing. Perbandingan lebar grid terhadap lebar model didefinisikan sebagai $z/w = -1/2$, $z/w = -1/4$, $z/w = 0$, $z/w = 1/4$, dan $z/w = 1/2$. Sedangkan perbandingan tinggi grid terhadap tinggi model ditentukan $y/h = 0.17$, $y/h = 0.33$, $y/h = 0.50$, $y/h = 0.67$, dan $y/h = 0.83$. Titik pengambilan data distribusi tekanan ditampilkan pada gambar 2.

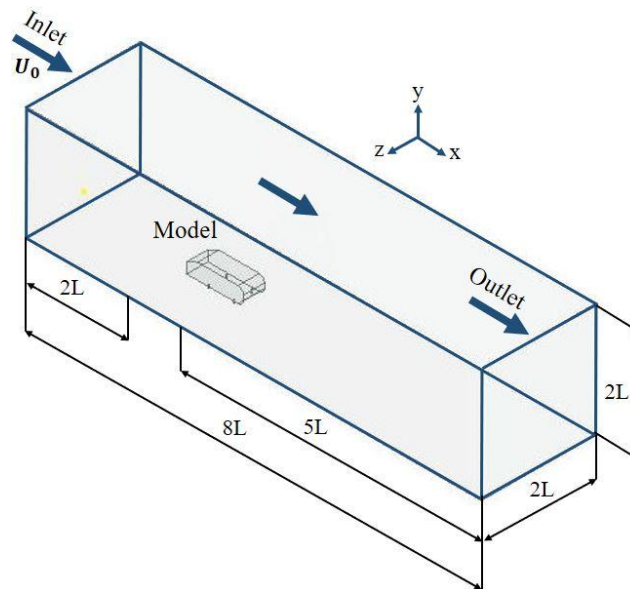


Sumber: Hasil desain model uji
Gambar 2. Lokasi pengambilan data distribusi tekanan

Selanjutnya distribusi tekanan disajikan dalam satuan tak berdimensi (C_p) melalui penggunaan persamaan 1.

$$C_p = \frac{(P - P_0)}{0.5 * \rho * v^2} \quad (1)$$

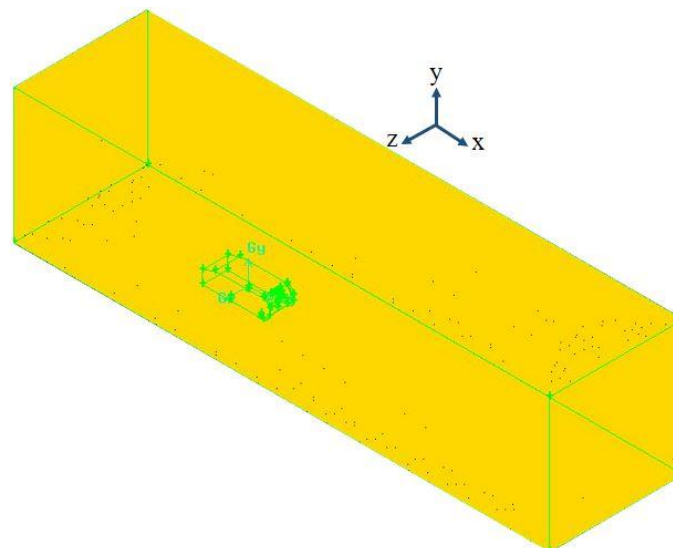
Desain model kendaraan dan pendefinisian ke dalam domain komputasi (terowongan angin) memanfaatkan perangkat autodesk inventor seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.



Sumber. Hasil desain domain komputasi

Gambar 3. Domain komputasi

Selanjutnya proses mesh dan penentuan kondisi batas dilakukan menggunakan perangkat gambit seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Sedangkan proses simulasi numerik memanfaatkan perangkat Computational Fluid Dynamics (CFD).



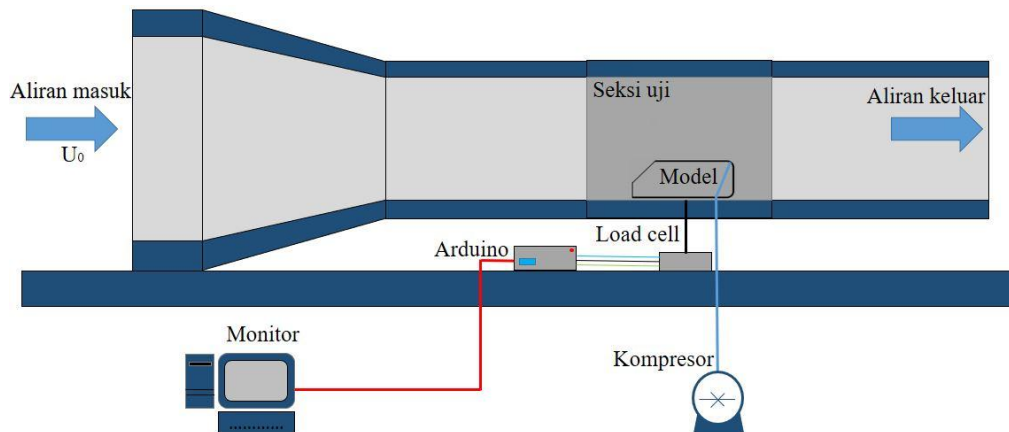
Sumber: Hasil tampilan mesh

Gambar 4. Tampilan mesh

Setelah diperoleh nilai hambatan aerodinamika masing-masing model baik model tanpa kontrol aktif maupun model dengan penerapan kontrol aktif blowing, dilakukan proses validasi melalui pengujian eksperimental dengan memanfaatkan fasilitas terowongan angin yang dilengkapi dengan perangkat load cell dan arduino. Data hambatan aerodinamika (C_d) ditampilkan pada layar monitor melalui format excel. Untuk setiap model, durasi waktu pengujian ditentukan selama 120 detik. Data hambatan yang diperoleh

pun sebanyak 120 data yang kemudian dirata-rata untuk memperoleh nilai hambatan (F_d). Besaran nilai hambatan aerodinamika disajikan dalam bentuk satuan tak berdimensi (C_d) melalui penggunaan persamaan 2 (Alciatore & Anderson :, n.d.). Posisi alat pengujian eksperimental ditampilkan pada gambar 5.

$$C_d = \frac{F_d}{0.5 * \rho * v^2 * A} \quad (2)$$



Sumber: Hasil desain terowongan angin
Gambar 5. Terowongan angin

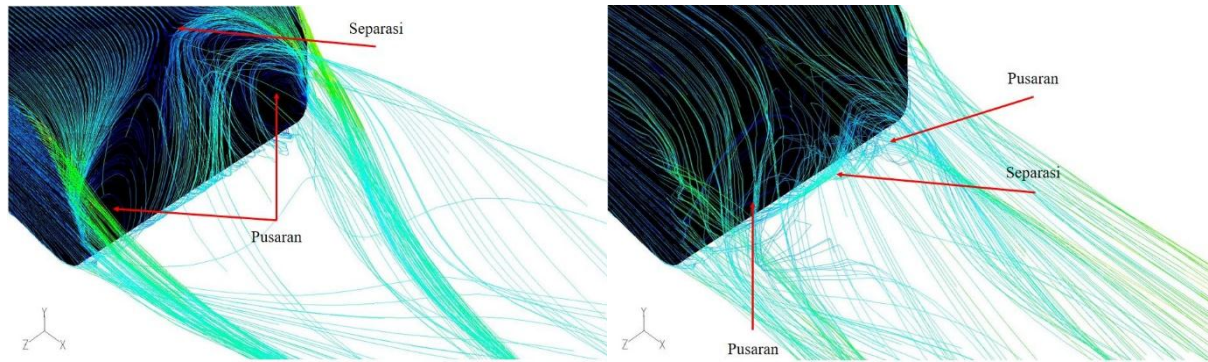
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Aliran

Perbandingan pola aliran udara model tanpa kontrol dan model dengan penerapan kontrol aktif blowing pada sisi belakang model kendaraan pada masing-masing kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s ditampilkan pada gambar 6.

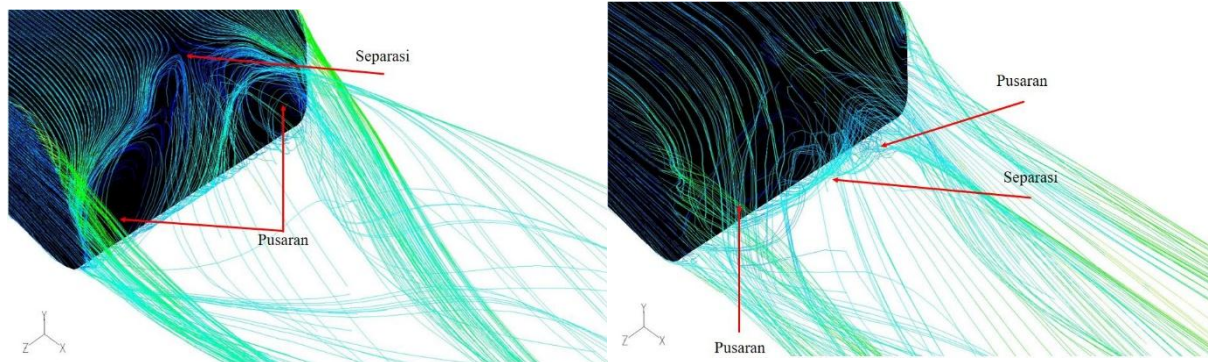
Untuk model tanpa penerapan kontrol aktif, proses separasi aliran terjadi tepat pada dinding bagian belakang model kendaraan. Hal ini terjadi pada semua kecepatan upstream. Aliran udara yang mulanya bergerak secara teratur, mengalami proses separasi pada saat mencapai sisi atas bagian belakang model. Hal ini disebabkan aliran udara tidak mampu mengikuti bentuk geometri belakang model akibat kehilangan energi untuk bergerak. Perlambatan aliran pada sisi tengah menyebabkan terjadi perbedaan kecepatan aliran yang signifikan dengan sisi samping bagian belakang model sehingga aliran terdorong bergerak menuju sisi samping dan membentuk pusaran longitudinal dengan struktur cenderung menempel pada dinding belakang model. Hal ini menjadi pemicu utama munculnya tekanan negatif dan fenomena hisapan kearah belakang.

Untuk model dengan penerapan kontrol aktif blowing, proses separasi mengalami penundaan. Separasi aliran terbentuk pada daerah jauh dari dinding belakang model sehingga terjadi minimalisasi perlambatan aliran. Akibatnya struktur pusaran yang terbentuk semakin kecil dan jauh dari dinding belakang model. Hal ini karena adanya penambahan energi tiupan yang berefek pada peningkatan laju aliran udara. Hasil ini bersesuaian dengan temuan Harinaldi dkk yang mengungkapkan bahwa penggunaan kontrol aktif teknik tiupan memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan pembentukan pusaran (Harinaldi et al., 2013).



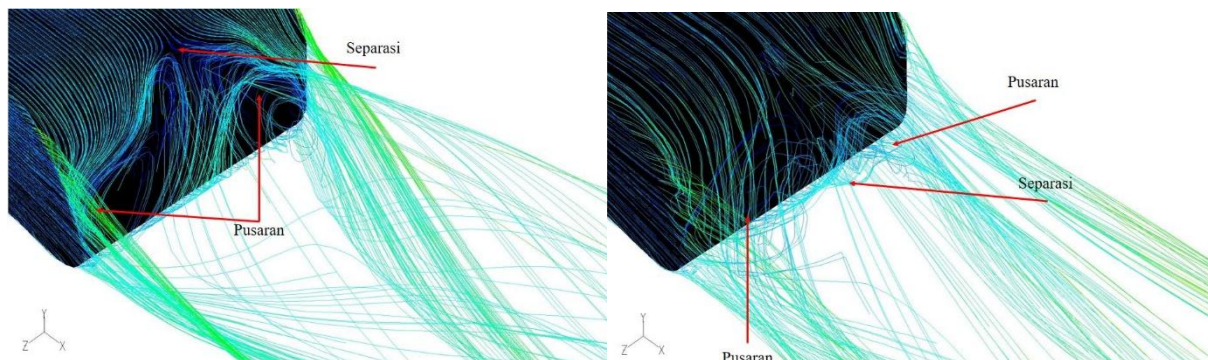
Tanpa Kontrol Aktif Blowing

Dengan Kontrol Aktif Blowing

a. $U_{01} = 11.1$ m/s

Tanpa Kontrol Aktif Blowing

Dengan Kontrol Aktif Blowing

b. $U_{02} = 13.9$ m/s

Tanpa Kontrol Aktif Blowing

Dengan Kontrol Aktif Blowing

c. $U_{03} = 16.7$ m/s

Sumber: Hasil komputasi

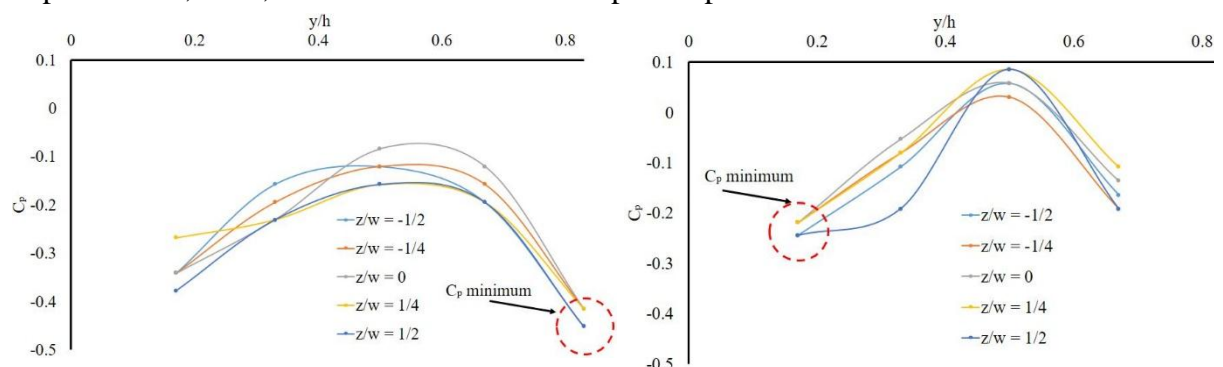
Gambar 6. Pola aliran udara pada sisi belakang model kendaraan

Koefisien Tekanan

Gambar 7 menampilkan distribusi tekanan pada dinding belakang model tanpa kontrol aktif dan model dengan penerapan kontrol aktif blowing pada masing-masing kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s.

Untuk model tanpa kontrol aktif pada semua kecepatan upstream, koefisien tekanan minimum diperoleh pada sisi atas bagian belakang model kendaraan ($y/h=0.83$). Hal ini karena pada posisi tersebut merupakan daerah awal separasi aliran terjadi seperti yang diperlihatkan pada gambar 6. Fenomena tersebut serupa dengan temuan Tarakka dkk yang mengungkapkan bahwa koefisien tekanan cenderung lebih rendah pada daerah aliran terseparasi (Tarakka et al., 2022). Fenomena lain terlihat bahwa pada semua kecepatan upstream untuk setiap model, koefisien tekanan minimum terendah terjadi pada dua sisi samping ($z/w=1/2$ dan $z/w=-1/2$). Hal ini karena pengaruh perbedaan kecepatan aliran antara sisi tengah dan samping hingga membentuk pusaran longitudinal serta tekanan negatif dengan intensitas lebih besar. Rata-rata koefisien tekanan minimum masing-masing kecepatan upstream dituliskan 11.1 m/s sebesar -0.4296, 13.9 m/s sebesar -0.4099, dan 16.7 m/s sebesar -0.3769. Hal tersebut menunjukkan terjadi peningkatan koefisien tekanan minimum rata-rata seiring dengan peningkatan kecepatan upstream.

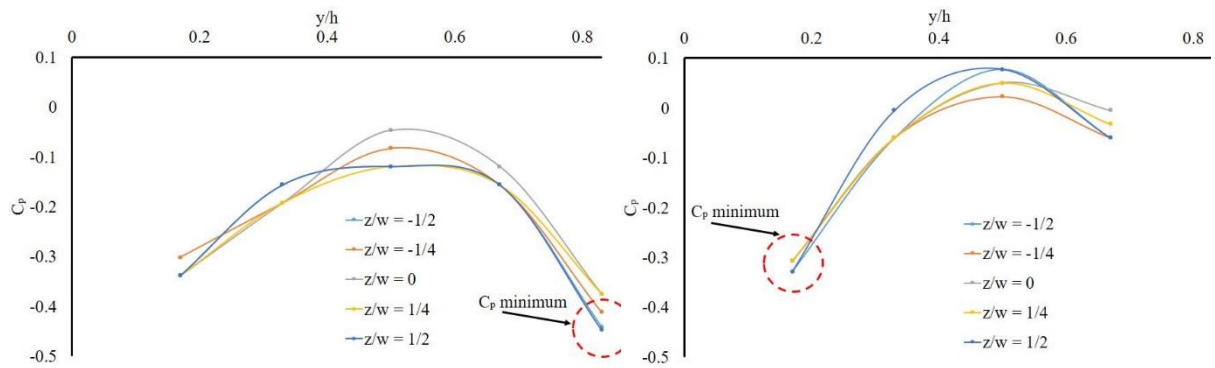
Untuk model dengan pengaplikasian kontrol aktif blowing pada semua kecepatan upstream, koefisien tekanan minimum diperoleh pada sisi bawah bagian belakang model uji ($y/h=0.17$). Ini disebabkan oleh penundaan separasi aliran, dimana proses separasi cenderung menjauh dari dinding belakang model sehingga tekanan negatif yang ditimbulkan oleh aliran balik pada sisi atas dapat diminimalisir. Bergesernya nilai koefisien tekanan minimum ke sisi bawah diakibatkan oleh dinamika aliran pada daerah tersebut. Aliran yang mulanya bergerak lurus secara horizontal mengikuti bentuk model dinding bagian bawah secara teratur yang seharusnya bergerak lurus justru membentuk aliran balik akibat perbedaan kecepatan aliran antara sisi tengah dan bawah dinding belakang model. Aliran balik inilah pemicu tekanan negatif sebagai penyebab utama rendahnya koefisien tekanan pada sisi bawah. Koefisien tekanan minimum rata-rata untuk masing-masing kecepatan upstream dituliskan 11.1 m/s sebesar -0.2294, 13.9 m/s sebesar -0.3160, dan 16.7 m/s sebesar -0.1894. Sehingga dengan demikian terjadi peningkatan koefisien tekanan minimum rata-rata pada semua kecepatan upstream, dimana peningkatan tersebut dituliskan 46.6015% untuk kecepatan upstream 11.1 m/s, 22.9080% untuk kecepatan upstream 13,9 m/s, dan 49.7479% untuk kecepatan upstream 16.7 m/s.



Tanpa Kontrol Aktif Blowing

Dengan Kontrol Aktif Blowing

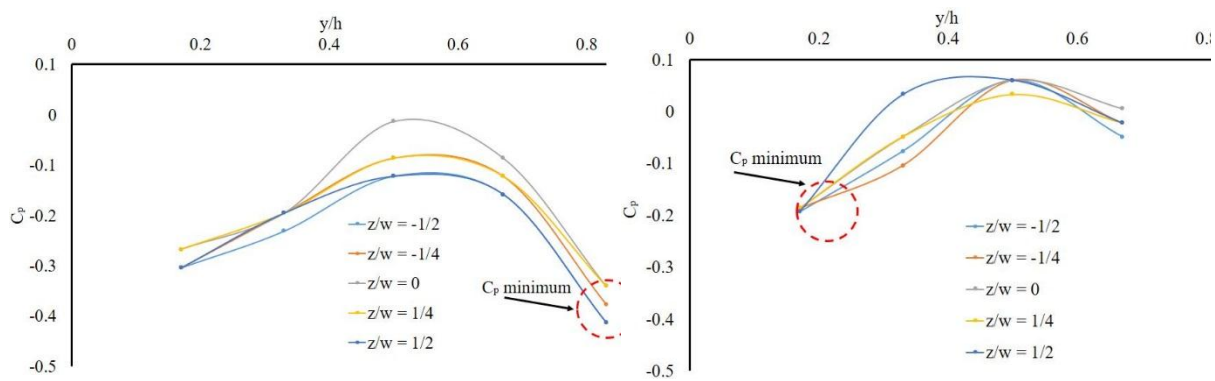
a. $U_{01} = 11.1$ m/s



Tanpa Kontrol Aktif Blowing

Dengan Kontrol Aktif Blowing

b. $U_{02} = 13.9$ m/s



Tanpa Kontrol Aktif Blowing

Dengan Kontrol Aktif Blowing

c. $U_{03} = 16.7$ m/s

Sumber: Hasil pengolahan data Koefisien tekanan

Gambar 7. Perbandingan koefisien tekanan terhadap posisi y/h

Tabel 1. Perbandingan koefisien tekanan minimum rata-rata

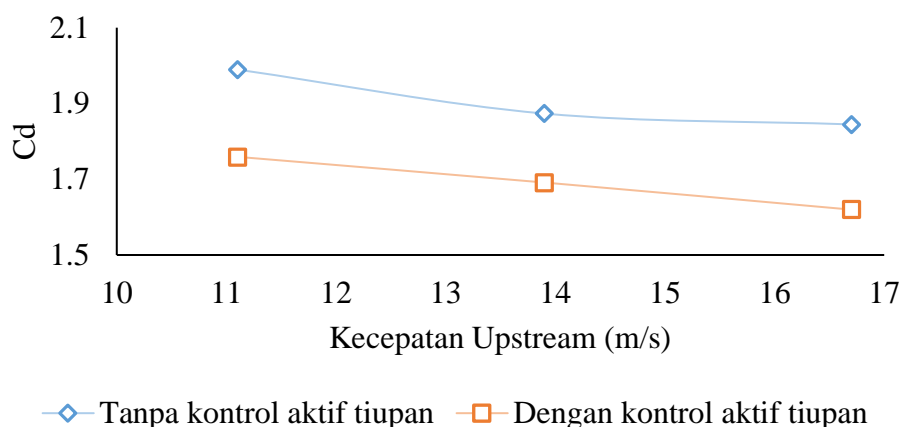
z/w	Cp minimum					
	Tanpa kontrol			Dengan kontrol aktif blowing		
	11.1 m/s	13.9 m/s	16.7 m/s	11.1 m/s	13.9 m/s	16.7 m/s
-1/2	-0.4516	-0.4411	-0.4132	-0.2444	-0.3286	-0.1937
-1/4	-0.4149	-0.4112	-0.3769	-0.2194	-0.3076	-0.1865
0	-0.4149	-0.3747	-0.3405	-0.2194	-0.3076	-0.1865
1/4	-0.4149	-0.3747	-0.3405	-0.2194	-0.3076	-0.1865
1/2	-0.4516	-0.4477	-0.4132	-0.2444	-0.3286	-0.1937
Rata-rata	-0.4296	-0.4099	-0.3769	-0.2294	-0.3160	-0.1894
Peningkatan Cp (%)	-	-	-	46.6015	22.9080	49.7479

(Sumber: Hasil pengolahan data koefisien tekanan)

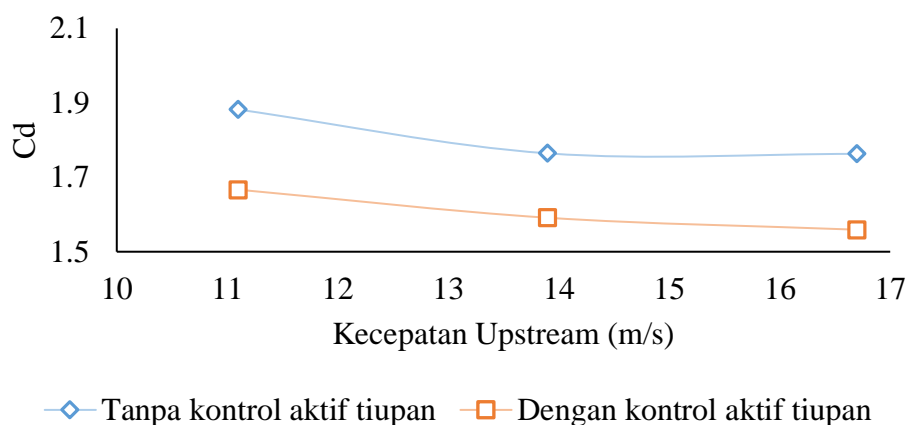
Koefisien Hambatan

Pada metode komputasi, koefisien hambatan (Cd) model tanpa kontrol aktif tiupan didapatkan untuk setiap kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s masing-

masing sebesar 1.9894, 1.8733, dan 1.8446. Sedangkan untuk model dengan penggunaan kontrol aktif tiupan pada sisi belakang model kendaraan diperoleh koefisien hambatan sebesar 1.7591, 1.6913, dan 1.6198. Sedangkan untuk metode eksperimental laboratorium, koefisien hambatan model tanpa penerapan kontrol aktif tiupan untuk setiap kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s masing-masing diperoleh 1.8818, 1.7642, dan 1.7627. Sedangkan untuk model dengan penerapan kontrol aktif tiupan masing-masing diperoleh 1.6666, 1.5912, dan 1.5590.



a. Komputasi



b. Eksperimental

Sumber: Hasil pengolahan data koefisien hambatan

Gambar 8. Koefisien hambatan metode komputasi dan eksperimental

Tabel 2. Presentase pengurangan hambatan (Cd)

Kecepatan Upstream, U_0 (m/s)	Pengurangan Hambatan (%)	
	Komputasi	Eksperimental
11.1	11.5747	11.4390
13.9	9.7171	9.8106
16.7	12.1872	11.5559

Sumber: Hasil pengolahan data koefisien hambatan

Dengan demikian baik metode komputasi maupun eksperimental terjadi pengurangan koefisien hambatan. Pengurangan koefisien hambatan untuk metode komputasi pada masing-masing kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s didapatkan sebesar 11.5747%, 9.7171%, dan 12.1872%. Sementara untuk metode eksperimental, pengurangan koefisien hambatan masing-masing kecepatan upstream didapatkan sebesar 11.4390%, 9.8106%, dan 11.5559%. Temuan dalam penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Tarakka dkk yang mengungkapkan bahwa penggunaan kontrol aktif tiupan pada sisi belakang model kendaraan memberikan efek pengurangan hambatan aerodinamika (Tarakka et al., 2022).

KESIMPULAN

Melalui hasil penelitian ini dapat diperoleh kesimpulan bahwa penerapan kontrol aktif tiupan pada sisi belakang model kendaraan dengan kecepatan 1.5 m/s dan kecepatan upstream 11.1 m/s, 13.9 m/s, dan 16.7 m/s mampu menunda proses separasi aliran, meningkatkan koefisien tekanan minimum dinding belakang, dan mengurangi koefisien hambatan. Peningkatan koefisien tekanan tertinggi didapat pada kecepatan upstream 16.7 m/s sebesar 49.7479% serta pengurangan koefisien hambatan tertinggi juga diperoleh pada kecepatan yang sama yaitu sebesar 11.5559%.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad Kosasih, E., Tarakka, R., Pangihutan Simanungkalit, S., & Gusti Made Fredy Lay Teryanto, I. (2012). Modification of flow structure over van model by suction flow control to reduce aerodynamics drag (Vol. 16, Issue 1).
- Alciatore, & Anderson: (n.d.). *McGRAW-HILL Series In Mechanical Engineering Anderson: Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*.
- Geropp, D., & Odenthal, H.-J. (2000). Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect. *Experiments in Fluids* (Vol. 28). Springer-Verlag.
- Gilliéron, P., & Kourta, A. (2010). Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates. *Experiments in Fluids*, 48(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0705-7>
- Harinaldi, H., Budiarto, B., & Pangihutan Simanungkalit, S. (2013). Effect of Active Control by Blowing to Aerodynamic Drag of Bluff Body Van. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.v40.i4>
- Kumar B, R., M, N. V., & T, K. (2021). Aerodynamic design optimization of an automobile car using computational fluid dynamics approach. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 19(5), 495–501. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1654963>
- Nizam Sudin, M., Azman Abdullah, M., Anuar Shamsuddin, S., Redza Ramli, F., & Mohd Tahir, M. (2014). Review of Research on Vehicles Aerodynamic Drag Reduction Methods. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*.
- Pramod, N., & Krishnani, B. S. (2009). CFD Study Of Drag Reduction Of a Generic Sport Utility Vehicle.
- Rakibul Hassan, S. M., Islam, T., Ali, M., & Islam, M. Q. (2014). Numerical study on aerodynamic drag reduction of racing cars. *Procedia Engineering*, 90, 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.854>

- Rauf, W., Tarakka, R., Jalaluddin, J., & Ihsan, M. (2020). Effect of Flow Separation Control with Suction Velocity Variation: Study of Flow Characteristics, Pressure Coefficient, and Drag Coefficient. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 8(3), 142–151. <https://doi.org/10.13189/ujme.2020.080302>
- Tarakka, R., Mire, B., & Noor Umar, M. (2015). Effect of Turbulence Model In Computational Analysis of Active Flow Control on Aerodynamic Drag of Bluff Body Van Model. *International Journal of Applied Engineering Research* (Vol. 10, Issue 1). <http://www.ripublication.com>
- Tarakka, R., Salam, N., Mochtar, A. A., Ihsan, M., & Rauf, W. (2022). Kajian Komputasi Pengaruh Penerapan Blowing pada Bagian Belakang Model Kendaraan. *Semesta Teknika*, 25(1), 33–39. <https://doi.org/10.18196/st.v25i1.13478>
- Wassen, E., & Thiele, F. (2009). Road Vehicle Drag Reduction by Combined Steady Blowing and Suction.