

Studi Numerik Pengaruh Pemasangan Bump Segitiga terhadap Karakteristik Aerodinamika pada Pelat Datar

Bangkit Angestu Aji, Herman Sasongko

Received: 29 May 2025

Accepted: 22 July 2025

Published: 11 November 2025

Keywords:

Pelat datar, Bump,

Turbulen, Studi Numerik

ABSTRAK

Dalam transisi menuju energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, Indonesia menghadapi tantangan kompleks, terutama karena masih bergantung pada energi fosil untuk memenuhi kebutuhan energinya. Ketergantungan ini berdampak pada tingginya konsumsi energi, khususnya di sektor transportasi. Untuk mengurangi konsumsi energi pada sektor ini, diperlukan upaya efisiensi, salah satunya melalui peningkatan performa *aerodinamika* kendaraan. Penelitian di bidang mekanika fluida, khususnya terkait *drag*, *lift*, dan *boundary layer*, menjadi sangat penting dalam konteks ini. Salah satu metode yang digunakan adalah *passive flow control*, seperti modifikasi geometri kendaraan, yang terbukti lebih efisien, berbiaya rendah, dan dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi. Pada penelitian ini, geometri *pelat datar* dimodifikasi dengan penambahan *bump* untuk mengkaji pengaruhnya terhadap karakteristik aliran. Hipotesis awal penelitian ini adalah peletakan *bump* akan mempengaruhi bentuk *separation bubble*, sehingga aliran yang melewati pelat datar akan menjadi turbulen lebih cepat dengan penambahan *bump* dapat menghasilkan *bubble separation* yang meningkatkan momentum aliran, sehingga memperkuat profil momentum dan menunda terjadinya separasi, yang diharapkan dapat mengoptimalkan gaya *drag*. Untuk membuktikan hipotesis di atas maka penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi numerik CFD dengan menambahkan *bump* berbentuk segitiga sama kaki dengan variasi sudut 15° , 30° , 45° , 60° dan juga bilangan Reynold sebesar $2,7 \times 10^3$ dan $4,2 \times 10^3$ pada *pelat datar* untuk mengamati fenomena aliran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan *bump* segitiga menghasilkan perubahan signifikan pada distribusi koefisien tekanan (C_p) dan pola aliran di sekitar pelat datar. Peningkatan sudut *bump* menyebabkan gradien tekanan yang lebih tajam dan pembentukan *separation bubble* yang lebih panjang *bubble* paling tebal berada pada sudut *bump* 60° , 45° , 30° , 15° . Namun timbulnya *bubble* pada pelat datar membuat nilai koefisien *drag* pada pelat datar dengan *bump* lebih tinggi dari pelat datar tanpa *bump*, nilai koefisien *drag* yang paling mendekati ada pada *bump* 15° , 30° , 45° , 60° . Analisis pada dua bilangan Reynolds menunjukkan bahwa aliran pada Re yang lebih tinggi cenderung lebih turbulen, menghasilkan pola aliran yang lebih kompleks dan area resirkulasi yang lebih luas. Koefisien *drag* pada pelat datar dengan *bump* segitiga tercatat lebih tinggi dibandingkan pelat datar polos untuk semua variasi yang diuji.

PENDAHULUAN

Dalam transisi menuju energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, Indonesia menghadapi tantangan kompleks. Sebagai negara dengan populasi besar dan pertumbuhan ekonomi pesat, Indonesia masih sangat bergantung pada energi fosil yang mendominasi konsumsi energi nasional. Tercatat pada tahun 2023 konsumsi energi final nasional Indonesia meningkat sekitar 5,4%, menjadi 137 ton *equivalent* dari tahun sebelumnya yang sebesar 130 ton *equivalent* dengan persebaran energi sebesar 40% batu bara, 30,18% minyak bumi, 16,28% gas bumi, dan energi terbarukan hanya sebesar 13,09%. Untuk mengatasi hal ini, berbagai upaya dilakukan, termasuk penelitian dan inovasi khususnya dalam bidang mekanika fluida yang berkaitan dengan karakteristik aerodinamika seperti gaya hambat (*drag*), gaya angkat (*lift*), dan lapisan batas (*boundary layer*). Studi tentang *boundary layer control*, baik aktif maupun pasif, menjadi fokus untuk meningkatkan efisiensi energi dalam berbagai aplikasi, termasuk transportasi. *Passive flow control*, seperti modifikasi geometri pada *body* kendaraan, dinilai lebih menguntungkan karena biaya rendah dan mengurangi konsumsi energi [3].

Lapisan batas (*boundary layer*) adalah lapisan tipis fluida yang berada dekat dengan permukaan benda padat yang dapat memunculkan efek viskositas fluida sangat signifikan. Dalam konteks aerodinamika, pengendalian lapisan batas (*boundary layer control*) menjadi penting untuk mengoptimalkan performa aerodinamis, seperti mengurangi gaya hambat (*drag*). Gaya hambat (*drag*) dapat diminimalisir dengan cara menunda terjadinya separasi aliran, karena separasi aliran inilah yang menyebabkan gaya hambat (*drag*) timbul dan memengaruhi kinerja sistem. Salah satu cara untuk menunda separasi adalah dengan memintas aliran agar menjadi turbulen. Pembahasan terkait topik ini masuk dalam domain manipulasi terhadap *boundary layer* pada suatu aliran atau bisa disebut *boundary layer control*. Penelitian ini mencari tahu bagaimana dampak pemasangan *bump* segitiga pada pelat datar dapat mempengaruhi karakteristik aerodinamis dengan memanipulasi *boundary layer* [1][2][4].

Hariyadi melakukan penelitian dengan melibatkan penambahan *bump* berbentuk segitiga dengan ketinggian 21 mm pada sebuah pelat datar. Penelitian ini dilakukan secara eksperimen pada *wind tunnel*. Hasil menunjukkan bahwa aliran setelah melewati *bump* segitiga mengalami separasi yang masif akibat tajamnya *adverse pressure gradient*, sehingga gaya *drag* total mengalami kenaikan sepanjang pelat datar. Namun, titik separasi tidak

dipengaruhi oleh variasi bilangan Reynolds yang sudah ditentukan [5].

Sutardi et al melakukan riset dengan melibatkan penambahan *semi-circular bump* pada pelat datar. Model pelat datar dengan *semi-circular bump* dan tanpa kawat dipasang pada *wind tunnel* untuk tes model. Kawat dipasang pada tiga posisi sudut berbeda pada permukaan *bump* 30 derajat, 40 derajat, dan 50 derajat. Distribusi tekanan pada permukaan pelat maupun pada permukaan *bump* diukur menggunakan tap tekanan statis yang dihubungkan ke manometranya, menghasilkan peningkatan koefisien geser *drag* serta memajukan titik separasi pada *boundary layer* [6].

Mehtar & Althaf melakukan penelitian dengan menambahkan rintangan berupa *bumps* (tonjolan) dan *dimples* (cekungan) dengan dua jenis bentuk, yaitu bola dan piramida, pada sebuah airfoil NACA 0012. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode komputasi fluida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua bentuk rintangan menyebabkan penundaan separasi aliran dan aliran balik, serta semua modifikasi terbukti dapat menurunkan gaya *drag*. Rasio gaya angkat terhadap gaya hambat (*L/D*) terbukti meningkat kecuali pada bentuk rintangan piramida. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa cekungan lebih efektif dibandingkan tonjolan [8].

Azmi melakukan eksperimen dengan melibatkan penambahan *vortex generator* pada airfoil NASA LS-0417. Dalam penelitian ini, parameter yang divariasikan adalah ketinggian *vortex generator* dan jarak penempatannya dari *leading edge*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *vortex generator* dapat menunda terjadinya separasi pada airfoil NASA LS-0417, dengan jarak optimal untuk menunda separasi adalah 0,3 dan ketinggian *vortex generator* yang optimal adalah 1 mm. Pada variasi jarak 0,3 dan ketinggian 1 mm, *vortex generator* menunjukkan peningkatan performa sebesar 14% pada nilai *Cl/Cd* [7].

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat dikatakan bahwa manipulasi pada *boundary layer* dengan meletakkan *bump* pada sebuah pelat datar dapat mempercepat terjadinya transisi *boundary layer* yang berakibat menunda terjadinya separasi aliran pada buritan. Dengan begitu timbul ide untuk melakukan studi yang lebih lanjut mengenai aliran melalui *bump* berbentuk segitiga dengan memvariasikan sudut sisi miring. Diharapkan dengan memberi variasi tersebut, dapat mempengaruhi geometri *bubble separation* yang terjadi, dengan harapan pada akhirnya dapat mempengaruhi turbulen pada aliran di belakangnya. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan memberikan informasi tambahan terhadap ilmu pengetahuan terkait *boundary layer control*, meliputi fenomena aliran yang

terbentuk dan optimalisasi yang dapat dilakukan untuk mendapatkan hasil terbaik terkait efek pemberian *bump* pada pelat datar terhadap karakteristik dari *boundary layer* yang terbentuk.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Model Uji

Model uji yang digunakan pada penelitian ini adalah pelat datar.



Gambar 1. Geometri penelitian

B. Bahan dan Alat

Penelitian ini mensimulasikan aliran yang melalui sebuah pelat datar dua dimensi yang sudah diberi *obstacle* berupa *bump* segitiga sama kaki dengan ketinggian 4 mm serta variasi sudut dan bilangan Reynolds sebesar $2,7 \times 10^3$ dan $4,2 \times 10^3$.

Tabel 1. Variasi Penelitian

Bentuk <i>bump</i>	Sudut sisi (α)
Segitiga sama kaki ($h=4$ mm)	15°
	30°
	45°
	60°



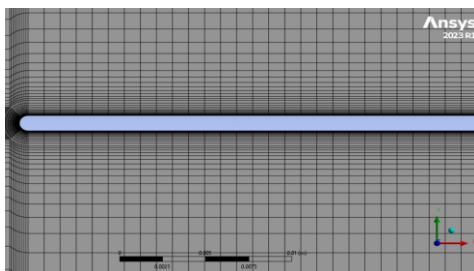
Gambar 2. Variasi sudut bump

C. Pelaksanaan Penelitian

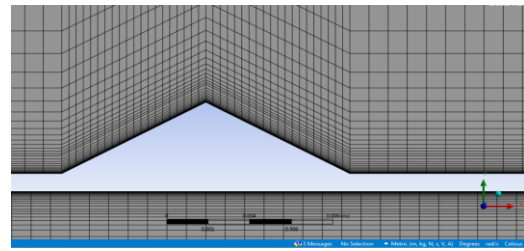
Penelitian dilakukan secara numerik menggunakan software ANSYS 2023 R1 dengan metode CFD (*computational fluid dynamic*). Diawali dengan pembuatan geometri dengan Solidwork lalu menuju tahap *pre-processing* (meshing dan boundary condition), *processing* (pengambilan data), dan *processing* (pengolahan hasil penelitian).

D. Pre Processing

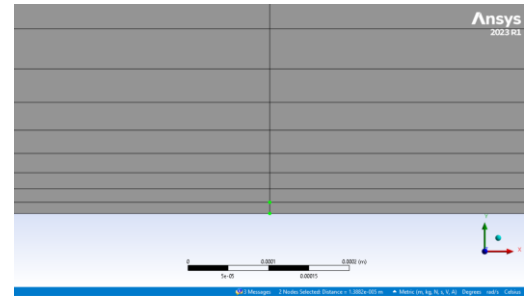
Pada tahap ini dilakukan pembuatan model pelat datar dengan Solidwork serta domain dan *meshing* volume pada domain dengan tujuan untuk mendiskritisasi bagian-bagian yang akan dilakukan kalkulasi. *Meshing* yang digunakan berjenis *structured mesh* dan dominasi *quad cell*.



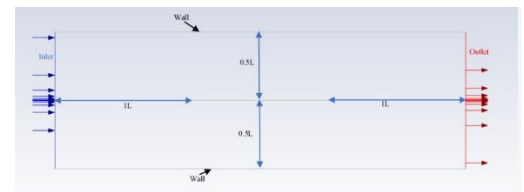
Gambar 3. Meshing model uji



Gambar 4. Meshing model uji



Gambar 5. Meshing model uji area boundary layer dengan first layer thickness 1.3882×10^{-5} m sepanjang kontur pelat datar



Gambar 6. Boundary Condition

E. Processing

Skala model yang digunakan yaitu dalam satuan mm. Model yang digunakan adalah model solver dan *turbulence* model jenis $K - \omega$ SST. Materials Jenis dan properties dari material dimasukkan sesuai dengan kondisi dari lingkungan yaitu pada temperatur 30°C dan tekanan 1 atm. Pemodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan density (ρ) $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas (μ) $1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$. *Operating conditions* menggunakan *standard temperature* dan *pressure* yaitu 1 atm atau 101325 Pascal. Pada daerah inlet boundary conditions didefinisikan velocity inlet 9,75 m/s, 15,5 m/s dan *Reynolds numbers* $2,7 \times 10^3$ dan $4,2 \times 10^3$. *Boundary conditions* pada sisi outlet adalah *outflow*. Bagian sisi atas, didefinisikan sebagai *wall*. *Solutions-solutions* pada penelitian ini akan menggunakan *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*. *Initialize* pada inlet didefinisikan sebagai *velocity inlet* sebesar 9,75 m/s dan 15.5 m/s. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-6} , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga kurang dari atau sama dengan 10^{-6} . Untuk persamaan kontinuitas, momentum ke arah x, y, dan z ditetapkan kriteria konvergensi sebesar 10^{-6} .

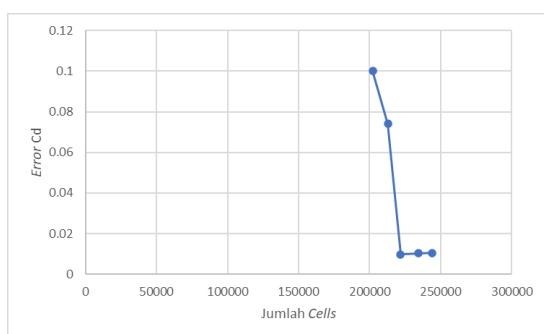
Proses *running* dilakukan di ANSYS 2023 R1 *Fluent* hingga perhitungan mencapai *convergence* setelah menentukan jumlah iterasi yang sesuai.

F. Post Processing

Pada tahap ini dilakukan ekstraksi data untuk menunjang pembuktian dari hipotesa, data yang diekstrak adalah data *streamline*, data C_p , profil kecepatan, intensitas turbulen dan turbulen *kinetic energy*, dan koefisien *drag*.

G. Grid Independence Test

Grid Independence Test (GIT) merupakan pengujian untuk membuktikan bahwa hasil simulasi yang didapat tidak bergantung pada jumlah elemen pemodelan. Metode yang digunakan adalah menguji jumlah *grid independence* terhadap suatu nilai yang sama, pengujian akan baru berhenti ketika hasil simulasi sudah stagnan walaupun jumlah *grid* berubah.

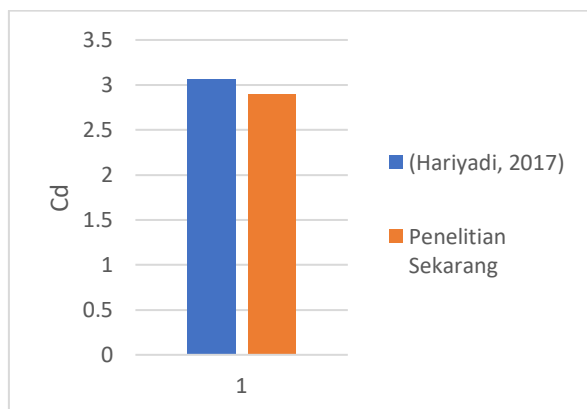


Gambar 7. Grafik perbandingan error akan cd dengan jumlah mesh

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi

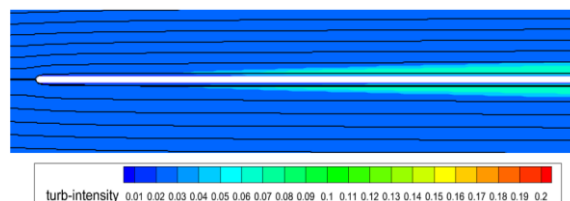
Validasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen dengan hasil simulasi yang pernah dilakukan. Hasil simulasi yang akan dibandingkan yaitu nilai koefisien *drag* (C_d) dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hariyadi [1]. Penggunaan penelitian dikarenakan memiliki geometri yang hampir sama dan kecepatan 9,75 m/s dengan perbedaan geometri dari *pelat datar*.



Gambar 8. Grafik perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu

Dapat dilihat penelitian saat ini memiliki nilai C_d yang relatif lebih kecil dengan tingkat *error* sebesar 5,23% sehingga penelitian masih dapat dianggap valid karena nilai *error* dibawah 10%.

B. Karakteristik Aliran pada Pelat Datar Polos

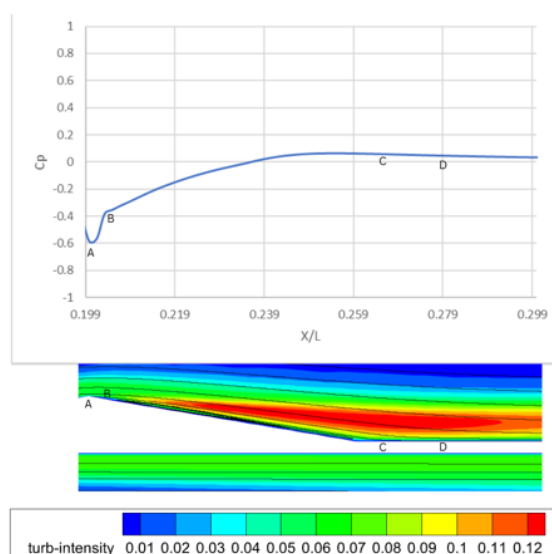


Gambar 9. Visualisasi streamline dan turbulent intensity pada pelat datar polos

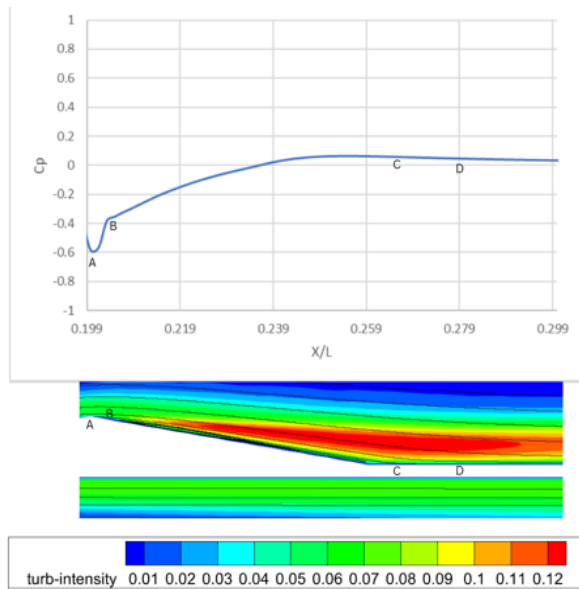
Dapat terlihat bahwa aliran melewati pelat datar diawal mengalami peristiwa stagnasi. Setelah melewati *leading edge* dari pelat datar, aliran tetap konstan dan tidak ditemukannya *bubble separation* yang timbul pada pelat datar polos. Walaupun tidak muncul *bubble*, tetapi terlihat aliran mengalami transisi dari laminar ke turbulen ditandai dengan intensitas turbulen yang timbul. Dari hal tersebut, pelat datar polos tersebut dapat dijadikan acuan untuk memodifikasi pelat datar yang diberi variasi *bump*.

C. Analisis Karakteristik Aliran pada Pelat datar dengan Bump 15 Derajat

Modifikasi *pelat datar* dengan penambahan *bump* ditujukan untuk memicu terjadinya *buble separation* agar mempercepat transisi aliran dari laminar menuju turbulen. Karakteristik aliran akan direpresentasikan dengan grafik koefisien tekanan dan visualisasi struktur *streamline* pada *pelat datar*, Untuk dianalisis pengaruh dari penambahan *bump* tersebut.

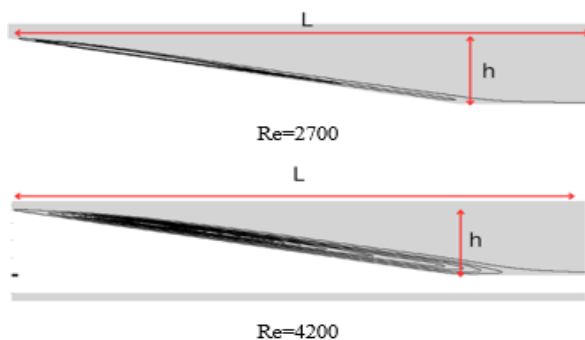


Gambar 10. Grafik C_p fungsi x/l dan visualisasi streamline pada $\alpha=15^\circ$ untuk $Re=2700$



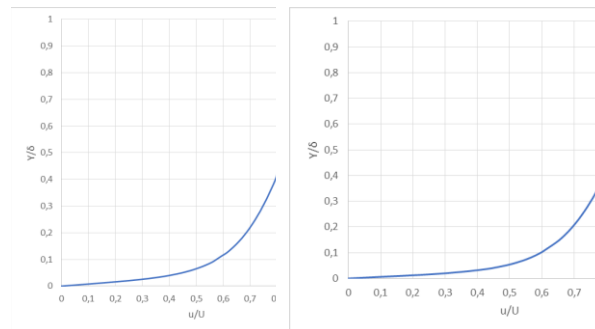
Gambar 11. Grafik C_p fungsi x/l dan visualisasi streamline pada $\alpha=15^\circ$ untuk $Re=4200$

Dari Gambar 10 dan 11 dapat disimpulkan bahwa modifikasi geometri berupa *bump* segitiga menghasilkan perubahan signifikan pada distribusi tekanan, pembentukan *bubble separation*, dan transisi aliran, yang merupakan karakteristik penting dalam studi aerodinamika pelat datar dengan pengganggu geometris, serta geometri *bump* memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik aerodinamika pelat datar pada *Reynolds numbers* 2700 dan 4200, terutama dalam memodifikasi distribusi tekanan dan pola aliran secara keseluruhan.



Gambar 12. Detail bubble pada $\alpha=15^\circ$

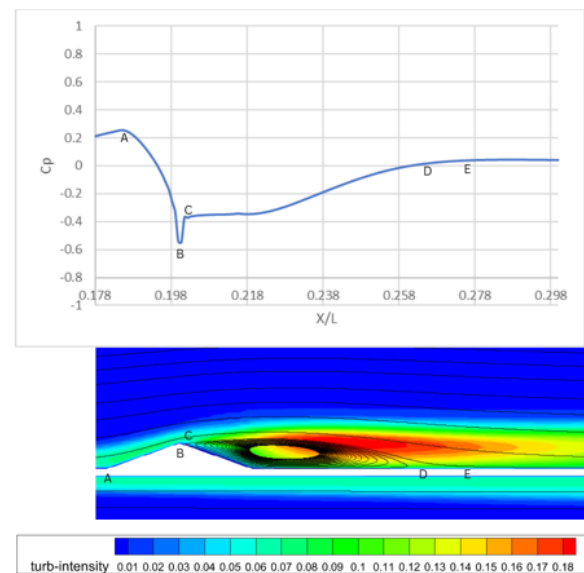
Secara keseluruhan, konfigurasi pada gambar pertama menghasilkan *bubble separation* dengan intensitas yang lebih besar dibandingkan gambar kedua, mengindikasikan bahwa modifikasi geometri berupa *bump* segitiga mampu secara signifikan memengaruhi distribusi tekanan dan karakteristik aliran. Fenomena ini relevan dalam aplikasi aerodinamika untuk mengontrol lokasi separasi dan meningkatkan performa aliran.



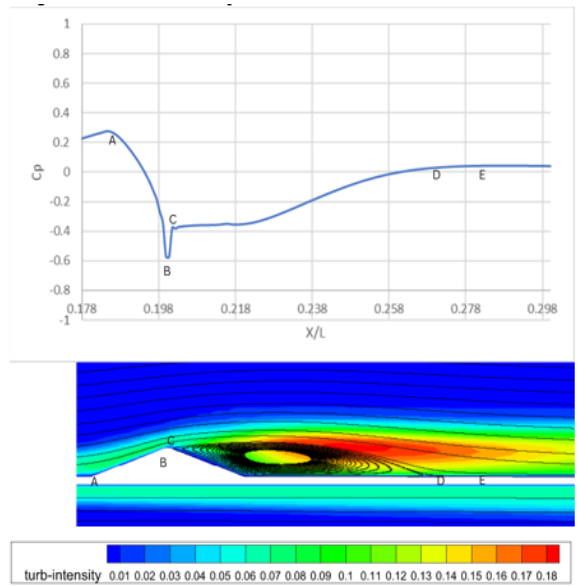
Gambar 13. Grafik profil kecepatan pada $0,5X/L$ ($\alpha=15^\circ$) untuk $Re=2700$ (kiri) dan $Re=4200$ (kanan)

Grafik profil kecepatan yang halus dengan gradien signifikan di dekat permukaan menunjukkan bahwa *bump* segitiga memengaruhi perkembangan *boundary layer* tanpa menyebabkan separasi aliran atau turbulensi penuh. Dengan demikian, pemasangan *bump* segitiga memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi aerodinamika pelat datar melalui pengendalian perkembangan *boundary layer*.

D. Analisis Karakteristik Aliran pada Pelat datar dengan Bump 30 Derajat

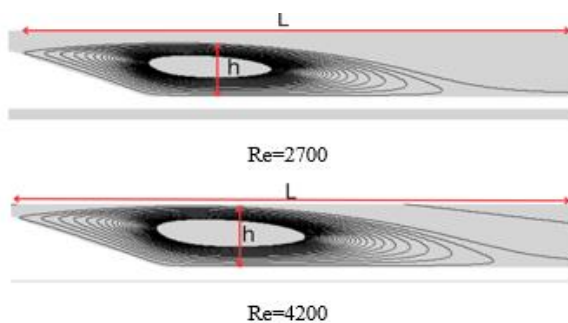


Gambar 14. Grafik C_p fungsi X/L dan visualisasi Streamline pada $\alpha=30^\circ$ untuk $Re=2700$



Gambar 15. Grafik C_p fungsi X/L dan visualisasi Streamline pada $\alpha=30^\circ$ untuk $Re=4200$

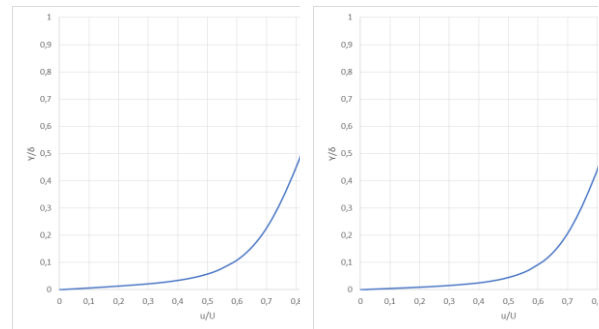
Pada Gambar 14, di titik A ($X/L \approx 0.178$), nilai C_p positif sekitar 0.2 mengindikasikan tekanan yang relatif tinggi dengan aliran yang masih stabil. Ketika aliran mendekati *bump*, terjadi penurunan C_p yang signifikan menuju titik B ($X/L \approx 0.198$) hingga mencapai nilai -0.6, menandakan akselerasi aliran yang kuat akibat *convergence streamtube*. Fenomena ini terjadi karena momentum aliran tidak mampu mengatasi *adverse pressure gradient* dan tegangan geser antara permukaan *bump* dengan aliran fluida. Pada Gambar 15, Pada titik awal ($X/L \approx 0.178$), nilai C_p positif sekitar 0.25 mengindikasikan tekanan yang relatif tinggi dengan aliran yang masih stabil. Ketika aliran mendekati *bump*, terjadi penurunan C_p yang signifikan menuju titik B ($X/L \approx 0.198$) hingga mencapai nilai -0.6, menandakan akselerasi aliran yang kuat akibat *convergence streamtube*. Fenomena ini diikuti dengan terjadinya separasi pada titik C ($X/L \approx 0.2$) yang ditandai dengan kenaikan nilai C_p secara mendadak. *Separation bubble* yang terbentuk dari titik C hingga titik D ($X/L \approx 0.264$) memiliki karakteristik yang khas, dengan panjang *bubble separation* sekitar $0.064X/L$



Gambar 16. Detail bubble pada $\alpha=30^\circ$

Analisis karakteristik *bubble separation* berdasarkan visualisasi menunjukkan perbedaan signifikan pada dua konfigurasi dengan *Reynolds numbers* yang berbeda ($Re = 2700$ dan $Re = 4200$). Pada $Re = 2700$, rasio panjang *bubble* terhadap panjang karakteristik (L/l) terukur sebesar 0.0382 dengan rasio ketebalan (h/l) 0.00478, sedangkan pada $Re = 4200$ terjadi peningkatan L/l menjadi 0.0435 dengan h/l relatif konstan pada 0.00476.

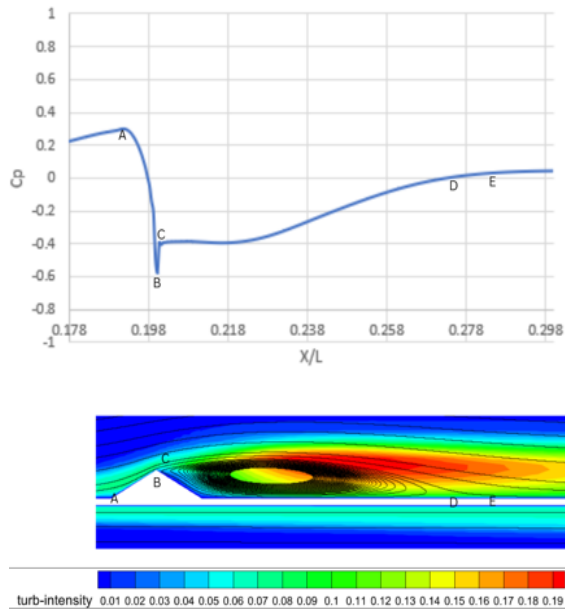
Perubahan *Reynolds numbers* dari 2700 ke 4200 menghasilkan peningkatan rasio L/l sebesar 13.9% dengan perubahan minimal pada rasio h/l sekitar 0.04%, disertai pola *streamline* yang lebih kompleks dan area resirkulasi yang lebih luas. Fenomena ini memvalidasi bahwa pemasangan *bump* segitiga pada pelat datar menghasilkan karakteristik aerodinamika yang berbeda pada variasi *Reynolds numbers*, dengan pengaruh yang lebih signifikan terhadap panjang *separation bubble* dibandingkan dengan ketebalannya, dimana hal ini berimplikasi penting pada desain dan optimasi perangkat aerodinamika.



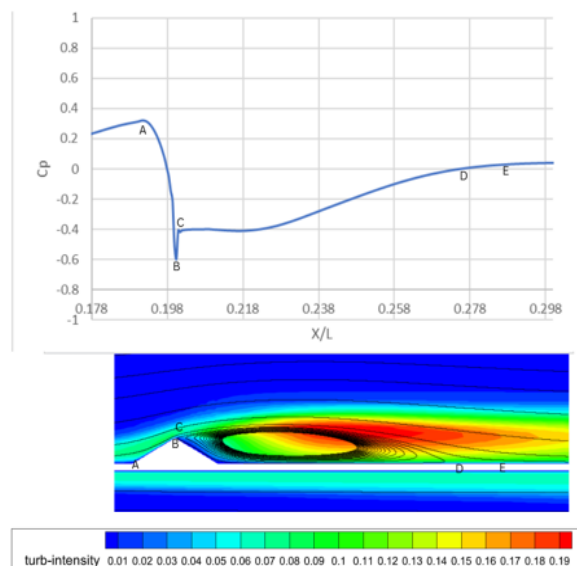
Gambar 17. Grafik profil kecepatan pada $0.5X/L$ ($\alpha=30^\circ$) untuk $Re=2700$ (kiri) dan $Re=4200$ (kanan)

Profil kecepatan memperlihatkan tren *non-linear* yang signifikan, dengan gradien kecepatan yang sangat tajam pada region $y/\delta < 0.2$, mengindikasikan dominasi efek viskos pada daerah dekat dinding. Peningkatan drastis kecepatan yang teramati pada $y/\delta > 0.4$ mengkonfirmasi adanya akselerasi aliran yang diinduksi oleh keberadaan *bump* segitiga, dimana kurva menunjukkan gradien positif yang semakin besar hingga mencapai kecepatan *freestream*. Evaluasi parameter *boundary layer* pada dua variasi *Reynolds numbers* mengungkapkan perubahan karakteristik aliran yang substansial, dimana pada $Re = 2700$ diperoleh nilai shape factor $H = 1.2479$ dengan ketebalan *displacement* (δ^*) = 0.000352 dan *momentum thickness* (θ) = 0.000282, sementara pada $Re = 4200$ terjadi penurunan *shape factor* menjadi $H = 1.2361$ dengan penurunan (δ^*) = 0.000338 dan (θ) = 0.000274.

E. Analisis Karakteristik Aliran pada Pelat datar dengan Bump 45 Derajat



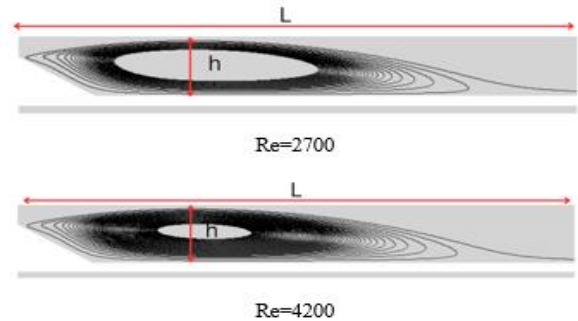
Gambar 17. Grafik C_p fungsi X/L dan visualisasi Streamline pada $\alpha=45^\circ$ untuk $Re=2700$



Gambar 18. Grafik C_p fungsi X/L dan visualisasi Streamline pada $\alpha=45^\circ$ untuk $Re=4200$

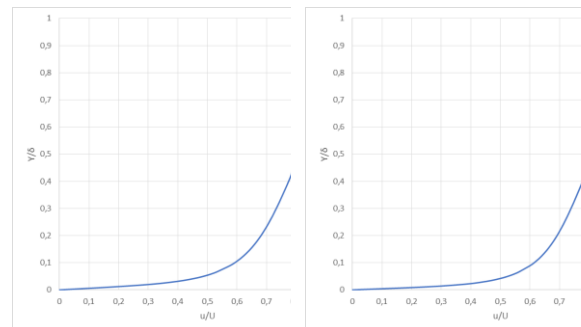
Pada Gambar 17, Pada titik A ($x/l \approx 0.185$), aliran menunjukkan nilai C_p positif sekitar 0.2, mengindikasikan tekanan yang relatif tinggi sebelum melewati *bump*. Ketika aliran mendekati titik B ($x/l \approx 0.195$), terjadi penurunan C_p yang drastis hingga mencapai nilai -0.6, fenomena ini terjadi akibat aliran melewati daerah *convergence*, menyebabkan peningkatan kecepatan aliran dan penurunan tekanan sesuai dengan prinsip Bernoulli. Setelah titik B, aliran mengalami *recovery* tekanan di titik C ($x/l \approx 0.2$) dengan nilai C_p sekitar -0.4. Pada fase ini, *bubble separation* mulai terbentuk, ditandai dengan kontur *turbulent intensity* pada rentang 0.08 hingga 0.13. *Bubble separation* ini terus berlanjut dari titik C hingga titik E. Pada Gambar 18, di titik A ($x/l \approx 0.185$), aliran memiliki nilai C_p positif sekitar 0.2, menandakan

tekanan yang relatif tinggi sebelum memasuki *bump*. Namun, di titik B ($x/l \approx 0.195$), terjadi penurunan drastis hingga mencapai -0.6, di mana peningkatan kecepatan aliran di daerah *convergence* menyebabkan penurunan tekanan. Setelah melewati titik B, aliran mengalami *recovery* di titik C ($x/l \approx 0.2$) dengan nilai C_p sekitar -0.4, meskipun *bubble separation* mulai terbentuk, seperti yang ditunjukkan oleh kontur *turbulent intensity*.



Gambar 19. Detail bubble pada *bump* $\alpha=45^\circ$

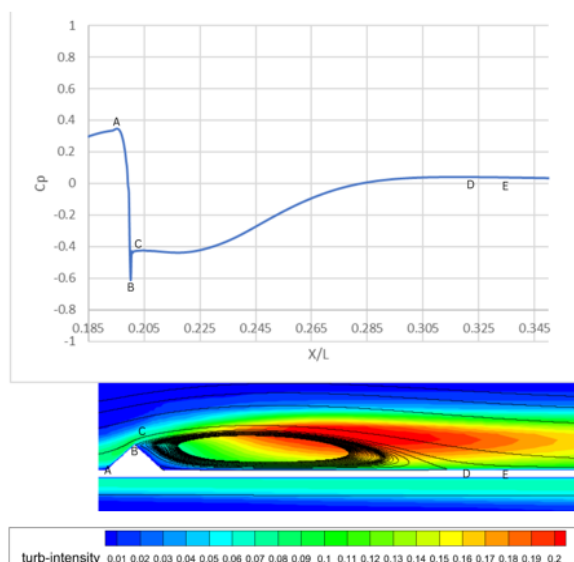
Pada $Re = 2700$, rasio panjang *bubble* terhadap panjang karakteristik (L/l) terukur sebesar 0,0545 dengan rasio ketebalan (h/l) 0.00478, sementara pada $Re = 4200$ terjadi peningkatan L/l menjadi 0.0621 dengan h/l yang relatif konstan pada 0.00476. Peningkatan *Reynolds numbers* mengakibatkan *bubble separation* menjadi lebih panjang, mengindikasikan area *resirkulasi* yang lebih besar akibat *adverse pressure gradient* yang lebih kuat dan momentum aliran yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan titik *reattachment* bergeser lebih jauh ke *downstream*.



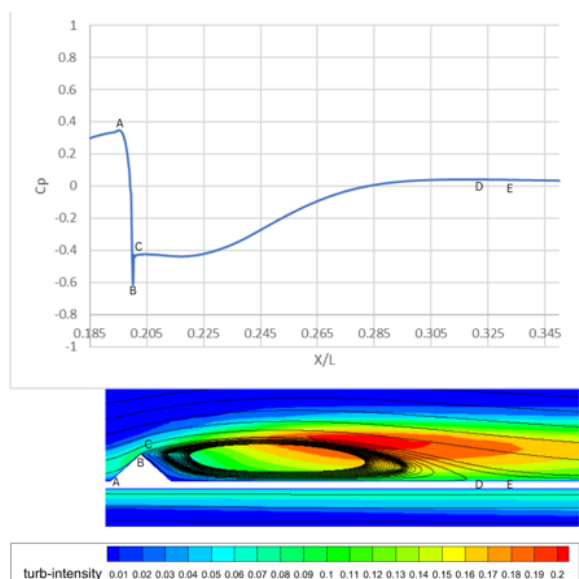
Gambar 20. Grafik profil kecepatan pada $0,5X/L$ ($\alpha=45^\circ$) untuk $Re=2700$ (kiri) dan $Re=4200$ (kanan)

Grafik profil kecepatan yang halus dengan gradien signifikan di dekat permukaan menunjukkan bahwa *bump* segitiga memengaruhi perkembangan *boundary layer*, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi aerodinamika pelat datar.

F. Analisis Karakteristik Aliran pada Pelat datar dengan Bump 60 Derajat



Gambar 21. Grafik C_p fungsi X/L dan visualisasi Streamline pada $\alpha=60^\circ$ untuk $Re=2700$

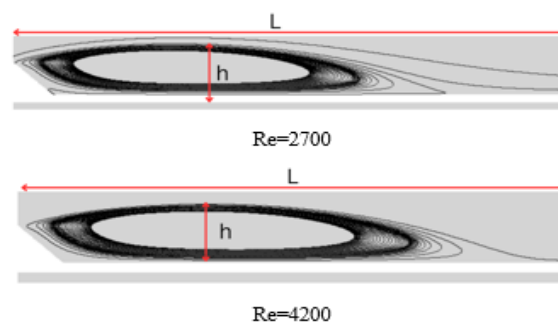


Gambar 22. Grafik C_p fungsi X/L dan visualisasi Streamline pada $\alpha=60^\circ$ untuk $Re=4200$

Pada Gambar 21, di titik A ($x/L \approx 0.185$), nilai C_p positif sekitar 0.2 mengindikasikan kondisi tekanan tinggi sebelum aliran mencapai *bump*, menunjukkan aliran yang masih stabil tanpa gangguan geometri. Ketika aliran bergerak menuju titik B ($x/L \approx 0.202$), terjadi penurunan drastis nilai C_p hingga -0.6, mengindikasikan percepatan aliran yang ekstrem di daerah konvergensi *bump* akibat ketidakmampuan momentum aliran mengatasi gradien tekanan negatif (*adverse pressure gradient*). Selanjutnya, di titik C ($x/L \approx 0.314$), terjadi pemulihan tekanan dengan nilai C_p sekitar -0.4, di mana *bubble separation* mulai terbentuk, menandakan transisi aliran dari laminar ke turbulen.

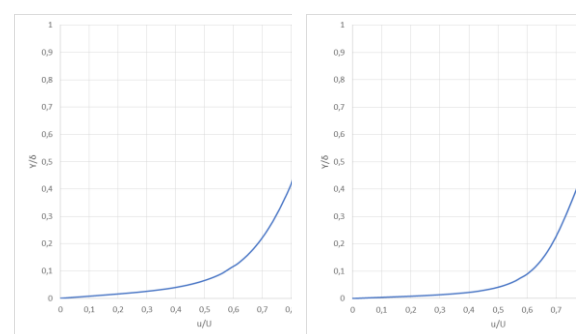
Pada Gambar 22, di titik A ($x/L \approx 0.185$), nilai C_p positif sekitar 0.2 mengindikasikan kondisi

tekanan tinggi sebelum aliran mencapai *bump*, menunjukkan aliran yang masih stabil tanpa gangguan geometri. Ketika aliran bergerak menuju titik B ($x/L \approx 0.202$), terjadi penurunan drastis nilai C_p hingga -0.6, mengindikasikan percepatan aliran yang ekstrem di daerah konvergensi *bump* akibat ketidakmampuan momentum aliran mengatasi gradien tekanan negatif (*adverse pressure gradient*). Selanjutnya, di titik C ($x/L \approx 0.314$), terjadi pemulihan tekanan dengan nilai C_p sekitar -0.4, di mana *bubble separation* mulai terbentuk, menandakan transisi aliran dari laminar ke turbulen.



Gambar 23. Detail bubble pada $\alpha=60^\circ$

Pada $Re = 2700$, rasio panjang *bubble* terhadap panjang karakteristik (L/l) terukur sebesar 0.0761 dan rasio ketebalan (h/l) sebesar 0.0088, mencerminkan pola aliran yang lebih sederhana dan area resirkulasi yang lebih kecil akibat momentum aliran yang rendah. Sebaliknya, pada $Re = 4200$, terjadi peningkatan rasio L/l menjadi 0.0801, yang merupakan peningkatan sebesar 13.9%, sementara rasio h/l tetap hampir konstan pada 0.0093 dengan perubahan minimal sekitar 0.04%.

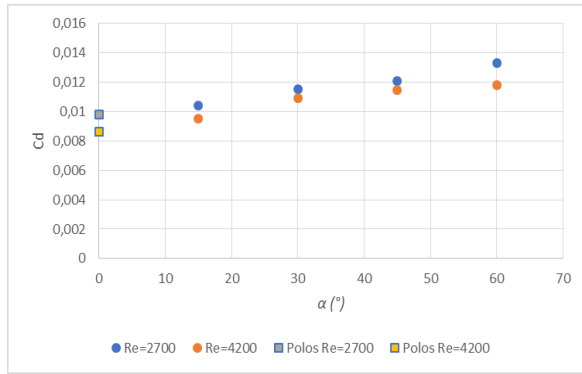


Gambar 24. Grafik profil kecepatan pada $0.5X/L$ ($\alpha=60^\circ$) untuk $Re=2700$ (kiri) dan $Re=4200$ (kanan)

G. Analisis Drag Coefficient

Tabel 2. Data Drag Coefficient

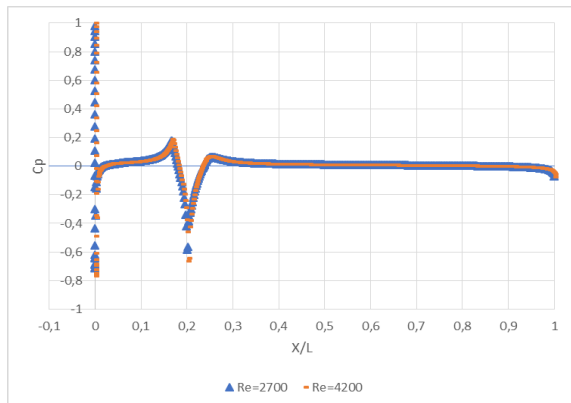
Pelat datar	Re_h	
	2700	4200
Polos	0.0098	0.00865
15°	0.01041	0.00952
30°	0.01156	0.0109
45°	0.01208	0.01146
60°	0.01334	0.01183



Gambar 24. Perbandingan grafik Cd

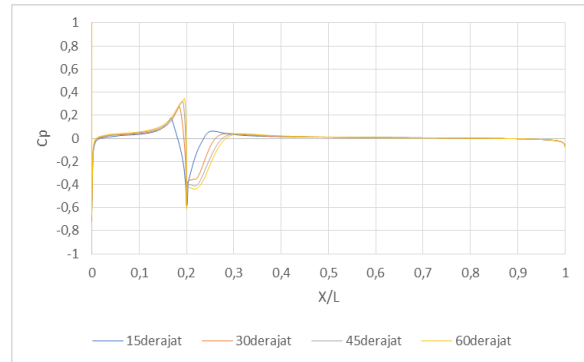
Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa pemasangan *bump* segitiga menghasilkan *wake*, dengan karakteristik intensitas turbulensi yang lebih tinggi, daerah tekanan rendah yang lebih luas, serta pola aliran balik yang lebih kuat. Interaksi antara boundary layer dengan *bump* segitiga menunjukkan kompleksitas yang tinggi, dimana terjadi percepatan aliran pada *upstream bump* akibat *favorable pressure gradient*, diikuti dengan perlambatan aliran yang tajam pada *downstream bump*, serta pembentukan *bubble separation* dalam memberikan energi intrusi dari fluktuasi yang ada pada *bubble separation*.

H. Diskusi



Gambar 25. Grafik Cp fungsi X/L pada $\alpha=45^\circ$ untuk Re=2700 dan Re=4200

Keberadaan *bump* segitiga memengaruhi karakteristik aerodinamika pelat datar dengan menciptakan gangguan aliran yang signifikan. Gangguan ini menghasilkan zona tekanan tinggi di depan *bump* dan tekanan rendah di belakangnya, yang berpotensi meningkatkan *drag* aerodinamika akibat separasi aliran. Pada bilangan Reynolds rendah ($Re = 2700$), aliran cenderung lebih laminar dengan pola distribusi tekanan yang lebih halus dibandingkan dengan $Re = 4200$, di mana aliran lebih turbulen. Hasil ini menunjukkan bahwa *bump* segitiga dapat dimanfaatkan untuk memodifikasi karakteristik aliran, seperti meningkatkan pencampuran atau mengendalikan separasi aliran, meskipun penggunaannya harus dirancang secara hati-hati untuk meminimalkan peningkatan *drag*.



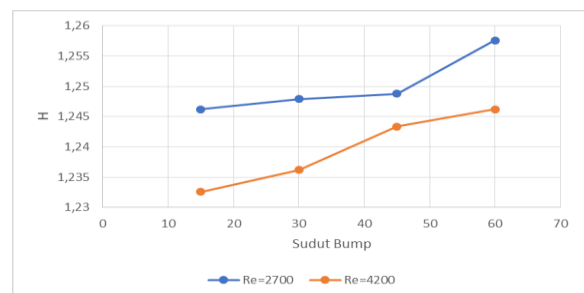
Gambar 26. Grafik Cp fungsi X/L pada pelat datar berdasarkan sudut bump ($\alpha=15^\circ-60^\circ$) untuk Re=4200

Secara keseluruhan, semakin besar sudut *bump*, semakin besar pula gradien tekanan yang dihasilkan, baik pada daerah sebelum maupun sesudah *bump*. Sudut kecil seperti 15° menghasilkan gangguan aliran yang lebih ringan dengan perubahan Cp yang lebih halus, sedangkan sudut besar seperti 60° menciptakan gangguan yang signifikan dengan gradien tekanan yang tajam. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi sudut *bump* memengaruhi distribusi tekanan secara langsung, sehingga dapat digunakan untuk mengontrol karakteristik aerodinamika sesuai kebutuhan desain.

Tabel 3. Profile Bubble pada Semua Variasi

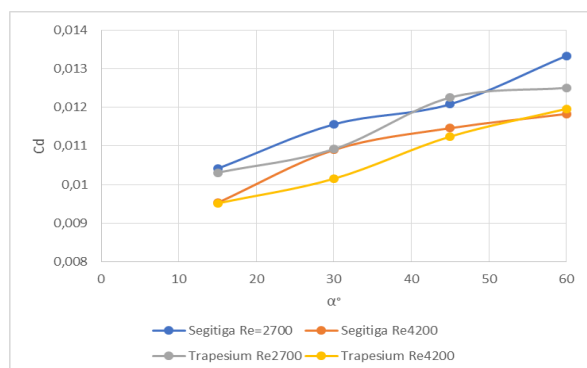
Sudut	Re=2700		Re=4200	
	Dimensi <i>bubble</i> (X/L)			
	Panjang	Tebal	Panjang	Tebal
15°	0.0382	0.0036	0.0237	0.0037
30°	0.0545	0.0067	0.0621	0.0068
45°	0.064	0.0080	0.0727	0.0081
60°	0.0761	0.0088	0.0801	0.0093

Secara statistik, rata-rata panjang gelembung untuk $Re = 2700$ adalah 0,04363 dengan rata-rata tebal 0,00507, sedangkan untuk $Re = 4200$ rata-rata panjangnya adalah 0,04073 dengan rata-rata tebal 0,00518. Hasil ini menunjukkan bahwa *bump* segitiga dapat digunakan untuk mengendalikan pemisahan aliran melalui pengaturan sudutnya, yang berimplikasi pada desain aerodinamika yang lebih efisien.



Gambar 27. Grafik H fungsi sudut α untuk Re=2700 dan Re=4200

Berdasarkan grafik perbandingan *shape factor* H terhadap sudut *bump* pada dua bilangan Reynolds ($Re = 2700$ dan $Re = 4200$), terlihat bahwa nilai H meningkat seiring bertambahnya sudut *bump* untuk kedua kondisi bilangan Reynolds. Pada $Re = 2700$, nilai H cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan $Re = 4200$ untuk setiap sudut *bump* yang diamati, menunjukkan bahwa aliran pada bilangan Reynolds rendah lebih sensitif terhadap gangguan yang dihasilkan oleh *bump* segitiga.



Gambar 28. Komparasi bentuk bump terhadap C_d

Dapat terlihat bahwa modifikasi menggunakan *bump* trapesium memiliki error yang lebih kecil dari dibandingkan dengan *bump* segitiga, hal ini diduga akibat *bump* segitiga memiliki sudut-sudut tajam yang akan membuat aliran lebih tidak halus melewati *bump*, dengan itu maka *bubble* yang terbentuk oleh *bump* segitiga lebih kuat dari *bump* trapesium. Hal ini membuat performa yang lebih bagus dan bisa dikatakan lebih baik modifikasinya adalah *bump* trapesium.

KESIMPULAN

Penambahan triangular *bump* pada pelat datar mampu menimbulkan *bubble separation*, Sehingga menambahkan *bump* berukuran 4 mm pada pelat datar yang diletakkan pada $b/l = 140\text{mm}$ mampu meningkatkan intensitas turbulensi aliran pada area *adverse upperside* pelat datar, namun pada parameter koefisien drag belum mampu di optimalkan, koefisien drag dari pelat datar *bump* lebih tinggi dari pelat datar polos.

Penambahan *bump* segitiga dengan tinggi 4mm pada *upperside* pelat datar dapat menimbulkan *bubble separation* pada pelat datar. Penambahan *bump* segitiga dengan variasi sudut kemiringan (15° , 30° , 45° , dan 60°) menghasilkan perubahan signifikan pada distribusi tekanan (C_p) dan pola aliran di sekitar pelat datar. Pada sudut kecil (15°), gangguan aliran lebih ringan dengan perubahan C_p yang lebih halus, sedangkan pada sudut besar (60°), gangguan aerodinamika meningkat secara signifikan dengan gradien tekanan yang tajam. Peningkatan sudut kemiringan juga meningkatkan panjang dan ketebalan

separation bubble, yang berimplikasi pada peningkatan drag aerodinamika. Pada $Re = 2700$, *separation bubble* memiliki panjang relatif lebih pendek dengan pola aliran yang lebih sederhana. Sebaliknya, pada $Re = 4200$, momentum aliran yang lebih tinggi memperpanjang *separation bubble* ke arah *downstream*.

REFERENSI

- [1] Anderson, J. D. (1995). Computational-Fluid-Dynamics-the-Basics-With-Applications Anderson-J-D (J. J. Corrigan, Ed.). McGraw-Hill
- [2] Fox, R. W. (2011). *Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition*.
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2024, 18 Januari). *Pemerintah kejar target tingkatan bauran EBT* [Siaran pers nomor 55.Pers/04/SJI/2024]. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-kejar-tingkatkan-bauran-ebt>
- [4] Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonalds Introduction to Fluid Mechanics, 8th Edition by Philip J. Pritchard (z-lib.org)*
- [5] S. S. Hariyadi, "Karakteristik Aliran di Belakang Gundukan (*Bump*) Segitiga pada Plat Datar," *Jurnal Penelitian*, vol. 3, no. 2, pp. 203-211, 2017. <https://doi.org/10.46491/jp.v2e3.97.203-211>
- [6] S. W. R. K. & H. S. Sutardi, "Experimental and Numerical Study on the Boundary Layer Flow Over a *Pelat datar* with a Semi-circular *Bump* with and without a Transversal Wire," *AIP Conference Proceedings*, p. 2187, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5138294>
- [7] U. Azmi, "Studi Eksperimen dan Numerik Pengaruh Penambahan Vortex Generator pada Airfoil NASA LS-0417," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, no. 6, 2017. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i1.21779>
- [8] Z. & A. A. Mehtar, "Influence of Sphreical and Pyramidical Dimples and *Bumps* on Airfoil Performance in Subsonic Flow," *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2021. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1219>

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis tidak memiliki konflik kepentingan.

KETERSEDIAAN DATA

Data tersedia dengan permintaan data kepada penulis.