

ANALISA INDIKATOR KINERJA TEROWONGAN ANGIN RANGKAIAN TERBUKA (*OPEN CIRCUIT WIND TUNNEL*) TIPE SUBSONIC

Vikra Aditya, Alchalil*, Asnawi, Abdul Rahman

Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh

*Corresponding Author: alchalil@unimal.ac.id

Abstract – Fluid is a substance that can change its shape continuously due to the acting tangential shear force. Aerodynamics is a branch of fluid dynamics that studies specifically the forces acting on an object contained in a fluid flow. Wind Tunnel is a tool used in aerodynamics research to study airflow characteristics. Wind tunnel performance indicators include flow uniformity, flow and pressure distribution, aerodynamic forces acting on test objects in the wind tunnel. By using unsymmetrical airfoils, the impact of speed variations of 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s and increasing angles of attack ranging from 0°, 5°, 10° on fluid flow can be determined. Tests were conducted in a section of the wind tunnel measuring 30 cm x 30 cm x 40 cm. Overall, the open-type wind tunnel has not been able to create uniform flow. The Reynolds number is at $Re > 4,000$, so the wind tunnel under study is turbulent. The results of the speed variation and angle of attack increase also have an impact on the lift and drag coefficient values of the airfoil. At the maximum speed variation of 10 m/s with an angle of attack of 10°, the lift coefficient is 0.14350 and the drag coefficient is 0.15162.

Abstrak – Fluida adalah suatu zat yang dapat berubah bentuknya secara kontinyu dikarenakan adanya gaya geser tangensial yang bekerja. Aerodinamika merupakan salah satu cabang ilmu dinamika fluida yang mempelajari khususnya gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda yang terdapat di dalam suatu aliran fluida. Terowongan Angin adalah alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamika untuk mempelajari karakteristik aliran udara. Indikator kinerja terowongan angin meliputi yaitu, keseragaman aliran, distribusi aliran dan tekanan, gaya aerodinamis yang bekerja terhadap benda uji di dalam terowongan angin. Dengan menggunakan airfoil tidak simetris dapat diketahui dampak variasi kecepatan 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s dan peningkatan sudut serang mulai dari 0°, 5°, 10° terhadap aliran fluida. Pengujian dilakukan di bagian section terowongan angin yang berukuran 30 cm x 30 cm x 40 cm. Secara keseluruhan terowongan angin tipe terbuka tersebut belum dapat menciptakan aliran yang seragam. Bilangan Reynolds ada pada angka $Re > 4.000$ maka terowongan angin yang diteliti jenis alirannya adalah turbulen. Hasil dari variasi kecepatan dan peningkatan sudut serang berdampak juga terhadap nilai koefisien lift dan drag dari airfoil. Pada variasi kecepatan maksimum 10 m/s dengan sudut serang 10° memiliki koefisien lift sebesar 0,14350 dan koefisien drag sebesar 0,15162.

Keywords: wind tunnels, fluid dynamic, aerodynamic, airflow

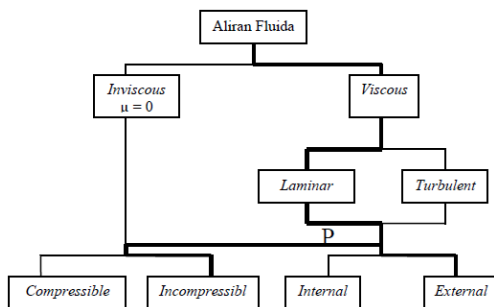
1 Pendahuluan

Fluida adalah suatu zat yang dapat berubah bentuknya secara kontinyu dikarenakan adanya gaya geser tangensial yang bekerja.

Fluida yang mengalir didefinisikan sebagai fluida yang *continuum*, fluida dianggap sebagai formasi molekul yang tergabung secara keseluruhan serta dapat ditinjau atau dianalisa secara molekul. Jika dilihat dari

klasifikasinya aliran fluida dapat dilihat pada Gambar 1. Udara merupakan salah satu fluida kompresibel, yaitu mampu mampat serta dapat dikompresikan hingga tekanan tertentu.

Udara yang bergerak mengandung suatu energi yang sebagian besar adalah berupa energi kinetik atau energi kecepatan maka fluida yang memiliki kecepatan akan memengaruhi sifat-sifat fisisnya yang meliputi densitas dan viskositas [1].



Gambar 1. Klasifikasi Aliran Fluida

Untuk mendapatkan gambaran secara umum pengaruh dari kecepatan terhadap sifat-sifat fisis tersebut maka dibutuhkan ilmu aerodinamika. Aerodinamika merupakan cabang ilmu dinamika fluida yang mengkaji khususnya gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda yang berada di dalam suatu aliran fluida. Salah satu alat pengujian yang dapat memberikan gambaran akan efek kecepatan angin pada suatu benda yang melintas di udara adalah terowongan angin (wind tunnel). *Wind Tunnel* atau terowongan angin merupakan sebuah alat bantu yang dikembangkan untuk menganalisa efek udara yang mengalir terhadap benda padat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui indicator kinerja dari terowongan angin yang meliputi, distribusi aliran, besaran bilangan *Reynolds*, gaya aerodinamika dan beberapa indicator lainnya.

2 Tinjauan Pustaka

2.1 Terowongan Angin (Wind Tunnel)

Terowongan Angin atau *Wind tunnel* adalah alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamika untuk mempelajari karakteristik aliran udara. Angin dialirkan melalui saluran yang menuju bidang uji untuk mengetahui dan menganalisa karakteristik aliran disekitar spesimen uji seperti profil aliran, distribusi tekanan dan turbulensi. Terowongan angin digunakan untuk menggambarkan keadaan fluida sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya-gaya aerodinamika dalam bidang aeronautika, yaitu untuk menganalisis kinerja mekanika terbang dari suatu benda terbang. Terowongan angin juga digunakan dalam pengujian berbagai kondisi benda dalam aliran udara seperti konstruksi gedung pencakar langit, lingkungan perkotaan dan lain-lain.[2]

2.2 Sifat Aliran

Pengamatan yang mendalam mengenai struktur molekul dari material mengungkapkan bahwa zat-zat yang biasa dianggap sebagai benda padat (baja, beton, dll) memiliki jarak antar molekul yang rapat dengan gaya-gaya kohesi antar molekul yang besar yang memungkinkan sebuah benda padat mempertahankan bentuknya dan tidak mudah untuk dideformasi. Namun, untuk zat-zat yang dianggap sebagai cairan (air, minyak, dll) memiliki molekul agak terpisah, gaya antar molekulnya lebih lemah daripada benda-benda padat dan molekulnya mempunyai pergerakan yang bebas. Sehingga zat cair dapat dengan mudah terdeformasi. Gas-gas (udara, oksigen, dll) memiliki jarak antar molekul yang lebih besar dan gerakan yang bebas dengan gaya antar molekul yang dapat diabaikan, sehingga sangat mudah terdeformasi. Secara khusus fluida didefinisikan sebagai zat yang berdeformasi terus-menerus selama dipengaruhi suatu tegangan geser.[3]

2.3 Bilangan Reynolds

Pada Tahun 1884 *Osborne Reynolds* melakukan percobaan untuk menunjukkan sifat-sifat aliran laminar dan turbulen. *Reynolds* menunjukkan bahwa untuk kecepatan aliran yang kecil fluida akan mengalir secara lurus seperti benang sejajar. Apabila kecepatan fluida ditambah maka aliran akan bergelombang yang akhirnya pecah dan menyebar.

Menurut *Reynolds*, ada tiga faktor yang mempengaruhi keadaan aliran yaitu kekentalan fluida μ (μ), rapat masa fluida ρ (ρ) dan luas penampang dari benda. *Reynold* menunjukkan bahwa aliran dapat diklasifikasikan berdasarkan suatu angka tertentu. Angka tersebut diturunkan dengan membagi kecepatan aliran dengan nilai $\mu/\rho l$, yang disebut dengan bilangan *Reynolds*.

Reynolds menetapkan untuk bilangan *Reynolds* di bawah 2.000, gangguan aliran dapat diredam oleh kekentalan suatu fluida dan aliran pada kondisi tersebut adalah laminar. Aliran akan turbulen apabila bilangan *Reynolds* lebih besar dari 4.000. Apabila bilangan *Reynolds* berada diantara kedua nilai tersebut ($2,000 < Re < 4.000$) aliran adalah transisi.[4]

$$Re = \frac{\rho l V}{\mu} = \frac{V l}{\vartheta} \quad (2.1)$$

Dimana :

Re = *Reynold Number*

ρ = Massa Jenis Fluida (Kg/m^3)

V = Kecepatan Aliran (m/s)

l = Luas Penampang (m)

μ = Viskositas dinamik ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) atau ($\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

ϑ = Viskositas kinematik (m^2/s)

2.4 Bilangan Mach

Bilangan *Mach* adalah parameter dominan dalam analisis aliran kompresibel, dengan berbagai efek tergantung pada besaran nilainya. Angka *Mach* dapat ditulis :

$$M_a = \frac{v}{c} \quad (2.2)$$

Dimana :

v = Kecepatan Aliran (m/s)

c = Kecepatan Suara

Para ahli aerodinamika terdahulu membuat perbedaan antara berbagai rentang bilangan mach dan klasifikasi sebagai berikut :

1. $Ma < 0,3$: aliran subsonik inkompresibel, dimana efek kerapatan fluida terabaikan
2. $0,3 < Ma < 0,8$: aliran subsonik, dimana efek kerapatan fluida penting tapi gelombang kejut yang muncul kecil.
3. $0,8 < Ma < 1,2$: aliran transonik, dimana *wake* pertama kali muncul, membagi wilayah subsonic dan wilayah supersonik. Penerbangan di wilayah transonik sulit karena karakter campuran medan aliran.
4. $1,3 < Ma < 3,0$: aliran supersonik, dimana terjadi *wake* namun tidak ada daerah subsonik $Ma > 3,0$: aliran hipersonik, dimana *wake* dan aliran lainnya mengalami perubahan yang sangat kuat

2.5 Gaya Aerodinamis

1. Gaya Hambat (Force Drag)

Dalam dinamika fluida, gaya hambat (yang kadang disebut hambatan fluida atau seretan) adalah gaya yang menghambat pergerakan sebuah benda padat melalui sebuah fluida (cairan atau gas). Gaya hambat dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 A \quad (2.3)$$

Koefisien *drag* adalah koefisien hambatan yang menunjukkan seberapa besar suatu benda dapat melawan hambatan fluida. Semakin kecil nilai dari koefisien *drag*, maka semakin mudah suatu benda melawan hambatan fluida Koefisien *drag* didapatkan dari persamaan berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (2.4)$$

Dimana :

F_D = Gaya drag (N)

C_D = Coefficient drag

ρ = Massa jenis udara (Kg/m^3)

v = Kecepatan fluida (m/s)

A = Panjang Chord Airfoil (m)

2. Gaya Angkat (Force Lift)

Gaya angkat (lift) yaitu gaya yang dihasilkan oleh efek dinamis dari udara, dan beraksi tegak lurus terhadap angin relatif melalui *center of pressure* dari sayap. Gaya angkat dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L v^2 A \quad (2.5)$$

Koefisien *lift* didapatkan dari persamaan berikut :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (2.6)$$

Dimana :

F_L = Gaya lift (N)

C_L = Coefficient lift

ρ = Massa jenis udara (Kg/m^3)

V = Kecepatan aliran (m/s)

A = Panjang *Chord Airfoil* (m)

3. Momen (Pitching Moment)

Dalam aerodinamika, *pitching moment* pada *airfoil* adalah momen (atau torsi) yang dihasilkan oleh gaya aerodinamis pada *airfoil*, jika aerodinamis yang diterapkan, bukan pada pusat tekanan, namun pada aerodinamis *airfoil*. Momen *pitching* pada sayap pesawat terbang merupakan bagian dari momen total yang harus diseimbangkan dengan menggunakan *lift* pada stabilizer horizontal[5]. Secara umum, *pitching moment* adalah momen yang bekerja pada sumbu lemparan benda yang bergerak.

$$M = \frac{1}{2} \rho C_M v^2 A_c \quad (2.7)$$

Koefisien momen *Pitching* merupakan dasar untuk definisi pusat aerodinamis dari sebuah *airfoil*[5]. Koefisien momen lemparan dapat dirumuskan pada persamaan berikut.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_c} \quad (2.8)$$

Dimana :

M = Momen (Nm)

C_M = Coefficient moment pitching

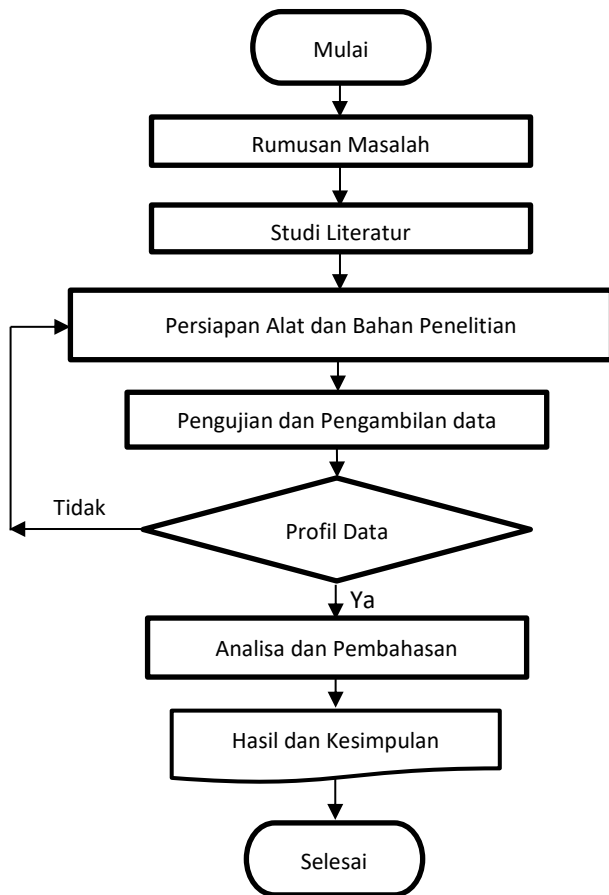
ρ = Massa jenis udara (Kg/m^3)

v = Kecepatan fluida (m/s)

A_c = *Chord/4* (m)

3 Metode Penelitian

Adapun tahapan penelitian yang dilakukan dijabarkan melalui diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3.1 Peralatan dan Bahan Penelitian

1. Alat

Untuk melakukan penelitian ini maka diperlukan sebuah terowongan angin rangkaian terbuka, dengan penjelasan sebagai berikut :

a. Honeycomb

Bentuk *honeycomb* yang digunakan adalah bentuk persegi dengan ukuran 750 mm x 750 mm. Komponen ini dibuat dari bahan pipa yang berpenampang persegi yang dibentuk seperti sarang lebah dengan ukuran yang disesuaikan. Bentuk *honeycomb* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Honeycomb

b. Contraction Cone

Ukuran *contraction cone* penampang masuknya sebesar 750 mm x 750 mm dan penampang keluarannya sebesar 300 mm x 300 mm dengan panjang 750 mm. Bentuk *contraction cone* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Contraction Cone

c. Test Section

Test section dirancang dengan ukuran penampang 300 mm x 300 mm, dengan panjang 400 mm. Bahan yang digunakan untuk membuat komponen ini adalah *plexi glass* agar pengamatan pengujian mudah dilakukan. Bentuk *test section* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Test Section

d. Diffuser

Diffuser dibuat dengan ukuran penampang 300 mm x 300 mm, penampang keluaran dengan ukuran 650 mm x 650 mm dan panjang diffuser 1750 mm. Bentuk *diffuser* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diffuser

e. Fan

Bentuk *fan* yang digunakan adalah persegi dengan ukuran penampang 650 mm x 650 mm dengan

diameter *blade* sebesar 480 mm. Bentuk *fan* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. *Fan*

2. Alat Ukur

a. *Pitot tube* (pitot meter)

Pitot tube mengukur kecepatan fluida pada suatu titik dengan mengubah kecepatan menjadi tekanan. *Pitot tube* nantinya dihubungkan dengan *manometer* pipa U sehingga nilai-nilai tekanannya dapat ditentukan. Wujud pipa pitot dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. *Pitot Tube Static*

b. *Manometer* Pipa U

Manometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan di dua titik yang berlawanan. *Manometer* mempunyai banyak jenis, tetapi yang paling sederhana adalah *manometer* dengan tabung berbentuk huruf U (*manometer* pipa U) yang berisi fluida cair (*liquid*) di dalam tabungnya, dimana pengukuran dilakukan pada satu sisi pipa seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. *Manometer* Pipa U

c. *Thermo-Anemometer*

Thermo-Anemometer adalah sebuah alat pengujian atau biasa disebut alat pengukur kecepatan angin yang digunakan dalam bidang Meteorologi dan Geofisika atau stasiun prakiraan cuaca. *Anemometer* berfungsi untuk mengukur atau menentukan kecepatan angin. Dalam pengujian sebuah terowongan angin *anemometer* digunakan untuk mengkalibrasi kecepatan angin yang dihasilkan oleh *fan*. Bentuk *anemometer* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. *Thermo-Anemometer*

3. Benda Uji

Dalam penelitian yang akan dilakukan, diperlukan benda uji *airfoil* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11.



Gambar 11. *Airfoil*

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Distribusi Aliran

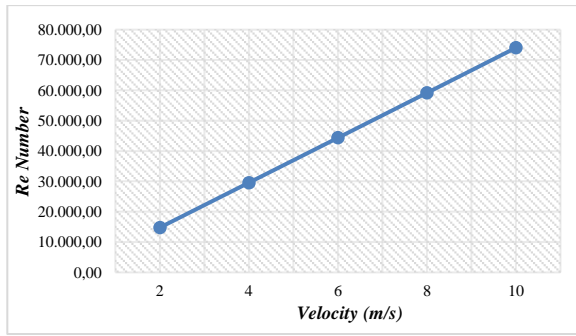
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk data distribusi aliran di dalam terowongan angin dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Data Distribusi Aliran Terowongan Angin Berdasarkan Kecepatan

No	V (m/s)	ρ (Kg/m ³)	μ (Kg/m·s)	T (°C)	P (Pa)	Reynolds Number	Mach Number
1	2	1,1572	$1,8801 \times 10^{-5}$	31,78	101.334,76	14.771,94	0.0057148
2	4	1,1577	$1,8796 \times 10^{-5}$	31,67	101.403,08	29.562,69	0.0114317
3	6	1,1577	$1,8796 \times 10^{-5}$	31,67	101.471,41	44.344,03	0.0171476

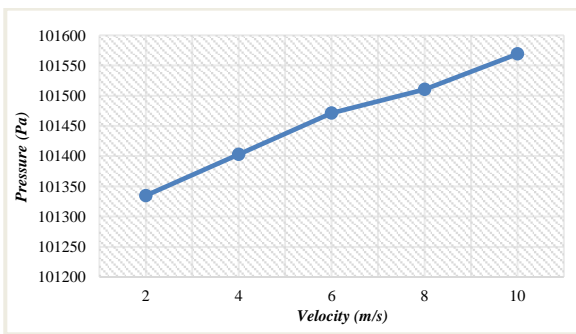
4	8	1,1581	$1,8791 \times 10^{-5}$	31,55	101.510,45	59.163,03	0.02288761
5	10	1,1587	$1,8784 \times 10^{-5}$	31,37	101.569,01	74.024,43	0.0285923

Tabel 2. Nilai Fd, Fl dan Momen



Gambar 12. Grafik Bilangan Reynolds Terhadap Kecepatan Aliran

Dapat dilihat nilai kerapatan (density) dan kekentalan (viskositas) fluida berubah disebabkan perubahan suhu di tiap variasi kecepatan aliran. Sementara untuk bilangan Mach ada pada $Ma < 0,3$ merupakan aliran subsonik. Untuk bilangan Reynolds ada pada angka $Re > 4.000$ dengan nilai maksimum pada kecepatan aliran 10 m/s yaitu 74.024 maka terowongan angin yang diteliti jenis alirannya adalah turbulen



Gambar 13. Grafik Tekanan Terhadap Kecepatan Aliran

Dalam penentuan tekanan untuk aliran digunakan persamaan ;

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge}$$

Dimana ;

P_{abs} = Tekanan Absolut (Pa)

P_{atm} = Tekanan Atmosfir (Pa)

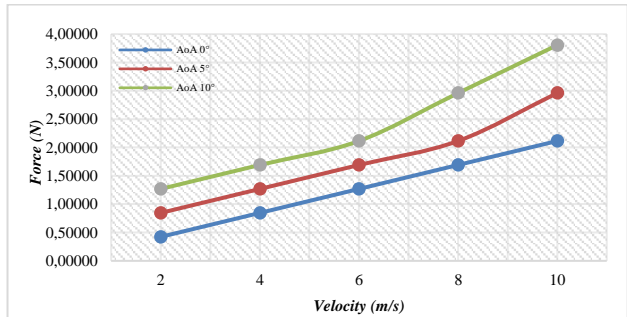
P_{gauge} = Tekanan Pengukuran (Pa)

Tekanan di dalam terowongan angin mengalami peningkatan signifikan seiring bertambahnya kecepatan aliran udara. Tekanan tertinggi ada pada kecepatan 10 m/s dengan nilai 101.569,01 Pa

4.2 Gaya Aerodinamis dan Momen

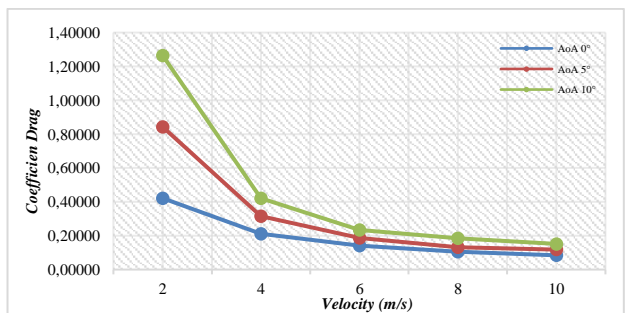
Hasil perhitungan mengenai gaya hambat, gaya angkat, dan momen lemparan berdasarkan sudut serang *airfoil* dan kecepatan aliran di dalam terowongan angin dapat dilihat pada Tabel 2.

Sudut Serang (°)	Kecepatan (m/s)	Drag Force (N)	Lift Force (N)	Pitching Moment (Nm)
0	2	0.42283	0.082617	$3,6 \times 10^{-4}$
	4	0.84565	0.162888	$9,45 \times 10^{-4}$
	6	1.26848	0.303408	$1,8 \times 10^{-3}$
	8	1.69130	0.403856	$2,79 \times 10^{-3}$
	10	2.11413	1.013956	$4,59 \times 10^{-3}$
5	2	0.84565	0.174860	$6,3 \times 10^{-3}$
	4	1.26848	0.566671	$1,71 \times 10^{-3}$
	6	1.69130	1.053378	4×10^{-3}
	8	2.11413	1.645524	$6,66 \times 10^{-3}$
	10	2.95978	2.522341	$1,05 \times 10^{-2}$
10	2	1.26848	0.240633	$1,35 \times 10^{-3}$
	4	1.69130	0.795105	$3,51 \times 10^{-3}$
	6	2.11413	1.592266	$6,39 \times 10^{-3}$
	8	2.95978	2.528488	$1,05 \times 10^{-2}$
	10	3.80543	3.601552	$1,35 \times 10^{-2}$



Gambar 14. Grafik Gaya Hambat pada Variasi Kecepatan

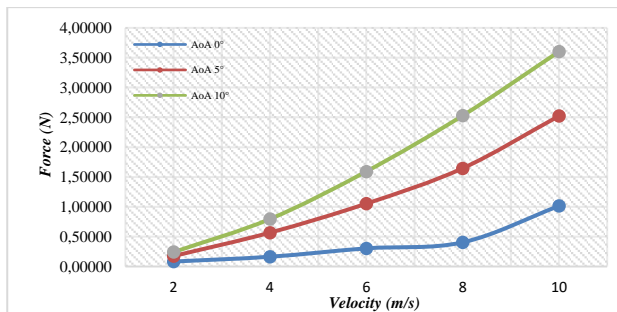
Perubahan gaya hambat disebabkan oleh perubahan kecepatan dan perubahan sudut serang (*angel of attack*). Semakin besar sudut serang maka nilai gaya hambat semakin besar, sedangkan seiring penambahan kecepatan nilai gaya hambat semakin meningkat. Hal ini dikarenakan semakin besar sudut yang diberikan, maka semakin banyak area permukaan *airfoil* yang menghambat aliran kemudian gaya hambatnya semakin besar



Gambar 15. Grafik Koefisien Hambat pada Variasi Kecepatan

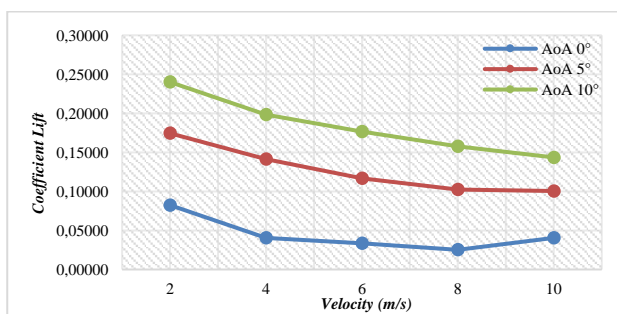
Peningkatan sudut serang berpengaruh terhadap nilai koefisien *drag*, pada variasi kecepatan aliran yang

ditunjukkan pada Gambar 4.4. Nilai koefisien *drag* pada variasi kecepatan aliran mengalami peningkatan signifikan pada kecepatan 2 m/s pada setiap sudut serang. Angkat tertinggi ada pada sudut serang 10° sebesar 1.26514 pada. Sudut serang 5° menuju ke 10° pada kecepatan aliran 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s dan 10 m/s menunjukkan nilai koefisien drag yang konstan tetapi cenderung meningkat. Hal tersebut dikarenakan kecepatan dan tekanan yang mulai tidak merata pada bagian atas airfoil sehingga menimbulkan turbulensi yang berarti bertambahnya gaya *drag*.



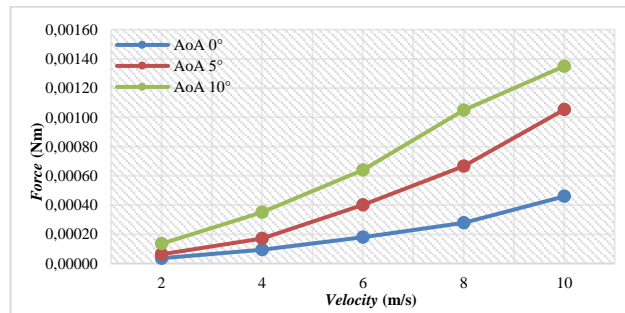
Gambar 16. Grafik Gaya Angkat pada Variasi Kecepatan

Berdasarkan Gambar 16 dapat dilihat perubahan gaya angkat disebabkan oleh perubahan sudut serang (angel of attack) dan perubahan kecepatan. Pada sudut serang 0° gaya angkat mengalami peningkatan yang cenderung sedikit, sedangkan pada sudut serang 10° nilai gaya angkat mengalami peningkatan paling signifikan pada kecepatan 10 m/s, artinya peningkatan kecepatan aliran berbanding lurus dengan peningkatan nilai gaya angkat tetapi besar sudut serang juga menentukan.



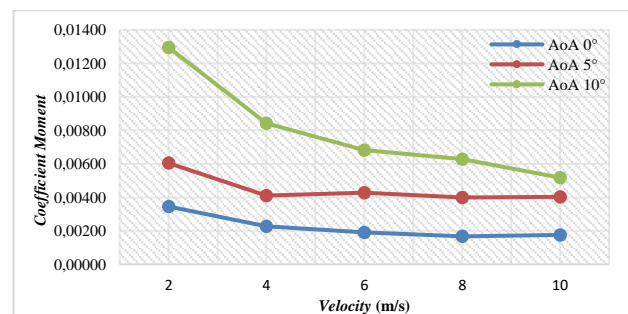
Gambar 17. Grafik Koefisien Angkat pada Variasi Kecepatan

Gambar 17 menunjukkan peningkatan sudut serang berdampak pada peningkatan koefisien *lift* dari kelima variasi aliran. Pada sudut 0° nilai koefisien *lift* tertinggi berada pada kecepatan 2 m/s yang memiliki nilai koefisien lift 0,08240. Sudut serang 10° menjadi sudut serang tertinggi pada kelima variasi kecepatan dengan nilai koefisien *lift* tertinggi berada pada kecepatan 2 m/s yang memiliki nilai koefisien lift 0,24000.



Gambar 18. Grafik Gaya Momen pada Variasi Kecepatan

Gaya moment yang terjadi pada *airfoil* disebabkan oleh pergerakan aliran yang dirubah menjadi gaya momen. Gaya momen mengalami peningkatan disetiap kecepatan aliran dan sudut serang. Gaya momen tertinggi ada pada sudut serang 10° dengan kecepatan aliran 10 m.s dengan nilai 0.00135. Hal ini disebabkan oleh aliran udara yang diterima bagian bawah *airfoil* besar, sehingga menimbulkan gaya momen inersia pada titik pusat *airfoil*



Gambar 19. Grafik Koefisien Momen pada Variasi Kecepatan

Peningkatan sudut serang berpengaruh terhadap nilai koefisien momen pada setiap variasi kecepatan aliran yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Nilai koefisien momen mengalami peningkatan signifikan pada kecepatan 2 m/s dengan sudut serang 10°. Angka tertinggi ada pada sudut serang 10° sebesar 0,01296. Pada sudut serang 0° dan 5° perubahan nilai koefisien momen tidak berubah secara signifikan, terlihat cenderung konstan.

5 KESIMPULAN

1. Bilangan Mach pada kecepatan minimum 2 m/s adalah 0.0057148 dan pada kecepatan maksimum 10 m/s sebesar 0.0285923 artinya masih pada angka $Ma < 0,3$ yang merupakan tipe aliran subsonik. Sedangkan untuk bilangan Reynoldnya pada kecepatan minimum adalah 14.771,94 berada pada angka $Re > 4.000$ maka terowongan angin yang diteliti jenis alirannya adalah turbulen. Kemudian tekanan yang terjadi di dalam terowongan angin pada variasi kecepatan minimum 2 m/s sebesar 101.334,76 Pa dan pada kecepatan maksimum sebesar 101.569,01 Pa.

2. Variasi kecepatan aliran dan sudut serang berdampak pada besaran gaya hambat yang terjadi pada *airfoil*, untuk kecepatan maksimum aliran 10 m/s dengan sudut serang 0° memiliki nilai sebesar 2,11413 N dan pada sudut serang 10° memiliki nilai sebesar 3.80543 N, hal ini dikarenakan luas penampang *airfoil* yang dilewati oleh aliran udara semakin besar seiring meningkatnya sudut serang. Variasi kecepatan aliran dan sudut serang juga berdampak pada peningkatan nilai gaya angkat. Pada kecepatan aliran maksimum 10 m/s dengan sudut serang 0° memiliki nilai gaya angkat sebesar 1.013956 N dan pada kecepatan aliran maksimum 4 m/s dengan sudut serang 10° sebesar 3.601552 N.
3. Hasil analisa menunjukkan tekanan yang terjadi di bawah *airfoil* lebih besar dibandingkan tekanan yang terjadi di atas *airfoil* pada setiap *angle of attack*. Kecepatan aliran pada bagian atas *airfoil* lebih cepat dibandingkan kecepatan aliran dibawah *airfoil* dikarenakan jarak yang ditempuh aliran lebih panjang pada bagian atas *airfoil*. Sehingga, tekanan di atas *airfoil* lebih rendah dibandingkan tekanan di bawah *airfoil*.
4. Gaya momen yang terjadi pada *airfoil* mengalami peningkatan seiring peningkatan kecepatan aliran disetiap sudut serang. Pada kecepatan 2 m/s dengan sudut serang 10° nilainya $1,35 \times 10^{-3}$ Nm, sedangkan pada kecepatan 10 m/s dengan sudut serang 10° nilainya $1,35 \times 10^{-2}$ Nm

- [3] Embang, J. D., (2016). Analisis 2D Airfoil Naca 4412 Menggunakan Computational Fluids Dynamic Pada Variasi Bilangan Mach dan Sudut Serang. Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta
- [4] Triatmojo, B. (2013). *Hidraulika 1*. Yogyakarta: Beta Offset.
- [5] Clancy, Laurence J. (1978). *Aerodynamics*. ISBN 978-0-273-01120-0. Pitman. Retrieved 1 July 2022

6 SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan ada beberapa hal yang perlu dicermati dan diperbaiki yaitu sebagai berikut :

1. Perlunya dilakukan kalibrasi kembali terhadap terowongan angin terutama pada bagian fan dan *test section* agar distribusi aliran yang ada dapat diketahui lebih teliti.
2. Apabila penelitian ini dilanjutkan maka disarankan untuk melakukan penambahan berupa sensor tekanan di dalam *test section* dengan tujuan agar pembacaan ketelitian distribusi tekanan lebih akurat.
3. Penentuan sudut serang akan lebih baik jika dilakukan pada range yang lebih rapat agar dan lebih besar sudutnya, agar nilai gaya aerodinamis diketahui lebih spesifik

Referensi

- [1] Ma'ruf, H. Moch. (2013). Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Koefisien Gaya Hambat Serta Gaya Angkat yang Dihasilkan Pada Benda Uji Berbentuk Setengah Bola dan Berbentuk Aerofoil Pada Alat Uji Terowongan Angin. *Jurnal TRANSMISI Universitas Merdeka Malang*, 9(1), 865–872.
- [2] Hanifah, S. (2015). Analisis Distribusi Kecepatan Aliran Wind Tunnel Tipe Terbuka. Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah. Diambil dari website: <https://eprints.undip.ac.id>