

ANALISIS DESAIN WIND TUNNEL UNTUK VISUALISASI ALIRAN DENGAN ASAP.

Meddy Kooshartoyo^{1*}, Yulianto Sulisty Nugroho¹,
Invranza Zuhdi Pane²

¹Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jalan Margonda Raya, Depok Jawa Barat, 16424, Indonesia

²Laboratorium Aerodinamika, Aeroelastika, dan Aeroakustika, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kawasan Puspiptek Gedung 240, Tangerang Selatan, 15346, Indonesia

*Corresponding Author: meedykooshartoyo@gmail.com

Abstrak

Pengujian terowongan angin adalah kegiatan untuk mengetahui karakteristik aliran dan visualisasi aliran merupakan salah satu bagian dari pengujian terowongan angin, yang ditujukan untuk mengetahui pola aliran udara di sekitar obyek uji. Informasi yang diperoleh dari uji visualisasi aliran selanjutnya dapat digunakan sebagai referensi dalam perancangan wahana transportasi, infrastruktur bangunan dan benda yang digunakan pada kesehariannya mengalami pengaruh gaya aerodinamika. Terdapat sejumlah cara untuk melakukan visualisasi aliran, dan salah satunya yang cukup populer adalah metode pengasapan dengan menggunakan smoke wire. Metode ini memungkinkan perolehan informasi visual dari aliran udara yang direpresentasikan dengan asap berwarna tertentu sehingga dapat mendukung proses kajian aliran udara dari aspek aerodinamik lebih lanjut. Dalam penelitian ini, cairan gliserin dan sabut kelapa dapat digunakan sebagai bahan dasar untuk pengasapan karena ekonomis dan tidak berdampak buruk pada kesehatan manusia.

Kata kunci: gliserin, smoke wire, terowongan Angin, visualisasi aliran.

Abstract

Wind tunnel testing is an activity to determine flow characteristics and flow visualization is one part of wind tunnel testing, which is intended to determine air flow patterns around the test object. The information obtained from the flow visualization test can then be used as a reference in designing transportation vehicles, building infrastructure and objects used in daily life that experience the influence of aerodynamic forces. There are a number of ways to visualize flow, and one of them which is quite popular is the fumigation method using a smoke wire. This method allows obtaining visual information from the air flow represented by certain colored smoke so that it can support the air flow study process from a further aerodynamic aspect. In this research, liquid glycerin and coconut fiber can be used as basic ingredients for fumigation because they are economical and do not have a negative impact on human health.

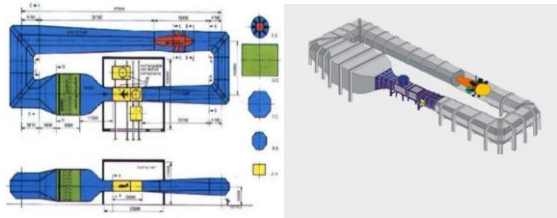
Keywords : flow visualization, glycerin, smoke wire, wind tunnel.

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Terowongan angin digunakan dalam penelitian aerodinamika untuk mempelajari karakteristik aliran udara. Terowongan angin digunakan untuk mensimulasikan keadaan sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya-gaya aerodinamika dalam bidang aeronautika, serta

menganalisis kinerja mekanika terbang (flight mechanics) dari suatu benda terbang (aerial vehicle). Selain itu, terowongan angin juga banyak digunakan dalam pengujian berbagai kondisi benda dalam aliran udara [N. Risnawan, 2018]. Untuk mensimulasikan aliran disekitar benda uji dengan cara pengujian visualisasi aliran dapat dilihat pada Gambar 1.1



Gambar 1.1. Lay out Terowongan angin ILST.(Dokumen ILST)

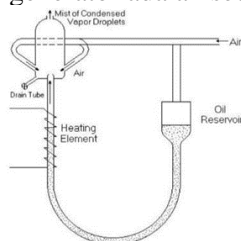
2. Landasan Teori

a. Eksperimen dilakukan di terowongan angin vertikal sirkuit terbuka TecQuipment AF17, tersedia di Laboratorium Penelitian Aerodinamika di Universitas Samsun. Terowongan angin ini mampu bekerja antara rentang kecepatan 0,8-35 m/s yang memiliki penampang uji berukuran 26 x 26 x 4 cm (lebar x tinggi x kedalaman). Terowongan angin dilengkapi dengan ViCount Compact Smoke Generator. Cairan yang digunakan minyak tidak beracun dipanaskan di atas 300 °C, berubah menjadi uap minyak dan dikeluarkan dari generator asap ke bagian uji terowongan angin dengan memanfaatkan karbon dioksida terkompresi. Uap minyak berubah menjadi asap oleh kondensasi saat memasuki bagian uji. Sebuah smoke rake (bernama SR-1) di pintu masuk bagian uji digunakan untuk menyuntikkan asap ke dalam filamen dapat dilihat pada Gambar 1.2 (Gokcen Jurnal dkk, 2021).



Gambar 1.2 TecQuipment AF17 open circuit wind tunnel dan ViCount Compact Smoke Generator (Gokcen Jurnal dkk, 2021).

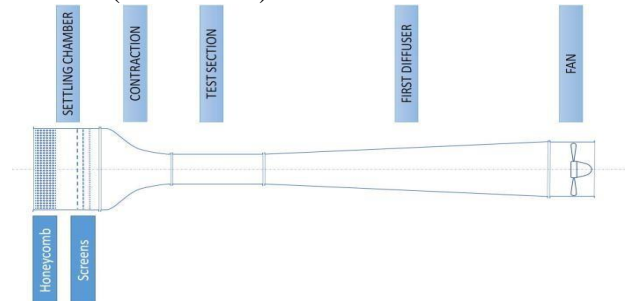
b. Pada penelitian D Raval1,dkk,2021, smoke wire dirancang berdasarkan prinsip Preston sweeting mist generator Gambar 2.2 menunjukkan diagram skema smoke generator berdasarkan prinsip ini. Cara kerja Preston sweeting mist generator adalah sebagai berikut:



Gambar 1.3 Preston sweeting mist generator.(D Raval1,dkk,2021)

Pada penelitian D. Raval1,dkk, kecepatan aliran di terowongan angin sebesar 3 m/s. Smoke generator menghasilkan asap dengan laju 154 cm³/s yang sangat dekat dengan laju alir desain 149 cm³/s. Smoke rake dipasang di bagian kontraksi terowongan angin untuk menghindari difusi aliran. Ketika input daya divariasikan dari 32 W hingga 626 W, suhu asap, laju asap, dan waktu didih diubah dalam kisaran 37° hingga 76°C, 61 hingga 154 cm³/s, dan 45 hingga 3 menit, masing-masing pada suhu udara. kecepatan 4,8 m/s di ruang pencampuran. Visualisasi aliran dilakukan pada model airfoil NACA 0015 dan gambar diambil untuk memeriksa fisik aliran di sekitar benda uji dalam kondisi operasi yang berbeda. (D Raval1,dkk,2021)

c. Terowongan angin loop terbuka Mauro S.*a, dkk,2017 terdiri dari komponen utama sebagai berikut (Gambar 1.4)



Gambar 1.4 Komponen utama dari desain terowongan angin (Mauro S.*a, dkk,2017)

Seksi Uji

o Panjang Seksi Uji dengan formula:
 $L_h = (0.5 \div 3) D_h$ (2.1)

$$D_h = 2 \sqrt{\frac{\Omega_{TS}}{\pi}}$$

Ω_{TS}/A_{TS} : Test section cross-sectional area

Kontraksi

o Panjang Kontraksi dengan formula:
 Atau panjang kontraksi dapat dihitung dengan

$$\frac{L}{2y_0} \cong 1$$
 (2.2)

persamaan 2.3:

$$L_{kontraksi} = (\sqrt{N} - 1) \times \frac{W}{2 \tan \frac{\theta}{2}}$$
 (2.3)

Settling chamber

o Panjang Settling chamber (Nidia,dkk) :
 $L_{Sc} = \sqrt{N} \times (0.5 \div 3) Dh$ (2.4)
 Diffuser

o Panjang Difuser :
 $L_{dif} = 0.2 Dh / (\tan(\Theta_e/2))$ (2.5)

3. Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan pada penelitian ini sebagai berikut:

- Bagaimana melakukan eksperimen visualisasi aliran dengan metoda asap
- Bagaimana smoke line dari variasi cairan gliserin yang digunakan untuk menghasilkan asap pada kecepatan 5m/s, 10m/s, 15m/s, 20 m/s dan sudut serang (α) 0° , 5° , 10° , 15° , 20° ?
- Bagaimana pengaruh kecepatan angin pada cairan gliserin pada volume dan ketebalan asap yang dihasilkan ?

4. Rencana Pemecahan Masalah

Adapun rencana pemecahan masalah yang digunakan pada penelitian ini, antara lain:

Eksperimen akan dilakukan menggunakan smoke wire berdasarkan prinsip generator kabut Preston Sweeting (Preston sweeting mist generator) (Raval1,dkk., 2021) sedangkan untuk terowongan angin dibuat dengan desain ruang uji 30 cm x 30 cm , persamaan diameter hidrolis untuk menentukan luas penampang ruang uji (Mauro S.*a, dkk,2017).

5. Tujuan Penelitian

Yang menjadi tujuan penelitian sebagai berikut:

- Menganalisis desain dan konstruksi wind tunnel.
- Menganalisis aliran asap di *wind tunnel*.
- Menganalisis ketebalan asap yang dihasilkan.

METODE

- Adapun Metode penelitian yang penulis lakukan, sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi literatur ini diperoleh dari beberapa literatur, baik berupa buku-buku perpustakaan, jurnal-jurnal yang diperoleh dari internet, dan sumber-sumber lain yang berkaitan dengan penelitian ini.

2. Analisis

Analisis digunakan untuk menganalisis data dan menghitung data yang diperoleh.

3. Diskusi

Diskusi ini dilakukan guna mendapatkan masukan sekaligus koreksi dan pembandingan.

4. Implementasi

Pembuatan sistem dan ujicoba sistem pada skala prototipe, dan dilanjutkan pada kondisi aktual.

5. Evaluasi.

Mengevaluasi proses penelitian sehingga sesuai dengan tujuan dari penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Terowongan Angin

1. Seksi Uji.

Untuk perancangan terowongan angin terbuka terlebih dahulu menentukan dimensi utama dan kecepatan angin yang diinginkan. Dimensi utama dari bagian uji adalah diameter hidroliknya (D_h) yang menentukan luas penampang ruang uji, untuk perancangan ini akan dibuat dengan penampang 0,3 m x 0,3 m x 0,68 m , kecepatan angin 22,5 m/s. (Mauro S.*a, dkk,2017).

Untuk menghitung D_h didefinisikan sebagai persamaan (2.1)

$$D_h = 2 \sqrt{\frac{\Omega_{TS}}{\pi}}$$

$$\Omega_{TS} = A_{TS}$$

$$= \text{Area penampang seksi uji}$$

$$\Omega_{TS} = A_{TS}$$

$$= 0,3m \times 0,3m$$

$$\Omega_{TS} = A_{TS} = 0,09m^2$$

$$D_h = 2 \sqrt{\frac{0,09}{\pi}}$$

$$D_h = 2\sqrt{0,0286} = 0,3385 \text{ m.}$$

Panjang seksi uji berdasarkan persamaan (2.1) adalah:

$$L_h = (0.5 \div 3) Dh$$

$$L_h = (0.5 \div 3) 0,3385 \text{ m}$$

$$L_h = 2,01 \cdot 0,3385 \text{ m,}$$

$$L_h = 0,680 \text{ m.}$$

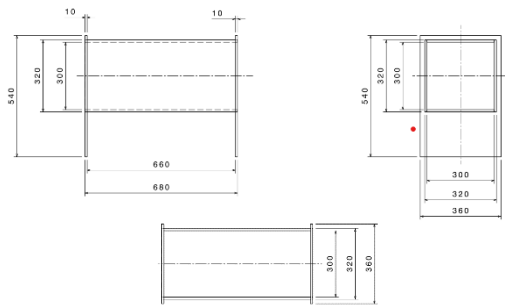
maka dengan panjang seksi uji 0,68 m masih memenuhi persyaratan yang ditentukan. (Mauro S.*a, dkk,2017)

Debit volumetrik aliran udara dalam bagian uji dapat dihitung berdasarkan persamaan debit aliran :

$$Q = A_{TS} \cdot v$$

$$Q = 0,09m^2 \cdot 22,5 \text{ m/s}$$

$$Q = 2,025 \text{ m}^3/\text{s}$$



Gambar 1.5 Komponen Seksi Uji dari desain terowongan angin

2. Kontraksi

Desain kontraksi dimulai dari penampang yang memiliki bentuk dan dimensi yang sama dengan ruang uji. Dalam hal penampang ruang uji persegi seperti bagian outlet kontraksi yang memiliki sudut kemiringan ke bagian inlet dengan nilai rasio (N) 0,9. Mauro S.*a, dkk,2017)

Untuk ini pendekatan 1-D (One dimensional) mempermudah analisa aliran guna menentukan gradien tekanan Gambar 3.3.(Nidia,dkk)

Pada pembuatan terowongan angin terbuka ini Gambar 3.4 bentuk kontraksi bagian inlet ke outlet dibuat sederhana dengan nilai Re seperti rancangan Bell-Metha.

Panjang kontraksi dapat dihitung dengan persamaan (2.3):

$$L_{kontraksi} = (\sqrt{N} - 1) \times W / (2 \tan(\theta/2))$$

$$L_{kontraksi} = (\sqrt{2,7} - 1) \times 0,3 / (2 \tan(7))$$

$$L_{kontraksi} = (1,6432 - 1) \times 1,22165$$

$$L_{kontraksi} = 0,6432 \times 1,22165$$

$$L_{kontraksi} = 0,80 \text{ m}$$

Tinggi kontraksi (H kontraksi) = 2y0 dengan persamaan(2.2) :

$$L / (2y_0) \cong 1$$

$$2y_0 = L : 1,25$$

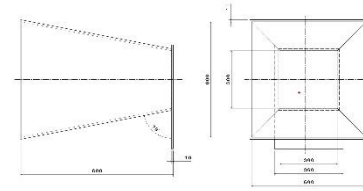
$$2y_0 = 0,80 : 1,25$$

$$2y_0 = 0,60 \text{ m}$$

$$H_k = 2y_0$$

$$H_k = 0,60 \text{ m}$$

Sedang penampang outlet kontraksi sama dengan penampang inlet seksi uji yaitu 0,3 m x 0,3 m sedang penampang inlet kontraksi sama dengan penampang settling chamber dibuat dengan penampang 0,60 m x 0,60 m



Gambar 1.6 Komponen Kontraksi dari desain terowongan angin

3. Settling chamber

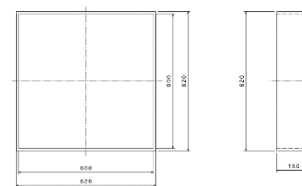
Panjang Settling chamber persamaan (2.4);

$$L_{Sc} = \sqrt{N} \times (0,5 \div 3) \times D_h$$

$$L_{Sc} = \sqrt{1,23} \times 0,5 \times 0,3385$$

$$L_{Sc} = \sqrt{1,23} \times 0,5 \times 0,3385$$

$$L_{Sc} = 0,150 \text{ m}$$



Gambar 1.7 Komponen Settling chamber dari desain terowongan angin

4. Diffuser

Desain diffuser dimulai dari penampang saluran masuk. Luas dan bentuknya diketahui sama dengan luas ruang uji. Dalam kasus terowongan angin sirkuit terbuka, diffuser terhubung ke kipas. Oleh karena itu, luas penampang outlet diffuser sama dengan penampang dari ruang kipas.

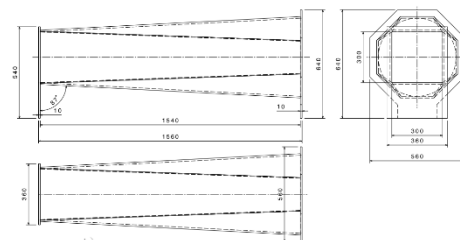
Untuk mengurangi kehilangan tekanan maka sudut kemiringannya dibatasi pada $\theta D = 7$ derajat.

Pajang Diffuser persamaan (2.5):

$$L_{dif} = 0,2 \times D_h / (\tan(\theta/2))$$

$$L_{dif} = 0,2 \times 0,0687536 / 0,0443$$

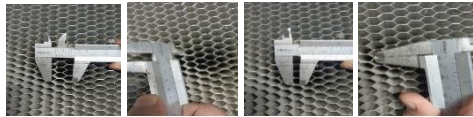
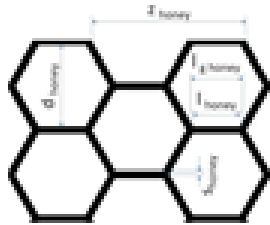
$$L_{dif} = 1,540 \text{ m}$$



Gambar 1.6 Komponen Diffuser dari desain terowongan angin

5. Honeycomb (Sarang Lebah)

Ukuran honeycomb yang digunakan pada terowongan angin Gambar 1.8

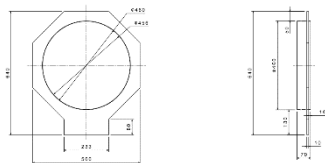


Zhoney=18mm dhoney=9mm ghoney=5mm Shoney=1mm

Gambar 1.8 Komponen Honeycomb dari desain terowongan angin

6. Interface fan

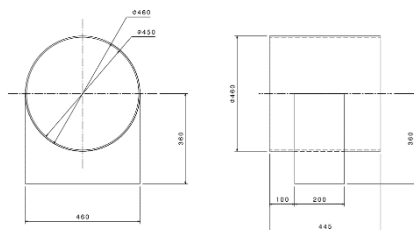
Interface fan adalah jarak antara diffuser dan fan, sehingga getaran dari motor tidak sampai ke diffuser.



Gambar 1.9 Komponen Interface fan dari desain terowongan angin

7. Motor Fan

Ukuran motor fan yang dipakai pada terowongan angin terbuka dapat dilihat pada Gambar 1.10.



Gambar 110 Ukuran motor fan dari desain terowongan angin

Spesifikasi motor fan:

- Jenis motor ventilator : Portable propeller
- Seri : SHT - 45
- Size : 450 mm (18")
- Voltage : 220/240 V-

- Watts : 1500 W
- Frequency : 50 Hz
- Speed : 2800 r/min
- Air delivery : 200 m3/min
- Wind pressure : 972 Pa



Gambar 111 Komponen motor fan dari desain terowongan angin

8. Anemometer.

Alat ukur untuk mengetahui kecepatan angin menggunakan anemometer dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Specifications : UT363/ UT363 BT
- speed Wind : 0~30m/s
- Wind speed accuracy : ±(5%rdg+0.5)
- Wind speed resolution : 0.1m/s
- Temperature : -10~50°C/14~122°F
- Temperature accuracy : ±2°C/±4°F
- Temperature resolution : 0.1°C/0.2°F
- Wind scale : Level 0~12
- Wind scale accuracy : ±1
- Sampling rate : 0.5s

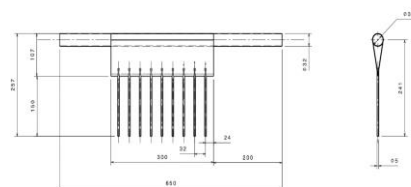
B. Smoke Generator

Smoke generator yang akan dibuat pada penelitian ini berdasarkan jurnal D Raval1,dkk,2021 yaitu dengan metode Preston sweeting mist generator seperti Gambar 1.3 diatas, sedangkan peralatan smoke generator dalam penelitian terdiri dari :

1. Smoke rake.
2. Box untuk menampung asap
3. Peralatan penghasil asap

1.Smoke rake

Smoke dengan ukuran seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Smoke rake dari desain terowongan angin

Smoke Rake (SR)

- Smoke Line Thickness : 5.0 mm
 - Number of Smoke Lines : 9
 - Distance Between Smoke Lines : 32 mm
- Posisi smoke rake ada didalam kontraksi dan seksi uji seperti gambar 2.2.



Gambar 2.2 Smoke rake didalam desain terowongan angin

2. Box untuk menampung asap
Box untuk menampung asap dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Box untuk menampung asap

3. Peralatan penghasil asap
Peralatan penghasil asap pada penelitian ini terdiri dari :

- ❖ Untuk cairan Gliserin
 - a. Power supply DC 5A, 30V.
 - b. Kawat nickelic
 - c. Kompresor mini
 - d. Botol cairan
- ❖ Untuk sabut kelapa
 - a. Biolite CampStove.
 - b. pematik.
 - c. Kompor listrik

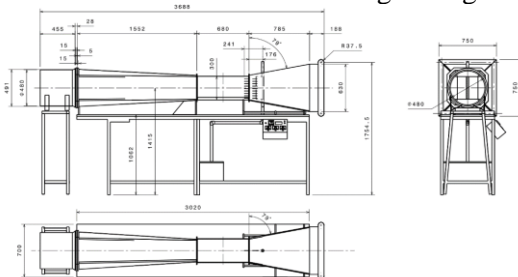


Gambar 2.4 Peralatan biolite CampStove

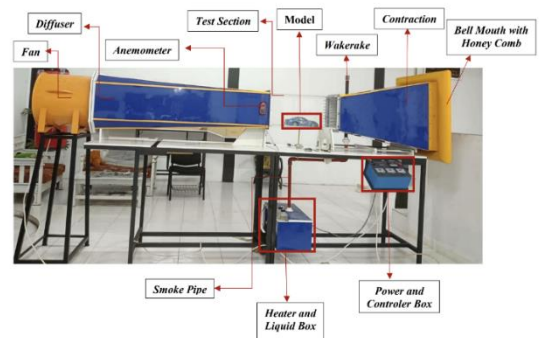
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Desain dan Konstruksi Terowongan Angin



Gambar 3.1 Desain Terowongan Angin



Gambar 3.2 Konstruksi Terowongan Angin

Hasil diimplementasikan dan Evaluasi dengan uji model airfoil NACA 4412 dibuat dari struktur kaca flexiglass setebal 10 mm, dan kulitnya dilapisi resin epoksi dengan mengacu pada dimensi geometri desain pada Gambar 3.3, dengan panjang chord (C) = 151,52 mm, lebar bentang (S) = 300 mm, ketebalan maksimum (t) = 19,18 mm. Proses finishing hanya dilakukan dengan menggunakan amplas halus untuk mencapai tingkat kekasaran pada dinding airfoil. Pada bagian samping tali busur diberikan dukungan penyangga dengan palang untuk keperluan percobaan pada terowongan angin.



Gambar 3.3 Geometri model uji
Pada penelitian ini model uji Airfoil 3D NACA 4412 dipasang pada bagian pengujian Gambar 3.4 Hasil implementasi dan evaluasi percobaan visualisasi aliran.



Gambar. 3.4 Hasil implemetasi dan evaluasi aliran pada benda uji dalam *wind tunnel* pada $v = 20\text{m/s}$

Gambar eksperimental diambil dengan kamera CANON M-10 dengan aperture F8-1.8 dan menggunakan kecepatan rana 1/30 s, ISO 100. Kamera ditempatkan berlawanan dengan bagian pengujian, mengamati garis asap yang jelas. Selain itu, lampu strip LED ditempatkan di dalam bagian pengujian di dinding samping untuk memberikan penerangan pada garis asap.

PEMBAHASAN

Hasil akhir dari simulasi visualisasi aliran perlu diverifikasi menggunakan data eksperimen dengan konfigurasi yang sama. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan percobaan yang dilakukan oleh Gokcen Jurnal et al. (2021) dapat dilihat pada tabel 1.

Validasi dilakukan dengan membandingkan sudut serang (α) 0° , 5° , 10° , 15° , 20° dan kecepatan angin (V_o) 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s dan 20 m/s. Koefisien angkat (CL) meningkat seiring dengan meningkatnya sudut serang (α) sebelum

Tabel 1. Perbandingan antara hasil penelitian dan percobaan yang dilakukan oleh Gokcen Jurnal et al. (2021) pada sudut serang (α) = 10°

Experiment Gokcen J, et al	Research results at speeds of 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s , 20 m/s, angle of attack 10°

Tabel 2. Sudut serang (α) meningkat dan kecepatan angin tertentu (V_o)

(α)	$V_o(m/s)$			
	5	10	15	20
0°				
5°				
10°				
15°				
20°				

Aliran udara disekitar model airfoil NACA 4412 mengikuti persamaan :

$$\frac{\delta}{L} \sim \sqrt{\frac{v}{V_\infty L}} = \frac{1}{\sqrt{Re}}$$

dimana :

δ = tebal lapisan batas (m)
 L = panjang karakteristik (m)
 ν = viskositas kinematik fluida (m^2/s)
 V_∞ = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)
 Re = Reynolds number

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan Hasil penelitian sebagai berikut:

a. Hasil analisis desain dan konstruksi wind tunnel.

Desain dan konstruksi wind tunnel yang dilengkapi dengan smoke generator dan peralatan smoke rake SR yang terpasang dibagian kontraksi dan menghasilkan asap dalam waktu yang lama sehingga dapat memenuhi tujuan penelitian.

b. Menganalisis aliran asap di wind tunnel.

Aliran angin dapat dilihat dari aliran asap yang uniform.

c. Menganalisis ketebalan asap yang dihasilkan. Aliran asap yang dihasilkan cukup tebal sehingga dalam pengambilan gambar lebih mudah.

Saran:

Untuk penelitian selanjutnya memerlukan kamera yang lebih bagus sehingga gambar yang dihasilkan lebih jelas.

Hasil analisis desain smoke rake.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Prof. Ir. Yulianto Sulistyono Nugroho, M.Sc. Ph.D

Dr. Ivranza Zuhdi Pane, M.Eng

NIP/NUP.196807281993031001 sebagai dosen pembimbing di FTM Universitas Indonesia dan Dr. Ivranza Zuhdi Pane, M.Eng NIP. 196105171987031002 Co.pembimbing di LA3 BRIN.

NIP. 196105171987031002

NIP. 196105171987031002

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah M. Kuraan • O' mer Savas," Smoke streak visualization of steady flows over a spinning cone at angle of attack in flight", Received: 6 June 2019 / Revised: 11 September 2019 / Accepted: 5 December 2019 / Published online: 18

December 2019 The Visualization Society of Japan 2019.

Ahmed ABOELEZZ*,a," Low Speed Wind Tunnel Design and Optimization Using Computational Techniques and Experimental Validation", INCAS BULLETIN, Volume 11, Issue 2/ 2019, pp. 3 – 13 (P) ISSN 2066-8201, (E) ISSN 2247-4528

Ahmed, M. R., Takasaki, T., & Kohama, Y. (2007). Aerodynamics of a NACA4412 airfoil in ground effect. *AIAA Journal*, 45(1), 37–47. <https://doi.org/10.2514/1.23872>

Alireza Hashem-ol-Hosseini a , Mehran Akbarpour Ghazani b,c , Amirreza Shahsavari a , M. Soltani c,d,e,f,*," Experimental investigation of thermal-hydraulic characteristics of finned oval tube bundles in cross-flow arrangements", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 180 (2021) 121759

Amat Chaeroni," Penyederhanaan Sistem Pemanas Dan Cairan Yang Digunakan Pada Smoke Generator Untuk Alat Peraga Ilmu Aerodinamika", Vol. 7 No.1 (2022):*Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, a:1:{s:5:"en_US";s:42:"Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma";}

Ankit Dangwal, Samadarshi Adhikari, Manish Kumar Bharti, Prakhar Jindal," Design, Fabrication and Testing of Smoke Wind Tunnel", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-12, October 2019

Auteri, F., Savino, A., Zanotti, A., Gibertini, G., Zagaglia, D., Bmegapche Tekap, Y., & Braza, M. (2022). Experimental evaluation of the aerodynamic performance of a large-scale high-lift morphing wing. *Aerospace Science and Technology*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107515>

Azim, R., Hasan, M. M., & Ali, M. (2015). Numerical investigation on the delay of boundary layer separation by suction for NACA 4412. *Procedia Engineering*, 105,

- 329–334.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.013>
- Bell, J.H., R.D. Metha. 1989. Boundary-Layer Predictions for Small Low Speed Contractions. London. AIAA Journal. http://vonkarman.stanford.edu/tunnel/contraction_paper.pdf
- Beyhaghi, S., & Amano, R. S. (2018). A parametric study on leading-edge slots used on wind turbine airfoils at various angles of attack. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.007>
- Cengel, Y.A., & Cimbala s.J.M. (2017). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (SI Units)*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Chen, X., Cheng, X., & Tian, J. (2023). Research on the pressure distribution under different airfoil types of aircraft. *Journal of Physics: Conference Series*, 2441(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2441/1/012005>
- D Ravall, S V Jain, A M Achari and K Ghosh,” Design and analysis of smoke flow visualization apparatus for wind tunnel”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, ICRAMEN 2021
- Effendy, M., Muchlisin, D., & Yani, J. A. (2019). Studi Eksperimental dan Simulasi Numerik Karakteristik Aerodinamika Airfoil NACA 4412. *ROTASI*, 21(3), 147–154.
- Felix Oehme a,* , Daniel Gleichauf a , Janick Suhr b , Nicholas Balaesque b , Michael Sorg a , Andreas Fischer a”, Thermographic detection of turbulent flow separation on rotor blades of wind turbines in operation , *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 226 (2022) 105025
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2020). *Introduction to fluid mechanics*, 8th edition. New Jersey, United States of America: J. Wiley. Fu Zhu a,b, Zhixiang Yu a,b,* , Zhixiang Liu a, Xiaoxiao Chen a, Ruizhou Cao a, Hao Qin c,” Experimental study on the air flow around an isolated stepped flat roof building: Influence of snow cover on flow fields”. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 203 (2020) 104244.
- Haque, M. N., Ali, M., & Ara, I. (2015). Experimental investigation on the performance of NACA 4412 aerofoil with curved leading edge planform. *ProcediaEngineering*, 105, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.099>
- Glenn Research Center, NASA, Schematic drawing of two wind tunnels (one subsonic, one supersonic) and an explanation of the differences in the design Jul 17, 2019
- Jurnal, G., Kose, C., Kolbakir, C., & Durna, A. S. (2021). Improvement of smoke rakes and the image processing for the flow visualization experiments Flow Control and Visualization in Low Reynolds Number View project. 11th ANKARA INTERNATIONAL AEROSPACE CONFERENCE. <https://www.researchgate.net/publication/356809694>
- Koca, K., Genç, M. S., Açikel, H. H., Çağdaş, M., & Bodur, T. M. (2018). Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution. *Energy*, 144, 750–764. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.045>
- Lakshmanan, D., Vadivelu, P., Sivaraj, G., & Prasath, M. S. (2021). Computational fluid dynamics simulation on

- aerodynamic characteristics of ONERA M6-wing. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2194–2199. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.042>
- Mauro S.*a, Brusca S.b, Lanzafame R.a, Famoso F.a, Galvagno A.b and Messina M.a,” Small-Scale Open-Circuit Wind Tunnel: Design Criteria, Construction and Calibration”, *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 23 (2017) pp. 13649-13662 © Research India Publications.
- Mccarty, M. (1968). The measurement of the pressure distribution over the wing of an aircraft in flight. <https://doi.org/10.26190/unsworks/18295>
- Mohamed, M. A., Afgan, I., Salim, M. H., & Mohamed, I. K. (2022). Low speed aerodynamic characteristics of non-slender delta wing at low angles of attack. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 9427–9435. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.003>
- Nade Cao, Kazutoshi Matsuda *, Kusuo Kato, Kenta Shigetomi, Kazufumi Ejiri,” experimental study on the effect of the secondary vortex at trailing edge on response characteristics of motion-induced vortex vibration in the torsional mode”, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 206 (2020) 104369, Department of Civil Engineering and Architecture, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550, Japan
- N. Risnawan, F. A. Yohanes, H. Novianti, and Y. Feriadi, “Pengukuran Kualitas Kecepatan Angin pada Terowongan Angin di ILST BBTA3,” *J. Aero Technol.*, vol. 02, no. 01, pp. 26–36, 2018.
- N.Yuniarsih,WowoRossbandrio,”Pengembang an Terowongan Angin Kecepatan Rendah (Low Speed Wind Tunnel) Untuk Tujuan Edukatif di Politeknik Negeri Batam”, *Corpus ID: 128148762, semanticscholar, Published 1 April 2015*
- Ockfen, A. E., & Matveev, K. I. (2009). Aerodynamic characteristics of NACA 4412 airfoil section with flap in extreme ground effect. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1(1), 1–12. <https://doi.org/10.2478/ijnaoe-2013-0001>
- Odenir de Almeida1, Frederico Carnevalli de Miranda1, Olivio Ferreira Neto1, Fernanda Guimarães Saad1,” Low Subsonic Wind Tunnel – Design and Construction”, *J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos*, v10, e1018, 2018
- Philip F. Yuan, Yanan Song, Yuqiong Lin, Hooi Shan Beh, Yan Chao, Tong Xiao, Shuyi Huang, Jingyun Zheng, Zhiqiang Wu,” An architectural building cluster morphology generation method to perceive, derive, and form based on cyborg-physical wind tunnel (CPWT)”, *Building and Environment* Volume 203, October 2021, 108045
- Podstick.com, “Pengertian Apa itu Liquid Vape Salt Nic dan Freebase”, May27,2021
- Qu, Q., Jia, X., Wang, W., Liu, P., & Agarwal, R. K. (2014). Numerical study of the aerodynamics of a NACA 4412 airfoil in dynamic ground effect. *Aerospace Science and Technology*, 38, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.07.016>
- Uddin, M. I., & Karim, M. M. (2017). Application of Volume of Fluid (VOF) method for prediction of wave generated by flow around cambered hydrofoil. *Procedia Engineering*, 194, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.120>
- Xu, J., Fu, Z., Bai, J., Zhang, Y., Duan, Z., & Zhang, Y. (2018). Study of boundary layer transition on supercritical natural laminar flow wing at high Reynolds number through wind tunnel experiment. *Aerospace Science and Technology*, 80, 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.07.007>

. Terjemahan oleh Arief Furchan. 1982.
Surabaya: Usaha nasional