

Analisis Intensitas Turbulensi Terhadap Kestabilan Kecepatan Angin *Test Section* pada Struktur *Wind Tunnel*

Riza Arif Pratama^{1*}, Muhammad Ikhsan¹, Dhimas Wicaksono³, M. Safiq Rieza⁴, Munir Zainal Abidin⁵

^{1,2,4,5}Program Studi Teknologi Pemeliharaan Pesawat, Universitas Tunas Pembangunan (UTP) Surakarta

³Program Studi Rekayasa Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan (STTKD)

^{1,2,4,5}Jln. Balekambang Lor No.1 Banjarsari, Manahan, Kota Surakarta 57135, Indonesia

³Jl. Parangtritis No.5 No.KM.4, Bangunharjo, Bantul, Yogyakarta 55187

E-mail: rizaarifp@lecture.utp.ac.id¹, mr.muhammadikhsan@lecture.utp.ac.id²,

dhimas.wicaksono@sttkd.ac.id³, muhammadsafiqreiza@gmail.com⁴, munir.zainal33@gmail.com⁵,

Info Naskah:

Naskah masuk: 11 November 2024

Direvisi: 22 Januari 2025

Diterima: 31 Januari 2025

Abstrak

Terowongan angin dalam pengujian aerodinamika selalu memiliki ukuran yang sangat besar untuk menghindari adanya intensitas turbulensi yang tinggi. Analisis intensitas turbulensi digunakan untuk menentukan ukuran terowongan angin yang lebih kecil sesuai standar untuk lebih efisien pada ruangan yang terbatas. Penggunaan bahan resin fiber epoxy dikarenakan lebih ringan dibandingkan pada aluminium dengan ketebalan 5mm. Tujuan penelitian menghasilkan terowongan angin dengan ukuran yang kecil dengan intensitas turbulensi yang rendah dan meminimalisir biaya pembuatan yang besar. Metode yang digunakan konstruktif untuk menganalisis desain terowongan angin dalam mengetahui maksimal kecepatan aliran angin pada lokasi tidak melebihi batas intensitas turbulensi. Hasil analisa didapatkan bahwa desain struktur terowongan angin mempunyai kemampuan menerima aliran angin inlet sebesar 5 m/s dengan maksimal kecepatan aliran angin di lokasi uji sebesar 10,7 m/s. Desain terowongan angin tidak bisa lebih dari kecepatan maksimal aliran angin pada lokasi uji karena akan menghasilkan intensitas turbulensi di atas 5% yang berpengaruh pada hasil uji.

Keywords:

wind tunnel;

aerodynamics

turbulence intensity;

velocity magnitude;

test section.

Abstract

Wind tunnels in aerodynamic testing always have very large sizes to avoid high turbulence intensity. Turbulence intensity analysis is used to determine the size of a smaller *wind tunnel* to be more efficient in limited space. The use of epoxy fiber resin material is because lighter than aluminum with a thickness of 5mm. The purpose of the study was to produce a *wind tunnel* with a small size with low turbulence intensity and minimize large manufacture costs. The method used is constructive to analyze the *wind tunnel* design in determining the maximum wind flow speed at test section does not exceed the turbulence intensity limit. The results of the analysis showed that the *wind tunnel* structure design has the ability to receive an inlet wind flow of 5 m / s with a maximum wind flow speed at the test location of 10.7 m / s. The *wind tunnel* design cannot exceed the maximum wind flow speed at the test section because it will produce turbulence intensity above 5% which affects the test result.

*Penulis korespondensi:

Riza Arif Pratama

E-mail: rizaarifp@lecture.utp.ac.id

1. Pendahuluan

Wind tunnel memiliki parameter yang mampu mempengaruhi kemampuan seperti: permukaan dalam yang halus, kekuatan struktur, tahan getaran, dan kemiringan *contraction cone* [1]. Kestabilan aliran angin pada test section harus seragam untuk mengetahui hasil pengujian pada airfoil. Permukaan bagian dalam *diffuser* dan *contraction cone* harus memiliki tingkat kekasaran yang rendah untuk meminimalisir turbulensi [2]. Struktur *Wind tunnel* mampu menahan getaran supaya tidak mempengaruhi hasil pengujian pada airfoil [3]. Struktur *wind tunnel* harus kokoh untuk membantu mencegah distorsi atau deformasi yang dapat mempengaruhi akurasi pengukuran. Kemiringan *contraction cone* harus mampu berfungsi untuk mengarahkan aliran angin ke bagian *test section* secara konsisten pada airfoil pada saat pengujian berlangsung [4]. Aliran angin yang mengalir harus terhindar dari efek gangguan tepi (*edge effect*) [5] sehingga aliran angin seragam dan mengurangi efek turbulensi.

Wind tunnel yang dirancang menggunakan model *open return*. Keunggulan *open return wind tunnel* memiliki konstruksi yang sederhana tanpa harus mengisolasi aliran angin sehingga tidak perlu pengontrolan suhu dan biaya perawatan yang rendah [6]. *Wind tunnel* ini memiliki bagian seperti *contraction cone*, honey comb, test section, diffuser, dan kaki [7]. Faktor yang mempengaruhi keadaan aliran angin yaitu kekentalan fluida μ (μ), rapat massa fluida ρ (ρ) dan luas penampang dari benda [8] dalam mengurangi intensitas turbulensi dan keseragaman aliran angin. Permukaan dalam yang halus pada *wind tunnel* digunakan untuk mereduksi turbulensi aliran angin di sekitar model uji (airfoil). Kondisi aliran angin yang konsisten di sepanjang *wind tunnel* dilakukan untuk menghindari variabilitas hasil yang disebabkan akibat fluktuasi aliran angin [5]. Permukaan dalam yang tidak halus akan mempengaruhi distribusi tekanan apabila terjadi gangguan kecil pada saat pengujian [9].

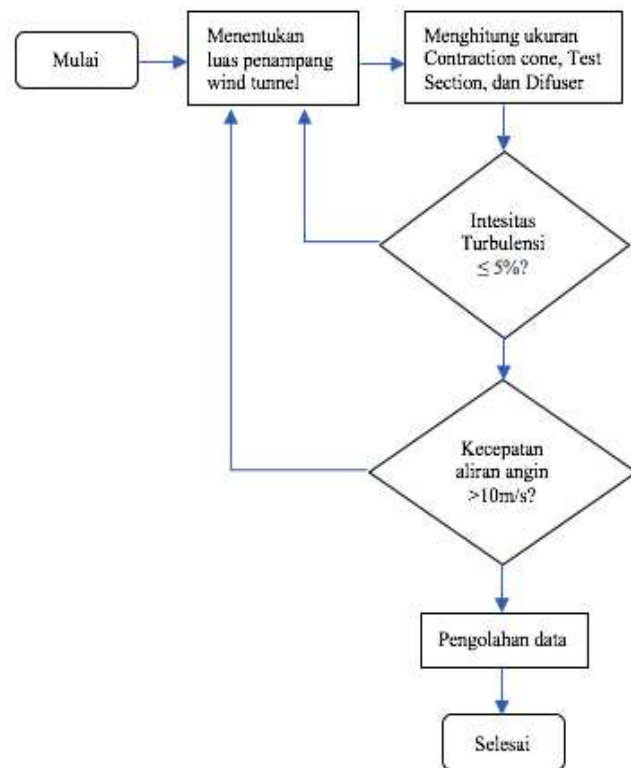
Kekuatan struktur harus dirancang dengan memperhitungkan beban aerodinamika yang dapat muncul pada saat pengujian. Struktur yang tidak kokoh akan mengalami kenaikan intensitas turbulensi akan mengakibatkan fluktuasi aliran angin yang tinggi [10]. Aliran angin yang tidak stabil diakibatkan adanya pengaruh pada struktur *wind tunnel* apabila terjadi getaran yang mengakibatkan variasi nilai [11]. Kemiringan *contraction cone* dengan sudut 5° dengan menambahkan luas rasio akan menurunkan intensitas turbulensi di bawah 2% [12]. Sudut kemiringan *contraction cone* dan *diffuser* diperkecil disesuaikan dengan luas rasio supaya menjaga aliran angin yang masuk ke *test section*. Struktur *wind tunnel* yang terbuat dari material komposit akan lebih kuat dan ringan dibandingkan dengan aluminium dengan elastisitas jauh lebih tinggi [13], [14].

Honeycomb dengan lubang berbentuk heksagonal yang digunakan dalam mengurangi turbulensi dan fluktuasi aliran angin yang awalnya tidak teratur menjadi lebih teratur dibandingkan berbentuk kotak dan bulat [15]. Penggunaan polywood akan mengalami durasi tunggu penurunan aliran angin secara bertahap tetapi memiliki waktu tunggu yang lebih lama supaya distribusi udara seragam [16]. Pada

penelitian lain, struktur *wind tunnel* berukuran besar mendapatkan nilai intensitas turbulensi pada tingkat medium sebesar 3,14% dengan kecepatan aliran angin yang terbatas pada 5,61m/s [17]. *Wind tunnel* jenis tubular *open return* memiliki intensitas turbulensi sebesar 4% dengan hasil simulasi dan dibandingkan dengan hasil nyata sangat berbeda jauh pada hasil pengujianya [18]. Aliran angin yang stabil pada 12m/s tidak akan berpengaruh pada nilai drag dan lift selama *Angle of Attack* tidak mengalami perubahan [19]. Tingkat medium pada intensitas turbulensi akan diminimalisir pada struktur *wind tunnel* yang akan dibuat dengan ukuran yang relatif lebih kecil dan faktor kekasaran yang rendah dengan bahan komposit fiber epoxy. Penggunaan resin epoxy digunakan karena lebih ringan dibandingkan aluminium dan kayu yang biasanya digunakan dalam pembuatan *wind tunnel* [20]. Tujuan penelitian untuk menentukan ukuran *wind tunnel* yang ukuran lebih kecil dengan intensitas turbulensi pada batas maksimal berbahan komposit fiber epoxy.

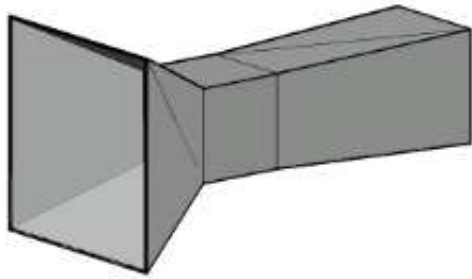
2. Metode

Metode konstruktif digunakan untuk melakukan pembuatan struktur *wind tunnel* dalam meminimalisir turbulensi supaya pada saat pengujian airfoil tidak mempengaruhi drag dan lift. Diagram alir dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

Tekanan aliran angin yang terdapat di setiap bagian sepanjang *wind tunnel* ditentukan sesuai prinsip Bernoulli. *Wind tunnel* memiliki bagian – bagian yang perlu dibuat seperti; *contraction cone* (CC), honeycomb, test section (TS), diffuser (D), dan kaki penopang.



Gambar 2. Desain Wind Tunnel

Gambar 2 menunjukkan desain *wind tunnel* yang dibuat merupakan jenis *open-loop* (sistem terbuka) dengan bagian *contraction cone*, *honeycomb*, *test section*, *diffuser*. Pada bagian *contraction cone* dan *diffuser* yang dibuat menggunakan material komposit resin fiber epoxy. Material komposit resin fiber epoxy digunakan karena lebih ringan dan kuat terhadap temperatur dibandingkan aluminium [21]. Dengan ukuran yang kecil *wind tunnel* akan mampu meredam turbulensi yang diakibatkan aliran angin pada saat dioperasikan, sehingga tidak akan mempengaruhi *drag* dan *lift* pada saat pengujian airfoil. Spesifikasi ukuran yang dibuat sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi Wind Tunnel

Bagian	Specification
Panjang Total Wind tunnel	1,9 m
Contraction cone Luar	920 x 920 mm
Contraction cone Dalam	400 x 400 mm
Panjang Contraction cone	500 mm
Material Test section	Akrilik
Test section	400 x 400 x 400 mm
Panjang Diffuser	1m
Diffuser Dalam	400 x 400 mm
Diffuser Luar	480 x 480 mm
Diameter honeycomb	5mm

Panjang total *wind tunnel* dihitung mulai dari inlet hingga *outlet* memiliki panjang 1,9m. Ukuran panjang *wind tunnel* sudah diukur untuk memastikan aliran angin yang stabil dan seragam pada saat masuk ke *test section*. Turbulensi yang mungkin terjadi pada aliran angin akan diminimalisir agar tidak mempengaruhi akurasi pengukuran gaya (*drag lift*). Penggunaan honeycomb mampu menurunkan intensitas turbulensi pada *wind tunnel* [22]. Gambar 3 merupakan arah aliran angin yang memasuki keseluruhan *wind tunnel* pada saat dilakukan simulasi intensitas turbulensi dan *velocity magnitude*.



Gambar 3. Arah Aliran Angin

Test section berukuran 400 x 400mm terbuat dari akrilik transparan supaya pada saat pengujian mampu melihat aliran angin yang mengenai airfoil. Aliran angin yang mencapai pada bagian *test section* harus memiliki turbulensi yang rendah [23]. Turbulensi yang rendah tidak akan mempengaruhi *drag* dan *lift* pada saat aliran angin menabrak airfoil pada saat pengujian. Pengujian akan dilihat hasil *drag* dan *lift* melalui alat ukur gaya terkait seberapa besar pengaruh terhadap turbulensi[24]. Pada bagian *test section* harus dihitung koreksi rasio *blockage* dari rasio luas bagian depan dengan luas penampang [25] dengan *blockage* dibawah 10% [26]. Koreksi rasio di atas 10% akan mengakibatkan distorsi yang akan mempengaruhi nilai pada saat pengujian [27]. Perencanaan panjang *test section* sesuai dengan persamaan diameter (D) [28] . Persamaan 1 mencari diameter dengan asumsi penampang 0,18m dan hasil desain pada Gambar 4.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \tag{1}$$

Luas penampang (A_t) pada *test section*:

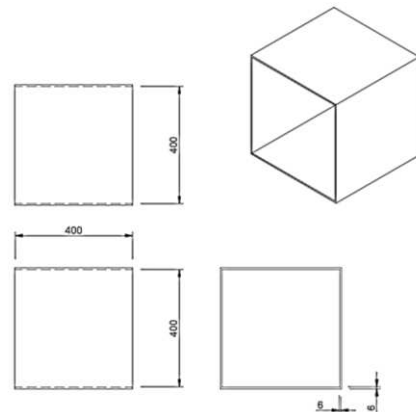
$$A_t = 0,18 \cdot 0,18 = 0,0324m^2$$

Luas penampang yang diketahui akan digunakan untuk mencari diameter hidraulik (D_h) untuk menentukan panjang dari bagian *test section*.

$$D_h = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0324}{3,14}} = \sqrt{0,041} = 0,202m$$

Jadi panjang *test section* (L_s):

$$L_s = 2 \cdot 0,202 = 0,4m$$



Gambar 4 Desain Test Section

Gambar 5 menunjukkan desain *diffuser* dalam berukuran 400 x 400mm dan bagian luar 480 x 480mm dengan panjang keseluruhan 1m yang terbuat dari komposit resin fiber epoxy. Perancangan pada bagian *diffuser* harus mampu mengurangi kehilangan tekanan total dengan mengompresi aliran angin memiliki fungsi yang sangat penting [28]. Persamaan 2 digunakan untuk menentukan ukuran diameter *axial fan* (D_f) yang akan dipakai dalam menghasilkan aliran angin pada ujung *diffuser*. Pada persamaan 2 menentukan *fan*

area (FA) yang akan dijadikan acuan dalam melihat kebutuhan ukuran diameter kipas yang dibutuhkan.

$$FA = 4 \cdot A \quad (2)$$

$$FA = 4 \cdot 0,0324 = 0,1296\text{m}^2$$

$$D_f = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0648}{3,14}} = \sqrt{0,165} = 0,406\text{m}$$

Maka, kipas aksial yang akan digunakan dengan diameter 0,406m yang dikonversi menjadi inchi yaitu 16 inch. Luar area keseluruhan (FAr) yang digunakan pada *diffuser* bagian luar sesuai Persamaan 3.

$$FAr = FA^2 \quad (3)$$

$$FAr = 0,285^2 = 0,0812\text{m}^2$$

Luas penampang (A_r) pada area kipas dilakukan penghitungan sesuai Persamaan 4 untuk menentukan panjang *diffuser* sehingga lebih efektif dalam pendistribusian aliran angin.

$$A_r = \frac{FAr}{A} \quad (4)$$

$$A_r = \frac{0,0812}{0,0324} = 2,5\text{m}$$

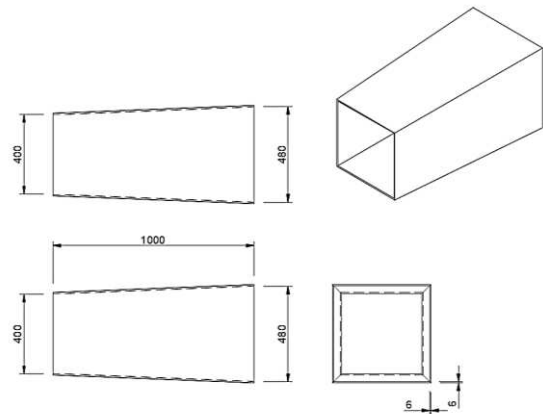
Maka, panjang *diffuser* (L_D) yang akan digunakan dilihat berdasarkan luas penampang kipas (A_r) dengan diameter hidraulik (D_h), dan sudut pada *diffuser* (θ) sesuai dengan Persamaan 5.

$$L_D = D_h \left(\frac{\frac{1}{2}A_r - 1}{\tan \theta} \right) \quad (5)$$

$$L_D = 0,2 \left(\frac{\frac{1}{2}2,5 - 1}{\tan 3^\circ} \right)$$

$$L_D = 0,2 \left(\frac{0,25}{0,05} \right) = 0,2 (0,5) = 1\text{ m}$$

Diffuser menggunakan kemiringan sudut $\pm 3^\circ$. Perencanaan *diffuser* pada *wind tunnel* dengan ukuran 2 - 3 kali lebih besar dibandingkan *test section* [28]. Penentuan panjang dari *diffuser* dihasilkan yaitu 1m.

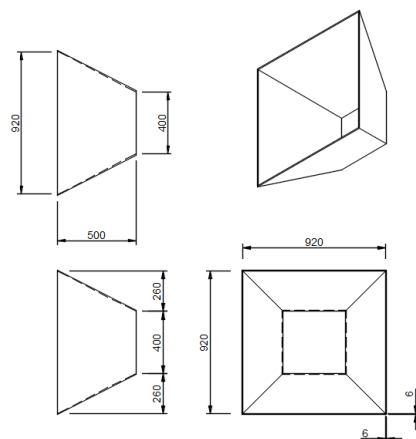


Gambar 5 Desain *Diffuser*

Gambar 6 menunjukkan *contraction cone* dibuat dengan ukuran bagian luar 920 x 920mm dan bagian dalam 400 x 400mm dengan sudut $\pm 62^\circ$. Ukuran tersebut memiliki pengaruh pada laju aliran angin di dalam ruang uji yang akan bertambah tergantung luas penampang *contraction cone* [29]. Aliran angin harus seragam supaya tidak mempengaruhi pengujian airfoil pada saat mengukur *drag* dan *lift* di area *test section*. Gangguan dan turbulensi aliran angin perlu diminimalisir dengan meningkatkan kurva *contraction cone* [30], sehingga mampu menghasilkan aliran angin yang optimal pada saat pengujian airfoil. Percepatan dan pengurangan aliran angin yang tidak seragam sebagian besar bergantung pada rasio *contraction cone* [31]. *Contraction cone* memiliki ukuran 6 – 10 kali dari *test section* [28] menggunakan persamaan 6.

$$Ac = 8 \cdot At \quad (6)$$

$$Ac = 8 \cdot 0,0324 = 0,5\text{ m}$$



Gambar 6 Desain *Contraction cone*

Pada bagian dalam *contraction cone* akan ditambahkan *honeycomb* berbentuk heksagonal dengan ukuran diameter 5mm yang digunakan untuk memecah aliran angin supaya lebih kecil pada saat masuk ke *test section*. Penggunaan *honeycomb* dengan berbentuk lingkaran masih belum terpengaruh pada turbulensi, sehingga menghasilkan aliran angin yang tidak seragam [32].

3. Hasil dan Pembahasan

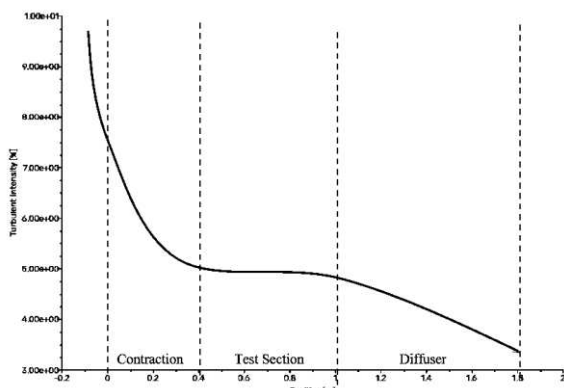
3.1 Pengujian Intensitas Turbulensi

Wind tunnel dilakukan pengujian intensitas turbulensi yang terjadi pada bagian *contraction cone* (CC), *test section*, (TS) dan *diffuser* (D) dengan titik point berada dibagian tengah pada masing – masing bagian dengan metode CFD. Pemantauan dilakukan untuk mengetahui bagian yang terjadi turbulensi dengan intensitas berbeda tergantung kecepatan aliran angin pada inlet. Simulasi menggunakan aliran angin inlet mulai dari 1 – 10m/s. Tabel 2 menunjukkan intensitas turbulensi pada setiap bagian *wind tunnel* yang dilalui aliran angin.

Tabel 2 Intensitas Turbulensi

Aliran angin Inlet (m/s)	Intensitas Turbulensi (%)		
	CC	TS	D
1	4,42	4,35	4,34
2	4,70	4,61	4,52
3	4,80	4,78	4,67
4	4,92	4,88	4,78
5	5,02	4,98	4,86
6	5,21	5,16	4,94
7	5,32	5,20	5,09
8	5,42	5,29	5,12
9	5,56	5,32	5,23
10	5,63	5,35	5,26

Pengujian disimulasikan untuk mengetahui intensitas turbulensi terhadap maksimal kecepatan aliran angin pada *wind tunnel*. Analisis yang dipantau digunakan untuk melihat kecepatan aliran angin yang mampu diterima oleh *wind tunnel* dalam menerima intensitas turbulensi rendah yaitu 5% [33]. Gambar 6 menunjukkan hasil analisis turbulensi yang didapatkan dengan maksimal 4,98 % yang tergolong intensitas turbulensi yang rendah pada bagian TS. Aliran angin yang diberikan melalui kipas axial, intensitas turbulensi pada CC mulai mengalami penurunan pada saat menuju ke TS dikarenakan melewati bagian D supaya aliran angin diperhalus [34]. Bagian TS memiliki intensitas turbulensi yang lebih stabil karena tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Bagian D mulai mengalami penurunan karena aliran angin tidak begitu mempengaruhi karena memiliki bagian yang lebih panjang. Batas maksimal inlet yang digunakan hanya 5m/s dikarenakan *wind tunnel* memiliki ukuran yang lebih kecil di bawah 2m.



Gambar 7 Intensitas Turbulensi (5m/s)

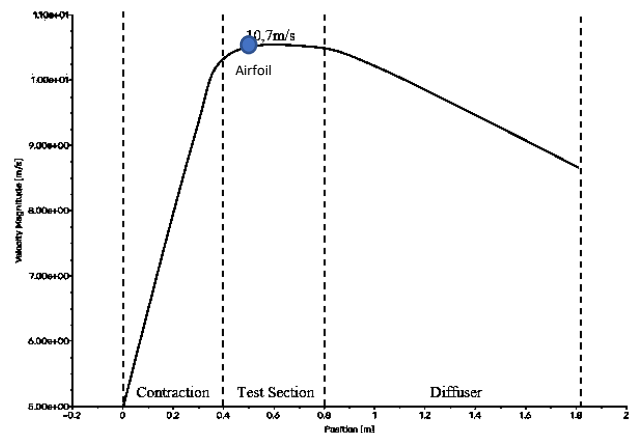
3.2 Pengujian Kecepatan Aliran Angin

Tabel 3 menunjukkan intensitas turbulensi maksimal 5% menggunakan aliran angin inlet 5 m/s dengan menghasilkan aliran angin pada *test section* 10,7m/s. Berdasarkan data simulasi yang dilakukan intensitas turbulensi di atas 5% dianggap akan berpengaruh pada nilai pengujian airfoil [33]. Maksimal kecepatan aliran angin yang digunakan maksimal 10,7m/s pada saat mencapai bagian TS.

Tabel 3 Kecepatan Aliran Angin TS

Aliran angin Inlet (m/s)	Intensitas Turbulensi (%)	Aliran angin TS (m/s)
1	4,35	2
2	4,61	4,14
3	4,78	6,21
4	4,88	8,28
5	4,98	10,7
6	5,16	12,4
7	5,20	14,5
8	5,29	16,7
9	5,32	18,6
10	5,35	20,7

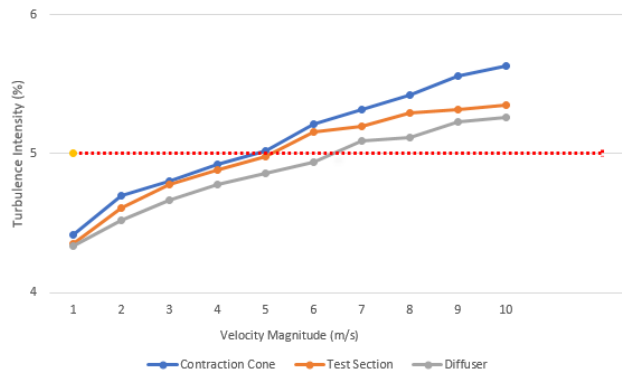
Gambar 8 menunjukkan posisi airfoil untuk pengujian dan penyesuaian sudut serang untuk mengevaluasi drag dan lift. Aliran angin ada TS stabil pada posisi penempatan airfoil [19]. Saat angin memasuki bagian pengujian, kecepatannya meningkat, dan menurun saat memasuki diffuser. Nilai *inlet* akan mengalami kenaikan pada saat pada bagian TS dikarenakan ukuran bagian CC lebih besar [30]. Rata – rata yang dihasilkan aliran angin pada bagian TS sebesar 10,7m/s oleh sebab itu intensitas turbulensi yang terjadi tidak berpengaruh pada kecepatan aliran angin [11]. Bagian TS sangat penting untuk menghasilkan aliran angin seragam supaya hasil uji lebih akurat[34].



Gambar 8 Kecepatan Aliran Angin (5m/s)

Gambar 9 menjelaskan pada kecepatan aliran angin 5m/s merupakan titik maksimal aman untuk melakukan pengujian yang sesuai dengan kemampuan struktur komposit wind tunnel epoxy[13]. Kecepatan aliran angin yang tinggi akan berpengaruh pada meningkatnya

intensitas turbulensi pada wind tunnel. Aliran angin tidak seragam apabila terjadi kecepatan angin yang melampaui batas maksimal struktur *wind tunnel*. Pola aliran angin yang mengalir ke airfoil tidak akan seragam dan terarah dikarenakan melebihi batas intensitas turbulensi.β



Gambar 9 Batas Maksimal Kecepatan Aliran Angin

Tinjauan literatur menunjukkan bahwa intensitas turbulensi yang digunakan adalah 3,14% [17] dan 4% [18], dengan panjang total melebihi desain terowongan angin yang diteliti. Meskipun intensitas turbulensi yang diamati relatif rendah, batas maksimum yang disarankan adalah $\leq 5\%$ [33]. Terowongan angin skala kecil biasanya menunjukkan intensitas turbulensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan terowongan angin skala besar. Intensitas turbulensi yang meningkat dapat menyebabkan hasil pengujian tidak konsisten akibat pengaruh getaran sehingga menimbulkan aliran angin yang tidak seragam. Penggabungan struktur sarang lebah dapat secara efektif mengurangi intensitas turbulensi di dalam terowongan angin [22]. Desain struktur terowongan angin dapat berkontribusi terhadap peningkatan intensitas turbulensi. Desain terowongan angin khusus ini dapat mencapai kecepatan maksimum 10,7 m/s; melebihi batas ini dapat mengakibatkan peningkatan turbulensi, yang menyebabkan hasil pengujian airfoil tidak akurat. Pembacaan sensor mungkin mengalami fluktuasi kecepatan, tekanan, dan perbedaan data kalibrasi, yang semuanya dapat berdampak buruk pada hasil pengujian. Variabilitas dalam parameter ini dapat menyebabkan nilai yang tercatat menjadi tidak konsisten dan dapat berubah selama pengujian.

4. Kesimpulan

Simulasi CFD yang dihasilkan dengan desain struktur *wind tunnel* berbahan komposit wind tunnel epoxy di atas memiliki intensitas turbulensi $\leq 5\%$. Kemampuan *wind tunnel* sesuai dengan studi simulasi sudah sesuai dengan batas maksimal intensitas turbulensi sehingga tidak akan mempengaruhi hasil pengujian aerodinamika. Batas kemampuan maksimal kecepatan angin pada ukuran ini dalam menghasilkan keseragaman aliran angin pada *wind tunnel* hanya mencapai 10,7m/s pada bagian *test section*. Penentuan kecepatan aliran angin harus berbanding lurus dengan maksimal intensitas turbulensi supaya tidak berpengaruh pada keseragaman aliran angin. Desain struktur *wind tunnel* dengan bahan komposit resin fiber epoxy mampu mengontrol turbulensi secara efektif, menjadikannya

sesuai untuk pengujian aerodinamika pada airfoil, dengan menjaga kualitas aliran angin yang stabil dan terkontrol dalam rentang kecepatan inlet yang diuji. Pembuatan *wind tunnel* sesuai dengan ukuran tersebut digunakan untuk memastikan ketepatan hasil dari simulasi dengan pemasangan *honeycomb* heksagonal untuk meminimalisir intensitas turbulensi. Hasil pengujian nyata pada struktur *wind tunnel* akan dilakukan dengan memanfaatkan alat ukur gaya untuk memastikan fluktuatif nilai yang terhubung dengan IOT.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Penelitian Dosen Pemula pada tahun 2024.

Daftar Pustaka

- [1] P. Yılmaz, "Design of a Low-Speed Subsonic Portable Wind Tunnel for Educational Purposes," 2019.
- [2] Y. D. Dwivedi, A. Wahab, A. D. Pallay, and A. Shesham, "Effect of surface roughness on aerodynamic performance of the wing with NACA 4412 airfoil at Reynolds number 1.7×10^5 ," *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 468–476, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.153>.
- [3] S. S. Abdel Aziz, E. B. Moustafa, and A. H. S. Salem Said, "Experimental Investigation of the Flow, Noise, and Vibration Effect on the Construction and Design of Low-Speed Wind Tunnel Structure," *Machines*, vol. 11, no. 3, 2023, doi: 10.3390/machines11030360.
- [4] M. Firman *et al.*, "Perancangan Terowongan Angin Rangkaian Terbuka Dengan Sistem Piv (Particle Image Velocimetry)," vol. 8, pp. 57–63, 2024.
- [5] M. Kooshartoyo, "ANALISIS DESAIN WIND TUNNEL UNTUK VISUALISASI ALIRAN," in *PROSIDING SEMNASTEK 2024*, 2024, pp. 1–11.
- [6] M. Jiménez-Portaz, L. Chiapponi, M. Clavero, and M. Losada, "Air flow quality analysis of an open-circuit boundary layer wind tunnel and comparison with a closed-circuit wind tunnel," *Physics of Fluids*, vol. 32, p. 125120, Aug. 2020, doi: 10.1063/5.0031613.
- [7] B. Setiawan, "Prototype Design Analysis of Digital-Based Wind Tunnel Aerodynamic Testing Equipment INTRODUCTION *," *Journal of Applied Science and Advanced Technology Journal Homepage*, 2023, doi: 10.24853/JASAT.5.3.83-90.
- [8] A. Yopiandi *et al.*, "PENGUKURAN GAYA MODEL AIRFOIL SD7043 DIDALAM TEROWONGAN ESWT (EDUCATION SMALL WIND TUNNEL)," *JOM FTEKNIK*, vol. 8, no. 1, 2021.
- [9] A. S. Olsen *et al.*, "Why is the measured maximum lift in wind tunnels dependent on the measurement method?," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Sep. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1618/3/032040.
- [10] K. Breuer, M. Drela, X. Fan, and M. Di Luca, "Design and performance of an ultra-compact, low-speed, low turbulence level, wind tunnel for aerodynamic and animal flight experiments," *Exp Fluids*, vol. 63, no. 11, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1007/s00348-022-03519-1.
- [11] K. Adithya, M. Kanta, C. Ram, and B. Rani, "EXPERIMENTAL DESIGN AND TESTING OF WIND TUNNEL," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 6, 2020, [Online]. Available: www.irjet.net

- [12] D. Khan, J. Holm Bjernemose, I. Lund, and J. Elkjær Bebe, "Design and construction of an open loop subsonic high temperature wind tunnel for investigation of SCR dosing systems," *International Journal of Thermofluids*, vol. 11, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijft.2021.100106.
- [13] B. Parveez, M. I. Kittur, I. A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, and M. A. Umarfarooq, "Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 22, Nov. 2022, doi: 10.3390/polym14225007.
- [14] R. A. Michi, A. Plotkowski, A. Shyam, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, "Towards high-temperature applications of aluminium alloys enabled by additive manufacturing," *International Materials Reviews*, vol. 67, no. 3, pp. 298–345, 2022, doi: 10.1080/09506608.2021.1951580.
- [15] İ. Göv, "COMPARISON OF HEXAGONAL, SQUARE, AND CIRCULAR SECTIONED HONEYCOMB PERFORMANCE IN A WIND TUNNEL," 2021.
- [16] H. Aleisa, K. Kontis, and M. Nikbay, "Low Observable Uncrewed Aerial Vehicle Wind Tunnel Model Design, Manufacturing, and Aerodynamic Characterization," *Aerospace*, vol. 11, no. 3, pp. 1–25, 2024, doi: 10.3390/aerospace11030216.
- [17] K. H. Wong, W. Lai, J. H. Ng, A. Fazlizan, K. Sopian, and N. Sahoo, "Open-Loop Subsonic Suction Type Wind Tunnel: Design, Simulation, Build and Test," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 105, no. 2, pp. 204–223, May 2023, doi: 10.37934/arfm.105.2.204223.
- [18] N. Syifa Fauziah Rahmani, D. Masruri, J. Teknik Mesin, and P. Negeri Bandung, "Airflow Velocity Measurement Of Turbular Test Section Based On RPM Setting Configuration In Open Circuit Subsonic Wind Tunnel," *JOURNAL OF APPLIED MECHANICAL ENGINEERING AND RENEWABLE ENERGY (JAMERE)*, vol. 4, no. 2, pp. 67–75, 2024, [Online]. Available: <https://journal.isas.or.id/index.php/JAMERE>
- [19] M. Tomin, M. Scipioni, and B. Gatti, "Design, Construction and Testing of a 3-Component Force Balance for Educational Wind Tunnels in Undergraduate Aerodynamics," *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 2020, doi: 10.15394/jaaer.2020.1809.
- [20] Sundram and R. Kumar, "Investigation of Airfoil Design and Analysis," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 10, no. 10, pp. 863–880, 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.47087.
- [21] S. Kumar and S. Narayanan, "Airfoil thickness effects on flow and acoustic characteristics," 2022. doi: 10.1016/j.aej.2021.10.022.
- [22] A. A. Wicaksana, R. Wibowo, and M. Kabib, "ANALISA INTENSITAS TURBULENSI ALIRAN UDARA PADA HONEYCOMB DENGAN BENTUK PENAMPANG MELINGKAR UNTUK WIND TUNNEL SUBSONIC," Online, 2020.
- [23] V. N. V. H. Wempi Geovano Iribaram, "Pengaruh Perbedaan Ukuran Intake Kontraksi Terhadap Laju Aliran Di Ruang Uji," vol. 5, no. 1, pp. 27–30, 2022.
- [24] R. A. Pratama, M. Ikhsan, and I. Permana, "Arduino IoT Controller for Angle of Attack Measurement with Force Balance," *International Journal Software Engineering and Computer Science (IJSECS)*, vol. 4, no. 1, pp. 184–195, 2024, doi: 10.35870/ijsecs.v4i1.2190.
- [25] J. B. R. G. Soupez and I. M. Viola, "High-blockage corrections for circular arcs at transitional Reynolds numbers," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 229, no. April, 2022, doi: 10.1016/j.jweia.2022.105139.
- [26] A. Eltayesh *et al.*, "Effect of wind tunnel blockage on the performance of a horizontal axis wind turbine with different blade number," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 10, pp. 1–15, 2019, doi: 10.3390/en12101988.
- [27] D. Choi, J. S. Baek, and K.-H. Kim, "Efficient diffuser design for plasma wind tunnels with a large blockage model," *Aerosp Sci Technol*, vol. 119, p. 107206, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107206>.
- [28] F. H. F. M. Xaverius, "Rancang Bangun Terowongan Angin Kecepatan Rendah Tipe Terbuka Sederhana dengan Smoke Generator Sebagai Visualisasi Aliran Udara untuk Alat Praktikum," *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, vol. 7, no. 2, 2022.
- [29] Yudha Nurfauzi Nugraha, Erwin Erwin, and Slamet Wiyono, "Design of Wind Speed Measurement System in Wind Tunnel Based on Pitot Tube," *Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, vol. 6, pp. 69–76, 2024, doi: 10.35814/asimetri.v6i1.5476.
- [30] S. Durmuş, "Optimization of contraction cone length in an open-circuit wind tunnel," *Balkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 26, no. 2, pp. 431–440, 2024, doi: 10.25092/baunfbed.1339334.
- [31] C. Mistry, S. Kesharwani, S. Roy, A. Roy, and K. Sinhamahapatra, "Numerical Modelling of Wind Tunnel Internal Flow for CFD Assisted Design," *Journal of The Institution of Engineers (India) Series C*, vol. 105, 2022, doi: 10.1007/s40032-021-00794-5.
- [32] K. D. Hix, "Experimental evaluation of a honeycomb structure in open Experimental evaluation of a honeycomb structure in open channel flows channel flows," 2020. [Online]. Available: https://scholarsmine.mst.edu/masters_theseshttps://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7952
- [33] M. S. Siddiqui, A. Rasheed, T. Kvamsdal, and M. Tabib, "Effect of turbulence intensity on the performance of an offshore vertical axis wind turbine," *Energy Procedia*, vol. 80, no. 1876, pp. 312–320, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.435.
- [34] F. Kassem and A. S. Abdelgawad, "Design and Performance Evaluation of an Open Loop Wind Tunnel at NIS Design and Performance Evaluation of an Open Loop Wind Tunnel at NIS," no. January, 2025, doi: 10.1007/s12647-024-00791-w.