

DESIGN OF LOW SUBSONIC WIND TUNNEL WITH OPEN RETURN SYSTEM FOR TESTING WIND TURBINES AT LOW AIRSPEEDS

Karnova Yanel^{1,*}, Asmara Yanto²

¹Progran Studi D3 Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang, Kota Padang, Sumatera Barat, 25173, Indonesia

²Progran Studi S1 Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang, Kota Padang, Sumatera Barat 25173, Indonesia

*E-mail: karnova.yanel@itp.ac.id

Diterima: 25-11-2022

Direvisi: 12-10-2023

Disetujui: 01-12-2023

ABSTRAK

Republik Indonesia kaya akan potensi energi baru terbarukan, termasuk energi angin yang melimpah. Studi ini bertujuan merancang open return wind tunnel tipe subsonic untuk menguji turbin angin pada kecepatan udara rendah. Fokus uji mencakup evaluasi efisiensi sudu, kinerja bearing, dan aspek lainnya. Pengujian pada kecepatan udara rendah (<5 m/s) sangat relevan dengan kondisi angin di Indonesia. Proses perancangan menggunakan Computer Aided Design (CAD), sedangkan pengambilan data dan analisis dilakukan melalui simulasi Computer Aided Engineering (CAE) dan perhitungan teoritis. Wind tunnel ini memiliki bagian seperti contraction, honey comb, test section, diffuser, dan kaki. Aliran udara yang mengenai sudu turbin dapat diamati melalui penggunaan asap dalam test section. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis pada pengembangan turbin angin rendah kecepatan di Indonesia.

Kata kunci: *perancangan wind tunnel; pengujian low subsonic; evaluasi turbin angin.*

ABSTRACT

The Republic of Indonesia is rich in potential for renewable energy, including abundant wind energy. This study aims to design a subsonic open return wind tunnel for testing wind turbines at low airspeeds. The testing focus includes the evaluation of blade efficiency, bearing performance, and other aspects. Testing at low airspeeds (<5 m/s) is highly relevant to the wind conditions in Indonesia. The design process utilizes Computer Aided Design (CAD), while data collection and analysis are conducted through Computer Aided Engineering (CAE) simulations and theoretical calculations. The wind tunnel comprises components such as contraction, honeycomb, test section, diffuser, and support structure. Airflow over the turbine blades can be observed using smoke visualization in the test section. This research is expected to provide practical contributions to the development of low-speed wind turbines in Indonesia.

Keywords: *wind tunnel design; low subsonic testing; wind turbine evaluation.*

1. PENDAHULUAN

Republik Indonesia memiliki potensi energi baru terbarukan yang sangat melimpah, terdiri atas panas bumi, energi air, energi angin,

bioenergi (bioetanol, biodiesel, biomassa), energi arus laut, energi nuklir, dan energi surya yang hampir dapat diterapkan atau dimanfaatkan di setiap wilayah di Indonesia. Kesadaran masyarakat untuk lebih

memperhatikan potensi energi baru terbarukan ini diperlukan guna memanfaatkan potensi-potensi energi baru terbarukan dari skala kecil sehingga akan terpujuk kesadaran akan menjaga lingkungan dan berkontribusi dalam pembangunan berkelanjutan, dan dapat mendukung ketahanan energi nasional [1]. Berbagai sumber energi yang ada di Indonesia yang kemudian dapat dijadikan sebagai sumber atau pembangkit tenaga listrik terutama sumber energi alternatif yang dapat digunakan. Salah satu sumber energi tersebut dapat di peroleh dari energi angin [2]. Energi angin atau bayu bisa dimanfaatkan sebagai untuk membangkitkan listrik melalui pembangkit listrik tenaga angin alias pembangkit listrik tenaga angin bayu (PLTB). Energi angin atau bayu merupakan alternatif energi yang terbarukan, melimpah ruah, tersebar luas, dan bersih [3,4].

Hingga saat ini diketahui baru ada dua PLTB yang beroperasi secara komersil di Indonesia, yaitu PLTB Sidrap dan PLTB Jeneponto di mana keduanya sama-sama berada di Provinsi Sulawesi Selatan [5]. Minimnya PLTB di Indonesia karena letak Indonesia berada di tepat garis khatulistiwa dan banyak ditumbuhi pepohonan lebat, sehingga sangat memungkinkan ada banyak pergesekan antara angin dengan pepohonan yang menyebabkan intensitas angin di negara khatulistiwa lebih sedikit [6]. Rata – rata kecepatan angin di Indonesia dari 01 Januari – 31 Desember 2022 adalah 1 meter/ detik- 5 m/s [7]. Turbin angin yang cocok beroperasi adalah turbin angin dengan kecepatan angin rendah. Pengujian turbin angin dapat dilakukan di dalam *wind tunnel* [8].

Wind tunnel (terowongan angin) adalah mesin di mana suatu benda ditempatkan dalam keadaan diam di dalam tabung, dan udara dihembuskan ke sekelilingnya untuk mempelajari interaksi antara benda tersebut dan udara yang bergerak [9]. *Wind Tunnel* pada awalnya digunakan untuk mengetahui interaksi antara udara dan suatu benda pada medium tersebut pada berbagai kondisi (kecepatan, suhu, dan tekanan tertentu). Pada dasarnya terowongan angin adalah saluran udara dengan berbagai luas penampang pada setiap segmennya yang bertujuan untuk mengatur properti udara seperti kecepatan dan tekanan sesuai dengan hukum Bernoulli [10].

Pada umumnya ada dua metode untuk menghitung efek dari fitur-fitur aerodinamika tambahan tersebut, yaitu dengan simulasi komputer menggunakan *program computational fluid dynamics* (CFD) ataupun menggunakan pengujian model skala yaitu dengan bantuan *wind tunnel* [11]. *computational fluid dynamics* /CFD dan *wind tunnel* memiliki kelebihan dan keterbatasan masing – masing [12]. Kelebihan *wind tunnel* dari pada pengujian *computational fluid dynamics* / CFD adalah memberikan representasi yang baik dari efek rata-rata dan hembusan [13].

Wind Tunnel terbagi 2, ada *open return wind tunnel* dan *close return wind tunnel*. Pada *open return wind tunnel*, udara yang melewati bagian uji dikumpulkan dari ruangan tempat terowongan berada. Sedangkan pada *Close return wind tunnel*, dimana udara dialirkan dari pintu keluar kipas ke bagian kontraksi melalui serangkaian saluran dan baling-baling yang berputar. *Open return wind tunnel* dan *close return wind tunnel* memiliki kelebihan dan kekurangan masing – masing sesuai dengan kebutuhan. Kelebihan *open return wind tunnel* adalah Intensitas turbulensi umumnya lebih tinggi dan aliran rata-rata lebih homogen, biaya konstruksi rendah, desain unggul untuk propulsi dan visualisasi asap, dan tidak ada akumulasi produk buangan di terowongan terbuka [14,15].

Wind Tunnel sering dilambangkan dengan kecepatan di bagian pengujian relatif terhadap kecepatan suara. Rasio kecepatan udara terhadap kecepatan suara disebut angka Mach (M). *Wind Tunnel* diklasifikasikan sebagai subsonik ($M < 0,8$), transonik ($0,8 < M < 1,2$), supersonik ($1,2 < M < 5,0$), atau hipersonik ($M > 5,0$) [16].

Dari hasil uraian diatas tentang sedikitnya pembangkit listrik tenaga angin/ bayu, kecepatan angin di Indonesia yang rendah, maka diperlukan desain *open return Wind tunnel* tipe *subsonic* yang bertujuan untuk menguji kemampuan sudu-sudu turbin angin (termasuk komponen bearing dan lainnya) yang menghasilkan energi listrik pada kecepatan udara rendah (<5 m/s).

2. METODE PENELITIAN

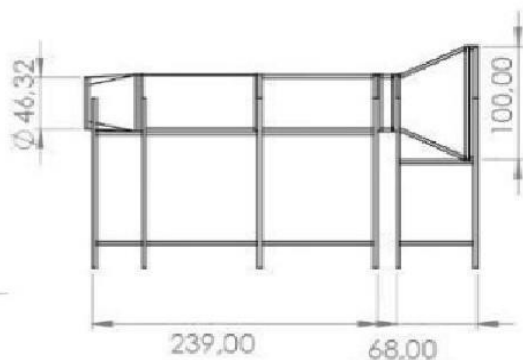
Pada penelitian ini proses perancangan akan menggunakan *Computer Aided Design* (CAD) dengan acuan sudu turbin yang akan diujikan nantinya berukuran maksimal diameter 40 cm atau pada turbin angin yang memiliki sudu vertikal dengan ketinggian sudu maksimal 40 cm. Kemudian untuk pengambilan data dan Analisa dilakukan dengan mengambil data simulasi *Computer Aided Engineering* (CAE) dimana simulasi bertujuan untuk melihat arah dan model dari aliran udara yang terjadi didalam *open return wind tunnel*. Perhitungan teoritis dilakukan untuk memperkuat hasil dari simulasi CAE. Rancangan *open return wind tunnel* dianggap dapat dibuat apabila arah aliran laminer pada *test section*.

2.1 Desain *Open Return Wind Tunnel* Dengan CAD

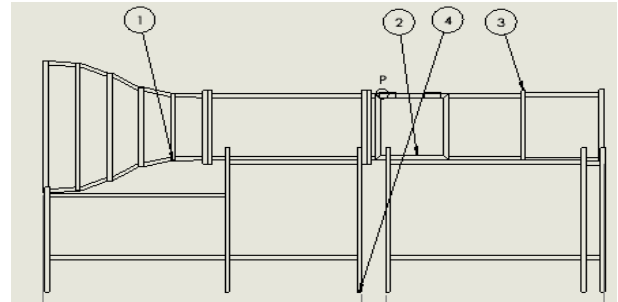
Open return wind tunnel memiliki bagian bagian seperti *contraction*, *honey comb*, *test section*, *diffuser* dan kaki. Gambar *Open return wind tunnel* ini di desain dengan perbandingan 1:1 terhadap model yang dibuat dengan CAD.

Gambar 1 adalah dimensi model terowongan angin/ *open return wind tunnel* beserta pengukuran panjangnya dalam satuan cm. Gambar 2 adalah bagian terowongan angin:

- 1 *Contraction*
- 2 *Test section*
- 3 *Diffuser*
- 4 Kaki



Gambar 1. Dimensi *Wind Tunnel*

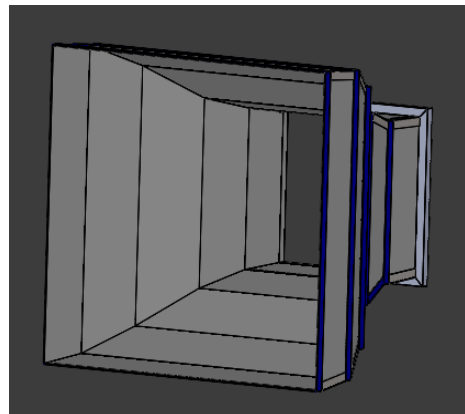


Gambar 2. Bagian-bagian *Wind Tunnel*

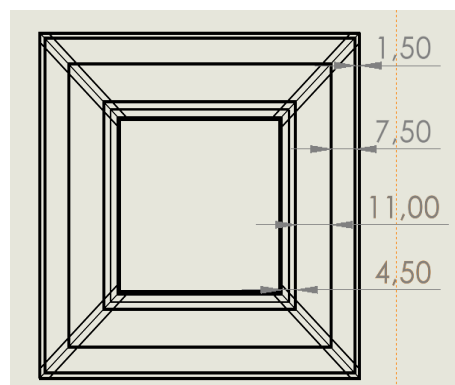
2.2 Desain Bagian *Wind Tunnel*

a. *Contraction*

Contraction adalah Ruang Yang Memiliki Luas Perlahanlahan Mengecil. *Contraction* memiliki fungsi yang berlawanan dari *Diffuser*. *Contraction* merupakan komponen yang dapat menyebabkan kenaikan kecepatan udara dan penurunan tekanan udara [17]. Gambar 3 adalah Model *Contraction*. Gambar 4 adalah dimensi *Contraction* dengan ukuran dalam satuan cm.



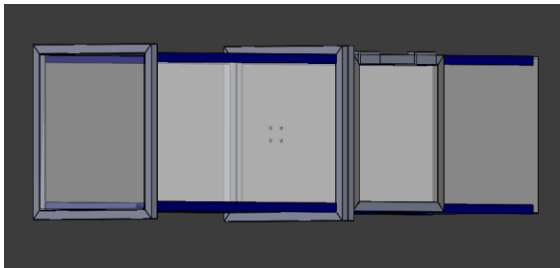
Gambar 3. Model *Contraction*



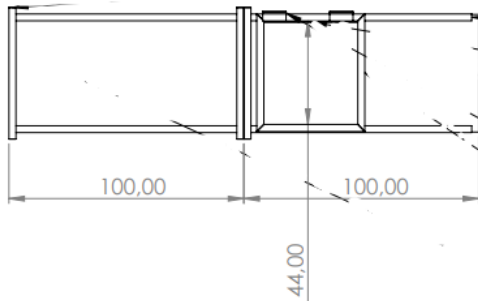
Gambar 3. Dimensi *Contraction*

b. Test Section

Test Section adalah bagian dari terowongan angin untuk meletakkan model yang akan diuji. Dimensi test section disesuaikan dengan dimensi model yang akan diuji, kemudian dimensi tersebut ditentukan dengan dimensi model dan diberi toleransi ukuran. Bagian test section harus cukup panjang dengan tujuan meredam gangguan aliran [17]. Gambar 5 adalah model *Test section*. Gambar 6 adalah dimensi *Test section* dengan ukurannya dalam satuan cm.



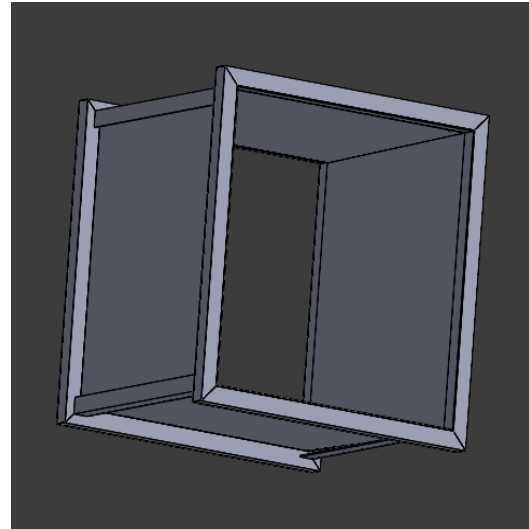
Gambar 4. Model Test Section



Gambar 5. Dimensi Test Section

c. Diffuser

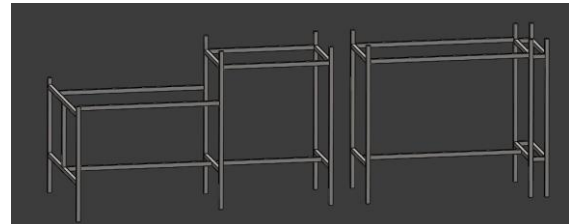
Diffuser berfungsi sebagai komponen yang menyebabkan kenaikan tekanan pada udara. Ketika udara melalui diffuser maka tekanannya akan naik, tetapi kecepatannya menurun, sesuai dengan Prinsip Bernoulli menyatakan bahwa pada suatu aliran fluida, Peningkatan kecepatan pada fluida akan menimbulkan penurunan tekanan pada aliran tersebut, atau sebaliknya [17]. Gambar 7 adalah model *diffuser*.



Gambar 6. Model Diffuser

d. Kaki

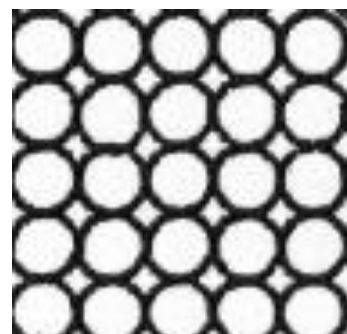
Kaki berguna untuk menopang *open return wind tunnel*. Gambar 8 adalah model kaki. Kaki dirancang untuk mampu menahan beban keseluruhan dari komponen *open return wind tunnel*.



Gambar 8. Kaki

e. Honeycomb

Honeycomb berbentuk seperti sarang lebah dan bersaluran lurus. *Honeycomb* berfungsi untuk mengurangi turbulensi aliran. Ketika aliran udara turbulen masuk dan melalui *honeycomb*, maka aliran tersebut akan menjadi aliran laminar [17]. Gambar 9 adalah model *honeycomb*.



Gambar 9. Honeycomb

2.3 Metode Perhitungan

a. Metode Simulasi CAE

Metode yang digunakan untuk merancang suatu *open return wind tunnel* adalah dengan menggunakan simulasi berbasis komputer yaitu dengan CAE.

b. Perhitungan Teoritis

Perhitungan teoritis dilakukan untuk memperkuat hasil CAE agar dapat menghindari kegagalan pembuatan *open return wind tunnel*. Berikut adalah persamaan yang digunakan [18]:

Perhitungan Mach Number:

$$M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (1)$$

Perhitungan Reynold Number:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (2)$$

Koefisien Rugi *Test Section*:

$$K_{ts} = \lambda \left(\frac{L}{D_h} \right) \quad (3)$$

Perhitungan Rugi karena Gesekan *Test Section*:

$$H_{ts} = K_{ts} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (4)$$

Koefisien Rugi pada *Contraction*:

$$K_c = 0,32\lambda \left(\frac{L}{D_h} \right) \quad (5)$$

Perhitungan Rugi Gesekan pada *Contraction*:

$$H_c = \frac{K_c(v_f^2)}{2g} \quad (6)$$

Daya Motor Penggerak:

$$P = (\Sigma K + 1) P_t \quad (7)$$

Koefisien Rugi pada *Diffuser*:

$$K_{df} = \left(\frac{\lambda}{8 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 0,6 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \left(1 - \frac{D1^4}{D2^4} \right) \frac{D0^4}{D1^4} \quad (8)$$

Perhitungan Rugi Gesekan pada *Diffuser*:

$$H_{df} = \frac{K_{df}(v_f^2)}{2g} \quad (9)$$

Koefisien Rugi pada *Honeycomb*:

$$K_h = \lambda \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{\beta}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (10)$$

Boundary Layer:

$$\delta = 4,91 \cdot L / \Re_l^{0,5} \quad (11)$$

Massa Aliran:

$$\dot{m} = \rho Q \quad (12)$$

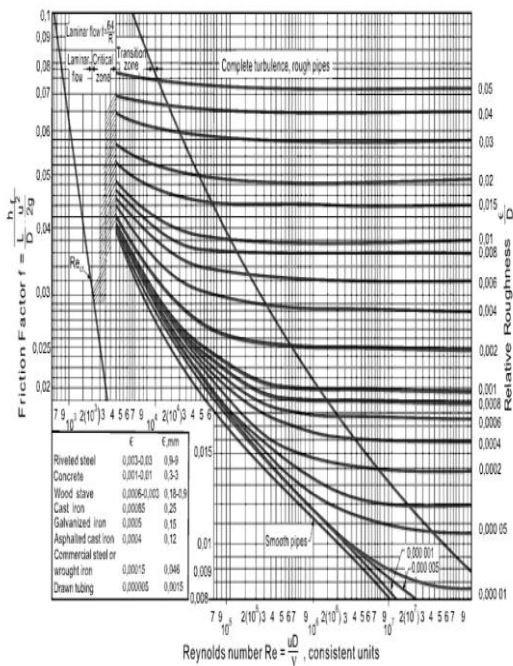
Rasio Energi:

$$ER = \frac{1}{\Sigma K} \quad (13)$$

Nilai Kekasaran Bahan:

Tabel 1. Tabel Kekerasan Akrilik

| | | Surface Ra of different plastic | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------|---------------------------------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|--|
| molding | material | Ra index arrange μm | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.012 | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | 6.3 | 12.5 | 25 | |
| inject | PMMA | | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | | | | | |
| | ABS | | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | | | | | |
| | AS | | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | | | | | |
| | PC | | | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | | | | | |
| | PS | | | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| | PP | | | | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | | | | | |
| | PA | | | | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | | | | | |
| | PE | | | | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | 6.3 | | | |
| | POM | | | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| | PSU | | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| | PVC | | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| | PPO | | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| | Chlorinated polyether | | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| | PBT | | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | |
| Thermosetting | Aminoplasts | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | | |
| | phenolics | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | | |
| | Silicone plastic | | | | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | | | | | |



Gambar 10. Diagram moody

Berdasarkan tabel 1 maka kekasaran permukaan *test section* yang menggunakan akrilik adalah ($\epsilon = 2,5 \times 10^{-5} \text{ mm}$). Gambar 10 diagram moody maka didapatkan nilai *friction factor* ($\lambda = 0,015$), yang akan digunakan pada persamaan koefisien rugi pada *test section*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan dan Perancangan Model

a. Exhaust Fan

Exhaust fan yang digunakan adalah Panasonic FV-40AFU, dengan spesifikasi: Voltage 220 Volt, Frequency 60 Hz, watt 58.1-73.9 w dan hembusan keluar $33.5 \text{ m}^3/\text{mnt}$ (CMM) $\sim 1183.04 \text{ ft}^3/\text{mnt}$ (CFM)(19).

b. Section Test

Spesifikasi *test section*

Ukuran *test section* : 50 cm X 50 cm X 200 cm

Kecepatan udara maksimum : 2 m/s atau 7,2 km/jam

Variabel umum:

Temperatur udara : $27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$

Konstanta gas : 287 J/Kg.K

K : 1,4
 μ (27°C) : $1,86 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2 = 1,86 \times 10^{-5} \text{ Kg/ms}$

pudara ISA : $1,225 \text{ Kg/m}^3$

Tekanan udara bebas : $1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^2 \text{ KPa}$

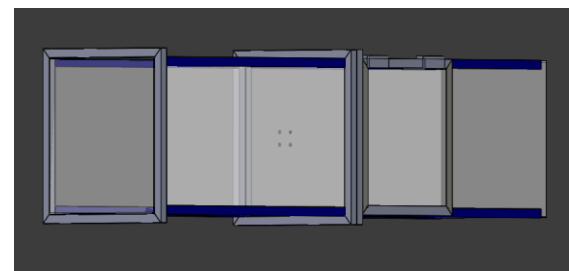
Percepatan gravitasi : $9,81 \text{ m/s}^2$

Massa jenis udara pada suhu 27°C

$$\rho = 1,225 \left(\frac{\text{tekananudarabebas}}{101,325} \right) \left(\frac{288,16}{273 + \text{temperaturudara}} \right) \rho$$

$$= 1,225 \left(\frac{1,103 \times 10^2 \text{ KPa}}{101,325} \right) \left(\frac{288,16}{173 + 27} \right) \rho$$

$$= 1,176 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$



Gambar 11. Rancangan Test Section

Dimensi *test section* adalah 50cm X 50cm X 200 cm, maka bilangan Reynold pada *test section* adalah

$$\Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \Re = \frac{1,176 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,5 \text{ m}}{1,86 \times 10^{-5}} \Re$$

$$= 6,3225 \times 10^4$$

Untuk mengetahui jenis aliran udara di *test section*, bilangan Reynold sepanjang *test section* dicari dengan

$$\text{Rex} = \frac{\rho v x}{\mu} \text{Rex} = \frac{1,176 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 2 \text{ m}}{1,86 \times 10^{-5}} \text{Rex}$$

$$= 2,25903 \times 10^5$$

Nilai bilangan Reynold yang melintasi *test section* adalah $2,25903 \times 10^5$, nilai tersebut masuk dalam kategori aliran transisi yang mana mendekati aliran laminar, maka aliran ini bisa kita anggap laminar atau mendekati laminar. *Boundary layer thickness* pada *test section* adalah

$$\delta = \frac{4,91 X}{\Re_x^{0,5}} \delta = \frac{4,91 \times 2 \text{ m}}{2,25903 \times 10^5} \delta$$

$$= 1,95 \times 10^{-2} \text{ m} \delta = 1,95 \text{ cm}$$

Ukuran luas penampang keluaran *test section* adalah:

$$\begin{aligned}
 A &= (a - (2\delta))X(a - (2\delta))A \\
 &= (0,5m \\
 &\quad - (2X1,95X10^{-2}m))X(0,5m \\
 &\quad - (2X1,95X10^{-2}m))A \\
 &= 0,2124m^2
 \end{aligned}$$

Debit aliran pada *test section*, berdasarkan hukum kontinuitas maka debit aliran pada *wind tunnel* adalah sama

$$\begin{aligned}
 Q &= AXVQ = 0,2124m^2 X 1,5 \frac{m}{s} Q \\
 &= 0,4249 \frac{m^3}{s}
 \end{aligned}$$

Mengikuti hukum kontinuitas massa aliran pada *windtunnel* adalah sama dimana massa alirannya adalah

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \rho X Q \dot{m} = 1,176 \frac{Kg}{m^3} X 0,4249 \frac{m^3}{s} \dot{m} \\
 &= 0,499 \frac{kg}{s}
 \end{aligned}$$

Kecepatan suara pada *test section*

$$\begin{aligned}
 c &= \sqrt{RKT}c = \sqrt{287 \frac{J}{Kg \cdot K} X 1,4 X 300K} c \\
 &= 347,19 \frac{m}{s}
 \end{aligned}$$

Besarnya bilangan mach pada *test section*

$$M = \frac{v}{c} M = \frac{2 \frac{m}{s}}{347,19 \frac{m}{s}} M = 0,005$$

Karena bilangan mach $M < 1$ pada *test section*, *windtunnel* ini tergolong low subsonic. Kekasaran permukaan *test section* yang menggunakan akrilik adalah ($\epsilon = 2,5X10^{-5}mm$)

Relativeroughness

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\epsilon}{D_h} \textit{Relativeroughness} \\
 &= \frac{5X10^{-5}mm}{500mm} \textit{Relativeroughness} \\
 &= 5X10^{-8}
 \end{aligned}$$

Koefisien rugi pada *test section* dengan nilai $Rex = 2,25903X10^5$ dan *Relativeroughness* = $5X10^{-8}$ dari diagram moody maka didapatkan nilai *friction factor* (λ) = 0,015, maka nilai koefisien rugi pada *test section* adalah

$$K_{ts} = \lambda \left(\frac{L}{D_h} \right) K_{ts} = 0,015 \left(\frac{2m}{0,5m} \right) K_{ts} = 0,06$$

Rugi karena gesekan (Head) pada *test section*

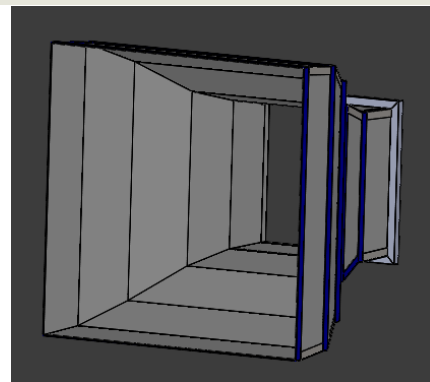
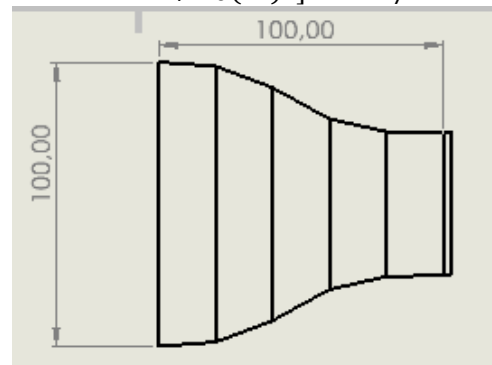
$$\begin{aligned}
 H_{ts} &= K_{ts} \left(\frac{v^2}{2g} \right) H_{ts} = 0,06 \left(\frac{2^2 \frac{m}{s}}{2X9,81 \frac{m}{s^2}} \right) H_{ts} \\
 &= 0,0122m
 \end{aligned}$$

c. Contraction

Contraction dirancang dengan menggunakan *Contraction Ratio (CR)* 4, dimana keluaran *contraction* besarnya sama dengan *test section*, *contraction* memiliki panjang 1 m dengan tinggi 1 m dengan panjang *settling chamber* sebesar 0,1295 m.

Kurva *contraction* dirancang dengan menggunakan rumus polynomial orde 5

$$\begin{aligned}
 Y(X) &= h_i - (h_i - h_e)[6(X')^5 - 15(X')^4 \\
 &\quad + 10(X')^3]X' = X/L
 \end{aligned}$$



Gambar 12. Rancangan *Contraction*

Perhitungan tinggi masukan *contraction*
Luas sisi keluaran *contraction* dengan lebar sisi 0,5 m

$$A_{ts} = 0,5m X 0,5m A_{ts} = 0,25m^2$$

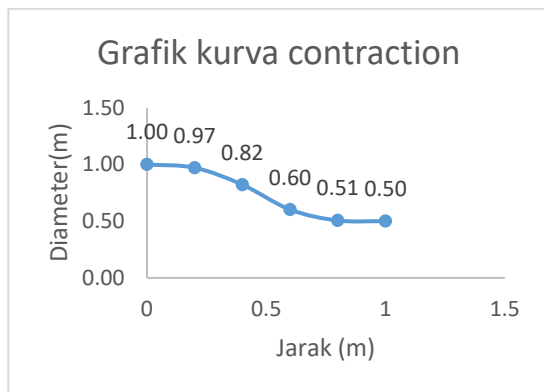
Perhitungan tinggi *contraction* dengan *contraction ratio* 4 adalah

$$\begin{aligned}
 Ca &= AX4Ca = 0,25m^2 X 4Ca \\
 &= 1m^2 H_{contraction} \\
 &= \sqrt{Ca} H_{contraction} \\
 &= \sqrt{1m^2} H_{contraction} = 1m
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan kontinuitas maka kecepatan pada *contraction* dapat diketahui berdasarkan kurva yang dirancang dengan polynomial orde 5 Dengan menggunakan persamaan bernouli $A1XV1 = A2XV2 = konstan$, maka $V2 = V1X A1/A2$, seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Kecepatan pada *Contraction* di Titik Kurva

| Jarak (m) | A(m ²) | Diameter(m) | V(m/s) |
|-----------|--------------------|-------------|--------|
| 0 | 1,000 | 1,00 | 0,5 |
| 0,2 | 0,943 | 0,97 | 0,53 |
| 0,4 | 0,675 | 0,82 | 0,74 |
| 0,6 | 0,362 | 0,60 | 1,38 |
| 0,8 | 0,256 | 0,51 | 1,95 |
| 1 | 0,250 | 0,50 | 2 |
| Rata-Rata | | 0,73 | 1,18 |



Gambar 13. Grafik Kurva *Contraction*

Bilangan Reynold pada *contraction* adalah:

$$\Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \Re = \frac{1,176 \frac{Kg}{m^3} \times 1,18 \frac{m}{s} \times 0,73m}{1,86 \times 10^{-5}} \Re = 5,4093 \times 10^4$$

Kecepatan suara pada *contraction*

$$c = \sqrt{RKT} c = \sqrt{287 \frac{J}{Kg \cdot K} \times 1,4 \times 300K} c = 347,19 \frac{m}{s}$$

Besarnya bilangan mach pada *contraction*

$$M = \frac{v}{c} M = \frac{1,18 \frac{m}{s}}{347,19 \frac{m}{s}} M = 0,003$$

Kekasaran permukaan *contraction* yang menggunakan seng plat adalah ($\epsilon = 0,15mm$, dan $D_h = 733 mm$).

$$\begin{aligned} Relativeroughness &= \frac{\epsilon}{D_h} Relativeroughness \\ &= \frac{0,15mm}{733mm} Relativeroughness \\ &= 2,04 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Koefisien rugi pada *contraction* dengan nilai $\Re = 5,4093 \times 10^4$ dan $Relativeroughness = 2,04 \times 10^{-4}$ dari diagram moody maka didapatkan nilai *friction factor* (λ) = 0,017, dan koefisien minor losses 0,06 maka nilai koefisien rugi pada *contraction* adalah:

$$\begin{aligned} K_{cc} &= 0,32\lambda \left(\frac{L}{D_h}\right) K_{cc} \\ &= 0,32 \times 0,017 \left(\frac{1m}{0,73m}\right) K_{cc} \\ &= 0,0074 \end{aligned}$$

Rugi karena gesekan (Head) pada *contraction*

$$\begin{aligned} H_{cc} &= K_{cc} \left(\frac{v^2}{2g}\right) H_{cc} = \\ 0,0074 \left(\frac{1,18^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}}\right) H_{cc} &= 0,005m \quad \text{Minor} \\ \text{losses pada } contraction & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{ccl} &= K_{ccl} \left(\frac{v^2}{2g}\right) H_{ccl} \\ &= 0,06 \left(\frac{1,95^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}}\right) H_{ccl} \\ &= 0,011m \end{aligned}$$

d. Diffuser

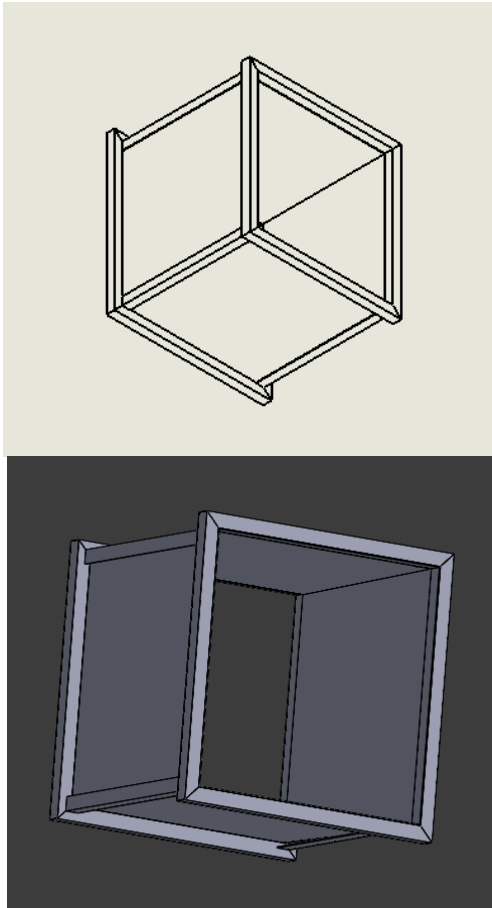
Diffuser berfungsi memperlambat aliran berkecepatan tinggi dari *test section*, sehingga mencapai pemulihan tekanan statis dan mengurangi beban sistem penggerak, *diffuser* dirancang memiliki panjang 50 cm sisi masukan udara dari *test section* berdimensi 50 cm dan sisi keluaran berdimensi 52 cm, dengan sudut yang terbentuk diantara kedua sisi $91,79 - 90 = 1,79$.

Berdasarkan persamaan kontinuitas maka kecepatan pada *diffuser* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan bernouli $A1XV1 = A2XV2 = konstan$, maka $V2 = V1X A1/A2$, dimana Luas sisi keluaran diffuser:

$$A2 = 0,52m \times 0,52m A2 = 0,27m^2$$

Kecepatan pada sisi keluaran diffuser:

$$V_2 = \frac{V_1 A_1}{A_2} \quad V_2 = \frac{2 \frac{m}{s} \times 0,25 m^2}{0,27 m^2} \quad V_2 = 1,85 \frac{m}{s}$$



Gambar 14 Rancangan Diffuser

Tabel 3. Tabel kecepatan diffuser

| A(m ²) | D(m) | (m/s) |
|--------------------|------|-------|
| 0,25 | 0,5 | 2 |
| 0,27 | 0,52 | 1,85 |
| Rata-rata | 0,51 | 1,92 |

Jenis aliran pada diffuser diketahui dengan mencari bilangan reynoldnya.

Bilangan reynold pada sisi masuk diffuser

$$\Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad \Re = \frac{1,176 \frac{Kg}{m^3} \times 2 \frac{m}{s} \times 0,5 m}{1,86 \times 10^{-5}} \quad \Re = 6,3225 \times 10^4$$

Bilangan Reynold pada sisi keluaran diffuser

$$\Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad \Re = \frac{1,176 \frac{Kg}{m^3} \times 1,85 \frac{m}{s} \times 0,52 m}{1,86 \times 10^{-5}} \quad \Re = 6,0794 \times 10^4$$

Kecepatan suara pada diffuser

$$c = \sqrt{RKT} \quad c = \sqrt{287 \frac{J}{Kg \cdot K} \times 1,4 \times 300 K} \quad c = 347,19 \frac{m}{s}$$

Besarnya bilangan mach pada diffuser

$$M = \frac{v}{c} \quad M = \frac{1,85 \frac{m}{s}}{347,19 \frac{m}{s}} \quad M = 0,005$$

Kekasaran permukaan diffuser yang menggunakan sengplat adalah ($\epsilon = 0,15 mm$, dan $D_h = 510 mm$)

$$\begin{aligned} \text{Relativeroughness} &= \frac{\epsilon}{D_h} \text{ Relativeroughness} \\ &= \frac{0,15 mm}{510 mm} \text{ Relativeroughness} \\ &= 2,94 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Koefisien rugi pada diffuser dengan nilai $\Re = 6,3225 \times 10^4$ di sisi masukan, $\Re = 6,0794 \times 10^4$ disisikeluar dan $\text{Relativeroughness} = 2,94 \times 10^{-4}$ dari diagram moody maka didapatkan nilai friction factor (λ) = 0,017, maka nilai koefisien rugi pada diffuser adalah:

$$K_{df} = \left(\frac{\lambda}{8 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + 0,6 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \left(1 - \frac{D_1^4}{D_2^4} \right) \frac{D_0^4}{D_1^4}$$

$$\begin{aligned} K_{df} &= \left(\frac{0,017}{8 \tan\left(\frac{1,79}{2}\right)} + 0,6 \tan\left(\frac{1,79}{2}\right) \right) \left(1 - \frac{0,5^4}{0,52^4} \right) \frac{0,5^4}{0,5^4} \\ K_{df} &= 0,0218 \end{aligned}$$

Rugi karena gesekan (Head) pada diffuser

$$H_{df} = K_{df} \left(\frac{v^2}{2g} \right) H_{df}$$

$$\begin{aligned} &= 0,0218 \left(\frac{1,85^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) H_{df} \\ &= 0,00413 m \end{aligned}$$

Rugi karena minor losses

$$\begin{aligned} H_{af1} &= K_{af1} \left(\frac{v^2}{2g} \right) H_{af1} \\ &= 0,03 \left(\frac{1,92^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) H_{af1} \\ &= 0,005m \end{aligned}$$

e. Honeycomb

Honeycomb berfungsi menyalurkan aliran dengan sumbu terowongan dan memecah ketidakstabilan aliran yang lebih besar. *Honeycomb* menunjukkan kinerja terbaik dengan rasio panjang terhadap diameternya berkisar antara 7 sampai 10(20). *Honeycomb* dirancang berbentuk lingkaran dan memiliki diameter 12 mm = 0,012 m dan memiliki Panjang 8,4 cm = 0,084 m. Berdasarkan persamaan kontinuitas maka kecepatan udara di dalam *honeycomb* adalah 2 m/s.

Bilangan Reynold pada *Honeycomb* adalah:

$$\begin{aligned} \Re &= \frac{\rho v D_h}{\mu} \Re = \frac{1,176 \frac{Kg}{m^3} \times 2 \frac{m}{s} \times 0,012m}{1,86 \times 10^{-5}} \Re \\ &= 1,517 \times 10^3 \end{aligned}$$

Kecepatan Suara pada *Honeycomb*

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{RKT} c = \sqrt{287 \frac{J}{Kg \cdot K} \times 1,4 \times 300K} c \\ &= 347,19 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

Besarnya Bilangan Mach pada *Honeycomb*

$$M = \frac{v}{c} M = \frac{2 \frac{m}{s}}{347,19 \frac{m}{s}} M = 0,005$$

Kekasaran permukaan *honeycomb* yang menggunakan polipropilena adalah ($\epsilon = 0,0016mm$, dan $D_h = 12 mm$).

$$\begin{aligned} &Relativeroughness \\ &= \frac{\epsilon}{D_h} Relativeroughness \\ &= \frac{0,0016mm}{12mm} Relativeroughness \\ &= 1,33 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Koefisien rugi pada *honeycomb* dengan nilai $\Re = 1,517 \times 10^3$ dan *Relativeroughness* = $1,33 \times 10^{-4}$ dari diagram moody maka didapatkan nilai *friction factor* (λ) = 0,04, maka nilai koefisien rugi pada *honeycomb*.

$$\begin{aligned} K_h &= \lambda \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{\beta}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\beta_h} - 1 \right)^2 \\ K_h &= 0,04 \left(\frac{0,084}{0,012} + 3 \right) \left(\frac{1,11 \times 10^{-4}}{1,11 \times 10^{-4}} \right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{1,11 \times 10^{-4}}{1,11 \times 10^{-4}} - 1 \right)^2 K_{hk} \\ &= 0,4 K_{hk} \\ &= 0,04 \left(\frac{0,084}{0,007} \right. \\ &\quad \left. + 3 \right) \left(\frac{3,84 \times 10^{-5}}{3,84 \times 10^{-5}} \right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{3,84 \times 10^{-5}}{3,84 \times 10^{-5}} - 1 \right)^2 K_{hk} \\ &= 0,6 \end{aligned}$$

Rugi karena gesekan (Head) pada *honeycomb*

$$\begin{aligned} H_{hy} &= K_h \left(\frac{v^2}{2g} \right) H_{hy} = 0,4 \left(\frac{2^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) H_{hy} \\ &= 0,08m \end{aligned}$$

$$H_{hyk} = K_{hk} \left(\frac{v^2}{2g} \right) H_{hyk}$$

$$\begin{aligned} &= 0,6 \left(\frac{2^2 \frac{m}{s}}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) H_{hyk} \\ &= 0,12m \end{aligned}$$

Total losses *honeycomb*

$$losses = 1600 * 0,08m losses = 130,47m$$

$$losses = 1521 * 0,12m losses = 186,05m$$

3.2 Total Koefisien Rugi

Tabel 4. Koefisien Rugi pada *Wind Tunnel*

| Bagian | K | % |
|--------------|-------|---------|
| Test section | 0,060 | 12,2626 |
| Contraction | 0,007 | 1,51592 |
| Diffuser | 0,022 | 4,47097 |
| Honeycomb | 0,4 | 81,7505 |
| Total | 0,489 | 100 |

Rasio Energi pada *Wind Tunnel* adalah:

$$ER = \frac{1}{\Sigma k} ER = \frac{1}{0,489} ER = 2,04$$

a. Total Losses

Mayor losses (Mloss)

$$\begin{aligned} Mloss &= 0,0122m + 0,005m + 0,00413m \\ &\quad + 130,47m + 186,05m \\ &= 316,65m \end{aligned}$$

Minor losses (mloss)

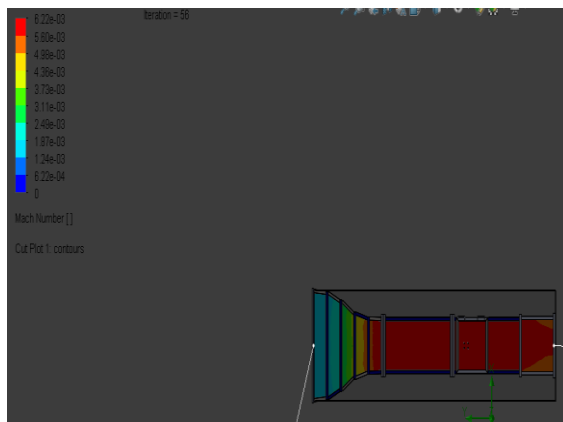
$$mloss = 0,011m + 0,005mmloss = 0,016m$$

b. Head Loss

$$\begin{aligned} Headloss &= Mloss + mloss \\ &= 8,0513 + 0,016 \\ &= 8,0313m \end{aligned}$$

3.3 Simulasi *Wind Tunnel* dengan Software

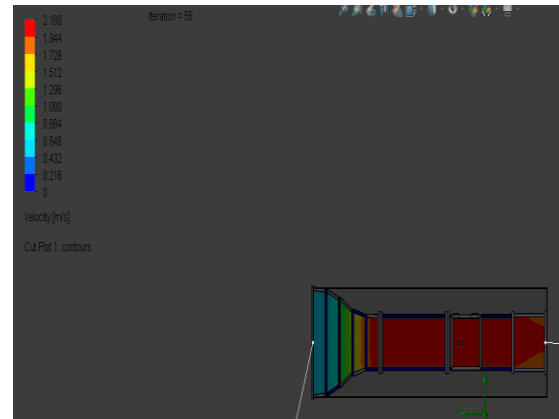
a. Simulasi Mach Number



Gambar 15. Pengujian CAE Mach Number *Wind Tunnel*.

Pada simulasi dengan menggunakan bantuan software terlihat machnumber pada *wind tunnel* memiliki besaran mach number yang berbeda terlihat dari perubahan kontur warna, berdasarkan simulasi nilai mach number pada *wind tunnel* $M < 1$ sehingga *windtunnel* ini tergolong tipe low subsonic *windtunnel*.

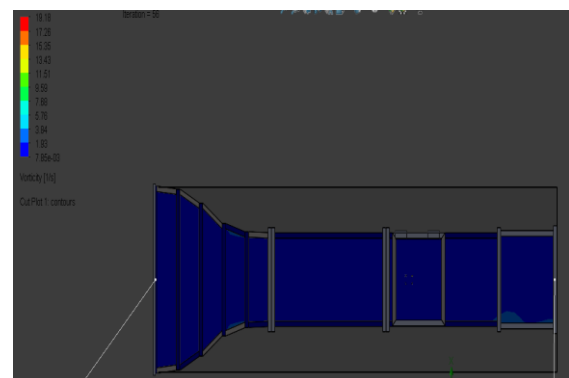
b. Simulasi Kecepatan pada *Wind Tunnel*



Gambar 16 Pengujian CAE Kecepatan *Wind Tunnel*.

Pada simulasi terlihat terjadinya penambahan kecepatan udara pada *contraction* sebelum memasuki *settling chamber* dan *test section*, hal ini selaras dengan fungsi *contraction* yaitu meningkatkan kecepatan udara sebelum memasuki *test section*. Peningkatan udara mulai berhenti dibagian *settling chamber* dan perlahan udara mulai stabil memasuki *test section* terlihat dari hasil simulasi. Kecepatan udara stabil 2 m/s pada *test section* dan berkurang perlahan di *diffuser* sebelum kembali keluar.

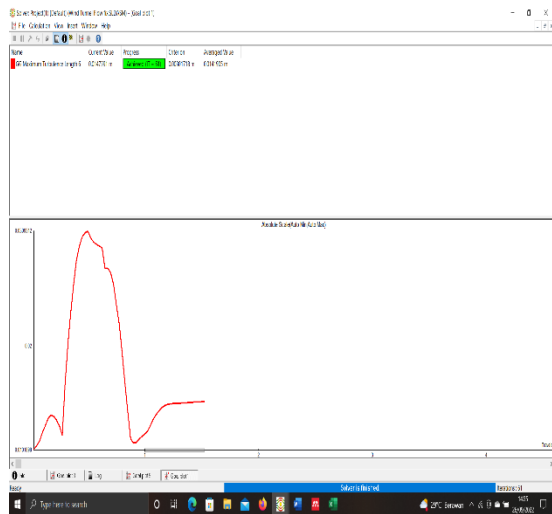
c. Simulasi Vorticity pada *Wind Tunnel*



Gambar 17 Pengujian CAE Vorticity *Wind Tunnel*.

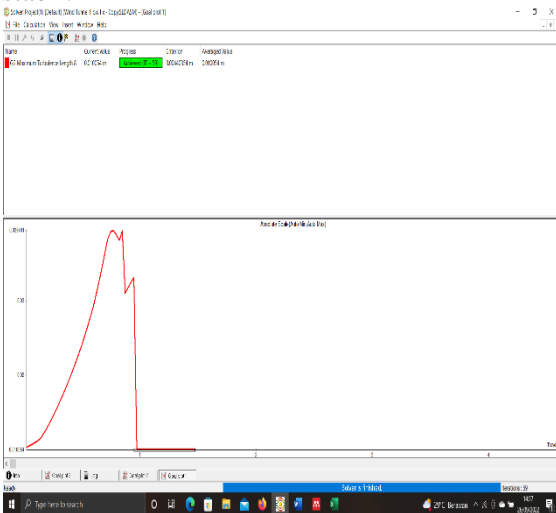
Pada *wind tunnel* tidak terlihat adanya vorticity pada aliran udara yang menandakan pada simulasi aliran udara yang melintasi *test section* itu stabil arahnya tidak berputar.

d. Grafik Panjang Turbulensi Alat



Gambar 18. Grafik Maksimum Turbulensi tanpa *Honeycomb*.

Pada grafik terlihat aliran mengalami turbulensi pada 1meter pertama, lebih tepatnya yaitu pada *contraction* terlihat turbulensi yang tinggi di 1meter pertama tersebut, setelah memasuki *settling chamber* nilai turbulensi mengalami penurunan dan setelah masuk *test section* terlihat aliran udara memiliki nilai yang stabil.



Gambar 19. Grafik Maksimum Turbulensi dengan *Honeycomb*

Pada grafik terlihat aliran yang masuk kedalam *contraction* mengalami kenaikan nilai turbulensi, setelah udara masuk kedalam *settling chamber* yang dipasang *honeycomb* di dalamnya udara yang masuk nilai turbulensinya stabil.

3.4 Data Langsung

a. Perbandingan Kecepatan

Pengukuran data kecepatan dilakukan dengan menggunakan anemometer untuk mengetahui kecepatan udara dalam *wind tunnel*, dengan pengujian kecepatan pada beberapa titik dalam keadaan pintu terbuka dan tertutup dengan data sesuai tabel 5.

Tabel 5. Data Pengujian Langsung

| Posisi (cm) | Kecepatan (m/s) |
|-------------|-----------------|
| 10 | 2 |
| 50 | 2 |
| 100 | 2 |
| 150 | 2 |
| 200 | 2 |

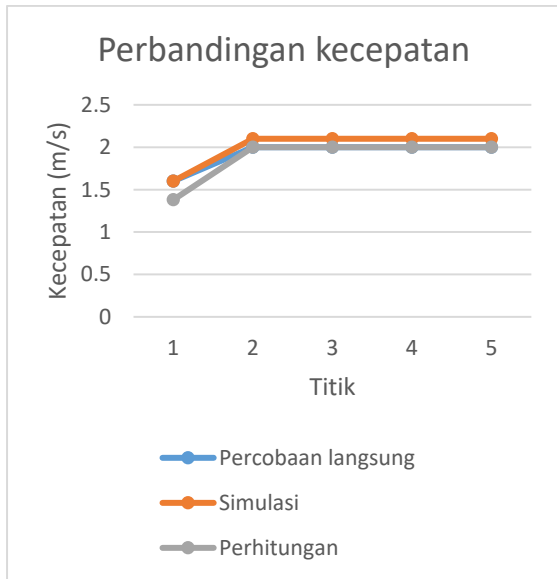
Berdasarkan data pengukuran kecepatan udara didalam *windtunnel* stabil pada 2 m/s sepanjang udara mengalir di dalam *test section*.

Berikut perbandingan data kecepatan berdasarkan pengujian langsung, perhitungan dan simulasi seperti tabel 6.

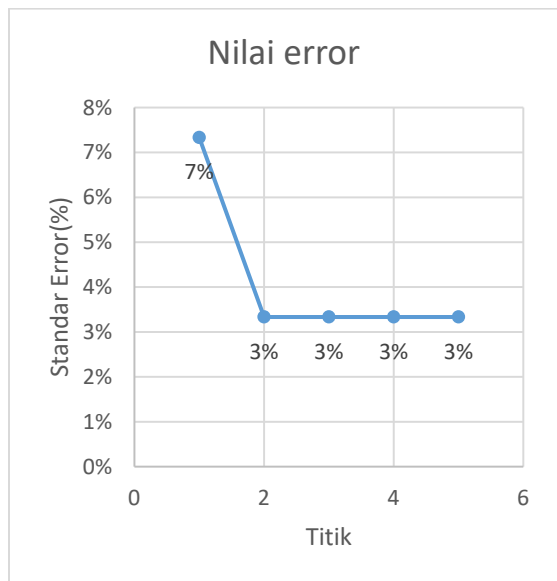
Tabel 6. Perbandingan Kecepatan

| Posisi | Kecepatan (m/s) | | |
|--------|--------------------|----------|-------------|
| | Percobaan langsung | Simulasi | Perhitungan |
| 1 | 1,6 | 1,6 | 1,38 |
| 2 | 2 | 2,1 | 2 |
| 3 | 2 | 2,1 | 2 |
| 4 | 2 | 2,1 | 2 |
| 5 | 2 | 2,1 | 2 |

Pada tabel 6, grafik 20 dan 21 terlihat berdasarkan pengujian langsung kecepatan udara berada pada kecepatan 2 m/s melebihi dari yang ditargetkan sebesar 1,5 m/s, yang menandakan *exhaust fan* memiliki kemampuan hisap yang cukup kuat untuk memenuhi kebutuhan kecepatan udara di dalam *wind tunnel*. Dimana nilai error yang paling tinggi berada pada titik 1 dengan nilai error 7% dan yang lainnya stabil pada 3%.



Gambar 20. Grafik Perbandingan Kecepatan



Gambar 21. Grafik Nilai Error Perhitungan, Simulasi dan Percobaan Langsung

b. Aliran udara dalam wind tunnel

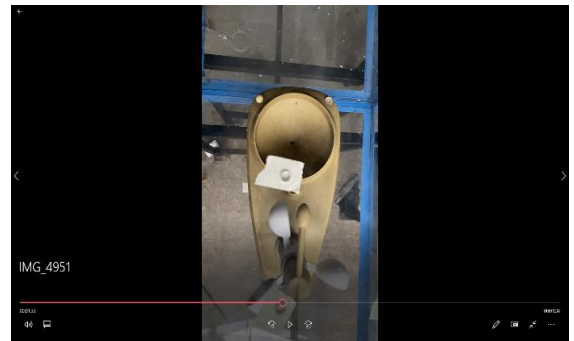
Pada pengujian dengan visualisasi asap terlihat aliran udara stabil mendekati laminar dan tidak terlalu mengalami turbulensi. Pada pengamatan dari jarak 30 cm setelah *honeycomb* aliran masih lurus hingga sampai pada kipas. Tidak selalu terjadi separasi aliran.



Gambar 22. Aliran Udara Visualisasi Asap



Gambar 23. Aliran Udara pada Benda Tampak Samping



Gambar 24. Aliran Udara pada Benda Tampak Atas



Gambar 25. Aliran Udara pada Benda Tampak Belakang

Pada gambar 22 sampai 25 terlihat perubahan jenis aliran dari laminar menjadi transisi Ketika menghantam benda, arah aliran yang semula lurus dibengkokkan Ketika menghantam benda.



Gambar 26. Aliran Tanpa Honeycomb



Gambar 27. Aliran dengan *Honeycomb* (a)



Gambar 28. Aliran dengan *Honeycomb* (b)

Pada gambar 26 terlihat aliran tanpa honeycomb fluida yang masuk ke dalam *test section* mengalami ketidak selarasan saat memasuki *test section* sebelum akhirnya selaras kembali, pada aliran udara yang menggunakan *honeycomb* udara yang masuk selarasa sampai keluar kembali dari *test section* pada gambar 27 dan 28.

3.5 Pembahasan

Wind tunnel jenis *open return wind tunnel* bertipe *low subsonic windtunnel* dirancang memiliki Panjang 3,6 m dengan kecepatan maksimal pada *test section* 1,5 m/s dengan aliran yang mendekati laminar, *contraction* dirancang dengan menggunakan *polynomial* orde 5, dimensi masukan 1 m X 1 m dan sisi keluaran berdimensi sama dengan *test section* dengan panjang *contraction* 1 m, *honeycomb* berbentuk lingkaran berdimensi 8,4 cm untuk panjang dan 12 mm untuk diameter, *diffuser* berdimensi 50 cm pada sisi yang menyatu dengan *test section* dan 52 cm pada sisi yang berhadapan dengan fan dengan sudut kemiringan $1,79^\circ$, Penggerak digunakan *exhaust fan* 16 inchi dengan daya 74 W untuk membuat aliran di *test section* stabil pada kecepatan 1,5 m/s.

Wind Tunnel memiliki total koefisien loss (rugi-rugi aliran) 0,531 dengan rincian koefisien loss pada *test section* sebesar 0,052, *contraction* 0,007, *diffuser* 0,022, *honeycomb* 0,45. Koefisien loss (rugi-rugi aliran) adalah kehilangan tekanan yang disebabkan oleh fluida sebelum masuk ke nose. Massa aliran 0,499 Kg/s dan debit 0,424 m³/s, boundary layer 1,23 cm dan turbulensi berdasarkan grafik terjadi pada 1 m pertama pada bagian *contraction* dan aliran stabil Ketika akan memasuki *test section*.

4. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan setelah rancangan *open return wind tunnel tipe low subsonic* ini dirancang dan dibuat dapat digunakan untuk pengujian sudu turbin angin untuk kecepatan rendah dibawah 5 m/s (maksimal 2 m/s). Bentuk aliran udara yang mengenai sudu turbin di dalam *test section* dapat dilihat dengan bantuan asap yang masuk melalui *contraction*. Kedepannya diharapkan dengan menggunakan *open return wind tunnel tipe low subsonic* didapatkan bentuk turbin angin yang baik untuk kecepatan udara rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. R. Al Hakim, "Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energy Terbarukan Untuk Ketahanan Energi Di Indonesia: Literatur Review," *J. Pengabdian Kpd Masy.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2020.
- [2] W. Andrian, "Indonesia Kaya Sumber Daya Energi Terbarukan," *Indonesiabaik.id*. [Online]. Available: <https://indonesiabaik.id/infografis/indonesia-kaya-sumber-daya-energi-terbarukan>, 2018.
- [3] D. L. Priandaru, "Kelebihan dan Kekurangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin," *Kompas*. [Online]. Available: <https://lestari.kompas.com/read/2023/06/10/110000486/kelebihan-dan-kekurangan-pembangkit-listrik-tenaga-angin?page=all>, 2023.
- [4] M. A. Rafdi Syah, "Pengetahuan Teknik Elektro: Bayu si Penghasil Listrik," *ITK*. [Online]. Available: <https://ee.itk.ac.id/berita/detail/pengetahuan-teknik-elektro-bayu-si-penghasil-listrik>, 2021.
- [5] S. N. Arifa, "Menilik Riwayat Pembangunan dan Potensi PLTB di Indonesia," *Goodnewsfromindonesia.id*. [Online]. Available: <https://www.goodnewsfromindonesia.id/2022/01/08/menilik-riwayat-pembangunan-dan-potensi-pltb-di-indonesia>, 2022.
- [6] N. N. Fadilah, "Inilah Alasan Penggunaan PLTB di Indonesia Masih Minim," *Zona Media Pembaru*, 2022.
- [7] BPS Karimun, "Badan Pusat Statistik Kabupaten Karimun," *karimunkab.bps.go.id*, 2023.
- [8] B. W. Wahyono, "Pengaruh Jarak Antar Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius Bentuk Twisted Profil 'L'," *Universitas Brawijaya*, 2020.
- [9] Wikipedia, "Terowongan angin," *Wikipedia*. [Online]. Available: <https://id.wikipedia.org/wiki/Wireshark>, 2023.
- [10] Pusziad, "Mengenal Prinsip Kerja & Konstruksi Wind Tunnel Batu Jajarkopasus Tni-Ad," *Pusziad*, 2023.
- [11] C. Wiratama, "Terowongan Angin (Wind Tunnel)," *Aeroengineering*. [Online]. Available: <http://aeroengineering.co.id/2017/07/pengujian-model-pesawat-terbang-dengan-terowongan-angin-wind-tunnel/>, 2018.
- [12] D. A. Phillips and M. J. Soligo, "Will CFD Ever Replace Wind Tunnels For Building Wind Simulations?," *Int J High-Rise Build*, vol. 8, no. 2, pp. 107–16, 2019.
- [13] RWDI, "Wind Engineering & Buildings: CFD & Wind Tunnel Testing Statement," *RWDI*. [Online]. Available: https://rwdi.com/en_ca/insights/thought-leadership/statement-on-cfd-and-wind-tunnel-testing-for-wind-engineering-of-buildings/, 2023.
- [14] M. Jiménez-Portaz et al., "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, 2020.
- [15] N. Hall, "Open Return Wind Tunnel," *NASA Glenn Research Center*, 2018. [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>.
- [16] N. Hall, "Types of wind tunnels," *NASA Glenn Research Center*. [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tuntype.html>, 2018.
- [17] A. Sa'diyah et al., "Pengantar Teknik Mesin," *Global Eksekutif Teknologi*, 2022. [Online]. Available: https://www.google.co.id/books/edition/TABEL_TEKNIK_MESIN/WdUsDwAAQBAJ?hl=en&gbpv=0.
- [18] M. Masrurroh et al., "TERMODINAMIKA," *UB Press*, 2021. [Online]. Available: https://www.google.com/books/edition/Perma_Culture/2RhLDwAAQBAJ?hl=en&gbpv=0#pg=PA33.
- [19] Panasonic, "FV-40AFU Ventilating Fan - Panasonic," *panasonic*, 2023.
- [20] L. Catta, "Fundamentals of Wind-Tunnel Design," *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 2023.