

Rancang bangun *frame wind tunnel* dengan siku 40 mm x 40 mm untuk peningkatan kestabilan struktur

Muh. Miftakhul Iman, Nur Rohmat

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

Jl. Surya Kencana No.1 Pamulang, Tangerang Selatan

Email: *muhamadmiftakhuliman@gmail.com

ABSTRAK

Pemanfaatan energi angin di Indonesia masih rendah akibat keterbatasan fasilitas eksperimen yang memadai untuk mendukung penelitian aerodinamika. Kondisi ini menjadi kendala dalam pengembangan teknologi energi terbarukan. Meningkatnya kebutuhan energi dan rendahnya pemanfaatan energi angin di Indonesia mendorong perlunya media eksperimen seperti *wind tunnel*. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi struktur rangka (*frame*) *wind tunnel* menggunakan profil besi siku 40 mm x 40 mm guna meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur. Rumusan masalah difokuskan pada konsep perancangan *frame*, pemodelan dan analisis struktur, serta evaluasi kelayakan desain berdasarkan faktor keamanan. Metode penelitian meliputi perhitungan manual berbasis mekanika teknik dan simulasi numerik dengan *finite element method* (FEM). Beban yang dianalisis berupa beban statis total 39,4 kg (382,59 N) yang berasal dari motor penggerak, *diffuser*, *test section*, *box thermo*, dan *outlet*. Parameter yang ditinjau meliputi distribusi tegangan, deformasi, regangan, dan faktor keamanan. Hasil perhitungan manual menunjukkan tegangan maksimum sebesar 22,05 MPa dengan faktor keamanan 11,3. Sementara itu, simulasi FEM menghasilkan tegangan maksimum 15,8 MPa, deformasi maksimum 0,0972 mm, dan faktor keamanan mencapai 19,9. Dengan demikian, struktur *frame wind tunnel* berbasis besi siku 40 mm x 40 mm dinyatakan stabil, aman, dan layak digunakan untuk pengujian aliran udara skala laboratorium.

Kata kunci: *Wind tunnel*, FEM, besi siku 40 mm x 40 mm, beban statis, faktor keamanan.

ABSTRACT

The utilization of wind energy in Indonesia remains low due to limited experimental facilities that support aerodynamic research. This condition has become an obstacle to the development of renewable energy technology. The increasing energy demand and the low utilization of wind energy in Indonesia highlight the need for experimental media such as a wind tunnel. This study aims to design and evaluate the structural frame of a wind tunnel using 40 mm x 40 mm angle iron profiles to enhance the strength and stability of the structure. The research focuses on the design concept, structural modeling and analysis, and design feasibility evaluation based on the safety factor. The research methods include manual calculations based on engineering mechanics and numerical simulation using the finite element method (FEM). The analyzed static load totaled 39.4 kg (382.59 N), derived from the drive motor, diffuser, test section, thermo box, and outlet. The parameters observed include stress distribution, deformation, strain, and safety factor. The manual calculation results show a maximum stress of 22.05 MPa with a safety factor of 11.3, while the FEM simulation produces a maximum stress of 12.5 MPa, a maximum deformation of 0.045 mm, and a safety factor of 19.9. Therefore, the wind tunnel frame structure made of 40 mm x 40 mm angle iron is declared stable, safe, and feasible for use in laboratory-scale airflow testing.

Keywords: *wind tunnel*, FEM, 40 mm x 40 mm angle steel, static load, safety factor.

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya jumlah penduduk dan pertumbuhan sektor ekonomi membawa konsekuensi terhadap meningkatnya energi dari tahun ke tahun. Di Indonesia, kondisi ini semakin memperkuat ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang tidak dapat diperbarui. Ketergantungan tersebut tidak hanya menyebabkan penurunan cadangan energi nasional, tetapi juga menimbulkan ketidakstabilan harga, ketergantungan impor, serta isu lingkungan berupa peningkatan emisi karbon yang menjadi perhatian global [1]. Sebagai langkah strategis dalam mengurangi ketergantungan tersebut, pemerintah Indonesia telah merumuskan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) untuk memperkuat pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT). RUEN menargetkan kontribusi EBT dalam bauran energi nasional mencapai 23% pada tahun 2025 dan meningkatkan 31% pada tahun 2050 [2]. Namun, kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa beberapa jenis EBT, khususnya energi angin, masih belum dimanfaatkan secara optimal. Hingga tahun 2020, kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) baru mencapai sekitar 135 MW dari potensi yang diperkirakan mencapai 9.000 MW, dan sebagai besar terkonsentrasi di Sulawesi selatan [3].

Menariknya, selain sumber angin alami, terdapat potensi lain yang belum banyak dieksplorasi, yaitu aliran udara buangan dari sistem *exhaust fan* industri. Aliran ini memiliki arah yang relatif konstan, kecepatan yang stabil, dan karakteristik yang cukup ideal untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi angin buatan [4]. Untuk mendukung pemanfaatan potensi ini secara efektif, dibutuhkan media eksperimental seperti *wind tunnel* yang mampu mengarahkan dan mengatur aliran udara buatan secara terkontrol.

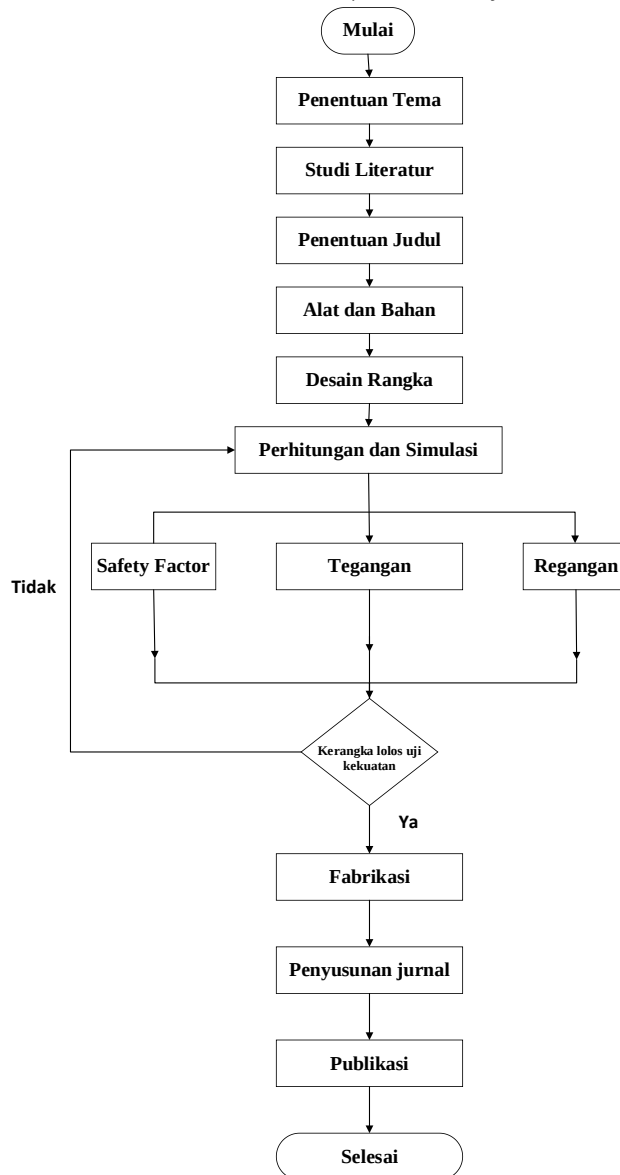
Dalam sistem *wind tunnel*, struktur rangka (*frame*) memiliki peran penting sebagai penopang keseluruhan sistem serta penjaga kestabilan saat terjadi aliran udara berkecepatan tinggi. Beberapa penelitian sebelumnya telah merancang *frame wind tunnel* dengan menggunakan material besi siku berukuran 30 mm x 30 mm maupun besi *hollow* dengan spesifikasi tertentu [5]. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih terbatas pada skala laboratorium dan belum banyak mengevaluasi dampak peningkatan dimensi penampang terhadap kinerja struktur secara menyeluruh.

Sampai saat ini belum ditemukan kajian komprehensif yang secara spesifik mengevaluasi performa struktur *frame wind tunnel* menggunakan besi siku berukuran 40 mm x 40 mm baik melalui pendekatan perhitungan manual maupun simulasi numerik. Kekosongan penelitian ini menunjukkan perlunya *studi* mendalam untuk memahami sejauh mana perubahan dimensi penampang mempengaruhi kekuatan, kekakuan, serta kestabilan struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menjembatani celah tersebut dengan melakukan analisis menyeluruh terhadap performa struktur *frame wind tunnel* berbasis besi siku 40 mm x 40 mm menggunakan metode elemen hingga (*finite element method/FEM*). Selain memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain mekanik yang lebih kuat, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan *wind tunnel* skala laboratorium yang efisien dan stabil.

Sebagai tindak lanjut dari latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kekuatan struktur *frame wind tunnel* berbasis siku 40 mm x 40 mm menggunakan analisa tegangan, regangan, deformasi dan faktor keamanan. Evaluasi dilakukan dengan pendekatan metode elemen hingga (*FEM*) untuk mengetahui sejauh mana desain mampu menahan beban dari aliran udara buatan, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan sistem *wind tunnel* skala kecil dan pemanfaatan energi angin non-konvensional, khususnya udara buangan industri.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan dua pendekatan utama, yaitu analisis teoritis (perhitungan manual berbasis mekanika teknik) dan pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga (*finite element method* (FEM)). Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari perancangan konsep, pemodelan desain, analisis struktur, hingga validasi hasil simulasi dengan perhitungan manual. Alur keseluruhan proses penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan urutan langkah dari identifikasi masalah, pengumpulan data, perancangan model *wind tunnel*, analisis kekuatan struktur melalui FEM, hingga penarikan kesimpulan akhir terkait kestabilan dan kelayakan desain *frame wind tunnel*.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

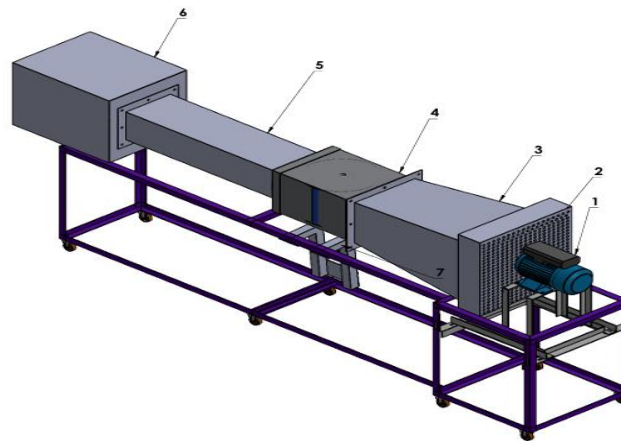
Keterangan:

Tahap kelayakan uji kekuatan dinyatakan “Ya” apabila memenuhi kriteria berikut:

1. *safety factor* $\geq 1,5$.
2. Tegangan maksimum < tegangan izin material.
3. Deformasi < 1 mm.

2.1 Konsep Perancangan *Wind Tunnel*

Konsep perancangan merupakan tahapan awal dalam proses rancang bangun yang bertujuan untuk menggambarkan ide dasar dari sistem atau produk yang akan dibuat. Pada penelitian ini, konsep perancangan *wind tunnel* difokuskan pada perancangan *frame* sebagai penopang utama seluruh komponen, sehingga struktur yang dihasilkan memiliki stabilitas dan keamanan yang memadai. Hasil konsep perancangan *wind tunnel* dapat dilihat pada Gambar 2. Bagian dan fungsi komponen dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Desain *Wind Tunnel*

Tabel 1. Bagian dan fungsi Komponen *Wind Tunnel*

No.	Bagian	Fungsi
1	Motor penggerak	Menghasilkan aliran udara
2	<i>Housing</i>	Mengubah energi putar menjadi aliran udara
3	<i>Diffuser</i> (saluran Pembesar)	Menurunkan kecepatan udara
4	<i>Test Section</i>	Tempat meletakkan model
5	Contraction Section	Mempercepat aliran udara dan membuat alirannya lebih laminar (rata)
6	<i>Outlet / Exhaust Section</i>	Mengeluarkan kembali aliran udara ke lingkungan dengan kecepatan yang lebih rendah
7	Sistem Transmisi Daya	meneruskan putaran dari motor penggerak ke kipas/impeller sehingga menghasilkan aliran udara.

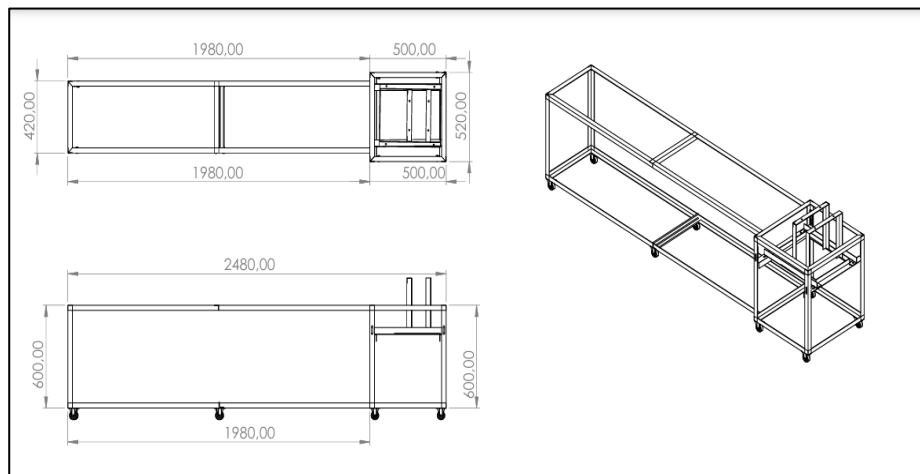
2.2 Desain *Frame Wind Tunnel*

Desain *frame wind tunnel* pada penelitian ini bertujuan untuk menopang seluruh komponen utama dari sistem *wind tunnel*, menjaga kekuatan struktur, serta memastikan kestabilan selama proses pengujian aliran udara buatan. Adapun dimensi nya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi *Frame wind tunnel*

No	Dimensi	Satuan
1	Panjang	2.480 mm
2	Lebar	420 mm
3	Tinggi	600 mm

Struktur menggunakan material besi siku berukuran 40 mm x 40 mm dengan tebal 3 mm, yang disambung dengan menggunakan metode pengelasan dan penggunaan baut pada beberapa titik kritis. Adapun desainnya dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Gambar *frame wind tunnel*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pendekatan Teoritis FEM Pada Struktur *Frame*

Pendekatan teoritis FEM pada struktur *frame* adalah perhitungan manual untuk mendapatkan estimasi awal terhadap tegangan, regangan, dan faktor keamanan yang bekerja pada struktur *frame wind tunnel*. Pendekatan ini menggunakan prinsip dasar mekanika teknik dengan asumsi struktur sebagai sistem balok sederhana yang mengalami beban statis terpusat, berikut adalah hasil perhitungan teoritis nya

1. *Von Mises Stress* Pada Perhitungan Teori

Von mises stress merupakan tegangan yang timbul pada permukaan benda akibat adanya pembebanan. Beban kerja yang digunakan dalam perhitungan ini terdiri dari dua gaya vertikal yang bekerja pada posisi yang berbeda, yaitu gaya pertama sebesar 176,58 N dan gaya kedua sebesar 206,01 N. sebelum menghitung tegangan, perlu ditentukan variabel penting seperti luas penampang (A), momen lentur (M), titik berat (C), momen inersia(I), serta tegangan normal (σ_x dan σ_y).

A. Perhitungan Luas Permukaan (A)

Perhitungan luas permukaan dengan menggunakan persamaan 1.

$$A = P \times L \quad (1)$$

Dimana :

$$P = 500 \text{ mm}$$

$$L = 520 \text{ mm}$$

Maka,

$$\begin{aligned} A1 &= P \times L \\ &= 500 \times 500 \text{ mm} = 260.000 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dan untuk Luas permukaan A2

$$\begin{aligned} A2 &= P \times L \\ &= 1.980 \times 420 \text{ mm} = 831.600 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Setelah diperoleh luas penampang *frame*, langkah selanjutnya adalah menghitung tegangan geser sebagai dasar perhitungan tegangan *von mises stress*. *von mises stress* ditentukan dari kombinasi tegangan geser dan tegangan normal, yang dihitung melalui rumus berikut

B. Perhitungan Tegangan Geser

Pada struktur *frame wind tunnel* ini, terdapat dua gaya utama yang bekerja pada posisi yang berbeda, karena kedua gaya tersebut memiliki titik kerja yang berbeda, oleh karena itu perhitungan tegangan geser dilakukan secara terpisah setiap gaya, dengan menggunakan persamaan 2.

$$M = F \times \frac{1}{2} \times L \text{ rangka frame} \quad (2)$$

$$M1 = 176,58 \times \frac{1}{2} \times 500 = 44.145 \text{ N.mm}$$

$$M2 = 206,01 \times \frac{1}{2} \times 1980 = 203,9 \text{ N.mm}$$

Berdasarkan pada kondisi pembebanan pada struktur rangka *wind tunnel*, kedua gaya ini bekerja pada posisi berbeda dengan jarak tentu dari titik tumpuan tetap.

Gaya pertama sebesar 176,58 N bekerja pada jarak 500 mm, sehingga menghasilkan momen :

$$M1 = 176,58 \times 500 = 88.290 \text{ N.mm}$$

Gaya kedua sebesar 206,01 N bekerja pada jarak 1980 mm, sehingga menghasilkan momen :

$$M1 = 206,01 \times 1980 = 407.899 \text{ N.mm}$$

Maka, total momen lentur yang bekerja pada struktur adalah :

$$M_{total} = M1 + M2 = 88.290 + 407.899,8 = 496.189,8 \text{ N.mm}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan geser berdasarkan dua gaya yang bekerja pada struktur. Momen pertama (M1) bernilai 44,145 N.mm dengan luas penampang terkait (A1) sebesar 260000 mm², sedangkan momen kedua (M2) sebesar 203,9 N.mm dengan luas penampang (A2) sebesar 831600 mm²

Selain itu ketebalan rangka besi siku (b) yang digunakan dalam struktur ini memiliki nilai 3 mm Perhitungan tegangan geser ini dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.

$$\tau_{xy} = M / 2 \cdot A \cdot b \quad (3)$$

Dimana =

M = momen yang terjadi (N.mm)

A = Luas Penampang siku (mm²)

b = Tebal pelat yang digunakan (mm)

Maka,

$$\begin{aligned} \tau_{1xy} &= (44,145 \text{ N} \cdot \text{mm}) / (2 \times 260000 \times 3 \text{ mm}) \\ &= 44,145 / 1.560.000 \\ &= 2,82 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

sedangkan,

$$\begin{aligned} \tau_{2xy} &= (203,9 \text{ N} \cdot \text{mm}) / (2 \times 831600 \times 3 \text{ mm}) \\ &= 203,9 / 4.989.600 \\ &= 4,08 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

C. Perhitungan titik berat (C) pada profil besi siku

Untuk menghitung titik berat (C) dari *frame* besi siku yang direncanakan, digunakan dimensi panjang sisi (h) sebesar 600 mm Dapat menggunakan persamaan 4.

$$C = h/2 \quad (4)$$

Maka,

$$C = 600/2 = 300 \text{ mm}$$

D. Perhitungan Momen Inersia (I)

Perhitungan momen inersia dapat dihitung menggunakan rumus

$$I = (b \cdot h^3) / 12 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i &= (3.3002) / 12 \\ &= 2,99 \times 109 \text{ mm} \\ &= 6750 \text{ mm} \end{aligned}$$

E. Perhitungan Tegangan Normal (σ_t , σ_x)

Perhitungan tegangan normal (σ_t atau σ_x) pada *frame* yang dirancang dapat dihitung berdasarkan momen lentur sebesar 496.189,8 N.mm dan jarak dari titik netral ke serat terluar (C) sebesar 300 mm

Perhitungan menggunakan persamaan 6.

$$\sigma_t = (M \cdot C) / I \quad (6)$$

Maka,

$$\begin{aligned} \sigma_t &= (496.189,8 \cdot 300) / 6750 \\ \sigma_t &= 22,05 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Nilai tegangan normal dan tegangan geser yang telah dihitung selanjutnya digunakan dalam persamaan tegangan *von mises* untuk menentukan tegangan maksimum gabungan yang terjadi pada struktur

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad (7)$$

Maka,

$$\sigma_{\max} = \frac{22,05 + 0}{2} + \sqrt{\left(\frac{22,05 - 0}{2}\right)^2 + (0,107)^2}$$

$$\sigma_{\max} = 22,05 \text{ MPa.}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai Tegangan Normal (σ_t , σ_x) sebesar 22,05 MPa.

2. Perhitungan Perubahan Bentuk (*Displacement*)

Displacement atau perpindahan yang terjadi pada struktur *frame* merupakan respons deformasi akibat beban kerja yang dikenakan. Nilai deformasi atau perpindahan (*displacement*) akibat gaya yang bekerja dapat ditentukan melalui perhitungan teoritis menggunakan persamaan berikut :

$$\delta = \frac{P \cdot \frac{1}{2} \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (8)$$

Maka,

Dimana : $P_{\text{total}} = 382,59 \text{ N}$

$L_{\text{total}} = 2480 \text{ mm}$

$E = 200000 \text{ MPa}$

$I = 6750 \text{ mm}^4$

Maka,

$$\delta = \frac{382,59 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2480^3}{48 \cdot 200.000 \cdot 6750}$$

$$= 0,732 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai Perubahan bentuk (*displacement*) sebesar 0,732 mm

3. Perhitungan Faktor Keamanan

Untuk mengetahui nilai faktor keamanan (*safety factor*), dapat dihitung menggunakan rumus

$$safety\ factor = ((yield\ point\ stress)) / ((working\ atau\ design\ stress)) \quad (9)$$

Dimana : *yield strength* = 250 MPa

σ_{max} = 22,05 MPa

maka,

Safety factor = ((250)) / ((22,05))

= 11,3

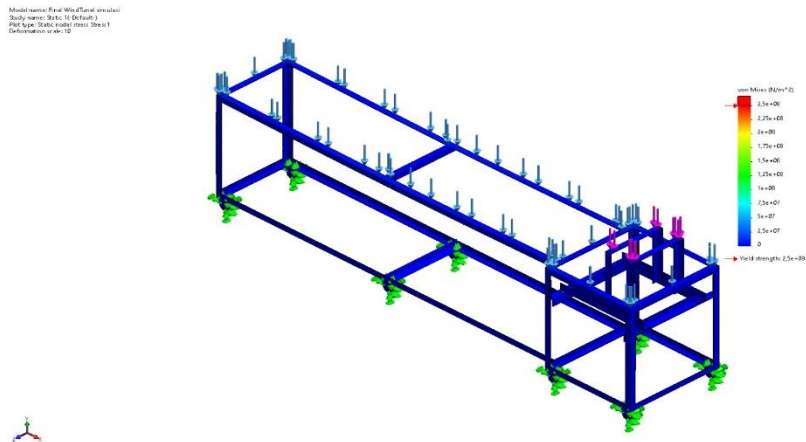
Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 11,3.

3.2 Simulasi FEM (*finite element method*) pada struktur *frame*

Simulasi struktur *frame* dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) untuk menganalisis tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada desain *wind tunnel*. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi kekuatan dan kestabilan struktur terhadap beban kerja yang diberikan. Hasil simulasi bisa dilihat pada gambar di bawah ini.

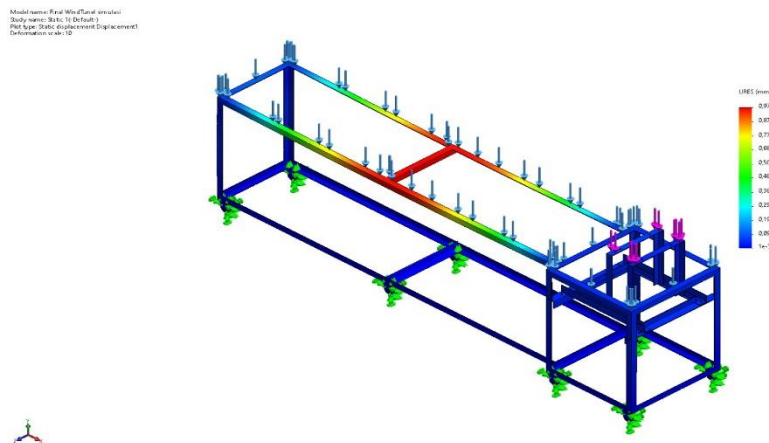
1. Hasil Simulasi Tegangan (*Von Misses stress*) pada rangka

Dari hasil simulasi dengan metode *von mises* menunjukkan tegangan maksimum 15,8 MPa dan minimum 0,00127 MPa, jauh dibawah nilai *yield strenght* material sebesar 250 MPa. Ini menandakan struktur berada dalam kondisi aman dan tidak mengalami deformasi plastis, sehingga layak dari segi kekuatan dan integritas terhadap beban kerja.[6]. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh [5] yang merancang *Open Circuit Wind Tunnel (OCWT)* untuk pengujian airfoil turbin di Institut Teknologi Padang. Penelitian tersebut menggunakan rangka berbahan besi siku dengan ketebalan 2 mm untuk menopang *test section* berukuran 100 cm × 50,6 cm. Meskipun penelitian tersebut tidak mencantumkan nilai tegangan atau deformasi hasil analisis, struktur *wind tunnel* yang dihasilkan dilaporkan mampu menahan beban dan getaran selama pengujian serta stabil terhadap kecepatan aliran udara hingga 5 m/s. Dengan demikian, hasil simulasi tegangan maksimum sebesar 15,8 MPa pada penelitian ini menguatkan bahwa desain rangka berbahan besi siku 40 mm × 40 mm juga memenuhi kriteria kekuatan dan kestabilan untuk aplikasi serupa pada *wind tunnel* skala laboratorium.

Gambar 4. Hasil simulasi *Von Mises Stress* pada struktur *frame wind tunnel*

2. Hasil Simulasi Deformasi (*Displacement*) Pada Rangka

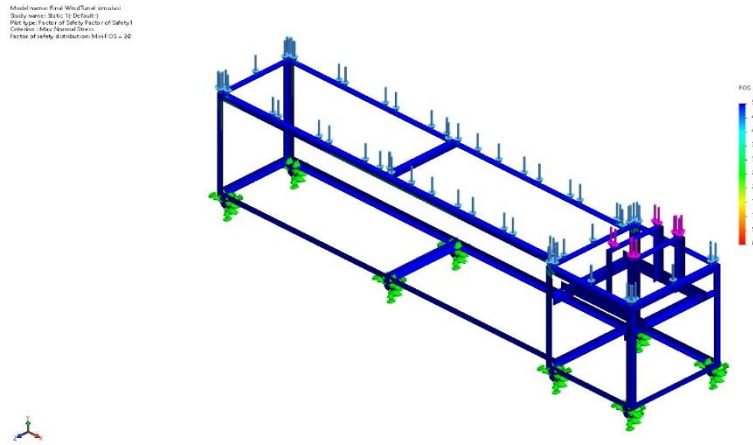
Displacement pada gambar menunjukkan perubahan posisi akibat pembebanan. Nilai maksimum sebesar 0,972 mm (warna merah), sedangkan minimum 0 mm terjadi pada area tumpuan tetap (*fixed support*) yang tidak mengalami perpindahan.[7]

Gambar 5. Hasil Simulasi *Displacement* Total (URES) pada struktur *frame wind tunnel*

3. Hasil Simulasi *equivalent strain* pada rangka

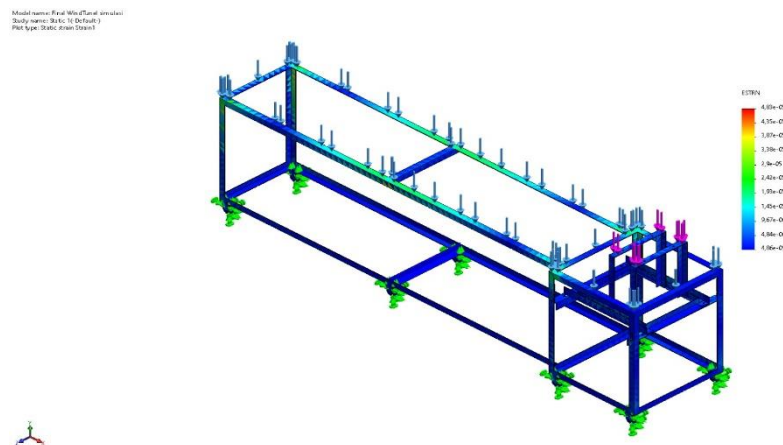
Hasil simulasi *equivalent strain* menunjukkan regangan minimum sebesar $4,86 \times 10^{-9}$ yang terjadi pada salah satu elemen mesh bernomor 2703, dan maksimum sebesar $4,83 \times 10^{-5}$ pada elemen mesh 13661. Nilai regangan ini masih jauh di bawah batas regangan luluh material ASTM

A36. Berdasarkan penelitian.[8] pada baja ASTM A36 dengan perlakuan normalizing menunjukkan regangan luluh antara 2,24% sampai 2,63% tergantung kondisi dan perlakuan panas.



Gambar 6. Tampilan Distribusi *Equivalent Strain* (ESTRN) pada Struktur *Frame Wind Tunnel*

4. Hasil Simulasi Faktor Keamanan (*Safety Of Factor*) Pada Rangka



Gambar 7. Tampilan Distribusi Faktor Keamanan (*Factor of Safety*)

Setelah mengetahui hasil dari tegangan (von mises) maka selanjutnya dapat menemukan hasil nilai *factor of safety*, jika nilai *FOS* kurang dari 1, maka kualitas produk tersebut dikatakan tidak aman untuk dibuat, maka perlu adanya perbaikan. Dan sebaliknya jika nilai minimum *FOS* lebih dari 1 maka produk tersebut dikatakan aman dan berkualitas baik.

Dilihat dari hasil simulasi pada *Safety Of Factor* diatas didapatkan pada material ASTM A36 diperoleh nilai *FOS* minimum sebesar 19,9 dan Nilai Maksimum sebesar 250.000. nilai minimum ini menunjukan bahwa titik dengan tegangan tertinggi pun masih memiliki tingkat keamanan hampir 20 kali lebih besar dari tegangan luluh material, yang menandakan bahwa struktur berada dalam zona aman secara signifikan. Nilai *safety factor* yang berada diatas 2 menjadi indikasi bahwa rangka telah memenuhi kriteria keamanan terhadap beban kerja. Visualisasi simulasi menunjukan bahwa area berwarna biru menandakan kondisi aman, sedangkan area berwarna merah mengindikasikan potensi kegagalan apabila tegangan melebihi batas izin material.[9]

3.3 Validasi Hasil Simulasi Fem Dan Perhitungan Teoritis

Simulasi FEA dan perhitungan teoritis dilakukan secara bersamaan untuk mengevaluasi tingkat akurasi rancangan serta memastikan keandalan struktur *frame* yang telah dibuat. Langkah ini penting untuk mengetahui sejauh mana hasil simulasi numerik mampu mepresentasikan kondisi aktual dari perhitungan manual berbasis mekanika teknik. Dengan membandingkan kedua pendekatan tersebut, peneliti dapat menilai konsistensi data, validasi model, serta mengidentifikasi potensi penyimpangan (galat) yang mungkin terjadi akibat penyerdahanaan asumsi pola model teoritis. Hasil perbandingan nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan antara perhitungan manual dan simulasi FEA disajikan dalam tabel berikut sebagai untuk proses validasi model secara menyeluruh.

Tabel 3. Analisa Perhitungan Teoritis Dan Simulasi

No.	Parameter analisis	Hasil simulasi	Hasil perhitungan manual	Selisih (galat)
1	<i>Stress</i>	15,8 MPa	22,05 MPa	28,32%
2	<i>Displacement</i>	0,972 mm	0,732 mm	32,79%
3	<i>Safety Factor</i>	19,9	11,3	76,11%

Perbedaan hasil antara perhitungan manual dan simulasi disebabkan oleh perbedaan asumsi batasan dalam model analisis. Pada perhitungan manual, perhitungan gaya dan tegangan dilakukan menggunakan pendekatan statis sederhana dengan asumsi beban merata dan kondisi tumpuan ideal, sedangkan pada simulasi menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan pembagian mesh dan kondisi batas yang lebih realistis. Nilai selisih hingga 76,18% pada parameter *safety factor* masih dapat diterima karena hasil simulasi cenderung memberikan nilai faktor keamanan yang lebih tinggi akibat distribusi beban yang lebih merata pada model. Secara umum, perbedaan di bawah 100% untuk analisis statis sederhana masih dianggap wajar dalam studi

perbandingan antara metode manual dan numerik, selama kedua hasil menunjukkan struktur berada pada kondisi aman (*safety factor* > 1,5).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, desain *frame wind tunnel* dengan menggunakan material besi siku 40 mm x 40 mm menghasilkan struktur yang kokoh dan stabil. Simulasi menggunakan *software finite elements methods* (FEM) menunjukkan bahwa :

1. Rangka (*frame*) *wind tunnel* berbahan besi siku 40 mm x 40 mm berhasil dirancang dan dianalisis menggunakan pendekatan perhitungan manual serta simulasi metode elemen hingga (FEM).
2. Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimum sebesar 15,8 MPa, jauh di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa, menandakan struktur bekerja pada zona aman.
3. Nilai perpindahan maksimum sebesar 0,972 mm menunjukkan deformasi yang sangat kecil dan tidak memengaruhi kestabilan struktur.
4. Nilai *safety factor* minimum sebesar 19,9 menunjukkan tingkat keamanan yang sangat tinggi, melampaui batas standar desain (*FoS* > 1,5).
5. Selisih galat antara hasil perhitungan manual dan simulasi sebesar 76,11% masih dapat diterima karena perbedaan asumsi dan kondisi batas dalam kedua metode analisis.

Secara keseluruhan, desain rangka *wind tunnel* berbasis besi siku 40 mm x 40 mm dinyatakan stabil, aman, dan layak digunakan sebagai media pengujian aliran udara skala laboratorium, serta dapat menjadi acuan dalam pengembangan desain *wind tunnel* pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Kusuma Wardhana, C. Gede Indra Partha, and I. Wayan Sukerayasa, "Pemanfaatan udara buang exhaust fan untuk pembangkit listrik tenaga bayu dengan pengaruh penambahan honeycomb berbasis atmega 2560," *Maret*, vol. 8, no. 1, p. 161, 2021.
- [2] R. Aji Saputra, C. Gede Indra Partha, and I. Wayan Sukerayasa, "Rancang bangun sistem pemanen energi angin exhaust fan turbin angin sumbu horizontal dengan pengarah angin (wind tunnel)," *Jurnal spektrum*, vol. 8, no. 2, Jul. 2021.
- [3] R. Hermawan, A. Aziz, and P. David Rey, "Investigasi parameter kinerja alat uji open circuit wind tunnel tipe subsonic Investigation of The Performance Parameters Of Subsonic Type Open Circuit Wind Tunnel Test Equipment," *Jurnal baut dan manufaktur*, vol. 2, Oct. 2020.
- [4] Y. Kusuma Wardhana, C. Gede Indra Partha, and I. Wayan Sukerayasa, "Pemanfaatan udara buang exhaust fan untuk pembangkit listrik tenaga bayu dengan pengaruh

- penambahan honeycomb berbasis atmega 2560," *Jurnal spektrum*, vol. 8, no. 1, p. 161, Mar. 2021.
- [5] K. Yanel and A. Yanto, "Design and Manufacturing of Wind Tunnel for Turbine Impeller Airfoil Testing," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 124–130, Oct. 2022, doi: 10.21063/jtm.2022.v12.i2.124-130.
- [6] fardana fendi and Rhohman Fatkur, "Analisa simulasi kekuatan rangka pada mesin brush sander menggunakan aplikasi solidwork," *Jurnal rekayasa mesin*, Mar. 2024.
- [7] Abdul Muchlis and Achmad Risa Harfit, "Kekuatan Statik Rangka Mesin Alat Penyortir Barang Menggunakan Software Solidworks," *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, vol. 2, no. 4, pp. 221–231, Jul. 2024, doi: 10.61132/venus.v2i4.413.
- [8] M. Dikwan, S. Jokosisworo, and A. F. Zakki, "Pengaruh Normalizing Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, dan Mikrografi Pada Sambungan Las Baja A36 Akibat Pengelasan Shielded-Metal Arc Welding (SMAW) dengan Variasi 2 waktu Pemanasan," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [9] A. Kekuatan, R. Mesin, P. Kacang, L. T. Kusuma, and H. Mahmudi, "Prosiding SEMNAS INOTEK (Seminar Nasional Inovasi Teknologi) 384," Online, 2023.