

Contents list available at [Sinta](#)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage:

<https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Analisis Kekuatan Struktur Rangka Greenhouse Tipe Single Span Menggunakan Metode Finite Element Analysis****Mas Wisnu Aninditya^{1*}, Muhammad Salman Fadhil², Kemal Mahfud³**^{1,3}Prodi Teknologi Mekanisasi Pertanian, Politeknik Enjiniring Pertanian Indonesia, Jalan Sinarmas Boulevard, Pagedangan, Tangerang, Banten, Indonesia²Divisi *Technical Development*, PT Daya Santosa Rekayasa, Jl. Brak No.7, Karang, Bonowarih, Karang Ploso, Kab. Malang, Jawa Timur, Indonesia**ARTICLE INFO**

Keywords:
Greenhouse
Kerangka
Solidworks
Stress Analysis

ABSTRACT

Ensuring the structural integrity of greenhouse facilities is critical for agricultural safety. This study evaluates the mechanical performance of a single-span galvanized iron greenhouse frame, specifically comparing a design integrated with "W-type" support against a conventional frame without additional support. Finite Element Analysis (FEA) using SolidWorks was conducted under a static vertical load of 600 N. Simulation results demonstrated that the W-support design exhibited superior rigidity, recording a maximum Von Mises stress of $1.533 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, displacement of 1.105 mm, and a Factor of Safety (FoS) of 13.31. Conversely, the conventional frame yielded a maximum stress of $5.517 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, displacement of 5.554 mm, and an FoS of 3.697. Crucially, stress values for both configurations remained significantly below the material's yield strength of $2.039 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. Consequently, while the W-support design offers enhanced stability, both configurations are deemed structurally safe for agricultural implementation.

*Corresponding author: maswisnua@gmail.com

DOI: <https://10.24127/armatur.v7i1.11013>

Received 21 January 2026; Received in revised form 07 Februari 2026; Accepted 10 Maret 2026

Available online 31 Maret 2026

PENDAHULUAN

Greenhouse atau rumah kaca merupakan infrastruktur vital yang dirancang untuk melindungi tanaman dari kondisi cuaca ekstrem guna mendukung budidaya pertanian yang berkelanjutan. Di Indonesia, adopsi teknologi *greenhouse* semakin masif, bertransformasi dari penggunaan eksklusif industri komersial pada akhir abad ke-20 menjadi solusi yang diakses oleh petani skala menengah hingga kecil pada abad ke-21. Menurut Castilla [1], *greenhouse* didefinisikan sebagai struktur bangunan dengan penutup transparan yang bertujuan memanipulasi lingkungan mikro agar sesuai dengan persyaratan biologis tanaman. Definisi ini sejalan dengan SNI No. 7604 tahun 2010, yang menstandarisasi *greenhouse* sebagai bangunan untuk optimalisasi lingkungan tumbuh.

Secara historis, *greenhouse* dikembangkan di wilayah subtropis untuk merekayasa suhu guna memperpanjang masa tanam di musim dingin. Namun, adaptasi di wilayah tropis seperti Indonesia menghadapi tantangan berbeda, terutama terkait kelembaban dan sirkulasi udara. Berdasarkan klasifikasi struktur yang dijelaskan oleh Von Zabeltitz [2], desain *greenhouse* sangat bervariasi mulai dari tipe tunnel, piggyback, hingga multispans, di mana pemilihan bentuk geometri atap sangat menentukan ketahanan aerodinamis dan efisiensi ventilasi. Konstruksi ini terdiri dari elemen struktural terintegrasi meliputi rangka utama, penutup atap, dinding, serta sistem pendukung seperti ventilasi dan irigasi [3], [4].

Kelayakan sebuah *greenhouse* tidak hanya ditentukan oleh performa fungsionalnya dalam mengontrol iklim mikro, tetapi juga oleh integritas strukturalnya. Studi oleh Briassoulis dkk. [5] menegaskan bahwa kegagalan struktur *greenhouse* sering kali disebabkan oleh standar desain yang tidak memadai dalam menahan beban angin dan hujan, terutama di wilayah dengan cuaca dinamis. Hal ini dikonfirmasi oleh berbagai insiden

kegagalan struktur di lapangan. Sebagai contoh, Pratama & Santoso [6] mencatat fenomena kerusakan infrastruktur pertanian akibat beban angin ekstrem di Jawa Timur, yang relevan dengan kasus robohnya *greenhouse* di Sragen (2019) dan Sidoarjo (2022). Observasi lapangan yang kami lakukan di PT. Daya Santosa Rekayasa pada rangka single span juga menunjukkan adanya defleksi visual saat pembebanan, mengindikasikan perlunya evaluasi kekakuan yang lebih serius.

Meskipun penggunaan *greenhouse* semakin meluas, literatur yang ada saat ini sebagian besar berfokus pada analisis fungsional (pengendalian suhu dan kelembaban) [7], [8]. Masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan terkait analisis kekuatan mekanis rangka berbiaya rendah (seperti besi galvanis) yang dimodifikasi dengan penguat tambahan untuk kondisi Indonesia. Kebanyakan studi struktural terpaku pada *greenhouse* skala industri besar, sementara analisis mendalam mengenai efektivitas penambahan penyangga tipe "W" (*W-support*) pada rangka single span sederhana belum banyak dieksplorasi secara kuantitatif.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan integritas struktural antara desain rangka konvensional dan desain yang dimodifikasi dengan penyangga tipe "W". Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada simulasi pembebanan statis menggunakan Finite Element Analysis (FEA) untuk menentukan batas keamanan (*Factor of Safety*) yang presisi. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi desain standar yang aman dan efisien bagi praktisi pertanian di Indonesia, sehingga risiko kegagalan struktur akibat beban fisik dapat diminimalisir.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan sebagai tahap perancangan awal (*preliminary design*) dengan menerapkan simulasi pembebanan statis (*Static Stress Analysis*)

menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) diterapkan dalam penelitian ini karena kemampuannya menyelesaikan masalah struktural kompleks dengan mendiskritisasi geometri menjadi elemen-elemen kecil untuk menghitung distribusi tegangan dan deformasi secara numerik [16]. Fokus utama pengujian adalah melakukan analisis komparatif terhadap kekuatan struktur pada dua variasi desain rangka *greenhouse* tipe *Single Span*, yaitu model rangka yang dilengkapi dengan penyangga tambahan (*W-support*) dan model rangka tanpa penyangga tambahan.

Dalam pelaksanaannya, simulasi ini menetapkan kondisi batas (*boundary conditions*) untuk merepresentasikan skenario pembebanan. Variabel beban luar (*external load*) diklasifikasikan sebagai beban hidup atap (*roof live load*) yang bersifat sementara sesuai standar pembebanan struktur [11]. Besar beban ditentukan sebesar 600 N. Nilai ini didasarkan pada pendekatan data antropometri rata-rata berat badan pria dewasa di Indonesia (persentil 50) yang berkisar ± 60 kg [17], guna merepresentasikan beban satu orang pekerja saat melakukan aktivitas perawatan atau instalasi. Beban tersebut didistribusikan secara vertikal ke bawah pada 12 titik simpul di bagian atas rangka.

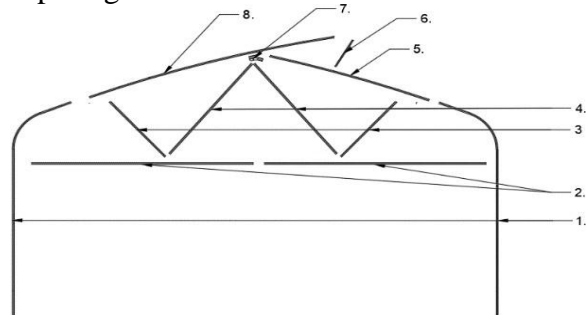
Variabel tumpuan (*fixture*) menggunakan tipe *Fixed Geometry* (jepit mati) pada kaki-kaki rangka untuk memastikan tidak ada pergeseran pada dasar struktur. Proses diskritisasi model (*meshing*) dilakukan menggunakan pengaturan standard mesh (*default*) yang disediakan oleh perangkat lunak untuk mendapatkan pendekatan geometri yang efisien pada tahap desain awal ini. Material struktur didefinisikan menggunakan variabel material Besi Galvanis (*Galvanized Iron*) yang spesifikasinya mengacu pada standar pustaka *SolidWorks*, dengan karakteristik mekanik meliputi *Yield Strength* sebesar 2.039×10^8 N/m², *Tensile Strength* $3.569 \times$

10^8 N/m², serta *Modulus Elastisitas* 2×10^{11} N/m².

Perlu dicatat bahwa penelitian ini memiliki batasan-batasan tertentu (*limitations of study*). Analisis dilakukan tanpa melalui studi independensi mesh (*mesh independency study*), sehingga hasil yang diperoleh bergantung pada kerapatan mesh standar. Selain itu, simulasi ini disederhanakan pada kondisi statis murni akibat beban pekerja dan belum memperhitungkan superposisi beban lingkungan dinamis yang riil di lapangan, seperti beban angin, curah hujan, maupun beban mati (*dead load*) dari berat plastik UV. Meskipun demikian, simulasi ini menghasilkan parameter luaran (*output*) berupa nilai *Von Mises Stress*, *Displacement*, dan *Factor of Safety* (FoS) yang memadai sebagai indikator awal keamanan desain.

a. *Greenhouse Tipe Single Span*

Greenhouse merupakan sebuah bangunan yang dirancang untuk dapat mengontrol dan memanipulasi kondisi lingkungan agar tercipta kondisi lingkungan yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Rangka *greenhouse* terdiri dari beberapa bagian seperti gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1 Bagian-bagian *greenhouse*

Keterangan

1. Rangka Arch 1
2. Beam W Support
3. Rangka W Support 2
4. Rangka W Support 1
5. Rangka Arch 3
6. Pipa Diagonal Ventilasi
7. Sambungan Arch
8. Rangka Arch 2

Bagian-bagian rangka tersebut kemudian dirakit dan dikencangkan menggunakan mur, baut, sekrup *self*

drilling, dan *clam*. Mur dan baut digunakan untuk mengencangkan *clam* yang menjepit rangka satu sama lain yang bersilangan, sedangkan sekrup *self drilling* digunakan untuk mengunci sambungan antar rangka arch agar tidak mudah terlepas.



Gambar 2 *Greenhouse single span*

Greenhouse single span memiliki beberapa ciri khas mulai dari struktur, bahan konstruksi, dan skala. Berikut penjelasannya :

1. Struktur

Greenhouse tipe *single span* memiliki struktur atap yang terdiri dari satu bentang (*span*) yang membentang dari satu sisi ke sisi lainnya. *Greenhouse* tipe *single span* dilengkapi dengan 3 ventilasi yaitu 1 ventilasi atap dan 2 ventilasi samping, selain itu untuk membantu sirkulasi udara di dalam *greenhouse*, pada tipe *single span* dilengkapi juga dengan *exhaust fan* dan *circulation fan*

2. Bahan konstruksi

Rangka *Greenhouse single span* umumnya dibangun dengan menggunakan besi galvanis ataupun alumunium, penggunaan besi galvanis ini karena besi tersebut lebih tahan terhadap korosi dan cuaca ekstrim. Pada bagian ventilasi bahan yang digunakan yaitu insect net dengan mesh 40. Lalu pada bagian atap menggunakan plastik UV atau plastik dengan bahan *polyethylene*

3. Skala

Skala ukuran pada *greenhouse single span* sangat fleksibel karna dapat menyesuaikan panjang dari lahan yang dimiliki, akan tetapi masih terdapat syarat yang harus dipenuhi dalam pembangunan *greenhouse*,

salah satunya lahan harus rata dengan kemiringan lahan maksimal 2%.

b. *Solidworks*

Solidworks digunakan untuk membuat gambar teknik, simulasi, dan analisis [10]. Simulasi uji beban dilakukan dengan menggunakan *stress analysis*, pengujian dengan *stress analysis* bertujuan untuk mendapatkan hasil dari pembebanan statik yaitu berupa *stress* (tegangan), *Factor of safety* (faktor keselamatan), dan *Displacement* (perpindahan), hal tersebut dilakukan untuk mengetahui keberhasilan dari perancangan gambar yang telah dibuat. Pada proses simulasi dilakukan secara bertahap sebagai berikut :

1. Pendefinisian material yang digunakan
2. Pemilihan titik tumpu pada rangka *greenhouse* dengan menggunakan jenis tumpuan *fixed geometry*,
3. Pemberian titik beban dan arah pembebanan pada rangka *greenhouse* dengan nilai gaya yang sama,
4. Proses meshing dengan parameter standard mesh setelah itu dapat memunculkan hasil analisis berupa nilai tegangan, perpindahan, dan faktor keamanan dari uji yang dilakukan

c. *Material*

Pada tahap penentuan material yang akan digunakan pada pengujian ini yaitu dengan menggunakan material jenis besi Galvanis. Besi galvanis ini merupakan besi yang telah dilapisi dengan lapisan seng sehingga besi tersebut lebih tahan terhadap korosi atau karat. Besi galvanis memiliki beberapa keunggulan yaitu daya tahan yang tinggi terhadap lingkungan ekstrem, kekuatan mekanik yang tinggi, kemampuan pemodelan yang baik, dan pengelasan yang mudah [1].

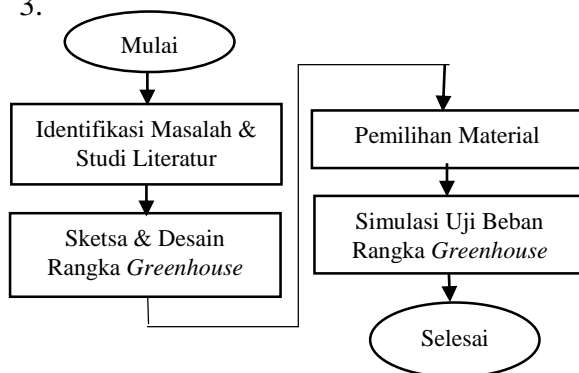
Tabel 1 Data Teknik Besi Galvanis

Keterangan	Nilai	Satuan
<i>Yield strength</i>	203943242,6	N/m ²
<i>Elastic modulus</i>	2e + 11	N/m ²
<i>Poisson's ratio</i>	0,29	N/A
<i>Mass density</i>	7870	Kg/m ³
<i>Tensil Strength</i>	356900674,5	N/m ²

Sumber : *Library Material SolidWorks*

d. Flow Chart

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan pelaksanaan berikut diagram alir terkait pelaksanaan penelitian pada gambar 3.



Gambar 3. *Flowchart*

1. Identifikasi Masalah dan Studi Literatur

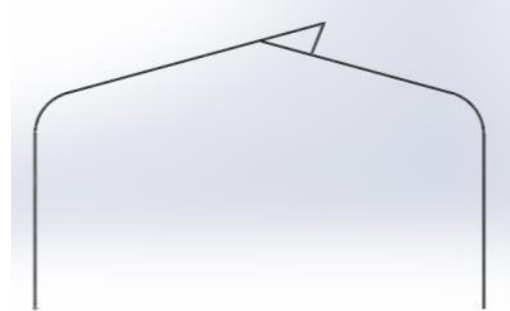
Identifikasi masalah pada rangka *greenhouse* ini untuk menentukan target yang ingin dicapai melalui analisis struktural ini (misalnya, keamanan, kestabilan) dan juga menentukan beban yang akan dialami struktur.

Studi literatur yaitu menyiapkan materi yang akan digunakan dalam proses penelitian ini. Materi – materi yang dikumpulkan diperoleh dari jurnal–jurnal atau buku yang membahas tentang analisis beban maupun tentang konsep pembebanan pada rangka.

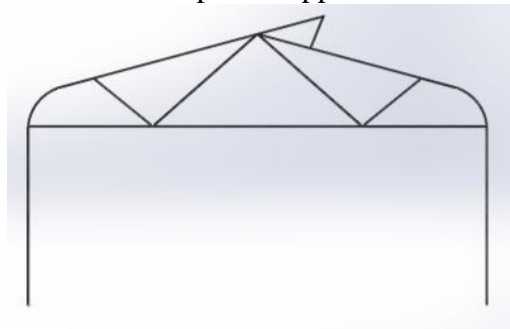
2. Sketsa & Desain Rangka *Greenhouse*

Pada tahap ini sketsa dan desain rangka *greenhouse* dibuat menggunakan aplikasi *SolidWorks*, sketsa merupakan gambaran awal yang digunakan sebagai acuan dalam pembuatan desain rangka secara keseluruhan, dalam pembuatan sketsa harus menggambarkan bagaimana bentuk dan ukuran dari benda yang akan dibuat. Ukuran penampang yang digunakan pada desain

rangka *greenhouse* adalah pipa besi galvanis dengan ukuran 32 mm dan tebal sebesar 1,5 mm seperti gambar 4 & 5. Pipa besi dengan ukuran tersebut digunakan pada setiap bagian rangka *greenhouse* akan tetapi dengan ukuran panjang yang berbeda-beda, seperti rangka arch, rangka W support, dan pipa diagonal ventilasi. Berikut sketsa dan desain dari rangka *greenhouse* yang sudah dibuat menggunakan aplikasi *SolidWorks*.



Gambar 4 Desain 3D rangka *greenhouse* tanpa W support



Gambar 5 Desain 3D rangka *greenhouse* dengan W support

3. Pemilihan Material

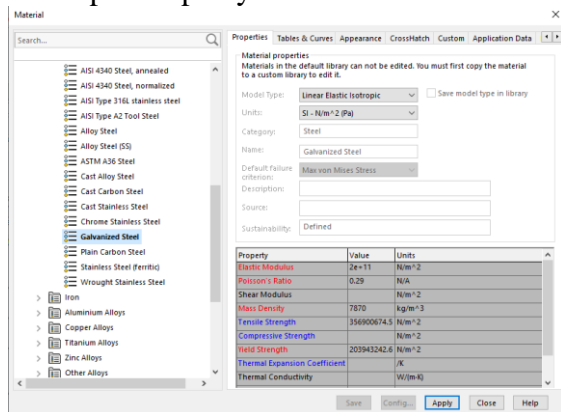
Material yang digunakan disesuaikan dengan yang digunakan pada industri di PT Daya Sentosa Rekayasa yang berada di Kabupaten Malang.

4. Simulasi Uji Beban pada Rangka *Greenhouse*

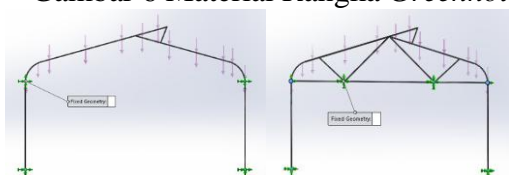
Simulasi uji beban dilakukan dengan menggunakan fitur stress analisis pada aplikasi *SolidWorks*. Stress analisis dilakukan untuk mengetahui kekuatan dari komponen atau struktur dari gambar yang telah dibuat dengan memberikan beban yang telah di perhitungkan sebelumnya. Stress analisis dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar pergeseran benda yang telah

dibuat akibat pembebanan. *Stress Analysis* adalah sebuah analisa perhitungan pada komponen atau assembling dari permesinan untuk memastikan nilai dari semua tegangan (stress) akibat beban tidak melebihi dari limitasi yang diatur oleh aturan atau standar tertentu. Adapun input yang dibutuhkan dalam menjalankan simulasi ialah beban, titik acuan reaksi tegangan, dan jenis material [11].

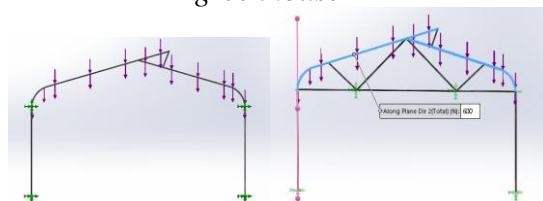
Selain itu *stress analysis* juga dapat membantu mengidentifikasi area dengan tegangan atau defleksi yang tinggi bisa juga di sebut titik lemah dari desain yang telah dibuat dan juga dapat memberikan faktor kemanan dari desain rangka yang telah dibuat. Simulasi uji beban terbagi menjadi beberapa tahapan yaitu :



Gambar 6 Material Rangka *Greenhouse*



Gambar 7 Titik tumpuan rangka *greenhouse*



Gambar 8 Titik dan arah pembebanan rangka *greenhouse*

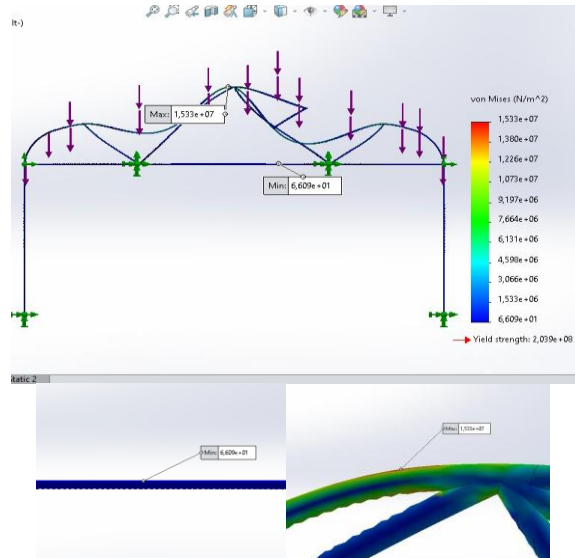
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan 2 jenis rangka *greenhouse* dengan *W support* dan tanpa *W support*.

A. Hasil Simulasi Uji Beban Dengan *W Support*

Pengujian beban pada rangka *greenhouse* dengan *w support* dilakukan dengan menggunakan *stress analysis* pada aplikasi *SolidWorks* sehingga mendapatkan beberapa hasil yaitu : *stress*, *displacement*, *strain*, dan *factor of safety*, berikut penjelasannya.

1. *Stress analysis*

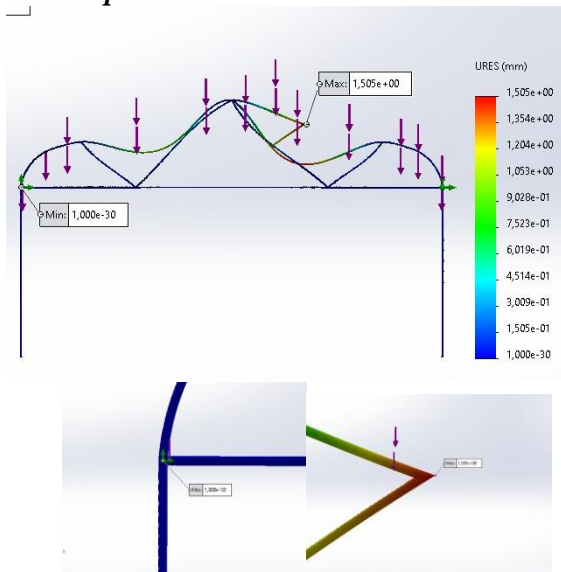


Gambar 9 *Stress analysis* rangka dengan *W support*

Pada gambar 9 merupakan gambar rangka yang telah dilakukan *stress analysis*. Nilai pada *stress* atau *von mises stress* merupakan nilai atau parameter yang digunakan untuk menentukan apakah bahan tersebut akan mengalami defleksi atau patah. Parameter *von mises stress* biasanya digunakan pada material yang sering mengalami deformasi akibat pembebanan seperti logam. Nilai dari *von mises stress* digunakan untuk menyatakan apakah objek yang dibuat memiliki nilai tegangan sama atau lebih besar dari *yield strength* material tersebut, apabila nilai tersebut melebihi maka objek akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk. [6]. *Yield strength* atau batas luluh merupakan titik ketika sebuah material mulai mengalami deformasi baik plastis atau permanen ketika diberi beban [2] yang terjadi pada rangka dengan *W support* berkisar antara $6,609 \times 10$ sampai dengan $1,533 \times 10^7$ dengan satuan yaitu N/m^2 .

Sedangkan nilai yield strength pada rangka tersebut adalah $2,039 \times 10^8$ dengan satuan N/m^2 . Nilai stress minimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 9 (b) dan nilai stress maksimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 9 (c). Dapat dilihat apabila nilai maksimum yang diperoleh sebesar $1,533 \times 10^7$ nilai tersebut masih di bawah dari nilai yield dari rangka tersebut maka dapat dikatakan stress yang terjadi pada rangka dengan w support masih aman.

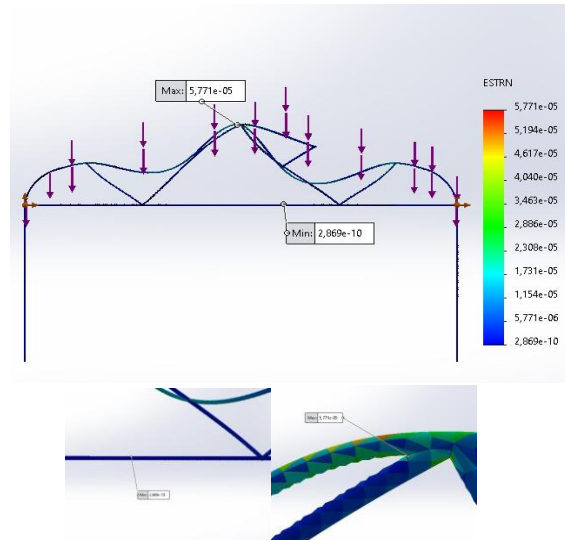
2. Displacement



Gambar 10 *Displacement* pada rangka dengan W support

Pada gambar 10 merupakan rangka yang telah dilakukan analisis dan nilai displacement atau perpindahan yang diperoleh yaitu berkisar dari $1,000 \times 10^{-30}$ sampai dengan 1,105 dengan satuan mm. Nilai displacement minimum yang diperoleh terdapat pada gambar 10 (a) dan nilai displacement maksimum yang diperoleh terdapat pada gambar 10 (b). *Defleksi* yang terjadi pada rangka merupakan gambaran apabila ketika rangka tersebut diberi beban maksimal melebihi yield nya maka akan terjadi deformasi dimana rangka akan mengalami perubahan bentuk akibat pembebanan yang berlebih.

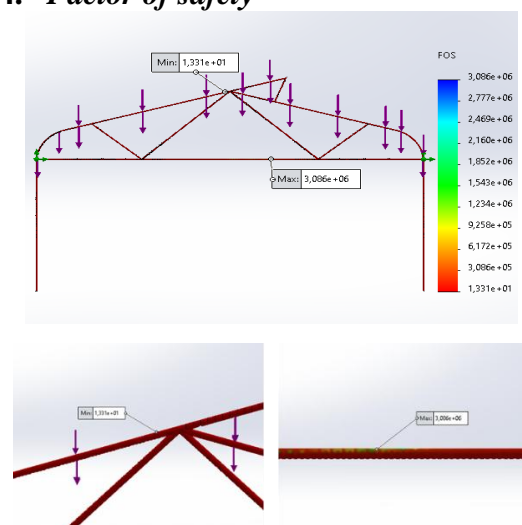
3. Strain



Gambar 11 *strain* pada rangka dengan W support

Pada gambar 11 merupakan rangka yang telah dilakukan analisis. Strain merupakan ukuran dari perubahan bentuk atau deformasi suatu material akibat pembebanan yang diterapkan dan nilai strain atau rengangan yang terjadi pada rangka tersebut berkisar antara $2,869 \times 10^{-10}$ sampai dengan $5,771 \times 10^{-5}$. Nilai strain minimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 11 (a) dan nilai strain maksimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 11 (b).

4. Factor of safety



Gambar 12 *Factor of safety* pada dangka dengan W Support

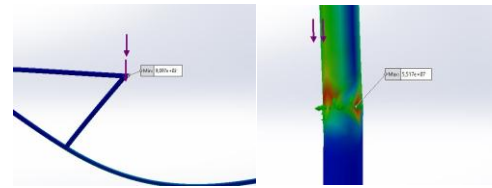
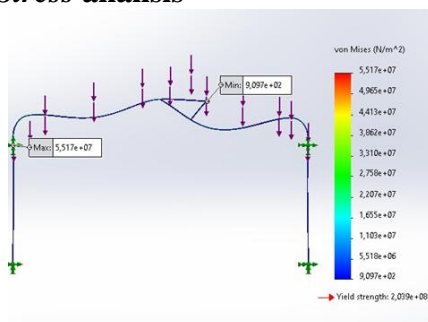
Pada gambar 12 merupakan rangka yang telah dilakukan analisis factor of safety. Factor of safety merupakan rasio nilai perbandingan antara kekuatan material (*yield*) dengan tegangan maksimal yang terjadi (*stress*). *Factor of safety* adalah rasio antara perbandingan antara kekuatan material (*yield strength*) dengan tegangan maksimal yang terjadi (*von mises stress*). Menurut [15] *Factor of safety* merupakan faktor yang digunakan untuk mengevaluasi suatu desain agar perancangan dalam elemen mesin lebih terjamin keamanannya. Menurut [9] berikut ini merupakan nilai Faktor Keamanan/*Safety*

Nilai *factor of safety* yang diperoleh yaitu sebesar $1,331 \times 10$ sampai dengan $3,069 \times 10^6$. Nilai minimal *factor of safety* yang diperoleh terdapat pada gambar 12 (a) dan nilai maksimal yang diperoleh terdapat pada gambar 12 (b). Warna merah pada analisis *factor of safety* tersebut menandakan bahwa nilai rata-rata *factor of safety* yang diperoleh yaitu $1,331 \times 10$ sampai dengan $6,172 \times 10^5$.

B. Hasil Simulasi Uji Beban Tanpa W Support

Pengujian beban pada rangka *greenhouse* tanpa *W support* dilakukan dengan menggunakan stress analisis pada aplikasi *SolidWorks* sehingga mendapatkan beberapa hasil yaitu : *stress*, *displacement*, *strain*, dan *factor of safety*, berikut penjelasannya.

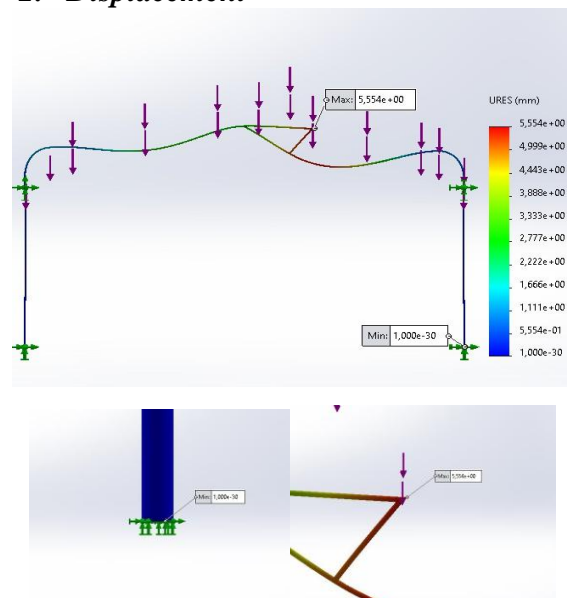
1. Stress analisis



Gambar 13 *Stress* analisis pada rangka tanpa *W support*

Pada gambar 13 merupakan gambar rangka yang telah dilakukan stress analisis. Nilai pada stress atau von mises stress yang terjadi pada rangka tanpa *W support* berkisar antara $9,097 \times 10^2$ sampai dengan $5,517 \times 10^7$ dengan satuan yaitu N/m^2 . Sedangkan nilai *yield strength* pada rangka tersebut adalah $2,039 \times 10^8$ dengan satuan N/m^2 . Nilai stress minimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 13 (a) dan nilai stress maksimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 13 (b). Dapat dilihat apabila nilai maksimum yang diperoleh sebesar $5,517 \times 10^7$ nilai tersebut masih di bawah dari nilai *yield* dari rangka tersebut maka dapat dikatakan stress yang terjadi pada rangka tanpa *w support* masih aman.

2. Displacement

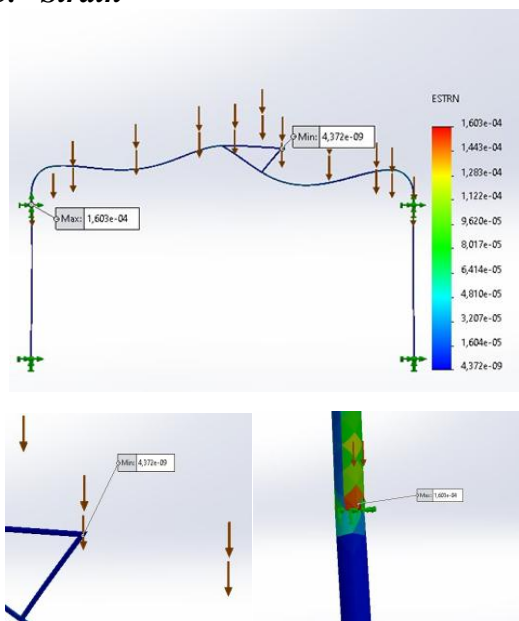


Gambar 14 *Displacement* pada rangka tanpa *W support*

Pada gambar 14 merupakan rangka yang telah dilakukan analisis dan nilai

displacement atau perpindahan yang diperoleh yaitu berkisar dari $1,000 \times 10^{-30}$ sampai dengan 5,554 dengan satuan mm. Nilai displacement minimum yang diperoleh terdapat pada gambar 14 (a) dan nilai displacement maksimum yang diperoleh terdapat pada gambar 14 (b). Defleksi yang terjadi pada rangka merupakan gambaran apabila ketika rangka tersebut diberi beban maksimal melebihi *yield* nya maka akan terjadi deformasi dimana rangka akan mengalami perubahan bentuk akibat pembebanan yang berlebih.

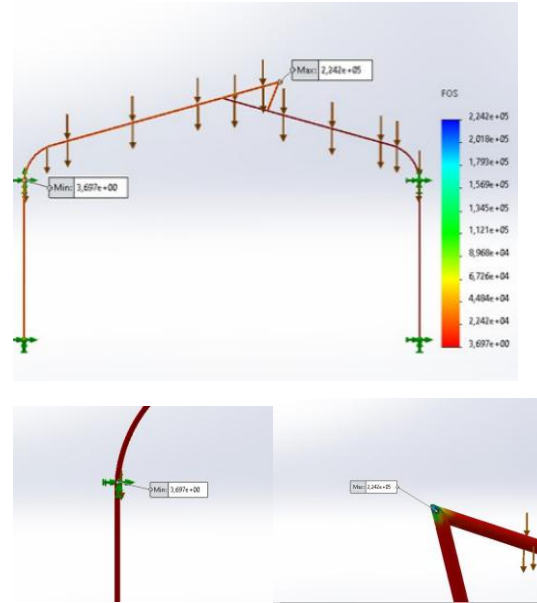
3. Strain



Gambar 15 Strain pada rangka tanpa W support

Pada gambar 15 merupakan rangka yang telah dilakukan analisis. Strain merupakan ukuran dari perubahan bentuk atau deformasi suatu material akibat pembebanan yang diterapkan dan nilai strain atau rengangan yang terjadi pada rangka tersebut berkisar antara $4,372 \times 10^{-9}$ sampai dengan $1,603 \times 10^{-4}$. Nilai strain minimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 15 (a) dan nilai strain maksimum yang terjadi pada rangka terdapat pada gambar 15 (b).

4. Factor of safety



Gambar 16 Factor of safety rangka tanpa W support

Pada gambar 16 merupakan rangka yang telah dilakukan analisis factor of safety. Factor of safety merupakan rasio nilai perbandingan antara kekuatan material (*yield*) dengan tegangan maksimal yang terjadi (*stress*). Nilai factor of safety yang diperoleh yaitu sebesar 3,697 sampai dengan $2,242 \times 10^5$. Nilai minimal factor of safety yang diperoleh terdapat pada gambar 16 (a) dan nilai maksimal yang diperoleh terdapat pada gambar 16 (b). Warna merah pada analisis factor of safety tersebut menandakan bahwa nilai rata-rata factor of safety yang diperoleh yaitu 3,697 sampai dengan $4,484 \times 10^4$.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan simulasi pembebanan statis yang telah dilakukan pada struktur rangka *greenhouse* dengan material besi galvanis (*Galvanized Iron*), dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Validasi Keamanan Desain (*Safety Validation*) Kedua variasi desain rangka dinyatakan aman dan layak untuk menahan beban kerja sebesar 600 N. Hal ini dibuktikan dengan nilai tegangan maksimum (*Von Mises Stress*) yang

terjadi, yaitu sebesar $1,533 \times 10^7$ N/m² pada rangka dengan *W support* dan $5,517 \times 10^7$ N/m² pada rangka tanpa *W support*. Nilai tegangan pada kedua desain tersebut masih berada jauh di bawah batas luluh (*Yield Strength*) material besi galvanis sebesar $2,039 \times 10^8$ N/m², sehingga tidak terjadi deformasi plastis permanen pada struktur.

2. Efektivitas Penguat Struktur (*Structural Performance*) Penambahan elemen penyangga tipe W (*W support*) terbukti secara signifikan meningkatkan *rigiditas* (kekakuan) struktur. Rangka dengan *W-support* menunjukkan performa mekanis yang lebih unggul dengan menghasilkan defleksi (*displacement*) yang sangat minim, yaitu 1,105 mm serta memiliki *Factor of Safety* (FoS) yang tinggi sebesar 13,31. Sebaliknya, rangka konvensional tanpa penyangga mengalami defleksi lebih besar yakni 5,554 mm dengan FoS sebesar 3,697. Meskipun desain konvensional masih dalam batas aman (FoS > 1), penggunaan *W support* direkomendasikan untuk stabilitas jangka panjang dan meminimalisir risiko kegagalan akibat beban dinamis di kemudian hari.

Referensi

- [1] Castilla, N. (2013). Greenhouse technology and management. CABI.
- [2] Wirosudarmo, R. (2011). Bangunan struktural pertanian. UB Press.
- [3] Husni Indra, S. M. (2021). Standar minimal greenhouse. IAARD Press.
- [4] Setiawan, H. F. (2002). Ilmu konstruksi perlengkapan dan utilitas bangunan. Kanisius.
- [5] Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Gratraud, J., & von Elsner, B. (1997). Mechanical properties of covering materials for greenhouses: Part 1, general overview. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(2), 81–96.
- [6] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- [7] Hibbeler, R. C. (2016). *Mechanics of materials* (10th ed.). Pearson Education.
- [8] Logan, D. L. (2016). *A first course in the finite element method* (6th ed.). Cengage Learning.
- [9] Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2005). *A textbook of machine design*. Eurasia Publishing House.
- [10] Vidosic, J. P. (2007). *Machine design projects*. Ronald Press Company.
- [11] Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain* (SNI 1727:2020). BSN.
- [12] Nico, M. O. (2019). Analisis tegangan, regangan, dan perpindahan pada trackframe excavator menggunakan Autodesk Inventor [Skripsi, Universitas Brawijaya].
- [13] Rizkiani, D. N., & Pertiwiningrum, A. S. (2020). Greenhouse sebagai wadah penelitian hortikultura pada balai penelitian dan pengembangan tanaman pangan di Pemalang. *Jurnal Arsitektur ARCADE*, 3(2), 461–470.
- [14] Sujadi, Y. N. H. (2019). Smart greenhouse monitoring system based on internet of things. *Jurnal J-Ensitem*, 6(1), 371.
- [15] Amalia, M. S., & Astuti, I. W. (2009). Pengembangan sistem informasi budidaya sayuran secara hidroponik dalam greenhouse dan sistem pakar pembuatan greenhouse beserta sistem hidroponik berbasis web [Skripsi, Institut Pertanian Bogor].
- [16] Moaveni, S. (2008). *Finite element analysis: Theory and application with ANSYS* (3rd ed.). Pearson Education.
- [17] Nurmianto, E. (2004). *Ergonomi: Konsep dasar dan aplikasinya* (2nd ed.). Guna Widya.