

Analisis Kekuatan Desain-Rangka Mesin *Palletizer Carton Box* dengan Metode Analitis dan Elemen Hingga

Deslana Avinda Krisna Putra^{1*}, Andre Sugijopranoto², Bondan Wiratmoko Budi Santoso³, Adhi Setya Utama⁴

¹⁻⁴Politeknik ATMI Surakarta, Jl. Adisucipto (Mojo) No. 01 Karangasem, Laweyan, Surakarta, Indonesia

E-mail: deslana.putra@atmi.ac.id¹, andre@atmi.ac.id²,
bondan.wiratmoko@atmi.ac.id³, setya.hutama@atmi.ac.id⁴

Abstrak. Analisis kekuatan pada proyek *Palletizer* yang dirancang oleh PT. Y telah dilakukan untuk memastikan konstruksi *frame Palletizer* dapat menahan beban operasional dan memenuhi faktor keamanan dinamis dengan menggunakan material ST 37. Metode Perhitungan Analitis dan Metode Elemen Hingga digunakan untuk menganalisis berbagai posisi pembebanan pada *frame Palletizer*, di mana tegangan maksimum ditemukan pada titik A2 dengan nilai 8,947 MPa yang lebih kecil dari tegangan ijin sebesar 123,33 MPa. Defleksi maksimum terbesar terjadi pada titik A1 dan A2 dengan nilai sebesar 0,231 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa *frame Palletizer* memenuhi semua kriteria dari segi faktor keamanan, stabilitas, dan defleksi. Berdasarkan analisis ini, dapat disimpulkan bahwa desain *frame Palletizer* memiliki kemampuan yang cukup untuk menahan beban operasional yang diberikan. Penggunaan material ST 37 terbukti sesuai untuk aplikasi ini karena memenuhi semua persyaratan kekuatan dan keamanan. Selanjutnya, dilakukan verifikasi tambahan untuk memastikan bahwa kriteria desain lainnya juga terpenuhi. Proyek ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan keselamatan dalam proses pemindahan barang.

Kata kunci: Analisis Kekuatan; CAE; FEA; Metode Analitis; *Palletizer*.

Abstract. The strength analysis of the *Palletizer* project designed by PT. Y has been conducted to ensure that the *Palletizer* frame construction can withstand operational loads and meet dynamic safety factors using ST 37 material. Analytical Calculation Methods and Finite Element Methods were employed to analyse various loading positions on the *Palletizer* frame, where maximum stress was found at point A2 with a value of 8.947 MPa, which is lower than the allowable stress of 123.33 MPa. The maximum deflection occurred at points A1 and A2 with a value of 0.231 mm. The analysis results indicate that the *Palletizer* frame meets all criteria in terms of safety factor, stability, and deflection. Based on this analysis, it can be concluded that the *Palletizer* frame design has adequate capability to withstand the operational loads applied. The use of ST 37 material is proven suitable for this application as it meets all strength and safety requirements. Additionally, further verification was conducted to ensure that other design criteria were also met. This project is expected to enhance efficiency and safety in the goods transfer process. Consequently, the reliability and durability of the *Palletizer* can be optimized. Moreover, potential risks of operational failure can be minimized. The implementation of this project is also expected to contribute positively to the company's productivity. Maintenance and management of the *Palletizer* equipment will also become more effective and efficient.

Keywords: Strength Analysis; CAE; FE; Analytical Method; *Palletizer*.

1. Pendahuluan

Kemunculan Revolusi Industri 4.0 menyebabkan digitalisasi dalam operasi logistik diadopsi oleh banyak perusahaan di berbagai negara. Penggunaan digitalisasi logistik, berakibat pada transparansi dari pemasok hingga pelanggan dapat diwujudkan. Pencapaian digitalisasi logistik, diperlukan teknologi yang tepat antara mitra rantai pasokan diperlukan [1]. Salah satu bentuk penerapan digitalisasi logistik adalah penggunaan robot untuk memindahkan barang secara otomatis, sehingga pekerjaan manusia dapat dipermudah [2], [3], [4], [5]. Beberapa keuntungan dari penggunaan robot meliputi penurunan biaya tenaga kerja, peningkatan fleksibilitas dan keserbagunaan, peningkatan presisi untuk produktivitas yang lebih tinggi, kondisi kerja manusia yang dapat diperbaiki, serta penggantian pekerjaan manusia di lingkungan yang berbahaya dan tidak praktis [6].

Pengembangan mesin otomatis untuk sektor industri dianggap sebagai alat utama untuk mendapatkan efisiensi, produktivitas, dan daya saing dengan meningkatkan biaya logistik di pasar global [7]. *Palletizing* dikenal sebagai proses yang banyak digunakan dan umumnya dilakukan di akhir dari lini produksi. Berbagai jenis *palletizer* digunakan, beberapa jenis utamanya adalah gantry, *cartesian*, dan *spherical*. Robot *gantry* disebut sebagai bentuk khusus dari robot *cartesian*, yang menggunakan dua sumbu X. Sumbu tambahan digunakan untuk memungkinkan robot menangani beban dan gaya yang lebih besar dengan membagi beban di antara dua sumbu tanah, sehingga robot ini dianggap ideal untuk mengambil dan meletakkan muatan berat atau memuat dan membongkar komponen [8], [9]. Robot *palletizer carton box* digunakan untuk menyusun boks pada posisi yang ditentukan sesuai dengan pola tertentu, sehingga penyimpanan, penanganan, bongkar muat, transportasi, dan kegiatan logistik lainnya dari *carton box* dapat terwujud [10], [11].

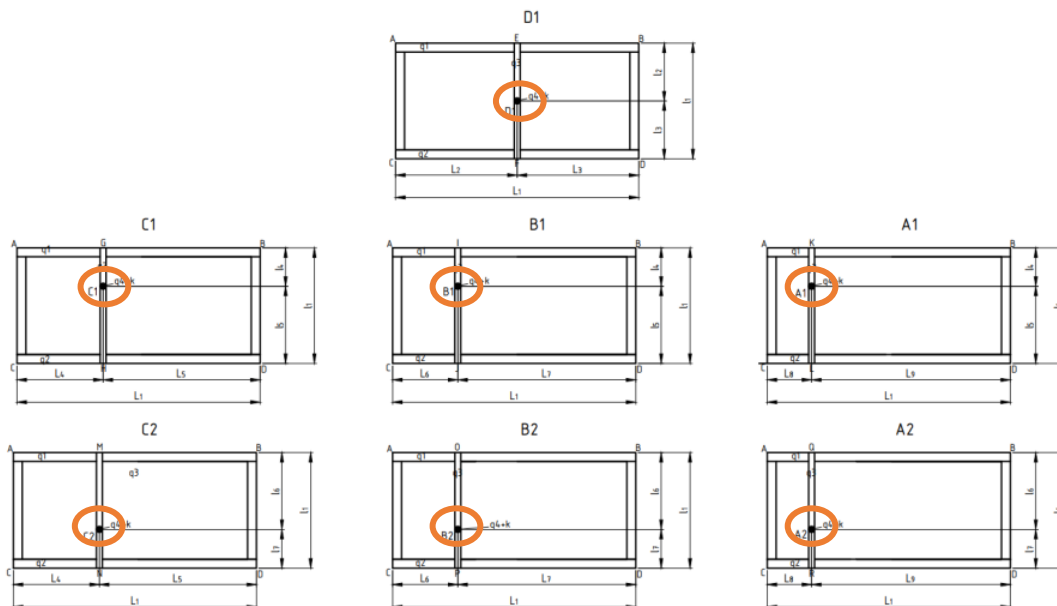
Kemajuan teknologi di bidang pengembangan material memungkinkan periset untuk memilih material tergantung pada mekanika strukturnya. Hal ini tidak hanya mengacu pada perangkat yang dioperasikan langsung di industri, tetapi juga mesin dan perangkat pengangkat dan penanganan. Salah satu mesin pengangkat dan penanganan adalah *Palletizer* [12]. Proses analisis desain mesin *Palletizer* terdiri dari dua langkah, yang pertama melakukan analisis struktur yang menghasilkan aksi internal seperti momen lentur dan gaya aksial, lalu diikuti dengan pemeriksaan keamanan desain untuk memverifikasi bahwa setiap sambungan memiliki kekuatan yang memadai [13]. Salah satu analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak rekayasa berbasis komputer (CAE) dan alat simulasi, seperti analisis elemen hingga (FEA) untuk memprediksi kinerja struktur ringan sebelum pembuatan dan produksi [14]. PT. Y merupakan perusahaan manufaktur yang melakukan pengembangan alat untuk memindahkan kardus berisi makanan dari conveyor ke pallet secara otomatis. Alat ini disebut *Palletizer Carton Box* dengan sistem *Gantry Robot*. Proyek ini bekerja sama dengan PT. N, yang merupakan perusahaan pembuat makanan ringan. Untuk menjamin rangka aman dan mampu menahan beban operasional maka diperlukan data untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan desain konsep rangka *Palletizer Carton Box*, sehingga dapat dilakukan evaluasi dan pengembangan desain. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan rangka *Palletizer Carton Box* mampu menahan beban operasional.

Desain konsep *palletizer* memiliki dimensi panjang 4100 mm, lebar 1765 mm, dan tinggi 2600 mm. Jenis material yang digunakan untuk rangka kolom adalah *I-Wide Flange*, sedangkan rangka horizontal menggunakan jenis material *hollow steel*. Material yang digunakan adalah salah satu material standar baja konstruksi yaitu ST 37. Beban operasional dari penggerak *gantry* dan produk memiliki total berat sekitar 233 kg. Berat produk yang dipindahkan adalah *box* dengan berat 8 kilogram. *Palletizer Carton Box* dapat meningkatkan efisiensi karena kecepatan *gantry* dapat disesuaikan dengan kebutuhan. *Palletizer Carton Box* akan memberikan keamanan yang lebih, karena pemindahan *box* yang dilakukan secara manual dengan ketinggian lebih dari 2 meter, akan memakan waktu lebih lama dan tidak aman saat operator melakukan penyusunan *box*.

2. Metode Penelitian

Penelitian pada jurnal ini menggunakan dua metode, yaitu metode analitis dan metode elemen hingga yang menggunakan software CAE. Metode analitis digunakan untuk melakukan perhitungan sederhana, sedangkan metode elemen hingga digunakan untuk melakukan analisis dengan bentuk kompleks [15]. Kedua hasil analisis tersebut akan dibandingkan sebagai validasi dalam melakukan

analisis kekuatan *frame palletizer*. Metode analitis adalah formulasi analitis yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan linear elastic sederhana. Metode analitis menggunakan asumsi bahwa material yang digunakan adalah elastis, stress berbanding lurus dengan strain, deformasi kecil, dan material berperilaku sama tanpa memperhatikan arah dari pembebanan (isotropic) [16]. Dasar dari analisis menggunakan Metode Elemen Hingga adalah dengan membagi objek menjadi *finite element* atau biasa hanya biasa disebut dengan *element* yang dihubungkan dengan nodes [17], [18]. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan desain konsep dari rangka *Palletizer* yang akan digunakan untuk memindahkan boks dengan berat maksimum 8 kg. Analisis pembebanan dibagi menjadi 7 titik posisi pembebanan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Kode posisi pembebanan pada *Palletizer Carton Box*

2.1. Tahap Perencanaan

Perencanaan dimulai dengan ide penelitian terhadap *Palletizer Carton Box* pada PT. Y yang belum memiliki analisis kekuatan. Analisis kekuatan dilakukan menggunakan Metode Elemen Hingga dengan bantuan simulasi CAE dan perhitungan analitis sebagai validasi terhadap divisi Engineering di PT.Y.

2.2. Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan observasi dan studi literatur atau tinjauan pustaka. Observasi dilakukan di PT. Y untuk mengambil data-data yang diperlukan dalam penelitian dan menentukan permasalahan-permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian. Studi literatur dilaksanakan dengan mengumpulkan buku dan jurnal-jurnal penelitian terdahulu sebagai referensi penelitian. Data dimensi alat bantu, jenis, dan jumlah pembebanan diperoleh dari observasi sedangkan data sifat mekanik material, faktor keamanan dan rumus perhitungan analitis diperoleh dari studi literatur yang kemudian dilanjutkan dengan pembuatan desain 3D yang digunakan untuk analisis Metode Elemen Hingga dibuat berdasarkan data yang diperoleh.

2.3. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan dimulai persiapan komputer dan *software Solidwork 2020* di kantor divisi Engineering PT. Y untuk pembuatan gambar 3D, dan *software Solidwork Simulation 2020* untuk melakukan analisis CAE. Gambar 3D dibuat berdasarkan data yang telah diperoleh dari observasi pada tahap sebelumnya. Kalkulator *scientific*, alat tulis, buku *Mechanics of Material* dan buku *Strenght of Material* dipersiapkan untuk pengerjaan perhitungan analitis.

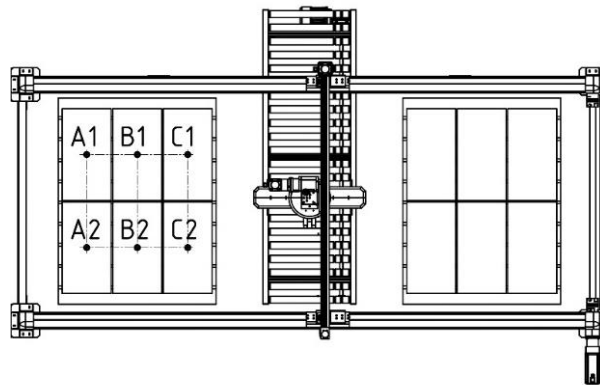
2.4. Analisis

Analisis dan pengolahan data dimulai dengan melakukan analisis Metode Elemen Hingga dengan bantuan simulasi CAE dan perhitungan analitis. *Von mises stress*, *displacement*, dan *1st principal stress* diperoleh dari simulasi CAE, sedangkan tegangan maksimum, defleksi maksimum, tegangan tekuk pada kolom diperoleh dari perhitungan analitis. Perhitungan analitis juga dilakukan untuk menentukan defleksi yang diizinkan dan faktor keamanan dari *frame palletizer*. Hasil dari simulasi CAE dan perhitungan analitis kemudian dibandingkan sebagai validasi. Analisis dilakukan pada hasil yang telah diperoleh dari simulasi CAE dan perhitungan analitis untuk mengetahui apakah *frame palletizer* sudah memenuhi standar keamanan beban dinamis dengan angka keamanan 2-3 [19]. Pengembangan desain akan dilakukan jika hasil analisis tidak memenuhi standar keamanan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Titik Analisis Kekuatan pada Palletizer Carton Box

Analisis pada *palletizer* dilakukan pada 7 titik posisi pembebanan, yang mana posisi titik pembebanan tersebut merupakan tempat untuk meletakkan boks yang berasal dari *conveyor* dan selanjutnya diletakkan di atas *Pallet*.



Gambar 2. Posisi Peletakan Boks dari tampak atas mesin *Palletizer*

3.2. Perhitungan dengan Metode Analitis

Perhitungan dengan metode analitis dilakukan pada ketujuh posisi titik pembebanan dengan menentukan Tegangan maksimum, defleksi maksimum, tegangan tekuk pada kolom, defleksi yang diizinkan dan faktor keamanan dengan rumus pada Tabel 1.

Tabel 1. Rumus yang digunakan dalam metode analitis

1. Tegangan maksimum pada tiap titik : $\sigma_{bmax} = \frac{M_{max,y}}{I}$ Keterangan : σ_{bmax} = tegangan tekuk (N/mm²) M = momen tekuk (N/mm) y = jarak vertikal ke sumbu netral (mm) I = inersia penampang (mm⁴)	2. Defleksi maksimum pada titik tengah : $\delta = \frac{-PL^3}{48EI}$ Keterangan : L = panjang Bentang (mm) P = beban Titik (N) E = modulus Elastisitas (N/mm²) I = inersia Penampang (mm⁴) a, b = jarak titik beban (mm)
3. Defleksi maksimum dengan jarak tertentu : $\delta = \frac{Pb(L^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3EI}}$ Keterangan : L = panjang Bentang (mm)	4. Tegangan tekuk pada kolom : $\sigma_k = \frac{\pi^2 xE}{\lambda^2}$ Keterangan : σ_k = tegangan tekuk

P = beban Titik (N) E = modulus Elastisitas (N/mm²) I = inersia Penampang (mm⁴) a, b = jarak titik beban (mm)	E = modulus elastisitas λ = rasio kelangsingan
5. Tegangan izin $\sigma_{izin} = \frac{\delta_{max}}{F.O.S}$ σ_{izin} = tegangan izin δ_{max} = tegangan maks (N/mm²) F.O.S = faktor keamanan	6. Defleksi yang diijinkan $\delta_{ijin} = \frac{\delta_{max}}{F.O.S}$ δ_{ijin} = defleksi yang diijinkan (mm) δ_{max} = tegangan maksimum dengan beban maksimum (N/mm²) F.O.S = faktor keamanan

Berdasarkan tabel rumus 1 untuk melakukan perhitungan analitis, berikut merupakan hasil dan pembahasannya :

3.2.1. Tegangan Maksimum yang terjadi pada masing-masing titik

Berdasarkan perhitungan analitis yang didapatkan dari rumus nomor 1 pada Tabel 1, tegangan maksimum pada rangka *palletizer* terjadi pada titik D1 dengan nilai sebesar 6,17 MPa. Hasil tegangan maksimum yang terjadi pada seluruh titik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analitis momen maksimum dan tegangan maksimum

Posisi Gantry	Momen Maksimum (N/mm)	Tegangan Maksimum (MPa)
D1	1.763.334,85	6,17
C1	1.624.524,17	5,84
B1	1.281.285,79	4,48
A1	820.059,21	2,87
C2	1.624.524,17	5,84
B2	128.128,79	4,48
A2	820.059,21	2,87

3.2.2. Defleksi Maksimum yang terjadi

Perhitungan analitis pada defleksi dibagi menjadi 2, yaitu defleksi maksimum yang terjadi pada titik tengah (rumus nomor 2, Tabel 1) dan defleksi maksimum yang terjadi dengan jarak tertentu (rumus nomor 3, Tabel 1). perhitungan dilakukan dengan dua cara karena adanya beban pada titik tengah dan samping. Berdasarkan perhitungan analitis menggunakan kedua rumus tersebut, didapatkan hasil defleksi maksimum pada titik D1 dengan nilai sebesar 0,2 mm. Hasil defleksi maksimum yang terjadi pada seluruh titik dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Defleksi maksimum yang terjadi pada tiap titik

Posisi Gantry	Defleksi Maksimum	Satuan
D1	0.2	mm
C1	0.18	mm
B1	0.14	mm
A1	0.082	mm
C2	0.18	mm
B2	0.14	mm
A2	0.082	mm

3.2.3. Perhitungan tegangan tekuk pada kolom

Perhitungan analitis tegangan tekuk pada kolom menggunakan rumus dari hukum *euler*, dikarenakan nilai kelangsingan (λ) = 312,31 lebih besar dari pada batas rasio kelangsingan (λ_g) = 100, yang artinya berada pada area elastis dan berlaku rumus *euler*. Hasil perhitungan analitis tegangan tekuk pada kolom memiliki nilai sebesar 21,24 N/mm² yang didapatkan dari perhitungan berikut :

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda^2} = \frac{3.14^2 \times 210000}{312,31^2} = 21,24 \text{ N/mm}^2 \quad (3.1)$$

3.2.4. Perhitungan tegangan izin

Perhitungan analitis tegangan izin didapatkan dari tegangan maksimum material dengan nilai sebesar 370 MPa yang dibagi dengan nilai faktor keamanan. Faktor keamanan yang digunakan memiliki nilai sebesar 3 berdasarkan dari standar keamanan beban dinamis dengan angka keamanan 2-3. Faktor keamanan yang dipilih menggunakan nilai terbesar dikarenakan sebagai optimasi dalam melakukan pengembangan desain *palletizer frame*. Hasil perhitungan analitis tegangan izin mendapatkan nilai sebesar 123,33 MPa yang didapatkan dari perhitungan berikut :

$$\sigma_{izin} = \frac{M_{max}.y}{I} = \frac{370}{3} = 123,33 \text{ N/mm}^2 \quad (3.2)$$

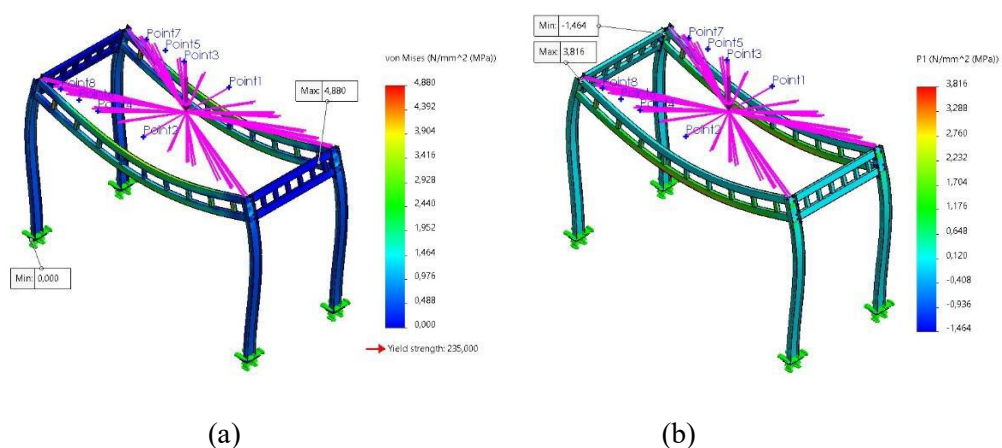
3.2.5. Defleksi yang diizinkan

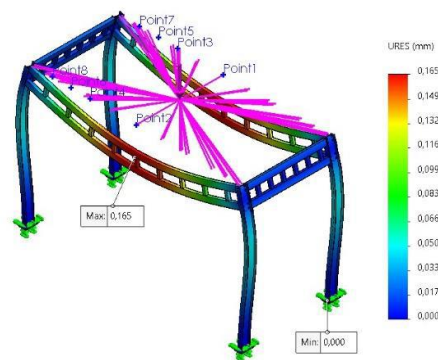
Perhitungan analitis defleksi yang diizinkan didapatkan dari defleksi maksimum dibagi dengan nilai faktor keamanan. Hasil perhitungan analitis defleksi yang diizinkan mendapatkan nilai sebesar 3,1 mm yang didapatkan dari perhitungan berikut:

$$\delta_{ijin} = \frac{\delta_{max}}{F.O.S} = \frac{12,4}{3} = 3,1 \text{ mm} \quad (3.3)$$

3.3. Analisis CAE pada Tiap Posisi Pembebanan

3.3.1. Analisis Pembebanan pada titik D1



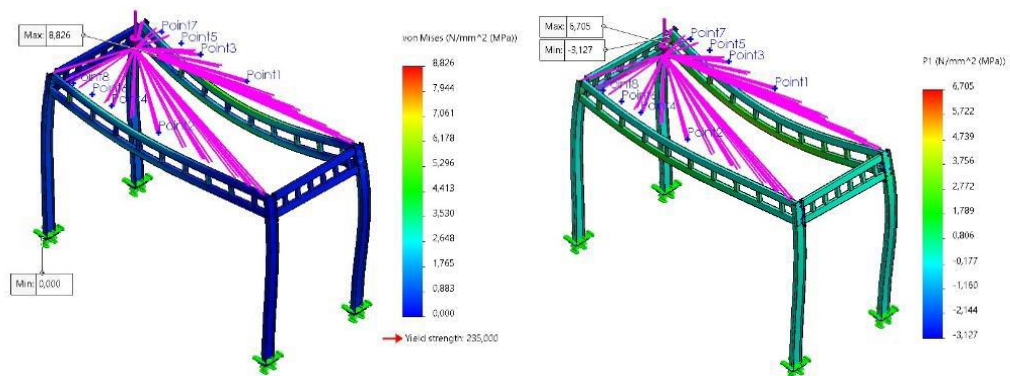


(c)

Gambar 3. (a) von mises stress, (b) 1st Principal Stress, (c) Displacement

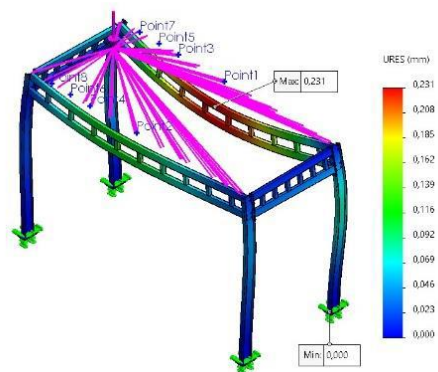
Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa *Von Mises Stress* dengan nilai 4,880 MPa, *1st Principal Stress* dengan nilai 3,816 MPa dan *Displacement* sebesar 0,165 mm.

3.3.2. Analisis Pembebanan pada titik A1



(a)

(b)

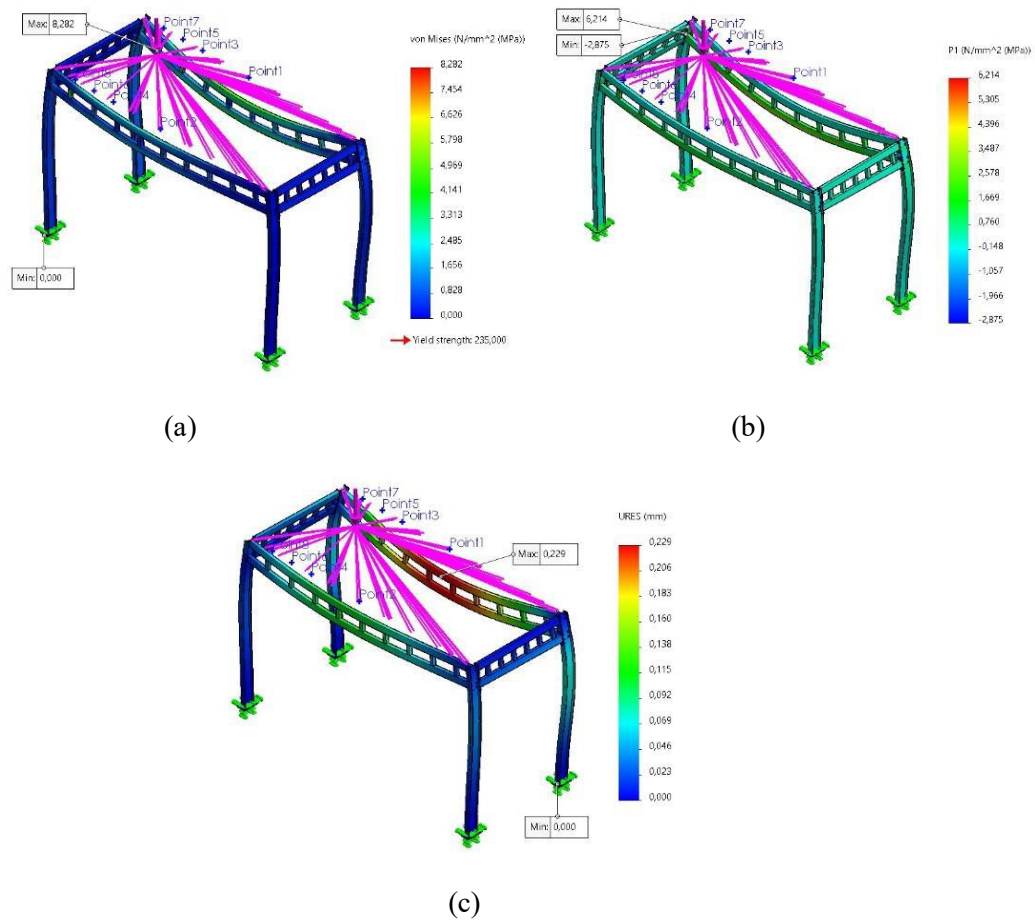


(c)

Gambar 4. (a) von mises stress, (b) 1st Principal Stress, (c) Displacement

Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa *Von Mises Stress* dengan nilai 8,826 MPa, *1st Principal Stress* dengan nilai 6,705 MPa dan *Displacement* sebesar 0,231 mm.

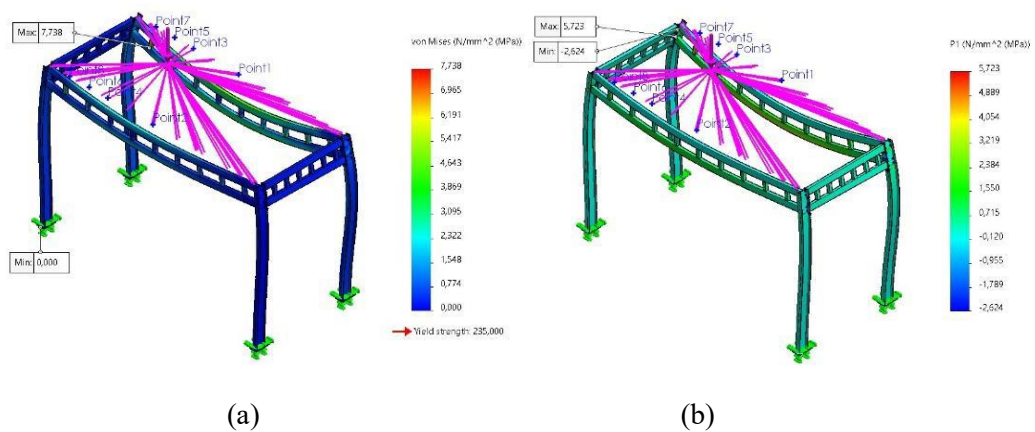
3.3.3. Analisis Pembebanan pada titik B1

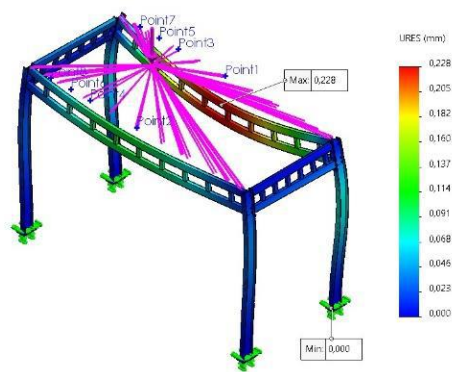


Gambar 5. (a) von mises stress, (b) 1st Principal Stress, (c) Displacement

Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa *Von Mises Stress* dengan nilai 8,282 MPa, *1st Principal Stress* dengan nilai 6,214 MPa dan *Displacement* sebesar 0,229 mm.

3.3.4. Analisis Pembebanan pada titik C1



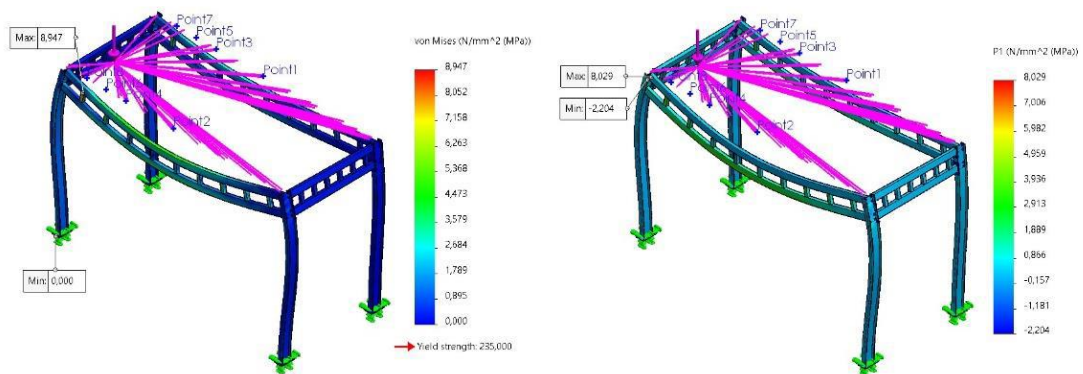


(c)

Gambar 6. (a) von mises stress, (b) 1st Principal Stress, (c) Displacement

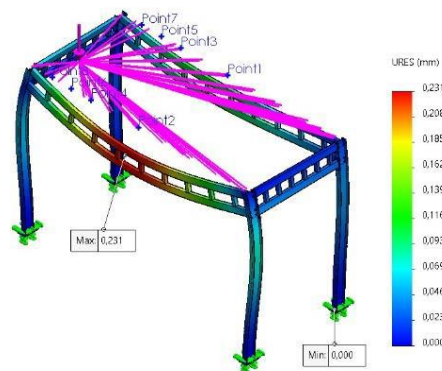
Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa *Von Mises Stress* dengan nilai 7,738 MPa, *1st Principal Stress* dengan nilai 5,723 MPa dan *Displacement* sebesar 0,228 mm.

3.3.5. Analisis Pembebanan pada titik A2



(a)

(b)

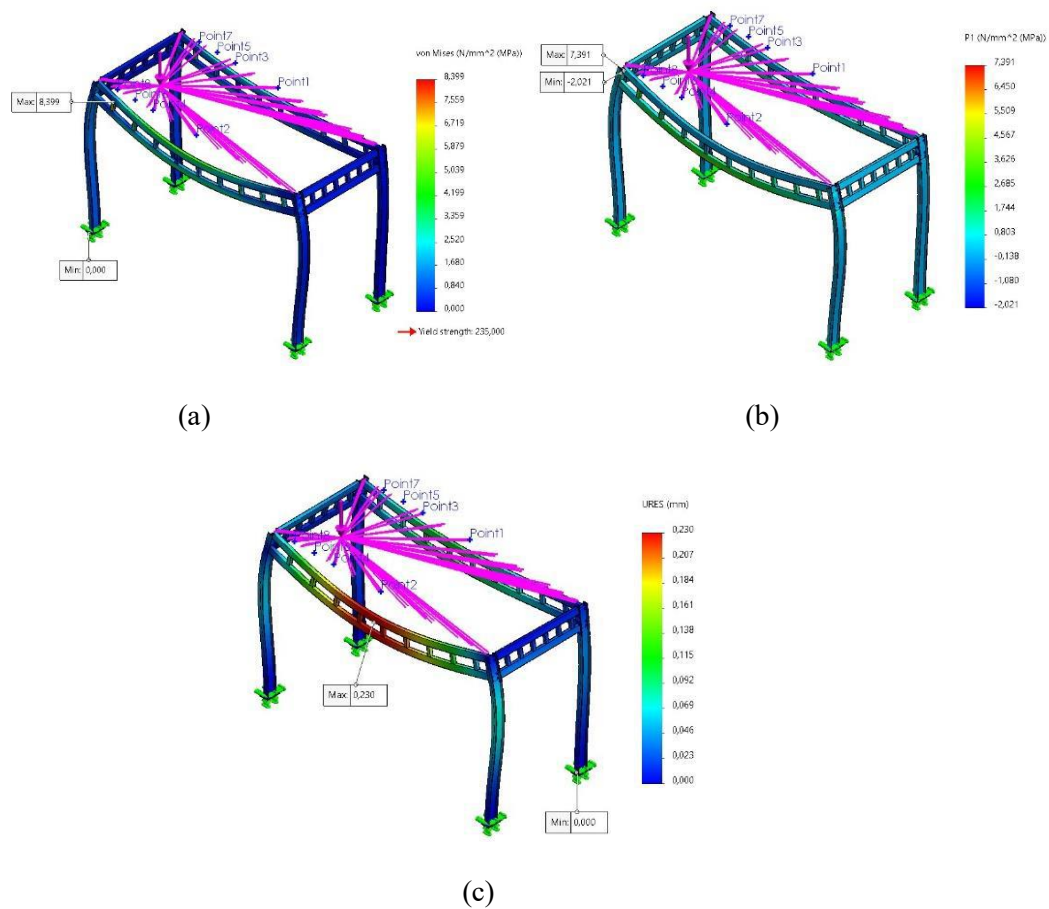


(c)

Gambar 7. (a) von mises stress, (b) 1st Principal Stress, (c) Displacement

Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa *Von Mises Stress* dengan nilai 8,947 MPa, *1st Principal Stress* dengan nilai 8,029 MPa dan *Displacement* sebesar 0,231 mm.

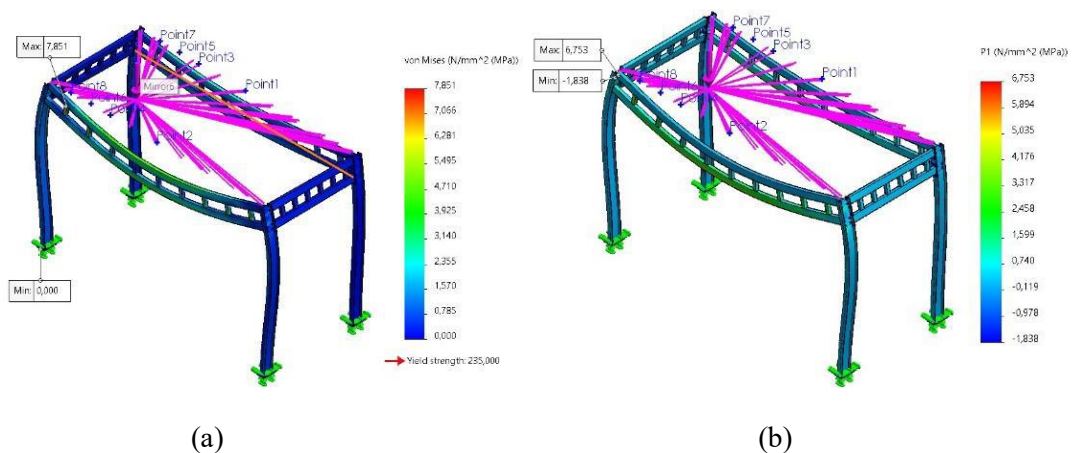
3.3.6. Analisis Pembebanan pada titik B2

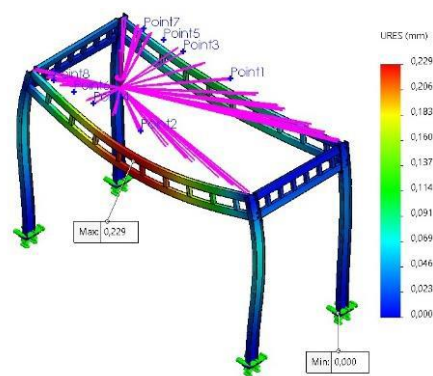


Gambar 8. (a) von mises stress, (b) 1st Principal Stress, (c) Displacement

Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa Von Mises Stress dengan nilai 4,880 MPa, 1st Principal Stress dengan nilai 3,816 MPa dan Displacement sebesar 0,165 mm

3.3.7. Analisis Pembebanan pada titik C2





(c)

Gambar 9. (a) *von mises stress*, (b) *1st Principal Stress*, (c) *Displacement*

Hasil analisis CAE pada titik D1 berupa *Von Mises Stress* dengan nilai 7,851 MPa, *1st Principal Stress* dengan nilai 6,753 MPa dan *Displacement* sebesar 0,229 mm.

3.4. Perbandingan dan Hasil Analisis antara Metode Analitis dengan Metode Elemen Hingga

Hasil analisis dibandingkan untuk menentukan tegangan yang paling besar dari ketiga jenis tegangan. Perbedaan hasil perhitungan analitis dan simulasi CAE disebabkan oleh perbedaan metode yang digunakan. Metode analitis memerlukan pemodelan yang disederhanakan dari bentuk 3D menjadi 2D sehingga menyebabkan perbedaan hasil dengan simulasi CAE. Hasil perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Tabel Perbandingan antara Metode Analitis dengan Metode Elemen Hingga

Posisi Gantry	Perhitungan Analitis (MPa)	<i>1st Principal Stress</i> (MPa)	<i>Von Mises Stress</i> (MPa)	Tegangan Izin (MPa)	Keterangan
D1	6,17	3,816	4,880	123,33	Memenuhi
A1	2,87	6,705	8,826	123,33	Memenuhi
B1	4,48	6,214	8,282	123,33	Memenuhi
C1	5,84	5,723	7,738	123,33	Memenuhi
A2	2,87	8,029	8,947	123,33	Memenuhi
B2	4,48	7,391	8,399	123,33	Memenuhi
C2	5,84	6,753	7,851	123,33	Memenuhi

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari Jurnal dengan judul “Analisis Kekuatan Desain Rangka Mesin *Palletizer Carton Box* dengan Metode Analitis dan Elemen Hingga” adalah :

- Posisi kritis rangka pada *Palletizer* berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode Elemen Hingga dengan *Software Solidwork Simulation* ada pada titik A2 dengan hasil *Von Mises Stress* sebesar 8,947 MPa dan *Displacement* sebesar 0,231 mm.
- Bahwa dari simulasi software solidwork mendapatkan hasil *stress* maksimum sebesar 8,947 MPa lebih kecil dari tegangan ijin sebesar 123,33 MPa, tidak melebihi angka keamanan SF=2 terhadap beban dinamis berdasarkan buku *Machine elements : a textbook*, (1978)

- Hasil analisis dengan menggunakan metode analitis dan metode elemen hingga memiliki perbedaan dikarenakan adanya perbedaan cara dalam menganalisa. Untuk metode analitis melakukan perhitungan dengan cara membagi komponen dalam bentuk 2D, sedangkan untuk analisis CAE menggunakan cara menghitung secara keseluruhan dalam bentuk 3D.

5. Referensi

- [1] Y. Kayikci, "Sustainability impact of digitization in logistics," *Procedia Manufacturing*, vol. 21, pp. 782–789, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.184.
- [2] R. Tjandrawinata, "Industri 4.0: Revolusi Industri Abad Ini Dan Pengaruhnya Pada Bidang Kesehatan Dan Bioteknologi," Feb. 2016, doi: 10.5281/ZENODO.49404.
- [3] S. Konur, Y. Lan, D. Thakker, G. Morkyani, N. Polovina, and J. Sharp, "Towards design and implementation of Industry 4.0 for food manufacturing," *Neural Comput & Applic*, vol. 35, no. 33, pp. 23753–23765, Nov. 2023, doi: 10.1007/s00521-021-05726-z.
- [4] K. Salonitis, "Manufacturing Energy Efficiency and Industry 4.0," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2268, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16052268.
- [5] F. Zaccaria, A. Baldassarri, G. Palli, and M. Carricato, "A Mobile Robotized System for Depalletizing Applications: Design and Experimentation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 96682–96691, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3092580.
- [6] Zomaya, A.Y., *Modeling and Simulation of Robot Manipulators: A Parallel Processing Approach*, vol. 8. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1992.
- [7] K. D. Mendoza-Calderón, J. A. M. Jaimes, J. G. Maradey-Lazaro, A. D. Rincón-Quintero, and C. G. Cardenas-Arias, "Design of an Automatic Palletizer," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2224, no. 1, p. 012095, Apr. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2224/1/012095.
- [8] S. Hameed, A. Ahmeed, M. Nabeel, and I. Khan, "3 Axis Palletizer," *JMCMs*.
- [9] J.-D. Lee, C.-H. Chang, E.-S. Cheng, C.-C. Kuo, and C.-Y. Hsieh, "Intelligent Robotic Palletizer System," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 12159, Dec. 2021, doi: 10.3390/app112412159.
- [10] Z. Zheng and R. Ma, "Research on the method of cement bag palletizing system based on machine vision," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 569, no. 5, p. 052011, Jul. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/569/5/052011.
- [11] Petroleum-Gas University of Ploiesti, Romania, O. Cangea, V.-B. Petrescu, and Kardynal Intserv, Romania, "STUDY AND DESIGN OF AN AUTOMATED PALLET SYSTEM," *JPGT*, vol. 3 (74), no. 2, pp. 49–56, 2022, doi: 10.51865/JPGT.2022.02.05.
- [12] P. Lonkwic, K. Przystupa, T. Krakowski, and H. Ruta, "Case Study of Support Frame Optimization Using a Distant Load," *Sustainability*, vol. 12, no. 3, p. 974, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12030974.
- [13] F. Sena Cardoso, K. J. R. Rasmussen, and H. Zhang, "System reliability-based criteria for the design of steel storage rack frames by advanced analysis: Part I – Statistical characterisation of system strength," *Thin-Walled Structures*, vol. 141, pp. 713–724, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2019.03.006.
- [14] C. P. Kohar, L. Greve, T. K. Eller, D. S. Connolly, and K. Inal, "A machine learning framework for accelerating the design process using CAE simulations: An application to finite element analysis in structural crashworthiness," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 385, p. 114008, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cma.2021.114008.

- [15] Y. Sun, J. Zhai, Q. Zhang, and X. Qin, "Research of large scale mechanical structure crack growth method based on finite element parametric submodel," *Engineering Failure Analysis*, vol. 102, pp. 226–236, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.012.
- [16] Chang, K. H., *e-Design Computer Aided Engineering Design*. Academic Press, 2015.
- [17] B. Fish, J T., *A First Course in Finite Element*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [18] W. K. Liu, S. Li, and H. S. Park, "Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future," *Arch Computat Methods Eng*, vol. 29, no. 6, pp. 4431–4453, Oct. 2022, doi: 10.1007/s11831-022-09740-9.
- [19] R. C. Hibbeler, *Mechanic of Materials*, Eight Edition. United States of America: Pearson Prentice Hall, 2011.