SINERGI *Polmed* : JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

EVALUASI KEKUATAN STRUKTURAL RANGKA PENOPANG SISTEM PRODUKSI BIODIESEL MENGGUNAKAN ANALISIS ELEMEN HINGGA

Surya Dharma[a], Siti Maretia Benu[b*], Rahmawaty[c], Rihat Sebayang[c], Ulfa Hasnita[d], Heru Pranoto[e], Khairul Rahmi[b], Rakha Arkananta[a]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia*
[b]*Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia*
[c]*Program Studi Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia*
[d]*Program Studi Teknik Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia*
[e]*Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155, Indonesia*

** Penulis korespondensi:: sitimaretia@polmed.ac.id; sitimaretia@gmail.com (Siti) Tel.: +628117310315*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 12 Maret 2026
Direvisi pada 20 Juli 2026
Disetujui pada 14 Oktober 2026
Tersedia daring pada 31 Oktober 2026

Kata kunci:
Rangka penopang; produksi biodiesel; metode elemen hingga; tegangan von Mises; faktor keamanan.

Keywords:
Supporting frame; biodiesel production; finite element analysis; von Mises stress; factor of safety.

ABSTRAK

Kebutuhan akan peralatan produksi biodiesel yang aman menuntut rancangan rangka penopang yang mampu menahan beban komponen dan fluida proses. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kekuatan struktur rangka baja tahan karat AISI 304 pada sistem produksi biodiesel berkapasitas 20 L per proses. Geometri rangka dimodelkan dalam tiga dimensi dan dievaluasi menggunakan metode elemen hingga terhadap pembebanan statik. Rangka menggunakan profil berukuran 40 × 40 mm dengan ketebalan 2 mm untuk menopang tiga reaktor dan peralatan pendukung. Hasil simulasi menunjukkan tegangan von Mises maksimum sebesar 57,86 MPa, lebih rendah daripada kekuatan luluh material sebesar 205 MPa. Faktor keamanan minimum yang dilaporkan mencapai 3,5, dengan perpindahan maksimum pada model utama sebesar 0,8564 mm. Konsentrasi tegangan muncul pada sambungan balok dan kolom rangka. Hasil ini menunjukkan bahwa rancangan memiliki margin kekuatan terhadap luluh untuk kondisi pembebanan statik yang dimodelkan. Meskipun demikian, kelayakan operasi belum dapat dipastikan tanpa pengujian purwarupa, analisis kelelahan, dan verifikasi kualitas model numerik.

ABSTRACT

Safe biodiesel production equipment requires a supporting frame capable of carrying the weight of process units and fluids. This study evaluates the structural strength of an AISI 304 stainless-steel frame designed for a biodiesel production system with a processing capacity of 20 L per batch. The three-dimensional frame model was assessed under static loading using finite element analysis. The frame consists of 40 × 40 mm sections with 2 mm wall thickness and supports three reactors and auxiliary equipment. The simulated maximum von Mises stress was 57.86 MPa, below the specified material yield strength of 205 MPa. The reported minimum factor of safety was 3.5, while the maximum displacement in the principal model was 0.8564 mm. Stress concentrations were found near beam–column connections. These results indicate an adequate margin against yielding for the loading assumptions used in the static model. However, the operational suitability of the design remains subject to prototype testing, fatigue assessment, and documented numerical verification.

1. PENGANTAR

Kebutuhan energi yang terus meningkat mendorong pengembangan bahan bakar terbarukan sebagai pelengkap sumber energi konvensional (Dharma dkk., 2023; Sadeq dkk., 2024). Salah satu bahan bakar yang telah diterapkan dalam sektor transportasi adalah biodiesel, yaitu bahan bakar yang umumnya tersusun atas ester metil asam lemak dan dihasilkan melalui esterifikasi atau transesterifikasi bahan baku berbasis minyak dan lemak (Brahma dkk., 2022; Elgharbawy dkk., 2025). Penggunaan bahan baku terbarukan maupun minyak jelantah menawarkan peluang untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun, pengembangan produksi biodiesel tidak cukup dinilai dari proses konversi bahan bakunya. Keamanan, keandalan, serta kemudahan pemeliharaan peralatan juga perlu diperhatikan sejak tahap perancangan (Jayabal, 2024; Suherman, 2023).

Dalam sistem produksi biodiesel berskala kecil, rangka penopang menghubungkan reaktor, pompa, pengaduk, dan perpipaan ke dalam satu susunan mekanis. Rangka harus mempertahankan posisi peralatan saat menerima berat sendiri, massa fluida proses, dan beban operasional. Pemilihan material serta dimensi profil karena itu memengaruhi keselamatan dan kemudahan fabrikasi. Pemodelan tiga dimensi memungkinkan pemeriksaan tata letak dan interferensi antarkomponen sebelum peralatan dibuat, sedangkan analisis elemen hingga dapat digunakan untuk memperkirakan respons struktur terhadap pembebanan tertentu (Afolabi dkk., 2021; Chen dkk., 2024).

Sejumlah penelitian telah memanfaatkan pemodelan dan simulasi untuk mendukung perancangan peralatan proses. Ong dan Nomanbhay (2018) mengevaluasi rancangan reaktor berbantuan pemanasan gelombang mikro untuk produksi biodiesel, sedangkan Adache dkk. (2025) menerapkan analisis elemen hingga pada desain mesin ekstraksi minyak jarak. Pendekatan serupa digunakan Rosalina dkk. (2025) untuk menilai rancangan sistem pengaduk limbah gliserin. Kajian-kajian tersebut menunjukkan manfaat simulasi pada komponen proses, tetapi belum secara langsung menjawab kebutuhan evaluasi kekuatan rangka penopang yang menampung beberapa reaktor dan peralatan pendukung dalam satu sistem produksi biodiesel.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang konfigurasi mekanis sistem produksi biodiesel berkapasitas 20 L per proses dan mengevaluasi respons statik rangka penopangnya menggunakan metode elemen hingga. Penilaian difokuskan pada tegangan *von Mises*, perpindahan, regangan, dan faktor keamanan rangka berbahan baja tahan karat AISI 304. Kontribusi penelitian terletak pada evaluasi awal kekuatan rangka untuk tata letak proses bertingkat dengan tiga reaktor dan komponen pendukung. Hasilnya digunakan sebagai dasar perbaikan desain sebelum dilakukan fabrikasi dan pengujian fisik.

2. METODE

Penelitian dilaksanakan melalui penetapan spesifikasi sistem, pemodelan geometri tiga dimensi, dan evaluasi struktur menggunakan metode elemen hingga. Perangkat lunak SOLIDWORKS 2025 digunakan untuk menyusun rancangan mekanis sistem produksi biodiesel. Analisis rangka difokuskan pada respons akibat pembebanan statik, dengan parameter keluaran berupa tegangan von Mises, perpindahan, regangan, dan faktor keamanan. Informasi teknis solver, jenis elemen, tumpuan, dan besar pembebanan perlu dilengkapi dalam dokumentasi metode untuk mendukung reproduksibilitas hasil.

2.1. Material rangka

Baja tahan karat AISI 304 dipilih sebagai material rangka karena memiliki ketahanan korosi yang baik dan umum digunakan pada lingkungan proses yang melibatkan kelembapan serta bahan kimia. Nilai sifat material yang digunakan sebagai masukan desain dirangkum pada Tabel 1 (Abouchenari dkk., 2024; Zhao dkk., 2023). Pada analisis kekuatan, parameter yang paling relevan adalah modulus elastisitas, rasio Poisson, dan kekuatan luluh. Nilai-nilai tersebut perlu disesuaikan dengan spesifikasi material yang benar-benar digunakan pada tahap fabrikasi.

Tabel 1: Sifat-sifat *Stainless Steel,* AISI 304

Sifat	Nilai	Satuan
Massa jenis	8000	kg/m³
Modulus elastisitas	193	GPa
Rasio Poisson	0,29	-
Kekuatan luluh	205	MPa
Kekuatan tarik	517	MPa
Titik leleh	1400 – 1450	°C
Konduktivitas termal	16,2	W/m·K

2.2. Penetapan spesifikasi sistem

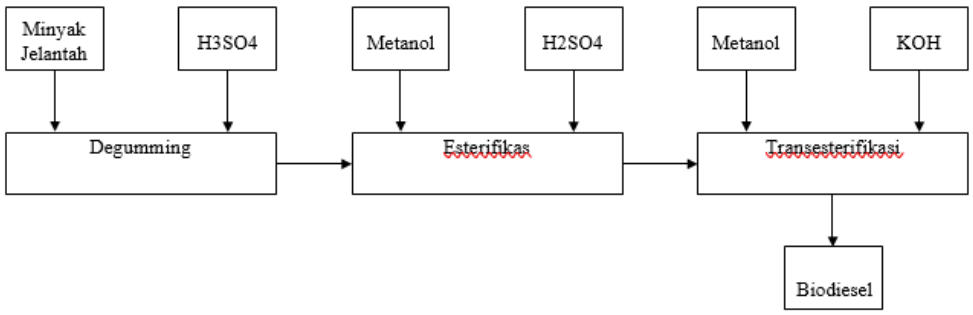
Spesifikasi awal ditetapkan untuk memastikan rancangan dapat menampung seluruh tahapan proses dan komponen pendukung sesuai kapasitas yang direncanakan (Buitrago-Leiva dkk., 2024; Celik dkk., 2025). Sistem dirancang sebagai unit produksi biodiesel berkapasitas operasi 20 L per proses, dengan tiga tahap utama, yaitu degumming, esterifikasi, dan transesterifikasi. Ringkasan komponen dan karakteristik rancangan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2: Spesifikasi Pabrik Biodiesel

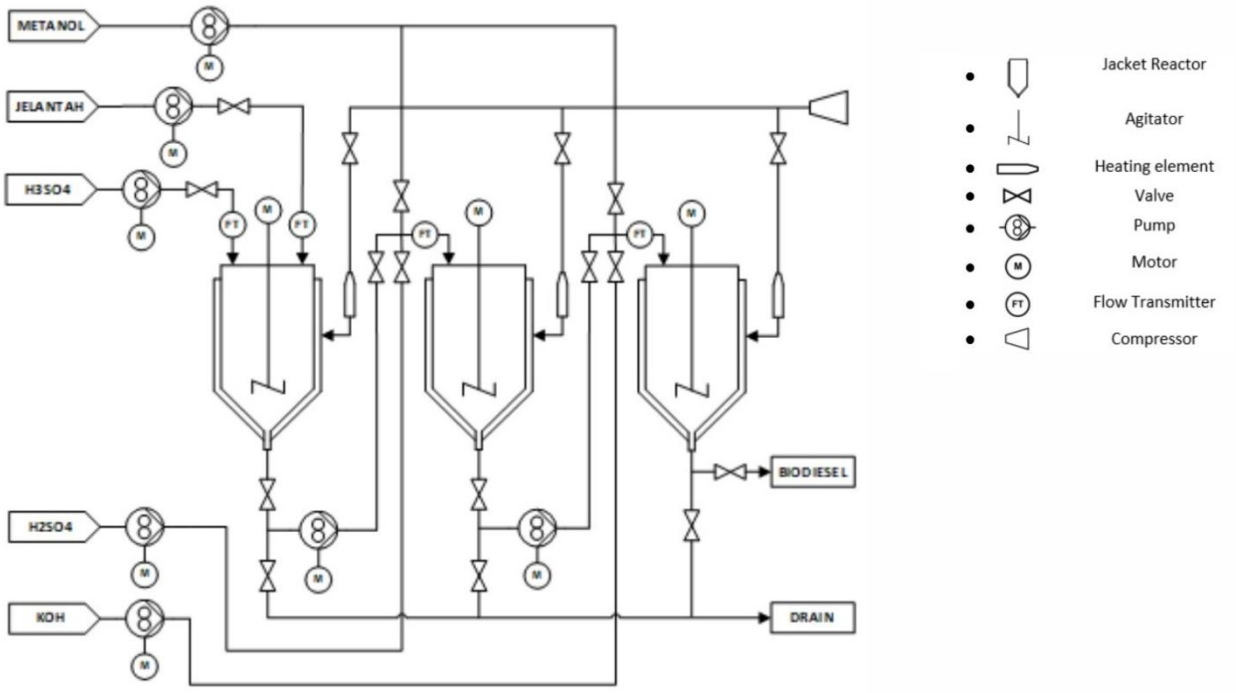
No.	Parameter	Spesifikasi
1.	Tahapan proses	*Degumming*, esterifikasi, dan transesterifikasi
2.	Kapasitas operasi	20 L per proses
3.	Material utama	Baja tahan karat AISI 304
4.	Jenis reaktor	Reaktor batch berjaket
5.	Sistem pemanas	Pemanasan tidak langsung
6.	Media pemanas	Udara panas
7.	Elemen pemanas	Pemanas udara listrik
8.	Posisi pengaduk	Masuk dari bagian atas
9.	Tipe pengaduk	Paddle

2.3. Konsep sistem produksi

Alur proses secara konseptual disusun dalam diagram alir blok (*Block Flow Diagram*/BFD) pada Gambar 1. Diagram tersebut menunjukkan tiga tahapan proses utama beserta bahan yang masuk pada masing-masing tahap. Susunan proses selanjutnya menjadi dasar penempatan reaktor dan perangkat pendukung di atas rangka.



Gambar 1: Diagram alir blok proses produksi biodiesel



Gambar 2: Diagram pipa dan instrumentasi sistem produksi biodiesel

Gambar 2 memperlihatkan diagram pipa dan instrumentasi (*Piping and Instrumentation Diagram*/P&ID) yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antarreaktor, jalur perpipaan, katup, dan perangkat ukur. Dokumen ini membantu menelusuri aliran bahan serta mengidentifikasi kebutuhan ruang dan sambungan pada tata letak peralatan (Kim dkk., 2022; Chew dkk., 2024). Dalam naskah ini, P&ID dipakai sebagai acuan pemodelan mekanis. Kesesuaian simbol, spesifikasi instrumen, dan fungsi pengaman terhadap standar yang relevan perlu diverifikasi sebelum dijadikan dokumen fabrikasi.

2.4. Pemodelan tiga dimensi

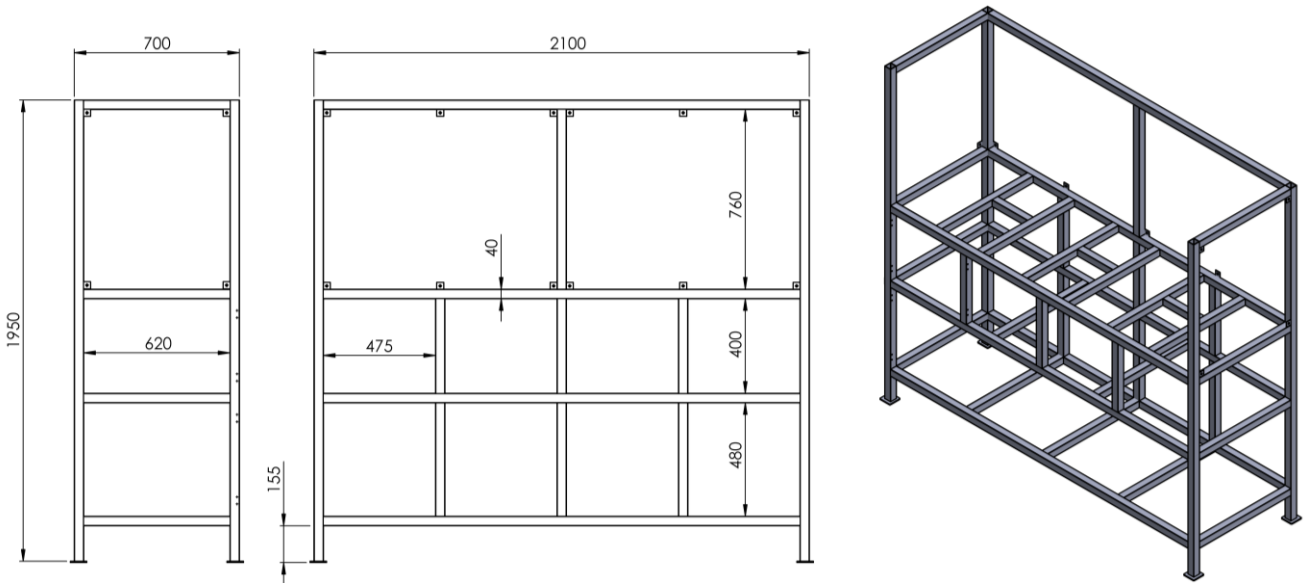
Pemodelan tiga dimensi dilakukan menggunakan *SOLIDWORKS* 2025 berdasarkan alur proses dan spesifikasi sistem. Komponen utama yang dimodelkan meliputi tiga reaktor berjaket, rangka penopang, pompa, pengaduk, pemanas, serta jaringan perpipaan. Setiap komponen ditempatkan dalam model perakitan untuk menilai kecukupan ruang, akses perawatan, dan potensi interferensi antarkomponen (Nyemba, 2025). Model geometri kemudian digunakan sebagai masukan evaluasi kekuatan rangka.

Perakitan virtual disusun secara bertahap agar hubungan posisi antarperalatan dapat diperiksa sebelum pembuatan komponen fisik. Pemeriksaan difokuskan pada kesesuaian dimensi, ruang pemasangan, serta jalur perpipaan dan kabel yang memerlukan akses selama pengoperasian.

2.5. Desain rangka penopang

Rangka penopang dirancang dalam tiga tingkat untuk mengintegrasikan peralatan proses biodiesel. Tingkat bawah menampung empat pompa umpan dan satu kompresor udara, tingkat tengah digunakan untuk tiga pompa transfer tambahan, sedangkan tingkat atas menopang tiga reaktor. Pembagian tingkat tersebut mempertimbangkan distribusi ruang, akses pemeliharaan, dan kebutuhan penempatan komponen. Penilaian terhadap getaran pompa atau beban dinamis belum menjadi bagian dari simulasi statik yang dilaporkan.

Struktur utama menggunakan profil berongga baja tahan karat AISI 304 berukuran 40 × 40 mm dengan ketebalan dinding 2 mm. Pelat penutup pada bagian tertentu dirancang dengan ketebalan 2 mm, sedangkan panel akrilik digunakan sebagai pelindung dan sarana pengamatan visual. Pemodelan rangka dilakukan menggunakan fitur *weldments* pada *solidworks* 2025. Susunan dan dimensi rangka ditampilkan pada Gambar 3. Detail sambungan las, tumpuan, dan pengikatan peralatan perlu didokumentasikan secara lengkap karena dapat memengaruhi hasil perhitungan kekuatan.



Gambar 3: Model geometri dan dimensi rangka penopang

2.6. Desain reaktor berjaket ganda

Sistem dirancang menggunakan tiga reaktor berjaket ganda (*double jacket*), masing-masing berbahan AISI 304 dengan ketebalan dinding nominal 2 mm dan celah jaket 5 mm. Umpan dimasukkan dari bagian atas reaktor dan produk dikeluarkan melalui saluran bawah. Dimensi reaktor ditunjukkan pada Gambar 4. Volume geometris bagian silinder dihitung menggunakan Persamaan 1, sedangkan bagian kerucut terpancung menggunakan Persamaan (2).

$$V_{\text{cylinder}} = \pi . r^2 . \text{t} \quad (1)$$

Keterangan:

V = volume (m³ atau L, sesuai satuan dimensi)

π = konstanta pi

r = jari-jari (m atau mm)

t = tinggi (m atau mm)

$$V_{\text{cylinder}} = \pi . (180) 2.500 = 50.893 mm^3 = 50{,}893 \text{ L}$$

Volume bagian kerucut terpancung ditentukan menggunakan Persamaan 2 berdasarkan geometri reaktor (Wang dkk., 2021).

$$V_{\text{cone}} = 1/3 \, \pi . \text{h} \, (R^2 + \text{Rr} + r^2) \quad (2)$$

$$V_{\text{cone}} = 1/3 \, \pi . 130 \, (1802 + (180.16{,}5) + 16{,}52) = 4.846 \text{ mm}^3 = 4{,}846 \text{ L}$$

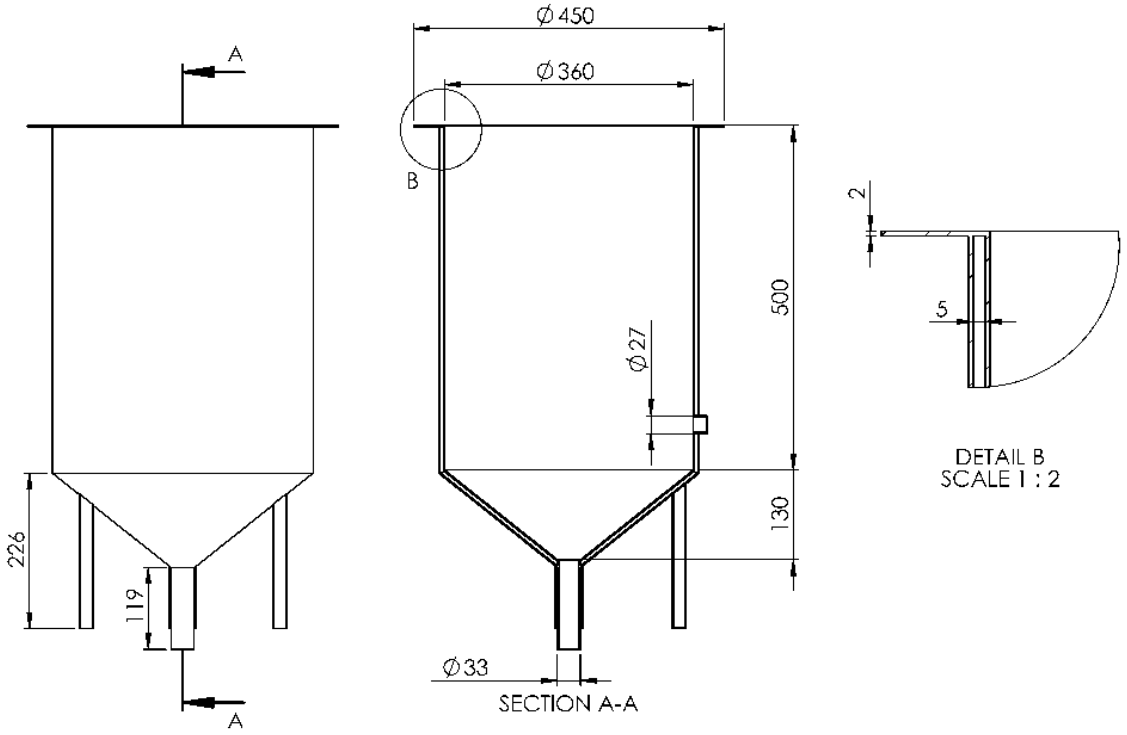
Volume total reaktor dihitung dengan menjumlahkan volume bagian silinder dan kerucut terpancung, sebagaimana dirumuskan dalam Persamaan 3.

$$\text{Kapasitas Total} = V_{silinder} + V_{cone} \quad (3)$$

Total Kapasitas =50,893 L + 4,846 L = 55,7 Liter

Volume geometris reaktor yang dilaporkan adalah sekitar 55,7 L, sedangkan kapasitas operasi yang direncanakan sebesar 20 L per proses. Selisih volume tersebut menyediakan ruang kosong di atas cairan untuk mengakomodasi pengadukan dan perubahan volume selama operasi. Namun, kecukupan ruang kosong harus dikaji bersama karakteristik reaksi, pembentukan uap, kapasitas ventilasi, dan sistem pengaman, bukan berdasarkan rasio volume semata.

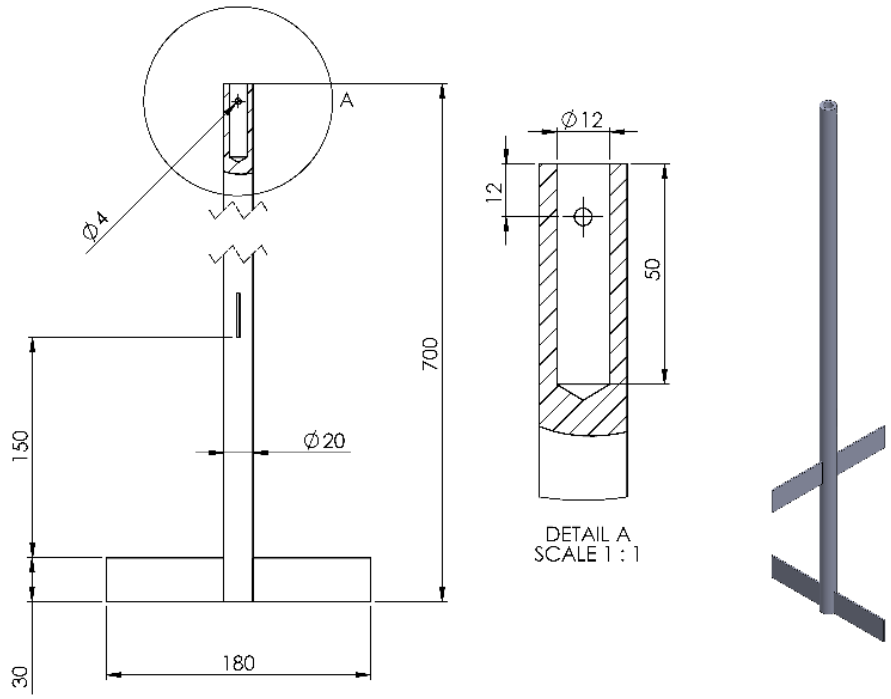
Perhitungan awal ini menunjukkan adanya cadangan volume dalam desain reaktor. Konfirmasi volume efektif, geometri bagian bawah, dan parameter keselamatan reaktor diperlukan sebelum desain digunakan sebagai acuan pembuatan peralatan.



Gambar 4: Geometri reaktor tangki berpengaduk dengan jaket pemanas

2.7. *Sistem pengaduk*

Setiap reaktor dilengkapi pengaduk tipe *paddle* yang dipasang pada poros vertikal dan digerakkan oleh motor listrik di bagian atas reaktor. Pengaduk dipilih untuk membantu pencampuran bahan selama proses berlangsung. Gambar 5 memperlihatkan rancangan pengaduk beserta dimensi utamanya. Kinerja pencampuran, konsumsi daya pengadukan, dan keseragaman temperatur belum diuji secara eksperimen dalam penelitian ini.



Gambar 5: Rancangan geometri pengaduk

2.8. *Sistem pompa dan penggerak*

Sistem penggerak pompa dirancang menggunakan motor listrik dengan transmisi sabuk dan puli. Rancangan awal menetapkan rasio putaran 1:1 antara motor dan pompa. Posisi motor dapat diatur melalui dudukan untuk membantu penyetelan jarak antarpuli dan ketegangan sabuk. Pemilihan jenis sabuk dan kesesuaian dimensi puli perlu mempertimbangkan beban aktual, putaran, serta rekomendasi produsen komponen.

Diameter *pitch* puli dihitung menggunakan Persamaan 4 dengan mengacu pada rujukan yang digunakan dalam naskah (Maitra, 1994).

$$PD = OD - 0{,}2 \quad (4)$$

Keterangan:
PD = diameter *pitch* puli
OD = diameter luar puli

$$PD = 3" - 0{,}2 = 2{,}8" = 71{,}17 \text{ mm}$$

Panjang sabuk efektif ditentukan menggunakan Persamaan 5 (Yahaya dkk., 2018).

$$L = 2C + \pi D \quad (5)$$

Keterangan:
L = panjang sabuk efektif
C = jarak sumbu kedua puli
D = diameter puli

$$L = 2(210) + \pi(71{,}17) = 643{,}43\ mm$$

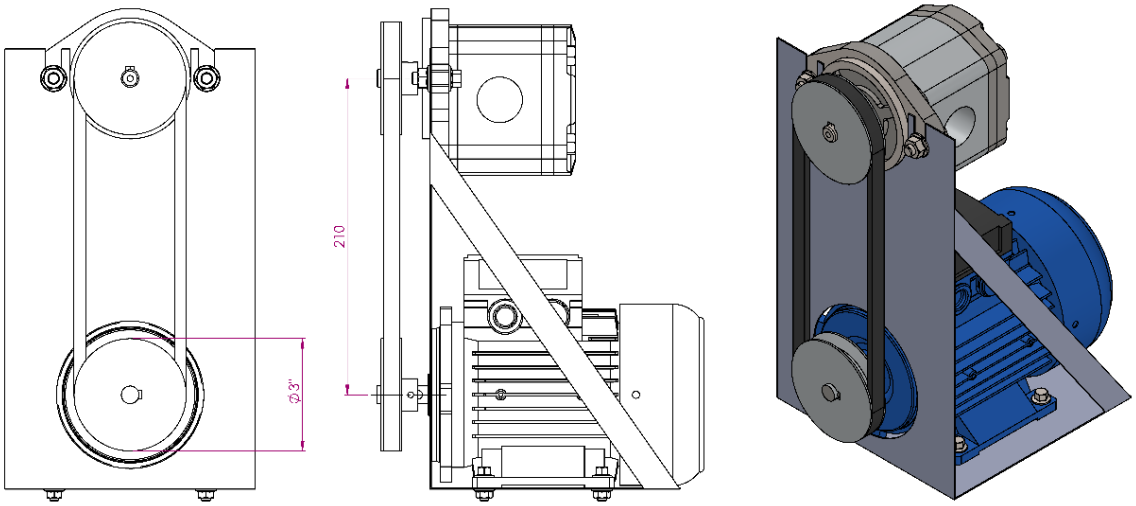
Hubungan antara panjang efektif dan panjang dalam sabuk dinyatakan pada Persamaan 6 (McCarthy dkk., 2005). Kesesuaian rujukan tersebut dengan formulasi transmisi sabuk perlu diperiksa kembali.

$$Li = L - 1{,}3" \quad (6)$$

Keterangan:
Li = panjang dalam sabuk

$$Li = 643{,}43 - 33 = 610{,}43\ mm = 24{,}03"$$

Berdasarkan perhitungan awal, dipilih sabuk V tipe A-24 dengan panjang nominal 24 inci. Gambar 6 menunjukkan rancangan susunan pompa, motor, dan transmisi sabuk. Ukuran tersebut perlu dikonfirmasi terhadap dimensi puli, jarak poros, dan kapasitas daya transmisi sebelum digunakan.

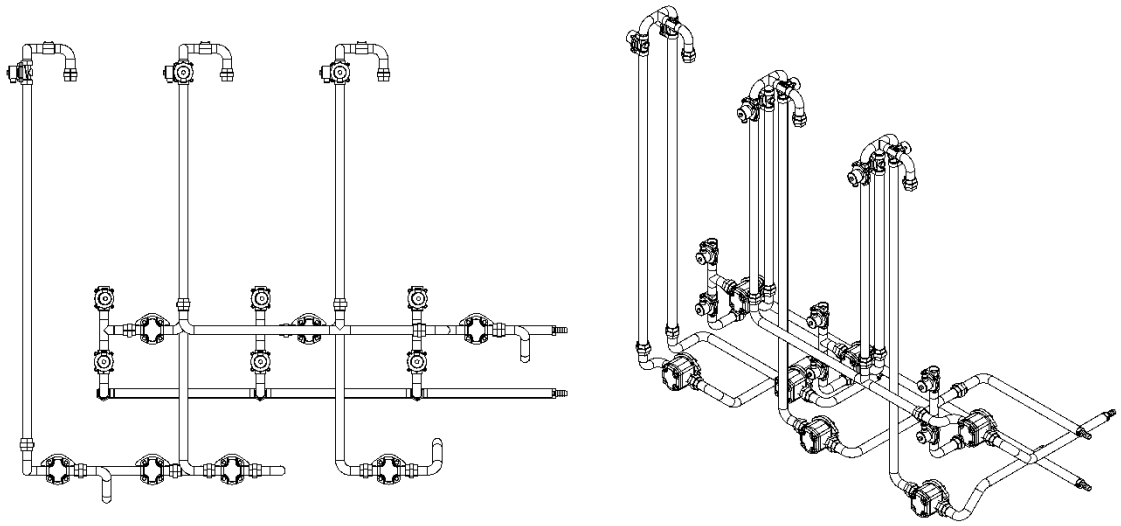


Gambar 6: Rancangan dudukan pompa, motor, dan sistem transmisi

2.9. Desain sistem perpipaan

Sistem perpipaan menghubungkan reaktor, pompa, dan unit pendukung agar aliran reaktan serta produk dapat berlangsung sesuai urutan proses. Jalur pipa dirancang dengan mempertimbangkan kebutuhan ruang, posisi sambungan, kemudahan inspeksi, dan akses pemeliharaan. Gambar 7 memperlihatkan model perpipaan yang disusun berdasarkan diagram pipa dan instrumentasi pada Gambar 2. Pemilihan diameter akhir perlu didukung perhitungan laju alir, kerugian tekanan, dan sifat fluida proses.

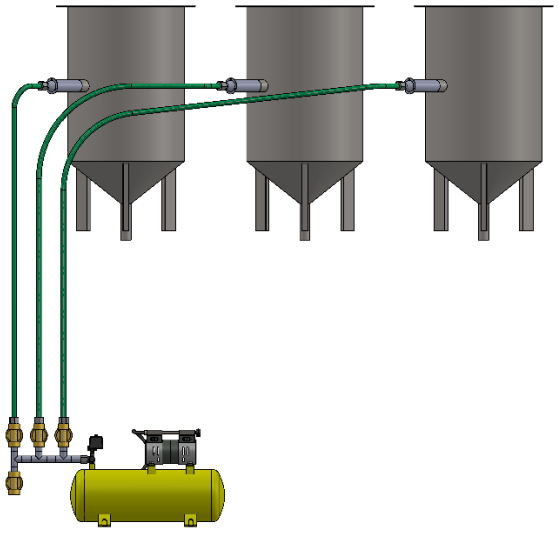
Pada rancangan awal, perpipaan utama menggunakan pipa baja tahan karat AISI 304 berdiameter nominal 1 inci. Sambungan dan komponen penghubung direncanakan untuk menyesuaikan tata letak proses. Penentuan spesifikasi pengelasan, kelas tekanan, jenis katup, serta sistem pengaman harus mengikuti kondisi operasi aktual dan standar yang relevan. Penyebutan ASME B31.3 dalam naskah merupakan acuan desain perpipaan; kesesuaian terhadap standar tersebut belum dapat dinyatakan tanpa dokumen perhitungan dan pemeriksaan yang memadai.



Gambar 7: Model sistem perpipaan produksi biodiesel

2.10. Sistem penyedia udara panas

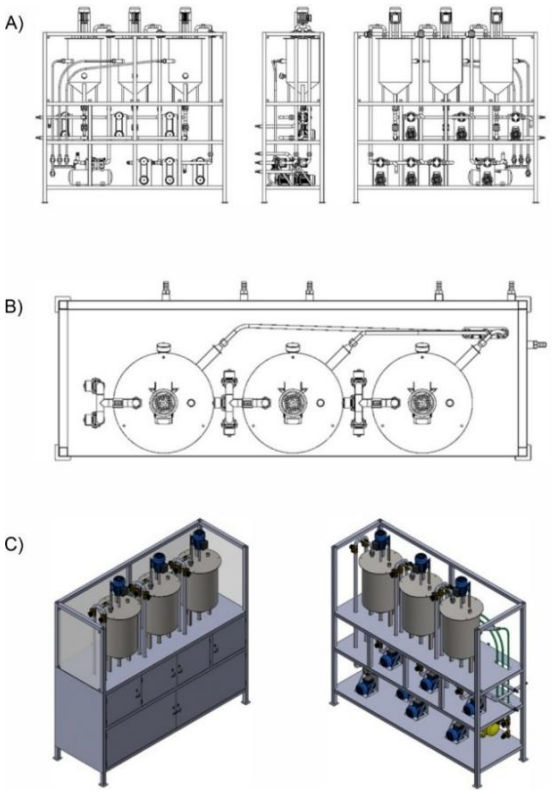
Sistem pemanas tidak langsung direncanakan menggunakan kompresor udara untuk mengalirkan udara menuju unit pemanas listrik berdaya nominal 2.000 W. Udara yang dipanaskan selanjutnya diarahkan menuju jaket reaktor melalui katup pengatur. Gambar 8 memperlihatkan susunan saluran udara pada tiga reaktor. Evaluasi temperatur operasi, kestabilan aliran, perpindahan panas, dan pengamanan temperatur berlebih masih diperlukan pada tahap pengujian.



Gambar 8: Rancangan sistem distribusi udara pemanas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perancangan menghasilkan model perakitan tiga dimensi sistem produksi biodiesel yang mengintegrasikan rangka penopang, tiga reaktor, sistem pompa, pengaduk, pemanas, dan perpipaan. Model tampak depan, atas, dan isometrik disajikan pada Gambar 9(a)–(c). Pemodelan ini membantu memeriksa susunan komponen dan potensi interferensi mekanis sebelum fabrikasi. Selanjutnya, rangka penopang dievaluasi menggunakan metode elemen hingga untuk mengidentifikasi distribusi tegangan, perpindahan, regangan, dan faktor keamanan terhadap beban statik yang diterapkan.



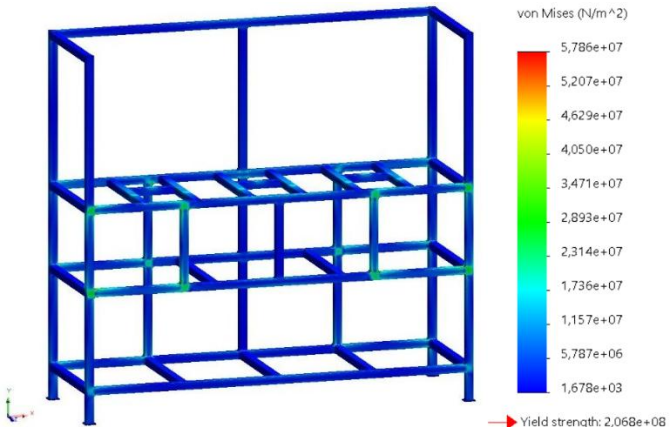
Gambar 9: Model sistem produksi biodiesel: (a) tampak depan; (b) tampak atas; (c) tampak isometrik

3.1. Hasil analisis elemen hingga

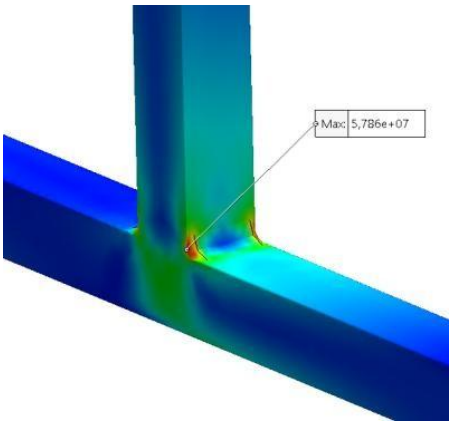
Analisis elemen hingga dilakukan pada model rangka penopang untuk memperkirakan respons struktur terhadap pembebanan statik. Parameter yang ditelaah meliputi tegangan *von Mises*, perpindahan total, regangan ekuivalen, dan faktor keamanan. Nilai-nilai hasil simulasi ditafsirkan berdasarkan kekuatan luluh material AISI 304 sebesar 205 MPa. Namun, informasi terperinci mengenai besar dan lokasi beban, batasan tumpuan, jenis elemen, ukuran *mesh*, serta uji konvergensi belum disajikan secara lengkap sehingga tingkat ketelitian model belum dapat dinilai secara independen.

3.1.1. Distribusi tegangan von Mises

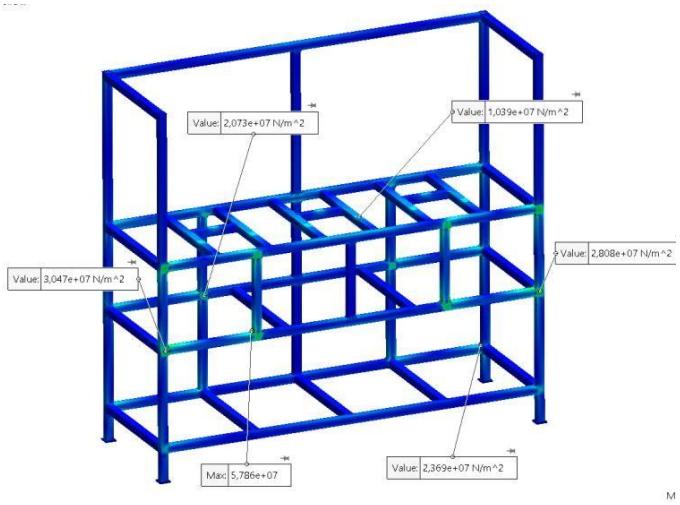
Hasil simulasi pada Gambar 10 menunjukkan bahwa tegangan *von Mises* maksimum mencapai 57,86 MPa. Konsentrasi tegangan terutama muncul di sekitar sambungan balok horizontal dan kolom vertikal pada tingkat tengah rangka. Dibandingkan kekuatan luluh AISI 304 sebesar 205 MPa, nilai tersebut setara dengan sekitar 28,2 % dari batas luluh material. Dengan demikian, pada asumsi pembebanan statik dan sifat material yang digunakan dalam model, tegangan terhitung masih berada di bawah kekuatan luluh. Hasil ini belum membuktikan ketahanan struktur terhadap beban kejut, kelelahan, atau kualitas aktual sambungan las, sehingga aspek tersebut tetap memerlukan evaluasi lebih lanjut.



(a)



(b)

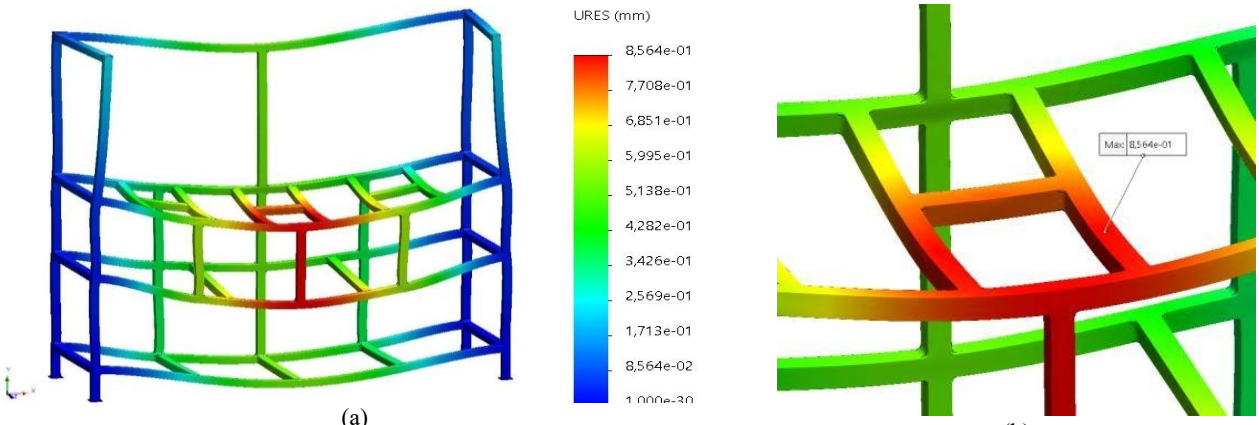


(c)

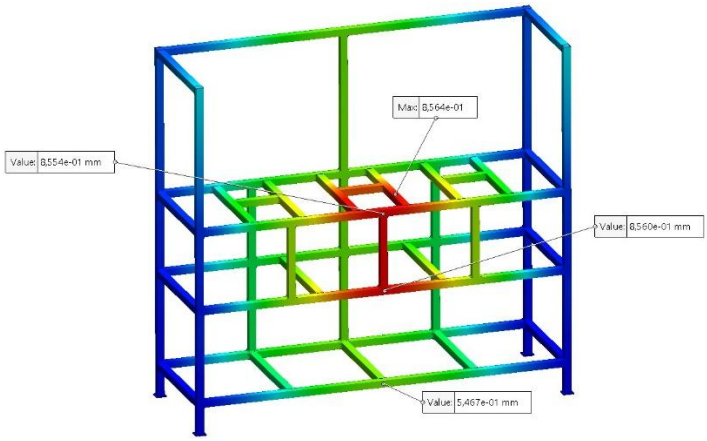
Gambar 10: (a) Distribusi tegangan *von Mises*; (b) lokasi tegangan maksimum; (c) titik konsentrasi tegangan

3.1.2. Perpindahan struktur

Kontur perpindahan pada Gambar 11 memperlihatkan bahwa lendutan terbesar terjadi di sekitar balok horizontal penopang reaktor. Perpindahan maksimum yang dilaporkan pada hasil utama adalah 0,8564 mm. Nilai ini relatif kecil dibandingkan dimensi keseluruhan rangka. Namun, penetapan batas lendutan yang dapat diterima perlu mengacu pada fungsi peralatan, toleransi penyambungan pipa, dan kriteria desain yang dinyatakan secara jelas. Oleh karena itu, hasil perpindahan ini lebih tepat dipandang sebagai perkiraan respons model statik daripada bukti akhir pemenuhan standar kelayakan layan.



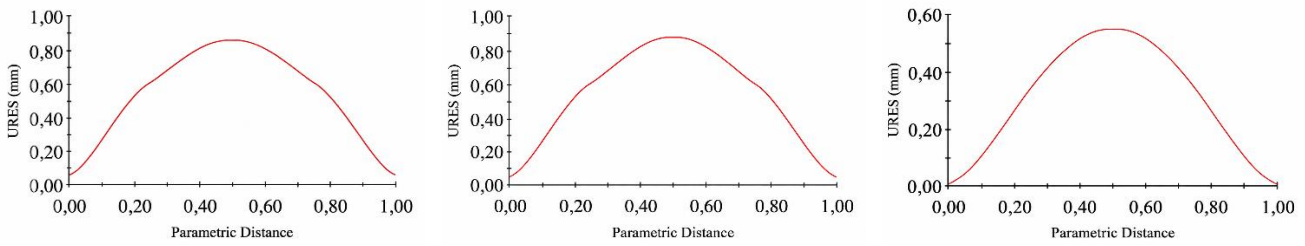
(a) (b)



(c)

Gambar 11: (a) Kontur perpindahan; (b) lokasi perpindahan maksimum; (c) distribusi perpindahan pada rangka

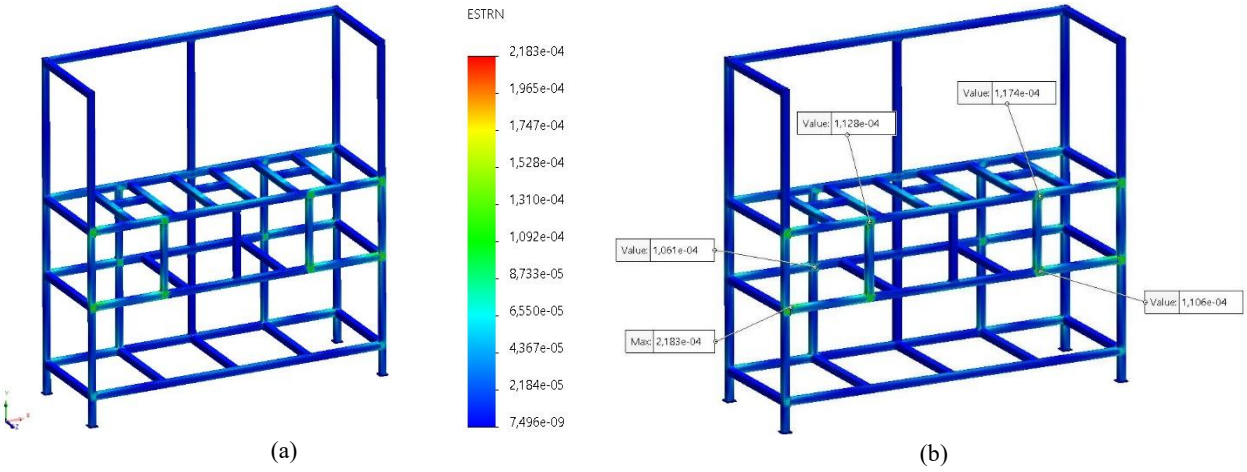
Gambar 12 memperlihatkan profil perpindahan pada balok tingkat atas, tengah, dan bawah rangka. Nilai puncak yang digambarkan pada setiap profil memperlihatkan bahwa perpindahan di tingkat atas dan tengah cenderung lebih besar dibandingkan tingkat bawah. Pola tersebut berkaitan dengan perbedaan distribusi beban dan kekakuan elemen yang menopang peralatan. Penilaian lokasi kritis perlu mempertimbangkan kondisi beban dan batasan tumpuan, sedangkan ketelitian hasil numerik harus dievaluasi melalui pemeriksaan sensitivitas mesh yang terukur.



Gambar 12: Profil perpindahan pada rangka tingkat (a) atas, (b) tengah, dan (c) bawah

3.1.3. Distribusi regangan

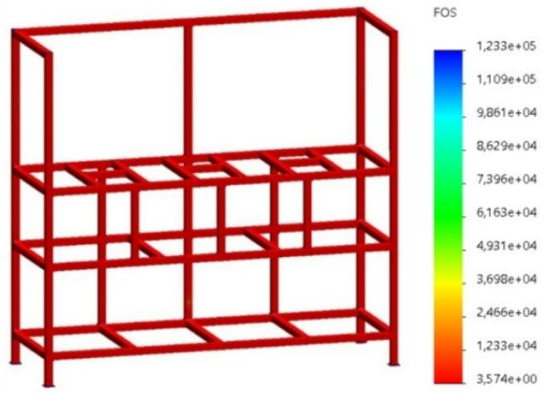
Distribusi regangan ekuivalen pada Gambar 13 memperlihatkan konsentrasi respons di sekitar sambungan elemen rangka. Nilai regangan maksimum yang dilaporkan sebesar $2{,}183 \times 10^{-4}$, setara dengan 0,02183 %. Untuk panjang acuan 1 m, nilai regangan tersebut setara dengan perubahan panjang sekitar 0,218 mm apabila diasumsikan sebagai regangan arah sepanjang elemen. Interpretasi hasil perlu dibatasi karena regangan ekuivalen tidak selalu identik dengan regangan aksial satu dimensi. Peta regangan dapat membantu mengenali daerah yang perlu diperiksa, tetapi evaluasi kelelahan dan sambungan las masih memerlukan analisis tersendiri.



Gambar 13: (a) Distribusi regangan ekuivalen; (b) daerah konsentrasi regangan

3.1.4. Evaluasi faktor keamanan

Faktor keamanan terhadap luluh dihitung dari perbandingan kekuatan luluh material dan tegangan ekuivalen maksimum. Dengan nilai 205 MPa dan 57,86 MPa, hasil perhitungan mendekati 3,54, sejalan dengan faktor keamanan minimum sekitar 3,5 yang dilaporkan pada Gambar 14. Hasil tersebut menunjukkan adanya margin kekuatan terhadap luluh pada model pembebanan statik. Namun, faktor keamanan ini tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai kapasitas operasi yang telah terverifikasi maupun bukti pemenuhan persyaratan kode desain tertentu. Penentuan kelayakan fabrikasi memerlukan pemeriksaan kondisi sambungan, potensi beban dinamis, tumpuan, dan batas penerimaan yang sesuai dengan fungsi rangka.



Gambar 14: Distribusi faktor keamanan terhadap luluh pada rangka

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa rancangan rangka penopang sistem produksi biodiesel berkapasitas 20 L per proses memiliki kekuatan struktural yang memadai terhadap batas luluh material berdasarkan simulasi elemen hingga pada kondisi pembebanan statik yang dimodelkan. Rangka berbahan baja tahan karat AISI 304 dengan profil berongga berukuran 40 × 40 mm dan ketebalan dinding 2 mm menghasilkan tegangan von Mises maksimum sebesar 57,86 MPa, atau sekitar 28,2 % dari kekuatan luluh material sebesar 205 MPa. Faktor keamanan minimum mencapai sekitar 3,5, dengan perpindahan maksimum sebesar 0,8564 mm dan regangan ekuivalen maksimum sebesar $2{,}183 \times 10^{-4}$. Konsentrasi tegangan tertinggi ditemukan pada sambungan balok horizontal dan kolom vertikal, sedangkan perpindahan terbesar terjadi di sekitar balok penopang reaktor. Temuan ini menunjukkan bahwa tegangan yang diprediksi masih berada di bawah batas luluh material pada kondisi simulasi, sekaligus mengidentifikasi sambungan rangka sebagai bagian kritis yang perlu diperhatikan dalam perancangan dan fabrikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Medan dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan melalui kontrak 3227/D6/DV.03.00/2024 atas dukungan terhadap pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menghargai bantuan seluruh pihak yang terlibat dalam kegiatan perancangan dan penyusunan manuskrip.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Surya Dharma : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan – Draf Awal.

Siti Maretia Benu : Validasi, Penulisan – Tinjauan dan Penyuntingan.

Rahmawaty : Konseptualisasi, Metodologi, Validasi.

Rihat Sebayang : Validasi dan Penulisan – Tinjauan.

Ulfa Hasnita : Investigasi, Validasi, dan Penulisan – Tinjauan.

Heru Pranoto : Metodologi, Validasi, dan Penulisan – Tinjauan.

Khairul Rahmi : Investigasi, Sumber Daya, Validasi, dan Penulisan – Tinjauan.

Rakha Arkananta : Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, dan Penulisan – Draf Awal

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abouchenari, A., Jalilpour, M., & Yazdi, M. (2024). Additive manufacturing of AISI 304L stainless steel: A review of processing parameters and mechanical performance. *Synthesis and Sintering, 4*, 87-100.

Adache, L. A., Mogaji, T. S. O., Mohammed Olabanji , & Olagoke, Z. A. (2025). Design And Finite Element Analysis Of An Extractor Machine For Castor Oil Biodiesel Production. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering, 6*(1), 34-50.

Afolabi, M., Ogechi, A., Onukogu, Igunma, T., Nwokediegwu, Z., & Adeleke, A. (2021). Advances in Reactor Design for High-Efficiency Biochemical Degradation in Industrial Wastewater Treatment Systems. *IRE Journal*. *4*(7) 274-299 .

Brahma, S., Nath, B., Basumatary, B., Das, B., Saikia, P., Patir, K., & Basumatary, S. (2022). Biodiesel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chemical Engineering Journal Advances, 10*, 100284.

Buitrago-leiva, J. N., Mejía, J. J., Puerta-ibarra, J. F., Acero-niño, I. F., Guarnizo-saavedra, A. F., Rodriguez-ferreira, J., Rojas-rodriguez, L., Hernández-torres, F. L., Arango-cotacio, C. E., Salazar-morales, J. E., Herrera-cruz, M. A., Linares-vásquez, M., Jiménez-vargas, J. F., Espíndola-díaz, J. E., Montañez-sogamoso, Ó. J., & Camps, A. (2024). Preliminary Design of Satellite Systems through the Integration of Model-Based System Engineering and Agile Methodologies: Application to the 3 ColStar Mission. *Aerospace*, *11*(756), 1–52.

Celik, H. K., Elham, A., Cinar, R., Erbil, M., Entwistle, R., Rennie, A., & Akinci, I. (2025). Development of a CAD–FEA Integrated Automation Add-In for DfAM-Aware Topology Optimization: A Case Study on an Additively Manufactured Pusher Duct Support Bracket for a Novel UAV Prototype. *Applied Sciences, 15*, 12341.

Chen, X., Li, R., Tao, Y., Tong, Y., Li, A., Mei, D., & Zhao, H. (2024). Engineering design and numerical design for chemical looping combustion reactor: A review. *Energy Reviews, 3*(3), 100100.

Chew, C. M., Teoh, H. C., Ng, L. Y., & Mah, S.-K. (2024). Fostering integration of current industry application practices in the final year integrated design project. *Journal of Computers in Education, 11*(4), 1133-1155.

Dharma, S., Silitonga, A.S., Shamsuddin, A.H., Sebayang, A.H., Jassinnee Milano, Sebayang, R., Sarjianto, Ibrahim, H., Bahri, N., B. & Damanik, N. (2023). Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45*(2), 3887-3899.

Elgharbawy, A. S., Farghali, M., Osman, A. I., Hanafy, M. A., & Al-Muhtaseb, A. a. H. (2025). Innovative biodiesel production for sustainable energy: Advances in feedstocks, transesterification, and cost efficiency. *Biomass and Bioenergy, 201*, 108114.

Jayabal, R. (2024). Advancements in catalysts, process intensification, and feedstock utilization for sustainable biodiesel production. *Results in Engineering, 24*, 103668.

Kim, B. C., Kim, H., Yoochan, M., Lee, G., & Mun, D. (2022). End-to-end digitization of image format piping and instrumentation diagrams at an industrially applicable level. *Journal of Computational Design and Engineering, 9*.

Maitra, G. M. (1994). Handbook of Gear Design: Tata McGraw-Hill.

McCarthy, M. A., McCarthy, C. T., Lawlor, V. P., & Stanley, W. F. (2005). Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I—model development and validation. *Composite Structures, 71*(2), 140-158.

Nyemba, W. R. (2025). Computer-Integrated Engineering Design and Manufacture: Modelling, Simulation, and Analysis using AutoCAD, MasterCAM, and Arena: Taylor & Francis.

Ong, M. Y., & Nomanbhay, S. (2018). Design and Modeling of an Enhanced Microwave Reactor for Biodiesel Production. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 8.

Rosalina, A., Ubaidillah, A. S., & Fipka Bisono, W. E. P. (2025). Design of a Hydraulic System for a Glycerin Waste Mixer Machine Using Finite Element Method. *Energy: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik, 15*(2), 268-282.

Sadeq, A. M., Homod, R. Z., Hussein, K. A., Togun, H., Armin, M., Isleem, H. F., Patil, A. R., & Moghaddam, A. H. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of the Total Environment*, *939*(173622), 1–28.

Suherman, I., M.Sabri, Muhammad Turmuzi, Arridina Susan Silitonga, Surya Dharma, Marnida Yusfiani. (2023). A Review of Properties, Engine Performance, Emission Characteristics and Material Compatibility Biodiesel From Waste Cooking Oil (WCO). *Automotive Experiences, 6*(3), 624-651.

Wang, W., Liu, Y., Bai, F., & Xue, G. (2021). Capture Power Prediction of the Frustum of a Cone Shaped Floating Body Based on BP Neural Network. *Journal of Marine Science and Engineering, 9*(6), 656.

Yahaya, B., Fabiyi, M. O., Apeh, E. S., & Ochei, E. S. (2018). Design And Fabrication Of Palm Kernel Shells Grinding Machine. *American Journal of Engineering Research. 7*(8), 75-83.

Zhao, X., Li, Z., Yang, B., Sun, X., Sun, G., Wang, S., & Chen, C. (2023). Microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel produced by interpass milling hybrid direct energy deposition-arc. *Journal of Materials Research and Technology, 27*, 3744-3756.