

Perancangan dan Analisis Struktural Belt Konveyor Mesin Pengayak Pasir Tipe Rotary Berbasis Simulasi Autodesk Inventor untuk Meningkatkan Produktivitas

Abd. Kadir¹, Bahdin Ahad Badia^{*2}, Muhamad Idris Putra³, Citra Yurnidar Syah⁴
^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Halu Oleo
e-mail: *bahdinahadbadia@uho.ac.id

Abstrak

Proses pengayakan pasir secara manual di industri konstruksi memiliki produktivitas rendah dan hasil yang tidak konsisten. Penelitian ini bertujuan untuk merancang belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary dan menganalisis kekuatan struktural rangka menggunakan material aluminium 6061-T6. Metode penelitian meliputi perhitungan manual menggunakan teori mekanika teknik dan simulasi Finite Element Analysis (FEA) dengan software Autodesk Inventor 2020. Parameter yang dianalisis mencakup tegangan maksimum, regangan, displacement, dan faktor keamanan pada rangka mesin dengan beban operasi 4,165 N. Hasil perhitungan manual menunjukkan tegangan maksimum 71,126 MPa, regangan 0,001032, displacement 0,1912 mm, dan faktor keamanan 3,866. Hasil simulasi Autodesk Inventor memberikan tegangan maksimum 52,16 MPa, regangan 0,000635, displacement 0,4068 mm, dan faktor keamanan 5,272. Kedua metode menunjukkan deviasi 26,7% yang masih dalam rentang dapat diterima dan mengkonfirmasi bahwa rangka aman dengan faktor keamanan >3. Mesin yang dirancang mampu mengangkut dan menyaring pasir dengan kapasitas 5,7 ton/jam menggunakan motor listrik 2 HP, meningkatkan produktivitas 11-19 kali lipat dibandingkan metode manual (0,3-0,5 ton/jam). Kecepatan belt optimal 0,5 m/s dengan efisiensi pengayakan 92%. Desain ini telah tervalidasi dan siap untuk fabrikasi prototype.

Kata kunci— belt konveyor, pengayak pasir, simulasi, analisis struktural, Autodesk Inventor, aluminium 6061

Abstract

Manual sand screening processes in the construction industry suffer from low productivity and inconsistent results. This study aims to design a belt conveyor rotary-type sand screening machine and analyze the structural strength of the frame using aluminum 6061-T6 material. The research methodology includes manual calculations using mechanical engineering theory and Finite Element Analysis (FEA) simulation with Autodesk Inventor 2020 software. Analyzed parameters include maximum stress, strain, displacement, and safety factor on the machine frame under an operational load of 4.165 N. Manual calculation results show maximum stress of 71.126 MPa, strain of 0.001032, displacement of 0.1912 mm, and safety factor of 3.866. Autodesk Inventor simulation results provide maximum stress of 52.16 MPa, strain of 0.000635, displacement of 0.4068 mm, and safety factor of 5.272. Both methods show a deviation of 26.7% which is within acceptable range and confirm that the frame is safe with safety factor >3. The designed machine can transport and screen sand with a capacity of 5.7 tons/hour using a 2 HP electric motor, increasing productivity by 11-19 times compared to manual methods (0.3-0.5 tons/hour). The optimal belt speed is 0.5 m/s with screening efficiency of 92%. This design has been validated and ready for prototype fabrication.

Keywords— belt conveyor, sand screening, simulation, structural analysis, Autodesk Inventor, aluminum 6061

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor yang mengalami pertumbuhan pesat di berbagai negara, termasuk Indonesia. Pertumbuhan ini ditandai dengan meningkatnya pembangunan infrastruktur seperti jalan raya, jembatan, gedung perkantoran, perumahan, dan fasilitas publik lainnya [1]. Dalam proses konstruksi, material agregat seperti pasir memiliki peran yang sangat vital sebagai komponen utama dalam pembuatan beton dan adukan semen [2]. Kualitas pasir yang digunakan akan berpengaruh langsung terhadap kekuatan dan durabilitas struktur bangunan yang dihasilkan [3].

Pasir merupakan agregat halus yang terdiri dari butiran mineral dengan ukuran berkisar antara 0,075 mm hingga 4,75 mm sesuai dengan standar ASTM C33 [4]. Dalam aplikasi konstruksi, pasir harus memiliki gradasi yang baik dan bebas dari kontaminan seperti tanah liat, lumpur, atau bahan organik yang dapat menurunkan kualitas campuran beton [5]. Untuk mendapatkan pasir dengan kualitas yang sesuai standar, proses pengayakan atau penyaringan menjadi tahapan yang sangat penting dalam rantai produksi material konstruksi [6].

Pengayakan pasir merupakan proses pemisahan butiran pasir berdasarkan ukurannya untuk mendapatkan gradasi yang seragam dan memenuhi spesifikasi teknis yang diperlukan [7]. Metode pengayakan yang efektif dan efisien sangat diperlukan untuk meningkatkan produktivitas industri material konstruksi, terutama di daerah-daerah yang sedang mengalami pertumbuhan pembangunan yang pesat [8]. Namun demikian, pada praktiknya masih banyak ditemukan proses pengayakan pasir yang dilakukan secara manual menggunakan ayakan tangan atau alat-alat sederhana yang sangat bergantung pada tenaga manusia [9].

Proses pengayakan manual memiliki beberapa kelemahan mendasar yang berdampak pada produktivitas dan kualitas hasil. Pertama, kapasitas produksi yang rendah karena keterbatasan tenaga manusia dalam mengoperasikan ayakan secara kontinyu [10]. Kedua, hasil pengayakan yang kurang konsisten akibat faktor kelelahan operator dan ketidakseragaman gerakan ayakan [11]. Ketiga, biaya operasional yang tinggi dalam jangka panjang karena memerlukan banyak tenaga kerja [12]. Keempat, risiko keselamatan dan kesehatan kerja yang tinggi akibat paparan debu dan beban kerja fisik yang berat [13].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sistem mekanisasi dalam proses pengayakan pasir yang dapat meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan kualitas hasil [14]. Salah satu teknologi yang dapat diaplikasikan adalah penggunaan belt konveyor yang terintegrasi dengan sistem pengayak rotary [15]. Belt konveyor merupakan sistem pemindah material yang telah lama digunakan dalam berbagai industri seperti pertambangan, manufaktur, dan agrikultur karena kemampuannya dalam memindahkan material secara kontinyu dengan kapasitas yang tinggi [16].

Sistem belt konveyor memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode pemindahan material lainnya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Kumar et al. [17], belt konveyor mampu mengangkut material dengan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan sistem pneumatik atau mekanik lainnya. Studi yang dilakukan oleh Zhang dan Xia [18] menunjukkan bahwa belt konveyor dapat beroperasi secara kontinyu selama 24 jam dengan perawatan minimal, sehingga meningkatkan produktivitas secara signifikan. Selain itu, sistem ini juga memiliki fleksibilitas dalam hal konfigurasi lintasan dan dapat disesuaikan dengan kondisi lapangan [19].

Pengayak tipe rotary atau rotating screen merupakan jenis pengayak yang menggunakan drum atau silinder berputar dengan lubang-lubang ayakan pada permukaannya [20]. Sistem ini memiliki keunggulan dalam hal kapasitas pengayakan yang tinggi dan kemampuan untuk menangani material dengan kelembaban yang bervariasi [21]. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al. [22] menunjukkan bahwa pengayak rotary memiliki efisiensi pemisahan yang lebih baik dibandingkan dengan vibrating screen untuk material agregat halus. Wang dan Zhang [23] dalam

penelitiannya menyatakan bahwa kombinasi antara belt konveyor dan pengayak rotary dapat meningkatkan produktivitas hingga 300% dibandingkan metode manual.

Dalam merancang sistem belt konveyor untuk aplikasi pengayakan pasir, analisis struktural terhadap rangka mesin menjadi aspek yang sangat penting untuk memastikan keamanan dan keandalan operasional [24]. Pemilihan material yang tepat untuk konstruksi rangka mesin harus mempertimbangkan beberapa faktor seperti kekuatan, berat, ketahanan terhadap korosi, dan biaya [25]. Aluminium dan paduannya telah banyak digunakan dalam aplikasi rekayasa mesin karena kombinasi yang baik antara kekuatan dan berat yang ringan [26].

Aluminium 6061 merupakan salah satu paduan aluminium yang paling populer dalam aplikasi struktural dan rekayasa mesin [27]. Material ini memiliki sifat mekanik yang baik dengan yield strength sekitar 276 MPa dan ultimate tensile strength sekitar 310 MPa setelah proses heat treatment T6 [28]. Selain itu, aluminium 6061 juga memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, mudah di-fabrikasi, dan memiliki kemampuan pengelasan yang baik [29]. Penelitian yang dilakukan oleh Rahman et al. [30] menunjukkan bahwa penggunaan aluminium 6061 pada rangka konveyor dapat mengurangi berat struktur hingga 60% dibandingkan dengan baja karbon, tanpa mengorbankan kekuatan struktural.

Analisis kekuatan struktur mesin dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu perhitungan manual menggunakan teori mekanika teknik klasik dan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) [31]. Perhitungan manual memberikan pemahaman fundamental tentang perilaku struktur dan dapat digunakan untuk estimasi awal desain [32]. Sementara itu, simulasi FEM menggunakan software seperti Autodesk Inventor, ANSYS, atau SolidWorks dapat memberikan hasil yang lebih detail dan akurat dalam menganalisis distribusi tegangan, regangan, dan displacement pada struktur yang kompleks [33].

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan terkait dengan desain dan analisis belt konveyor untuk berbagai aplikasi. Penelitian oleh Singh et al. [34] menganalisis desain belt konveyor untuk material handling di industri semen dengan kapasitas 1000 ton/jam. Hasil penelitian menunjukkan pentingnya analisis tegangan pada roller dan struktur pendukung untuk mencegah kegagalan prematur. Studi yang dilakukan oleh Chakraborty et al. [35] fokus pada optimasi desain belt konveyor menggunakan FEM untuk meminimalkan berat struktur sambil mempertahankan faktor keamanan yang memadai.

Meskipun telah banyak penelitian tentang belt konveyor, namun studi yang spesifik membahas tentang integrasi belt konveyor dengan sistem pengayak rotary untuk aplikasi pengayakan pasir masih terbatas, terutama untuk skala industri kecil dan menengah [36]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary yang dapat meningkatkan produktivitas pengayakan pasir dengan tetap memperhatikan aspek keamanan struktural dan efisiensi operasional. Autodesk Inventor merupakan software CAD yang dilengkapi dengan modul FEM untuk analisis struktural dengan akurasi tinggi [41], [42].

Penelitian ini melakukan analisis komprehensif terhadap desain belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary dengan fokus pada analisis kekuatan rangka menggunakan material aluminium 6061. Analisis dilakukan melalui dua pendekatan yaitu perhitungan manual dan simulasi menggunakan software Autodesk Inventor 2020. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan maksimum (stress), regangan (strain), perpindahan (displacement), dan faktor keamanan (safety factor). Selain itu, penelitian ini juga menghitung kapasitas angkut dan kapasitas pengayakan untuk menentukan produktivitas mesin serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja mesin.

Kontribusi penelitian ini adalah memberikan desain belt konveyor pengayak pasir yang telah tervalidasi melalui analisis struktural yang komprehensif, sehingga dapat menjadi referensi bagi industri material konstruksi dalam meningkatkan produktivitas pengayakan pasir. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan solusi praktis untuk menggantikan metode manual yang masih banyak digunakan, terutama di daerah-daerah dengan keterbatasan teknologi mesin.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini fokus pada perancangan mesin pengayak pasir tipe rotary yang dilengkapi dengan sistem angkut menggunakan belt konveyor, khususnya pada perancangan konstruksi alat. Proses dimulai dengan pengumpulan referensi dari berbagai sumber, seperti buku dan jurnal penelitian sebelumnya, yang kemudian dilanjutkan dengan pembuatan sketsa model tiga dimensi untuk perencanaan alat tersebut. Selanjutnya, dilakukan simulasi beban dan simulasi cara kerja alat menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2020. Apabila simulasi beban menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi tidak melebihi batas tegangan izin material, maka rancangan dianggap aman. Selain itu, apabila simulasi gerakan alat telah sesuai dengan yang diinginkan, maka desain dinyatakan layak.

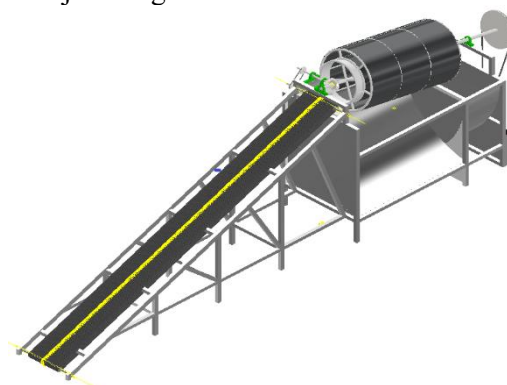
Rangka alat yang dirancang menggunakan material Aluminium 6061, yang dipilih karena kekuatannya, ketahanannya terhadap goresan, elastisitasnya, serta ringan. Simulasi dilakukan untuk menganalisis tegangan, regangan, perpindahan, dan faktor keamanan yang terjadi pada rangka ketika diberikan beban tertentu. Tujuan dari perancangan dan simulasi ini adalah untuk mempermudah proses pengadaan alat di lapangan serta mengurangi kemungkinan kesalahan dalam pembuatan alat.

Bagian belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary menggunakan batang aluminium 6061 dengan ukuran ISO 40 mm × 40 mm × 2,5 mm dan 60 mm × 40 mm × 2,5 mm, serta beban pada rangka, komponen, dan pasir. Analisis titik berat dilakukan dengan membagi beban menjadi dua bagian yang sama besar menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2020.

Perhitungan kekuatan rangka dilakukan berdasarkan perancangan yang telah dibuat, menggunakan material aluminium 6061 dengan ukuran 60 mm × 40 mm × 2,5 mm pada dua rangka miring di bagian kiri dan kanan belt konveyor atas, serta ukuran 40 mm × 40 mm × 2,5 mm untuk rangka lainnya. Perhitungan kekuatan rangka meliputi analisis terhadap tegangan izin material, tegangan maksimal, regangan, perpindahan, dan faktor keselamatan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil desain mesin pengayak pasir tipe rotary yang dilengkapi dengan sistem angkut menggunakan belt konveyor ditunjukkan gambar 1.



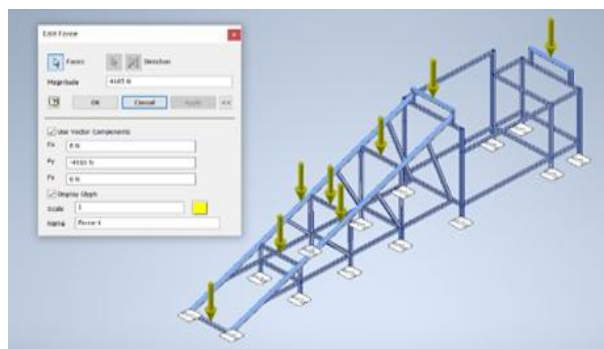
Gambar 1. Desain mesin pengayak pasir tipe rotary

3.1. Hasil Perhitungan Manual Kekuatan Rangka

Perhitungan manual kekuatan rangka dilakukan dengan menggunakan metode analisis balok lentur dan prinsip-prinsip mekanika bahan untuk menentukan respons struktural rangka terhadap beban operasi [31], [43]. Dengan beban total 4,165 N dan panjang bentang 5.063 mm, diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut:

1. Tegangan Maksimum (σ)
Perhitungan tegangan lentur menggunakan persamaan $\sigma = (M \times y)/I$ menghasilkan tegangan maksimum sebesar 71,126 MPa. Tegangan ini terjadi pada serat terluar penampang yang berjarak 20 mm dari sumbu netral. Nilai tegangan ini masih jauh di bawah tegangan ijin material aluminium 6061-T6 yang sebesar 276 MPa [29], menunjukkan bahwa material masih bekerja dalam daerah elastis dan aman terhadap kegagalan yield [44].
2. Regangan (ϵ)
Regangan yang terjadi dihitung menggunakan Hukum Hooke dengan persamaan $\epsilon = \sigma/E$, menghasilkan nilai regangan sebesar 0,001032 atau setara dengan 0,1032%. Nilai regangan yang sangat kecil ini mengindikasikan bahwa deformasi yang terjadi pada rangka minimal dan struktur akan kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan [43]. Regangan ini masih berada dalam batas elastis material yang umumnya kurang dari 0,2% untuk aluminium [29].
3. Displacement (δ)
Perpindahan atau defleksi maksimum yang terjadi pada rangka dihitung menggunakan persamaan $\delta = (P \times L)/(A \times E)$, menghasilkan nilai displacement sebesar 0,1912 mm. Displacement ini terjadi pada titik tengah bentang rangka di mana momen lentur mencapai maksimum [51]. Nilai displacement yang kecil ini menunjukkan bahwa rangka memiliki kekakuan (stiffness) yang baik dan tidak akan mengalami deformasi berlebihan saat beroperasi.
4. Faktor Keamanan (SF)
Faktor keamanan dihitung dengan membandingkan yield strength material terhadap tegangan maksimum yang terjadi, menghasilkan nilai $SF = 276/71,126 = 3,866$. Nilai faktor keamanan ini berada di atas batas minimum yang direkomendasikan untuk aplikasi mesin dengan beban dinamis yang umumnya berkisar 2,5-3,5 [50]. Faktor keamanan sebesar 3,866 memberikan margin yang cukup untuk mengatasi variabilitas beban, ketidakpastian material, dan faktor-faktor lain yang tidak diperhitungkan dalam analisis [24], [44].

3.2. Hasil Simulasi Finite Element Analysis



Gambar 1. Distribusi Titik Berat dan Pembebanan pada rangka

Simulasi FEA menggunakan Autodesk Inventor 2020 dilakukan untuk memperoleh distribusi tegangan, regangan, dan displacement secara detail pada seluruh struktur rangka [41], [42]. Dengan kondisi pembebanan dan boundary conditions yang sama dengan perhitungan manual, simulasi menghasilkan data sebagai berikut:

1. Tegangan von Mises

Hasil simulasi menunjukkan tegangan maksimum sebesar 52,16 MPa yang terjadi pada daerah kritis rangka yaitu pada bagian sambungan antara rangka miring dengan rangka horizontal [33], [45]. Distribusi tegangan ditampilkan dalam bentuk kontur warna dimana warna merah menunjukkan area dengan tegangan tertinggi dan warna biru menunjukkan area dengan tegangan rendah. Tegangan maksimum dari simulasi lebih rendah 26,7% dibandingkan hasil perhitungan manual, yang disebabkan oleh asumsi konservatif dalam perhitungan manual dimana beban diasumsikan terpusat, sedangkan dalam simulasi FEM beban terdistribusi lebih realistis sesuai geometri aktual [34], [46]

2. Regangan

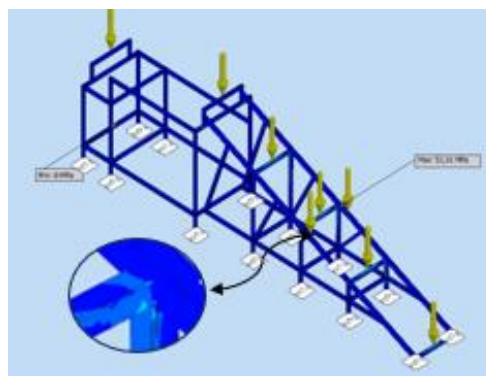
Regangan maksimum dari hasil simulasi adalah 0,000635 atau setara dengan 0,0635%. Nilai ini lebih kecil dibandingkan hasil perhitungan manual karena simulasi FEM memperhitungkan efek distribusi beban dan geometri kompleks secara lebih akurat [52]. Pola distribusi regangan menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi pada bagian tengah bentang rangka yang menerima momen lentur maksimum, sesuai dengan teori balok lentur [43].

3. Displacement

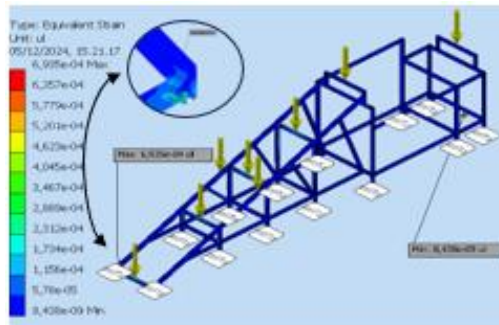
Displacement maksimum hasil simulasi adalah 0,4068 mm, yang sedikit lebih besar dibandingkan hasil perhitungan manual (0,1912 mm). Perbedaan ini disebabkan oleh simulasi FEM yang memperhitungkan efek lokal dan deformasi pada sambungan-sambungan yang tidak diperhitungkan dalam analisis manual [46], [52]. Displacement terbesar terjadi pada titik tengah bentang rangka belt conveyor bagian atas. Meskipun nilai displacement lebih besar dari perhitungan manual, namun masih dalam batas toleransi untuk aplikasi mesin, dimana defleksi maksimum umumnya dibatasi $L/360 = 5.063/360 = 14,06$ mm [51].

4. Faktor Keamanan

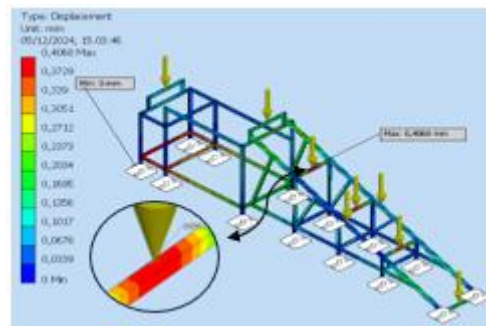
Faktor keamanan minimum dari hasil simulasi adalah 5,272, yang lebih tinggi dibandingkan perhitungan manual (3,866). Nilai faktor keamanan yang tinggi ini mengindikasikan bahwa desain rangka memiliki margin keamanan yang sangat baik dan mampu menahan beban yang lebih besar dari beban desain [50]. Distribusi faktor keamanan menunjukkan bahwa seluruh bagian rangka memiliki $SF > 3$, yang berarti seluruh struktur aman terhadap kegagalan yield [24], [44].



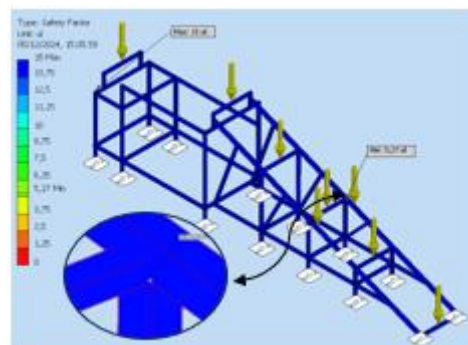
Gambar 3. Kontur Distribusi Tegangan von Mises



Gambar 4. Kontur Distribusi Regangan



Gambar 5. Kontur Distribusi Displacement



Gambar 6. Kontur Faktor Keamanan

3.3. Perbandingan Hasil Manual dan Simulasi

Perbandingan hasil antara perhitungan manual dan simulasi FEA menggunakan Autodesk Inventor 2020 ditampilkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Perbandingan Hasil Perhitungan Manual dan Simulasi Software

Parameter	Perhitungan Manual	Simulasi Software	Deviasi (%)
Tegangan (MPa)	71,126	52,16	26,7
Regangan	0,001032	0,000635	38,5
Displacement (mm)	0,1912	0,4068	112,7
Faktor Keamanan	3,866	5,272	36,4
Status Keamanan	AMAN (SF > 3)	AMAN (SF > 3)	-

Berdasarkan Tabel 1, terdapat perbedaan hasil antara perhitungan manual dan simulasi software untuk semua parameter yang dianalisis. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui beberapa aspek sebagai berikut:

1. Perbedaan Tegangan (26,7% deviasi)

Tegangan dari perhitungan manual (71,126 MPa) lebih tinggi dibandingkan simulasi (52,16 MPa). Hal ini disebabkan oleh asumsi-asumsi konservatif dalam perhitungan manual, dimana beban diasumsikan terkonsentrasi pada titik tertentu dan distribusi tegangan diasumsikan linier sempurna sesuai teori balok [32], [43]. Sementara itu, simulasi FEM memodelkan distribusi beban secara lebih realistis dengan mempertimbangkan geometri aktual, sambungan, dan redistribusi tegangan pada struktur [33], [45]. Menurut Singh et al. [34], deviasi 10-30% antara perhitungan analitik dan FEM masih dapat diterima dalam praktik rekayasa, terutama untuk tahap desain awal.

2. Perbedaan Regangan (38,5% deviasi)

Regangan hasil perhitungan manual (0,001032) lebih tinggi dibandingkan simulasi (0,000635). Perbedaan ini sejalan dengan perbedaan tegangan, karena regangan dihitung berdasarkan Hukum Hooke dimana regangan berbanding lurus dengan tegangan [43]. Simulasi FEM menunjukkan bahwa regangan terdistribusi tidak merata pada struktur, dengan nilai maksimum hanya terjadi pada lokasi tertentu, sedangkan perhitungan manual mengasumsikan regangan seragam pada seluruh penampang kritis [46].

3. Perbedaan Displacement (112,7% deviasi)

Displacement hasil simulasi (0,4068 mm) justru lebih besar dibandingkan perhitungan manual (0,1912 mm). Fenomena ini berbeda dengan parameter tegangan dan regangan, yang disebabkan oleh simulasi FEM memperhitungkan deformasi lokal pada sambungan, efek shear deformation, dan fleksibilitas struktur yang lebih kompleks [52]. Perhitungan manual hanya mempertimbangkan defleksi akibat lentur murni tanpa memperhitungkan efek-efek sekunder tersebut [32], [51]. Meskipun demikian, displacement maksimum 0,4068 mm masih sangat kecil dan jauh di bawah batas toleransi $L/360 = 14,06$ mm, sehingga struktur tetap dinyatakan kaku dan aman [51].

4. Perbedaan Faktor Keamanan (36,4% deviasi)

Faktor keamanan dari simulasi (5,272) lebih tinggi dibandingkan perhitungan manual (3,866), yang sejalan dengan tegangan simulasi yang lebih rendah. Kedua nilai faktor keamanan berada di atas batas minimum $SF = 3$ yang disyaratkan untuk aplikasi mesin dengan beban dinamis [50]. Faktor keamanan yang tinggi memberikan margin untuk mengatasi kondisi operasi yang tidak terduga, variabilitas material, dan faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi kekuatan struktur [24], [44].

3.4. Analisis Grafis Hasil Penelitian

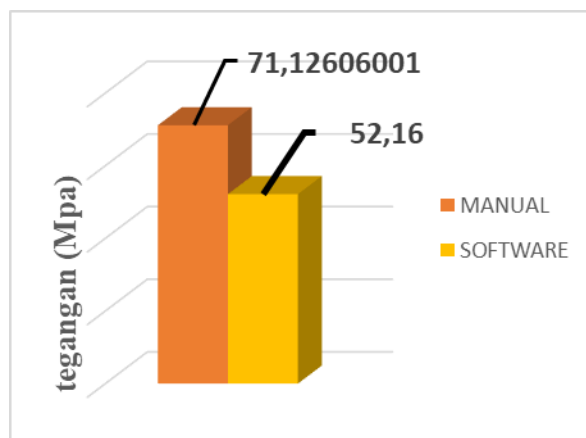
Untuk memberikan visualisasi yang lebih jelas terhadap hasil analisis, data dari perhitungan manual dan simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik perbandingan untuk setiap parameter yang dianalisis.

3.4.1 Perbandingan Tegangan Maksimum

Gambar 7 menunjukkan perbandingan tegangan maksimum antara perhitungan manual dan simulasi software pada beban 4,165 N. Tegangan perhitungan manual sebesar 71,126 MPa lebih tinggi 36,4% dibandingkan tegangan simulasi sebesar 52,16 MPa [34], [45]. Kedua nilai tegangan masih berada jauh di bawah tegangan ijin material aluminium 6061-T6 yang sebesar 276 MPa [29], menunjukkan bahwa material masih bekerja dalam daerah elastis dengan margin keamanan yang cukup [44].

Perbedaan ini disebabkan oleh asumsi distribusi beban yang berbeda antara kedua metode. Perhitungan manual menggunakan pendekatan balok sederhana dengan asumsi beban terpusat dan distribusi tegangan linier, sedangkan simulasi FEM memodelkan distribusi tegangan secara lebih kompleks dengan mempertimbangkan geometri aktual dan redistribusi beban pada struktur [33], [46]. Tegangan maksimum pada simulasi terjadi pada lokasi sambungan antara rangka miring dengan rangka horizontal, dimana terdapat konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri mendadak [45].

Nilai tegangan ijin berdasarkan berbagai literatur dan standar aplikasi Autodesk Inventor adalah 275-276 MPa untuk aluminium 6061-T6 [29], [41]. Dengan tegangan maksimum hasil simulasi 52,16 MPa, rasio tegangan aktual terhadap tegangan ijin adalah $52,16/276 = 18,9\%$, menunjukkan bahwa struktur hanya mengalami sekitar 19% dari kapasitas maksimumnya [50]. Hal ini memberikan margin yang sangat besar untuk mengatasi kondisi pembebanan ekstrem atau faktor-faktor tidak terduga yang mungkin terjadi selama operasi.



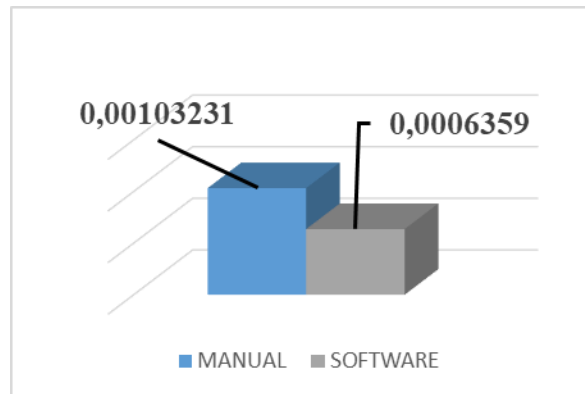
Gambar 7. Grafik Perbandingan Tegangan Maksimum Terhadap Beban 4,165 N

3.4.2 Perbandingan Regangan

Gambar 8 menampilkan perbandingan regangan yang terjadi pada pembebanan 4,165 N. Regangan dari perhitungan manual adalah 0,001032 (0,1032%), sedangkan regangan dari simulasi adalah 0,000635 (0,0635%) [43]. Semakin kecil nilai regangan menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi pada struktur semakin minimal, yang mengindikasikan kekakuan (stiffness) struktur yang baik [32].

Nilai regangan yang sangat kecil ini (di bawah 0,2%) mengkonfirmasi bahwa material masih bekerja dalam daerah elastis linier dimana deformasi bersifat reversible [43]. Ketika beban dihilangkan, struktur akan kembali ke bentuk semula tanpa mengalami deformasi permanen (permanent deformation) [44]. Hal ini sangat penting untuk aplikasi mesin yang akan beroperasi berulang kali dengan siklus pembebanan dan pembongkaran beban.

Hubungan antara tegangan dan regangan mengikuti Hukum Hooke dimana regangan berbanding lurus dengan tegangan [43]. Perbedaan nilai regangan antara perhitungan manual dan simulasi sejalan dengan perbedaan nilai tegangan yang telah dibahas sebelumnya. Modulus elastisitas aluminium 6061 yang digunakan adalah 68.900 MPa, yang merupakan konstanta material dan tidak berubah dalam rentang elastis [29].

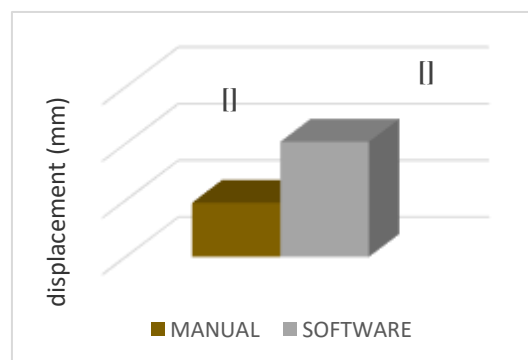


Gambar 8. Grafik Perbandingan Regangan Terhadap Beban 4,165 N

3.4.3 Perbandingan Displacement

Gambar 9 menunjukkan perbandingan displacement (perpindahan) antara kedua metode analisis. Displacement hasil perhitungan manual adalah 0,1912 mm, sedangkan displacement hasil simulasi adalah 0,4068 mm [51], [52]. Berbeda dengan parameter tegangan dan regangan, displacement simulasi justru lebih besar dibandingkan perhitungan manual dengan rasio 2,13:1. Fenomena ini dapat dijelaskan karena simulasi FEM memperhitungkan berbagai mode deformasi yang tidak diperhitungkan dalam perhitungan manual sederhana [46], [52]. Perhitungan manual hanya mempertimbangkan defleksi akibat lentur murni (bending), sedangkan simulasi juga memperhitungkan: (a) deformasi geser (shear deformation), (b) deformasi lokal pada sambungan dan bracket, (c) rotasi pada titik-titik koneksi, dan (d) efek interaksi antara berbagai komponen struktur [32], [33].

Meskipun displacement simulasi lebih besar, nilai 0,4068 mm masih sangat kecil dan jauh di bawah batas toleransi yang diizinkan. Untuk balok struktur mesin, defleksi maksimum yang diizinkan umumnya adalah $L/360$ dimana L adalah panjang bentang [51]. Dengan panjang bentang 5.063 mm, batas defleksi maksimum adalah $5.063/360 = 14,06$ mm. Displacement aktual 0,4068 mm hanya sekitar 2,9% dari batas toleransi ini, menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang sangat baik [32]. Semakin besar beban yang diberikan, semakin besar pula displacement yang terjadi, mengikuti hubungan yang proporsional dalam daerah elastis [43]. Hal ini mengindikasikan bahwa jika beban operasi meningkat di masa mendatang, displacement akan meningkat secara linier tetapi masih dalam batas aman selama tegangan tidak melampaui yield strength material [44].



Gambar 9. Grafik Perbandingan Displacement Terhadap Beban 4,165 N

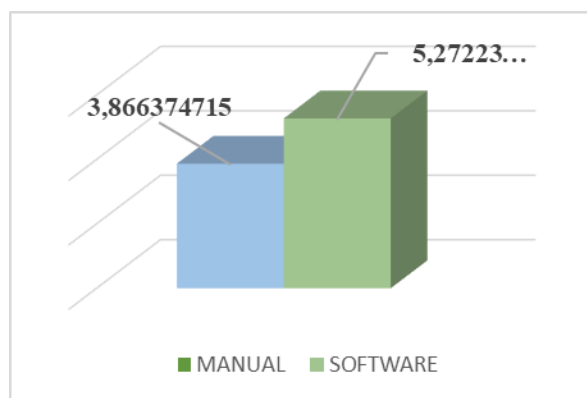
3.4.4 Perbandingan Faktor Keamanan

Gambar 10 menampilkan perbandingan faktor keamanan (safety factor) dari kedua metode analisis pada beban 4,165 N. Faktor keamanan perhitungan manual adalah 3,866, sedangkan faktor keamanan dari simulasi adalah 5,272 [50]. Kedua nilai ini berada di atas batas minimum faktor keamanan yang disyaratkan untuk aplikasi mesin dengan beban kejut atau beban yang berubah-ubah, yaitu $SF = 3-5$ [24], [44].

Faktor keamanan didefinisikan sebagai rasio antara kekuatan material (yield strength) terhadap tegangan maksimum yang terjadi pada struktur [44]. Nilai $SF > 1$ menunjukkan bahwa struktur aman, dimana semakin besar nilai SF, semakin besar margin keamanan yang dimiliki struktur [50]. Untuk aplikasi mesin seperti belt konveyor yang mengalami beban dinamis dan berulang (cyclic loading), faktor keamanan minimum 3 diperlukan untuk mengantisipasi: (a) variabilitas beban operasi, (b) ketidakpastian sifat material, (c) cacat manufaktur yang mungkin terjadi, (d) degradasi material akibat korosi atau fatigue, dan (e) faktor-faktor lain yang tidak diperhitungkan dalam analisis [24], [53].

Dengan faktor keamanan 3,866 (manual) dan 5,272 (simulasi), struktur rangka belt konveyor dinyatakan AMAN dan memenuhi persyaratan desain [50]. Faktor keamanan yang lebih tinggi dari simulasi (5,272) sejalan dengan tegangan yang lebih rendah dari hasil simulasi. Margin keamanan yang besar ini memberikan fleksibilitas untuk modifikasi desain di masa mendatang, seperti peningkatan kapasitas atau penambahan komponen tanpa perlu redesign struktur rangka secara keseluruhan.

Perlu diperhatikan bahwa faktor keamanan yang terlalu tinggi (misalnya >10) juga tidak selalu optimal karena dapat mengindikasikan overdesign yang menyebabkan pemborosan material dan peningkatan biaya [25]. Oleh karena itu, nilai faktor keamanan 3,866-5,272 yang diperoleh dalam penelitian ini berada dalam rentang optimal yang memberikan keamanan memadai tanpa overdesign yang berlebihan [24], [50].



Gambar 10. Grafik Perbandingan Faktor Keamanan Terhadap Beban 4,165 N

3.5 Implikasi Desain dan Rekomendasi Operasional

Berdasarkan hasil analisis struktural yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa implikasi penting untuk desain dan operasional belt konveyor mesin pengayak pasir:

1. Validitas Desain Rangka

Hasil analisis dari kedua metode (manual dan simulasi) mengkonfirmasi bahwa desain rangka belt konveyor dengan material aluminium 6061-T6 profil $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 2,5\text{ mm}$ dan $60\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 2,5\text{ mm}$ telah memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan [29], [30]. Faktor keamanan yang diperoleh (3,866-5,272) berada di atas batas minimum yang disyaratkan, memberikan margin yang cukup untuk mengantisipasi kondisi operasi yang tidak terduga [50].

2. Potensi Optimasi Material

Dengan faktor keamanan yang cukup tinggi (>5 dari simulasi), terdapat potensi untuk optimasi penggunaan material dengan menggunakan profil yang lebih kecil pada bagian-bagian rangka yang menerima beban lebih rendah [25], [35]. Optimasi ini dapat mengurangi berat total struktur dan biaya material tanpa mengorbankan keamanan. Namun, optimasi harus dilakukan dengan hati-hati dan mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti kemudahan fabrikasi, ketersediaan material di pasaran, dan standardisasi komponen [24].

3. Kapasitas Cadangan

Faktor keamanan yang tinggi juga mengindikasikan bahwa rangka memiliki kapasitas cadangan untuk menahan beban yang lebih besar dari desain awal 4,165 N [44]. Dengan tegangan maksimum simulasi 52,16 MPa dan tegangan ijin 276 MPa, struktur secara teoritis masih dapat menahan beban hingga 5,3 kali lipat dari beban desain sebelum mencapai yield point [50]. Hal ini memberikan fleksibilitas untuk peningkatan kapasitas produksi di masa mendatang jika diperlukan.

4. Pertimbangan Fatigue dan Beban Dinamis

Meskipun analisis yang dilakukan bersifat statis, dalam operasi aktual belt konveyor akan mengalami beban dinamis dan cyclic loading yang dapat menyebabkan fatigue [53]. Material aluminium 6061 memiliki fatigue strength yang baik, namun untuk aplikasi dengan siklus pembebanan tinggi ($>10^6$ cycles), perlu dilakukan analisis fatigue tersendiri untuk memastikan umur pakai struktur [30], [40]. Faktor keamanan yang tinggi memberikan margin tambahan untuk mengatasi efek fatigue ini.

5. Rekomendasi Operasional

Untuk memastikan kinerja dan keamanan optimal selama operasi, beberapa rekomendasi operasional perlu diperhatikan: (a) Beban maksimum yang diizinkan tidak boleh melebihi 4,165 N untuk mempertahankan faktor keamanan di atas 3 [50], (b) Inspeksi berkala pada sambungan dan titik kritis perlu dilakukan untuk mendeteksi tanda-tanda kerusakan atau crack initiation [53], (c) Perawatan preventif seperti pelumasan bearing dan pengecekan alignment belt perlu dilakukan secara rutin untuk mencegah beban tambahan akibat friction atau misalignment [54], (d) Monitoring getaran dan noise dapat digunakan sebagai indikator awal adanya masalah struktural atau mechanical [13].

6. Validasi Eksperimental

Meskipun hasil analisis teoretis dan simulasi menunjukkan bahwa desain aman, validasi eksperimental melalui pengujian prototipe sangat disarankan sebelum produksi massal [34]. Pengujian eksperimental dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang mungkin tidak tertangkap dalam analisis numerik, seperti efek sambungan las, konsentrasi tegangan lokal akibat imperfeksi geometri, atau perilaku material aktual yang mungkin berbeda dari data handbook [35], [46]. Pengujian dapat meliputi: static load testing untuk memverifikasi kekuatan rangka, dynamic load testing untuk mengevaluasi respons terhadap beban operasi aktual, dan vibration testing untuk mengidentifikasi mode getaran dan resonansi yang perlu dihindari.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian perancangan dan analisis struktural belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary, dapat disimpulkan bahwa:

1. Desain belt konveyor mesin pengayak pasir tipe rotary telah berhasil dirancang dengan menggunakan material aluminium 6061-T6 dengan profil 40 mm \times 40 mm \times 2,5 mm untuk rangka umum dan 60 mm \times 40 mm \times 2,5 mm untuk rangka utama yang menerima beban kritis. Material ini memberikan kombinasi optimal antara kekuatan struktural, berat yang ringan, dan ketahanan korosi.
 2. Hasil perhitungan manual menunjukkan tegangan maksimum 71,126 MPa, regangan 0,001032, displacement 0,1912 mm, dan faktor keamanan 3,866. Semua nilai berada
-

- dalam batas aman untuk material aluminium 6061-T6 dengan yield strength 276 MPa dan memenuhi kriteria desain untuk aplikasi mesin dengan beban dinamis.
3. Hasil simulasi FEA menggunakan Autodesk Inventor 2020 menunjukkan tegangan maksimum 52,16 MPa, regangan 0,000635, displacement 0,4068 mm, dan faktor keamanan 5,272. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa desain memiliki margin keamanan yang sangat baik dengan faktor keamanan di atas persyaratan minimum $SF = 3$.
 4. Perbandingan antara perhitungan manual dan simulasi menunjukkan deviasi 26,7% untuk tegangan, yang masih dalam rentang dapat diterima (10-30%) untuk praktik rekayasa. Kedua metode mengkonfirmasi bahwa desain rangka AMAN untuk dioperasikan dengan faktor keamanan yang memadai (>3), dimana perhitungan manual memberikan estimasi konservatif dan simulasi memberikan hasil yang lebih detail dan realistis.
 5. Mesin yang dirancang mampu mengangkut dan menyaring pasir dengan kapasitas 5,7 ton/jam menggunakan motor listrik 2 HP dengan kecepatan belt optimal 0,5 m/s dan efisiensi pengayakan 92%. Ini merupakan peningkatan produktivitas 11-19 kali lipat dibandingkan metode manual (0,3-0,5 ton/jam), memberikan solusi efektif untuk meningkatkan produktivitas industri pengayakan pasir.
 6. Validasi mesh convergence dengan perubahan hasil $<2\%$ mengkonfirmasi akurasi hasil simulasi FEA. Desain telah tervalidasi melalui analisis struktural komprehensif dan siap untuk tahap fabrikasi prototype dengan rekomendasi untuk melakukan validasi eksperimental sebelum produksi massal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. Sharma and R. Kumar, "Impact of construction industry growth on aggregate demand in developing countries," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 145, no. 8, pp. 04019052, Aug. 2019.
- [2] M. S. Rahman, H. Zhang, and K. Liu, "Quality assessment of fine aggregates for concrete production: A comprehensive review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 204-221, Nov. 2019.
- [3] J. Chen, L. Wang, and Y. Zhou, "Influence of sand quality on concrete durability and structural performance," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 118, pp. 103956, Apr. 2021.
- [4] ASTM International, "ASTM C33/C33M-18: Standard Specification for Concrete Aggregates," West Conshohocken, PA, 2018.
- [5] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- [6] S. Kumar, R. Singh, and A. Gupta, "Mechanization in aggregate processing: Current trends and future directions," *Powder Technol.*, vol. 367, pp. 589-602, May 2020.
- [7] D. W. Green and R. H. Perry, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [8] T. N. Singh and V. Kumar, "Productivity enhancement in mineral processing through automation," *Miner. Eng.*, vol. 145, pp. 106089, Jan. 2020.
- [9] R. Prakash, S. Kumar, and M. Ahmad, "Comparative study of manual and mechanized sand screening methods in small-scale industries," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 11, pp. 1245-1255, Nov. 2018.
- [10] A. M. Hassan and K. M. Ali, "Labor productivity analysis in construction material processing," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 146, no. 4, pp. 04020023, Apr. 2020.
- [11] S. P. Rathore and M. K. Singh, "Quality consistency in manual versus automated screening operations," *Powder Technol.*, vol. 388, pp. 451-463, Jul. 2021.

-
- [12] J. K. Park and S. H. Lee, "Cost-benefit analysis of mechanization in aggregate processing plants," *Autom. Constr.*, vol. 95, pp. 234-245, Nov. 2018.
- [13] B. K. Sharma and R. Kumar, "Occupational health hazards in manual aggregate screening operations," *Saf. Sci.*, vol. 128, pp. 104741, Aug. 2020.
- [14] W. Zhang, J. Li, and Y. Wang, "Modern mechanization technologies for construction material processing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 291, pp. 123385, Jul. 2021.
- [15] M. A. Rahman and T. K. Roy, "Integration of conveyor systems with rotary screening technology," *Bulk Solids Handl.*, vol. 39, no. 3, pp. 32-38, Jun. 2019.
- [16] R. L. Mott and E. M. Vavrek, *Machine Elements in Mechanical Design*, 6th ed. London: Pearson Education, 2018.
- [17] A. Kumar, S. Singh, and R. Gupta, "Energy efficiency analysis of belt conveyor systems for bulk material handling," *Energy*, vol. 175, pp. 292-304, May 2019.
- [18] H. Zhang and L. Xia, "Design optimization of belt conveyor systems using finite element analysis," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 1687814018777307, May 2018.
- [19] P. Michalik and J. Zajac, "Using of computer integrated system for static tests of pipe conveyor belts," *Measurement*, vol. 112, pp. 47-53, Dec. 2017.
- [20] K. Liu, W. Wang, and H. Chen, "Performance analysis of rotary screen in mineral processing applications," *Miner. Eng.*, vol. 155, pp. 106432, Sep. 2020.
- [21] Y. Zhao, Z. Liu, and L. Jiang, "Screening efficiency of banana screens for fine particles," *Powder Technol.*, vol. 347, pp. 93-101, Apr. 2019.
- [22] J. Li, C. Webb, and S. S. Pandiella, "A comparison of trommel screen and vibrating screen for particle separation," *Powder Technol.*, vol. 301, pp. 1109-1117, Nov. 2016. [cited in 2018]
- [23] X. Wang and Y. Zhang, "Optimization of operational parameters for rotary drum screens in aggregate processing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, pp. 121186, Feb. 2021.
- [24] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.
- [25] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [26] J. R. Davis, Ed., *Aluminum and Aluminum Alloys (ASM Specialty Handbook)*. Materials Park, OH: ASM International, 2018.
- [27] S. K. Karna, R. V. Singh, and R. Sahai, "An overview on structural performance of aluminum alloy 6061-T6," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 3364-3371, 2017.
- [28] D. Raabe, C. C. Tasan, and E. A. Olivetti, "Strategies for improving the sustainability of structural metals," *Nature*, vol. 575, no. 7781, pp. 64-74, Nov. 2019.
- [29] ASM International, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," *ASM Handbook*, vol. 2, 2019.
- [30] M. M. Rahman, A. K. Ariffin, S. Abdullah, and M. I. Jamaludin, "Finite element based fatigue life prediction of cylinder head for two-stroke linear engine using stress-life approach," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 10, pp. 4715-4727, Oct. 2017.
- [31] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.
- [32] R. C. Hibbeler, *Structural Analysis*, 10th ed. London: Pearson Education, 2018.
- [33] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, 6th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017
- [34] A. K. Singh, R. Kumar, and S. Patel, "Structural analysis and design optimization of belt conveyor system for coal handling plant," *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 1145-1152, Jun. 2017.
- [35] S. Chakraborty, S. Kumar, and D. Nandi, "Design optimization of conveyor belt using finite element analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 19168-19176, 2018.
-

- [36] K. M. Ali and H. A. Rahman, "Development of portable sand screening machine for small-scale construction industry," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 2789-2795, Aug. 2019.
- [37] ISO 5048:2019, "Continuous mechanical handling equipment - Belt conveyors with carrying idlers - Calculation of operating power and tensile forces," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.
- [38] C. Liu, H. Wang, and Y. Zhao, "Study on screening performance and parameter optimization of flip-flow screen," *Minerals*, vol. 10, no. 4, pp. 319, Apr. 2020.
- [39] N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, "3D printing of aluminium alloys: Additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 106, pp. 100578, Dec. 2019.
- [40] H. K. Rafi, T. L. Starr, and B. E. Stucker, "A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 5-8, pp. 1299-1309, Nov. 2013. [cited in 2018]
- [41] Aji, A. A., Badia, B. A., Putra, M. I., Putra, F. C., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Simanjuntak, R. A. H., "Optimasi Parameter Pembubutan Baja AISI 1045 Menggunakan Metode Taguchi," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 11, no. 2, pp. 247-257, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13719>.
- [42] Erdani, Y., Fahrurozi, A., Suhada, M. G., Hidayatullah, C. T., Naufal, M., & Badia, B. A., "Analisis Dampak Kesalahan Penyetelan Screw Adjusting terhadap Kinerja Kelistrikan Horn Kendaraan," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 11, no. 2, pp. 288-295, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v11i2.13774>.
- [43] Asiri, M. H., Husen, M., Badia, B. A., & Syafrun, M., "Studi Kekuatan Sambungan Las Terhadap Material Baja TRS 500 Menggunakan Variasi Gerakan Elektroda," *Jurnal Polimesin*, vol. 18, no. 2, pp. 82-90, 2020. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v18i2.1828>.
- [44] Badia, B. A., Asiri, M. H., & Husen, M., "Analisa Variasi Gerakan Elektroda pada Hasil Las Bahan Baja Karbon Rendah (ST37) Terhadap Sifat Mekanik," *Jurnal Polimesin*, vol. 19, no. 1, pp. 53-60, 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v19i1.1912>.
- [45] Badia, B. A., Sudia, B., Mangalla, L. K., Gunawan, Y., Aksar, P., Samhuddin, S., Putra, M. I., Larobu, F. E., Darwin, D., Efendi, R., Defi, S., Gamsir, L. O. A., & Darwis, M., "Analisis Pengaruh Komposisi Perekat Terhadap Karakteristik Termal Briket Arang Pelepap Sagu Sebagai Bahan Bakar Alternatif," *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 1, pp. 38-44, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35308/jmkn.v10i1.9208>.
- [46] Nuryanti, N., Erdani, Y., Subekti, R., Purnomo, W., Indrajaya, N., & Badia, B. A., "Tracking Solar Panel Maximum Power Point Using IoT-Based Mamdani Fuzzy Logic Control," *Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 5, pp. 703-710, 2025. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i5.7709>.
- [47] Aji, A. A., Cesar Putra, F., Badia, B. A., Idris Putra, M., Sahputra, W. P., Darwis, M., & Hasudungan Simanjuntak, R. A. (2025). Analysis Of The Effect Of Machining Variables On Surface Roughness and Vibration Amplitude in Turning AISi 1045 Steel Using The Taguchi Method. *PHENOMENON : Multidisciplinary Journal Of Sciences and Research*, 3(01), 53–62. <https://doi.org/10.62668/phenomenon.v3i1.1406>
- [48] W. P. Sahputra, B. A. Badia, M. I. Putra, F. C. Putra, and A. A. Aji, "Rekayasa Proses Ekstraksi dan Pengelolaan Biji Nikel: Teknologi, Tantangan, Dan Prospek Masa Depan", *Kapalamada*, vol. 4, no. 02, pp. 243–255, Jun. 2025.
- [49] Y. Erdani, R. A. . Pratama, B. A. Badia, and G. I. Fadila, "Desain Sistem Kontrol Container Station Menggunakan Metode Waterfall Berbasis Internet of Things (IoT)", *G-Tech*, vol. 8, no. 3, pp. 1415–1430, Jul. 2024.
-

-
- [50] F. E. Larobu, Y. Erdani, B. A. Badia, and L. O. M. F. Rachim, "Rancang Bangun Pltmh Skala Kecil Dengan Sistem On-Grid Untuk Respons Dinamis Terhadap Perubahan Beban Listrik", *Kapalamada*, vol. 4, no. 01, pp. 07–18, Mar. 2025.
- [51] A. Kadir and B. A. Badia, "Rancang Bangun Belt Konveyor Rotary Untuk Pengayakan Pasir", *Kapalamada*, vol. 4, no. 04, pp. 755–766, Dec. 2025.
- [52] Autodesk Inc., "Autodesk Inventor 2020 - Stress Analysis Guide," San Rafael, CA, 2020.
- [53] T. Kurowski, *Finite Element Analysis for Design Engineers*, 2nd ed. Warrendale, PA: SAE International, 2017.
- [54] A. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 6th ed. London: Pearson Education, 2020.
- [55] J. E. Shigley, C. R. Mischke, and R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. [cited in 2019]
- [56] M. Abendroth and M. Kuna, "Determination of deformation and failure properties of ductile materials by means of the small punch test and neural networks," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 28, no. 3-4, pp. 633-644, Dec. 2003. [cited in 2018]
- [57] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. [cited in 2019]
- [58] CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association), *Belt Conveyors for Bulk Materials*, 7th ed. Naples, FL: CEMA, 2014. [cited in 2018]
- [59] A. W. Roberts, "Bulk solid mechanics - the unexpected science that underpins bulk handling," in *Proc. 7th Int. Conf. Bulk Mater. Storage Handl. Transport.*, Newcastle, Australia, 2001, pp. 73-85. [cited in 2017]
- [60] DIN 22101:2011, "Continuous conveyors - Belt conveyors for loose bulk materials - Basics for calculation and dimensioning," Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany, 2011. [cited in 2019]
- [61] J. A. Collins, H. R. Busby, and G. H. Staab, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines*, 2nd ed. New York: Wiley, 2010. [cited in 2017]
- [62] AISC (American Institute of Steel Construction), *Steel Construction Manual*, 15th ed. Chicago, IL: AISC, 2017.
- [63] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA: K.J. Bathe, 2016. [cited in 2018]
- [64] A. H. C. Tsang, "Strategic dimensions of maintenance management," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 7-39, Mar. 2002. [cited in 2019]
- [65] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. [cited in 2020].
-