

ANALISA BED MILLING MESIN FRAIS MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

ANALYSIS OF MILLING MACHINE BED USING THE FINITE ELEMENT METHOD

¹Qomaruzzaman, ²Muhammad Joddy Setiawan, ³Muhammad Rayhan Yusuf,
⁴Muhammad Rian, ⁵Rahmatullah

^{1,2,3,4,5}Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

Jl. Raya Jakarta Km 5 No.6, Kalodran, Kec. Walantaka, Kota Serang, Banten 42183

email : 1dosen10017@unpam.ac.id

ABSTRAK

Analisis struktur rangka mesin frais (*bed milling*) merupakan aspek penting dalam memastikan kekakuan, kestabilan, dan ketelitian hasil proses pemesinan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kekuatan dan deformasi bed mesin frais menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method – FEM*). Model tiga dimensi dibuat berdasarkan dimensi aktual mesin frais tipe medium dengan material utama besi cor FC-25, yang umum digunakan karena memiliki kekakuan tinggi dan redaman getaran yang baik. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis numerik dengan pembebanan yang mewakili gaya potong maksimum pada proses milling. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi tegangan (*von Mises stress*), deformasi total, dan faktor keamanan (*safety factor*) pada berbagai titik kritis bed mesin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada area penumpu meja kerja dan dudukan kolom utama dengan nilai masih berada di bawah batas luluh material ($\sigma < 0,6 \times \sigma_y$). Deformasi maksimum tercatat sebesar 0,12 mm pada kondisi pembebanan ekstrem, yang masih dalam batas toleransi geometrik untuk operasi milling presisi. Nilai faktor keamanan rata-rata berada pada kisaran 2,5–3,0, menandakan desain bed cukup aman terhadap beban dinamis pemotongan. Dengan demikian, metode elemen hingga terbukti efektif dalam mengevaluasi performa struktural mesin frais dan dapat digunakan sebagai dasar perbaikan desain untuk meningkatkan kekakuan serta stabilitas getaran.

Kata Kunci : Mesin Frais, Bed Milling, Metode Elemen Hingga, Tegangan, Deformasi.

ABSTRACT

The structural analysis of a milling machine bed is a critical aspect to ensure rigidity, stability, and machining accuracy. This study aims to analyze the strength and deformation characteristics of a milling machine bed using the Finite Element Method (FEM). A three-dimensional model was developed based on the actual dimensions of a medium-sized milling machine, with the main material being cast iron (FC-25), chosen for its high stiffness and good vibration damping properties. The simulation was carried out using numerical analysis software under load conditions representing the maximum cutting force during milling operations. The parameters analyzed included von Mises stress distribution, total deformation, and safety factor at critical points of the machine bed. The results showed that the maximum stress occurred in the support area of the worktable and the column base, with values remaining below the material's yield strength limit ($\sigma < 0.6 \times \sigma_y$). The maximum deformation was recorded at 0.12 mm under extreme loading, still within the allowable geometric tolerance for precision milling operations. The average safety factor ranged from 2.5 to 3.0, indicating that the bed design is structurally safe under dynamic cutting loads. Thus, the Finite Element Method proves effective for evaluating the structural performance of milling machines and can serve as a basis for improving bed design to enhance rigidity and vibration stability.

Keywords : Milling Machine, Bed Milling, Finite Element Method, Stress Analysis, Deformation.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dalam sektor industri berlangsung sangat cepat dan menuntut setiap pihak untuk terus menyesuaikan diri. Hal ini juga berlaku pada perusahaan manufaktur yang mengaplikasikan teknologi produksi guna memperbaiki serta meningkatkan efisiensi proses, sehingga dapat menghasilkan produk berkualitas

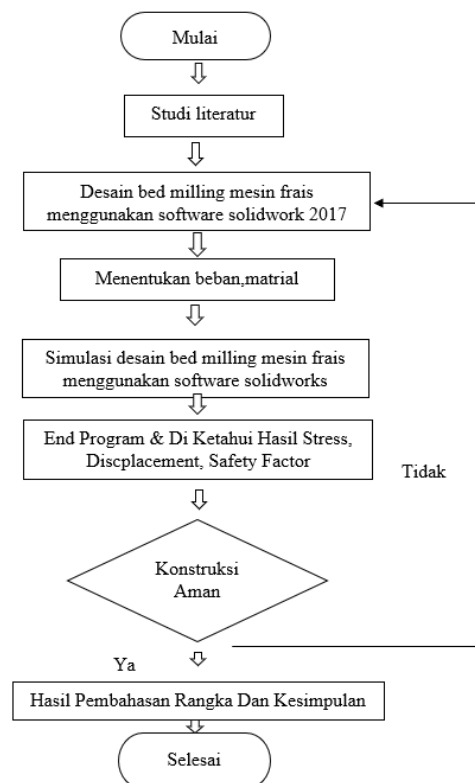
tinggi. Salah satu peralatan yang dimanfaatkan dalam menghasilkan barang industri adalah mesin frais. Mesin frais banyak digunakan dalam pembuatan komponen logam melalui berbagai proses pengerjaan tertentu. Karena mesin ini berperan penting dalam proses produksi, tingkat ketelitian hasil yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kondisi kerja mesin itu sendiri (Tolosi et al., 2015).

Mesin frais (*milling machine*) merupakan jenis mesin perkakas yang melakukan proses pemotongan dengan cara menyayat permukaan benda kerja memakai alat potong yang memiliki banyak mata potong dan berputar. Alat pemotong ini umum dikenal sebagai pisau *frais (milling cutter)*. (Rikosa et al., 2018). Di antara berbagai tipe pada mesin *frais*, mesin *bed milling* yang memiliki keunggulan, dalam hal kekakuan struktur dan kemampuan dalam menahan beban berat, sehingga sangat cocok digunakan untuk proses pemotongan logam dalam skala besar maupun pekerjaan berat. *Bed* berfungsi sebagai fondasi mesin, menopang semua komponen penting mesin (Omar et al., 2023). Salah satu komponen utama pada mesin *bed milling* adalah rangka atau *bed* mesin, yang berfungsi sebagai pondasi untuk menopang seluruh struktur mesin serta menahan gaya-gaya yang timbul selama proses pemesinan. Kinerja *bed* mesin sangat berpengaruh terhadap presisi dan stabilitas proses *frais*. Oleh karena itu, analisa terhadap kekuatan dan kekakuan struktur *bed* mesin menjadi hal yang penting untuk memastikan bahwa komponen tersebut mampu menahan beban kerja tanpa mengalami deformasi yang berlebihan atau bahkan kerusakan. Untuk menganalisa kekuatan dan perilaku struktur *bed* mesin secara lebih mendalam dan akurat, metode elemen hingga dapat digunakan. Metode elemen hingga merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk merepresentasikan karakteristik kekuatan suatu struktur. Prinsip dasar dari metode ini terletak pada proses pemecahan suatu sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil (elemen), sehingga solusi dari sistem yang rumit dapat diperoleh melalui penyatuan hasil solusi dari masing-masing elemen tersebut. (Isworo, Hajar dan Ansyah, 2018) (Abbas et al., 2020).

Metode ini merupakan pendekatan numerik yang dapat memungkinkan simulasi dan analisis struktur secara detail dengan mempertimbangkan berbagai kondisi pembebanan dan batas. Dengan menggunakan metode elemen hingga, analisa tegangan, deformasi, serta faktor keamanan dari *bed* mesin dapat dihitung dan divisualisasikan secara digital. Hasil dari analisis ini sangat berguna dalam proses perancangan ulang (*redesign*) maupun peningkatan performa mesin dari segi kekuatan dan umur pakai.

II. METODE PELAKSANAAN

Metodologi penelitian ini dimulai dengan studi pustaka menggunakan beberapa literatur diantaranya jurnal penelitian, dan buku. Selanjutnya dilakukan analisa terhadap bed milling mesin frais menggunakan metode elemen hingga, selanjutnya adalah menarik kesimpulan dan membuat laporan dan penelitian pun selesai dilakukan. Alur penelitian tersebut dapat disajikan dalam diagram 3.1 dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir penelitian

Proses prosedur penelitian ini disusun secara sistematis untuk menganalisis struktur bed milling mesin frais menggunakan metode elemen hingga Tahapan-tahapan dalam penelitian ini terbagi menjadi 3 tahapan, yaitu sebagai berikut:

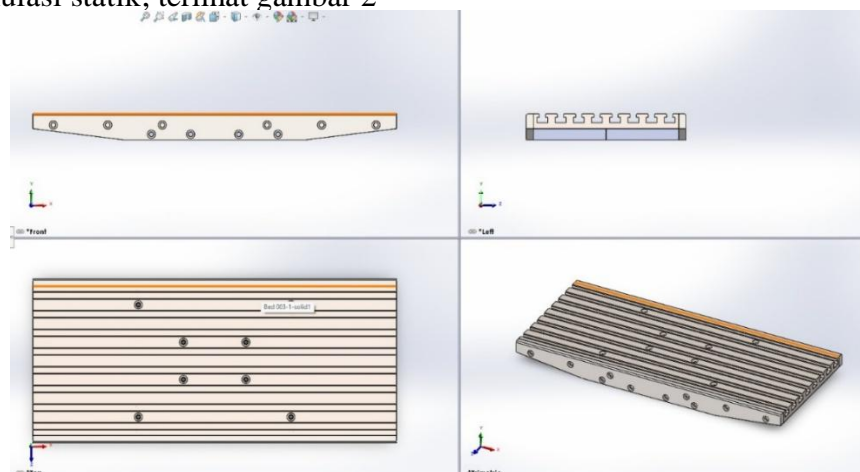
1. Pre-process
 - a. Melakukan penelusuran referensi berupa buku, jurnal, dan sumber terpercaya lainnya yang berkaitan dengan mesin frais, struktur bed milling, metode elemen hingga, serta penggunaan perangkat lunak *SolidWorks* Simulation sebagai alat bantu analisis.
 - b. Menyiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan berupa pc desktop, serta *software* yang digunakan, pita ukur, kertas serta pulpen.

- c. Mengidentifikasi bentuk, ukuran, dan fungsi dari komponen bed milling yang akan dianalisis. Data dapat diperoleh melalui pengukuran langsung, data teknis atau gambar teknik
 - d. Menggambar sketsa kasar bed milling pada kertas agar mempermudah dalam proses pembuatan 3D pada software solidworks yang akan digunakan sebagai acuan.
 - e. Menggambar model 3D dari bed milling mesin frais yang menggunakan perangkat lunak CAD, yaitu SolidWorks, berdasarkan data dan dimensi yang telah diperoleh.
2. Process
- a. Pemodelan 3D Komponen bed milling, pada tahapan ini dilakukan dengan menggambar sketsa 2D bed milling berdasarkan data ukuran aktual atau rancangan, setelah itu dilakukan extrude atau fitur pemodelan lainnya hingga terbentuk model 3D dari bed milling.
 - b. Penentuan material komponen pada bed milling yaitu berupa Carbon Steel-AISI 304 setelah itu mengatur jenis material pada properti part untuk digunakan dalam simulasi.
 - c. Pembuatan studi simulasi (*simulation setup*), Membuat studi baru dengan jenis Static Analysis untuk menganalisis tegangan dan deformasi akibat pembebanan.
 - d. Pemberian kondisi pembebanan, memberikan gaya tekan atau beban operasional yang bekerja pada permukaan bed saat proses frais berlangsung.
 - e. Menjalankan simulasi, sistem akan menghitung hasil simulasi berdasarkan parameter input yang sudah diberikan.
 - f. Analisis hasil simulasi, meninjau hasil simulasi tegangan, deformasi, faktor keamanan.
3. Post-process
- a. Menampilkan hasil simulasi yang dihasilkan oleh *SolidWorks 2024* yang ditampilkan secara visual dalam bentuk grafik warna (*contour plot*), jenis-jenis hasil yang ditampilkan simulasi tegangan, deformasi dan faktor keamanan.
 - b. Menyimpan gambar hasil simulasi (*screenshot*) dalam format JPEG/PNG dan menyusun data numerik dan grafik hasil simulasi.

- c. Memberikan penjelasan teknis terhadap hasil yang diperoleh: posisi tegangan tertinggi, besarnya deformasi, dan keamanan struktur bed milling.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada desain struktur bed mesin frais yang ditampilkan, bentuk geometris dari bed telah divisualisasikan secara jelas sehingga dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai distribusi massa dan titik tumpu dari seluruh komponen yang terpasang di atasnya. yang merinci berat masing-masing komponen penyusun sistem bed milling, mulai dari table (meja kerja), saddle, base, hingga elemen-elemen pendukung lainnya. Informasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai-nilai gaya yang bekerja secara statik pada struktur bed mesin frais." "Dengan mendasarkan pembebanan pada data berat aktual setiap komponen, proses perhitungan dan analisis dapat dilakukan secara lebih akurat dan realistis, sehingga hasil simulasi numerik maupun pendekatan analitik yang dilakukan dapat mencerminkan kondisi riil yang terjadi selama operasi pemesinan. Proses ini sangat penting guna mengevaluasi sejauh mana struktur bed mampu menahan beban operasional tanpa mengalami deformasi yang mengganggu fungsi mesin secara keseluruhan. Desain model dan kondisi pembebanan statis tersebut divisualisasikan secara rinci pada Gambar 4.8, yang menggambarkan arah pembebanan, titik-titik penerapan gaya, serta kondisi tumpuan yang digunakan dalam simulasi statik, terlihat gambar 2

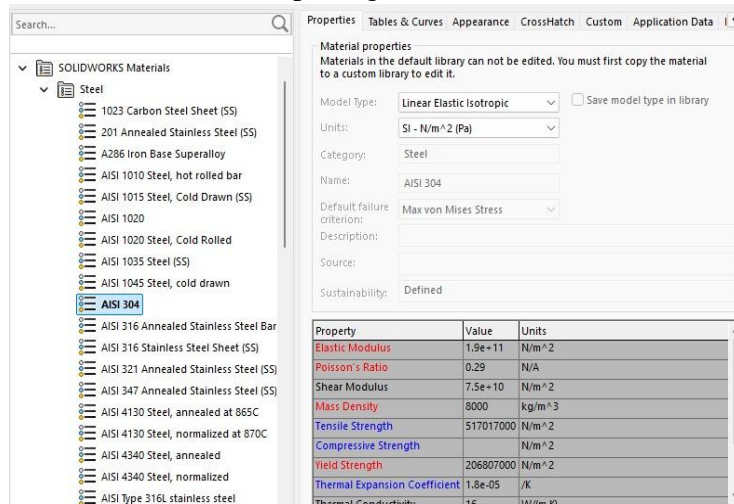


Gambar 2 bentuk bed milling mesin frais

Gambar 2 menunjukkan desain bed milling mesin frais, posisi *bed* ini berada pada *Bed milling mesin frais* , mengetahui kekuatan *desain bed* maka perlu dilakukan perhitungan pada bed itu sendiri secara numerik dan analitik, untuk mendapatkan hasil yang baik.

A. Verifikasi Material Bed Milling Mesin Frais

Material yang digunakan untuk komponen bed pada desain mesin frais ini telah diverifikasi sebagai jenis baja tahan karat (stainless steel) dengan spesifikasi SS AISI 304. Verifikasi ini dilakukan melalui fitur material library pada perangkat lunak SolidWorks Premium 2017, di mana material dipilih dan ditetapkan secara langsung pada tahap awal proses pemodelan 3D sebelum dilakukan simulasi. Pada saat proses verifikasi, jenis material yang digunakan dapat dikonfirmasi melalui tab 'Material Properties' yang tersedia pada tampilan pengaturan properti material. Informasi lengkap mengenai sifat mekanik material, seperti modulus elastisitas, kekuatan tarik, rasio Poisson, dan densitas, secara otomatis terintegrasi ke dalam sistem simulasi berbasis metode elemen hingga (FEM) untuk mendukung keakuratan analisis struktural." "Hasil verifikasi pemilihan material ini dapat dilihat secara visual dalam tampilan laporan hasil running simulasi yang dihasilkan oleh SolidWorks Simulation. Gambar 3 berikut ini menunjukkan tangkapan layar (screenshot) dari bagian laporan simulasi, yang menampilkan detail spesifikasi material SS AISI 304 yang digunakan dalam analisis. Dengan demikian, dapat dipastikan bahwa seluruh proses perhitungan tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada struktur bed mesin frais ini telah mengacu pada karakteristik material yang sesuai dan tervalidasi dalam perangkat lunak

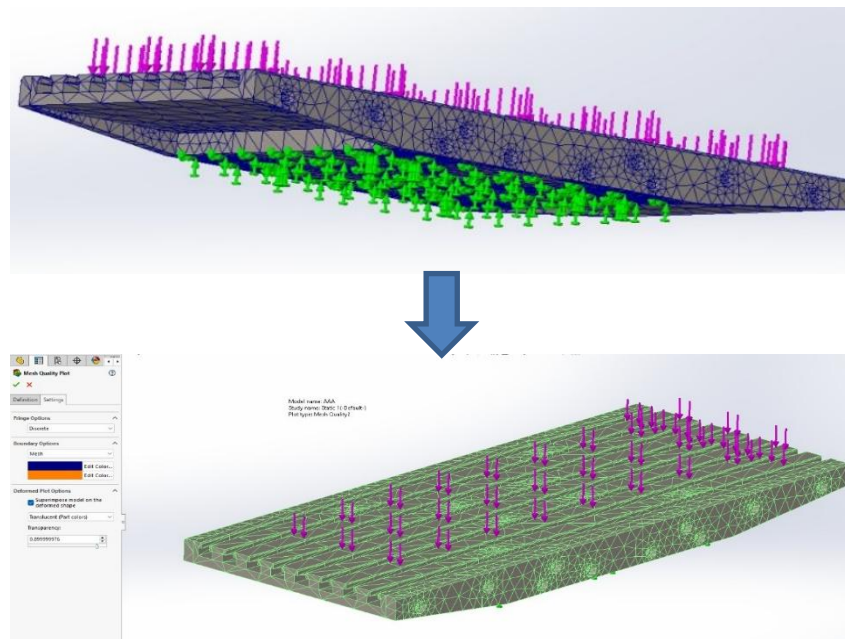


Gambar 3. Material bed (SS 304)

B. Menentukan Meshing Bed Milling Mesin Frais

Desain *meshing* dilakukan secara maksimal, dengan penentuan constraint atau tumpuan berdasarkan posisi rancangan. Beban sebesar 3500 kg, mencakup berat meja dan

benda kerja, diberikan sebagai pembebanan tertinggi yang ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah.



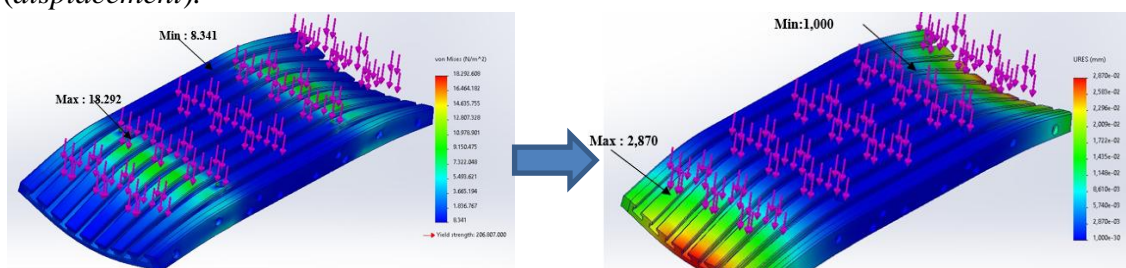
Gambar 4 Proses meshing bed milling mesin frais

Untuk nilai meshing pada bed milling mesin frais terlihat pada gambar 4. Mesh Quality Plot di bawah menunjukkan bahwa geometri telah berhasil dibagi menjadi elemen-elemen mesh dengan kualitas yang baik. Elemen-elemen mesh ditampilkan dalam warna hijau, menunjukkan pembentukan elemen tetrahedral tiga dimensi. Model memiliki mesh yang cukup rapat dan merata di seluruh permukaan bed mesin, khususnya pada area-area yang menerima pembebanan langsung. Model 3D dari desain bed mesin frais ini telah disesuaikan dengan pengaturan visualisasi pada perangkat lunak SolidWorks Simulation dengan cara menerapkan opsi transparansi pada bagian material. Pengaturan transparansi tersebut diatur pada level 0,899999976 melalui fitur 'Translucent - Part Colors', yang memungkinkan pengguna untuk melihat secara menyeluruh struktur mesh elemen hingga (finite element mesh) tanpa terhalang oleh tampilan solid dari permukaan model. Langkah ini bertujuan untuk memudahkan proses evaluasi kualitas dan kerapatan mesh, serta memastikan bahwa distribusi elemen pada seluruh permukaan model telah merata dan sesuai untuk keperluan simulasi pembebanan statik." "Pada model tersebut juga ditampilkan vektor-vektor gaya berupa panah berwarna ungu yang mengarah ke bawah (negatif sumbu-z), yang merepresentasikan arah pembebanan statik yang diterapkan pada permukaan meja kerja (table). Beban tersebut memiliki nilai total sebesar 3.500 kg, yang merupakan akumulasi dari beban komponen mesin di bagian atas

seperti meja kerja, perlengkapan penjepit, serta estimasi berat benda kerja yang dikerjakan pada saat proses pemesinan.

C. Analisa *Von Misses Stress* pada Bed Milling

Dalam analisis *numerik* ini, metode elemen hingga diterapkan melalui perangkat lunak analisis untuk memecah struktur menjadi elemen-elemen kompleks yang saling terhubung. Proses perhitungan mengacu pada metode CAE. Gambar 5. memperlihatkan hasil analisis *Equivalent von Mises stress*. Setelah simulasi selesai, diperoleh data berupa tegangan *von Mises*, regangan *1st principal*, tegangan *3rd principal*, dan perpindahan (*displacement*).



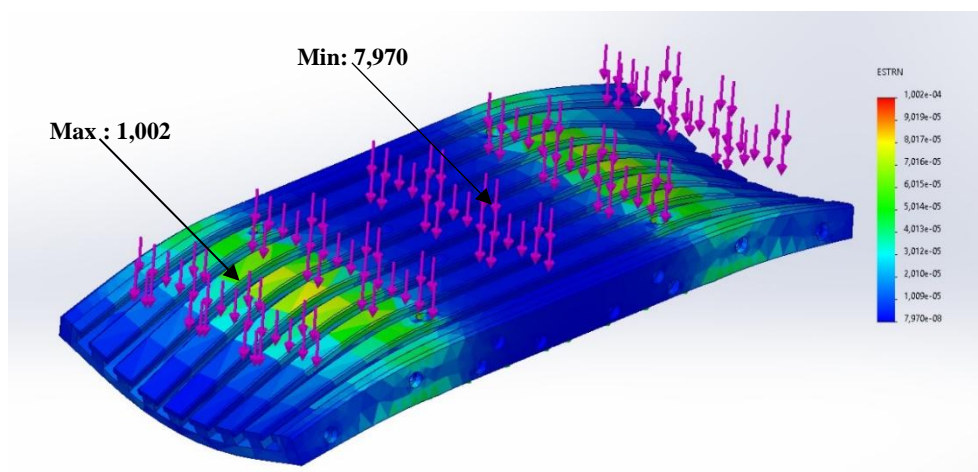
Gambar 5. *von misses stress*

Dapat dilihat bagian *von misses stress* (N/m^2) yang paling besar berada pada bagian yang ditunjukkan oleh panah merah, Bagian maksimum sebesar $18.292 N/m^2$ yang dimana nilai tersebut didapatkan dari pemodelan CAE dengan pembebanan sebesar 3500 kg (benda kerja + table), nilai terendah dapat diambil nilai $8,341N/m^2$ dengan pembebanan 3500 kg (benda kerja + table), sedangkan untuk nilai *yield strength* didapatkan $206 N/m^2$ dapat diambil kesimpulan bahwa tegangan yang terjadi pada *von misses stress* pada *Bad* aman tidak melewati batas aman-nya. Gambar 5 menyajikan hasil analisis deformasi (*displacement*) yang diperoleh melalui pengujian berbasis Computer Aided Engineering (CAE) terhadap struktur bed mesin frais. Dalam visualisasi tersebut, distribusi nilai perpindahan ditampilkan dalam bentuk kontur warna, yang menggambarkan besarnya defleksi pada masing-masing bagian struktur akibat pembebanan statik yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai maksimum dari deformasi ditunjukkan secara jelas melalui panah berwarna merah yang mengarah pada titik kritis, yaitu lokasi pada struktur yang mengalami perpindahan paling besar sebagai respons terhadap beban kerja yang diterapkan. Besarnya nilai displacement maksimum ini menjadi indikator utama dalam mengevaluasi kekakuan serta kestabilan desain struktur terhadap gaya-gaya operasional." "Sementara itu, bagian-bagian dari struktur yang menunjukkan nilai perpindahan paling kecil atau bahkan mendekati nol, ditampilkan pada

area berwarna biru tua, yang umumnya terletak pada sisi-sisi tumpuan atau bagian dasar yang terjepit secara tetap. Pemodelan bed milling mesin frais pada *Displacement* dengan pembebanan sebesar 3500 kg (benda kerja + table), terlihat hasil yang didapatkan memiliki nilai pembebanan keseluruhan sebesar 3500 kg (benda kerja + table), dan nilai terbesar pada 2, 870 mm dimana nilai *Displacement*, tersebut termasuk nilai batas aman-nya, hal ini menunjukkan bahwa dari segi defleksi yang dialami, desain struktur bed milling mesin frais mempunyai tingkat kekakuan yang baik dan aman jika digunakan dari hasil analisa struktur yang telah dilakukan, sedangkan pada nilai terendah *Displacement* yaitu 1,000 mm.

D. Strain (Regangan)

Pada gambar 6 merupakan hasil analisa pada *Strain* dengan bagian - bagian hasil pengujian CAE, nilai maksimum ditunjukkan pada panah merah. Persamaan sederhana yang membentuk model elemen hingga kemudian disusun menjadi sistem persamaan besar yang mencakup seluruh persoalan. Analisis ini digunakan sebagai dasar evaluasi struktur benda yang dirancang untuk melaksanakan beberapa fungsi sekaligus menahan gaya eksternal yang diterima. Bagian nilai terkecil dapat dilihat pada gambar 6 dibawah ini.



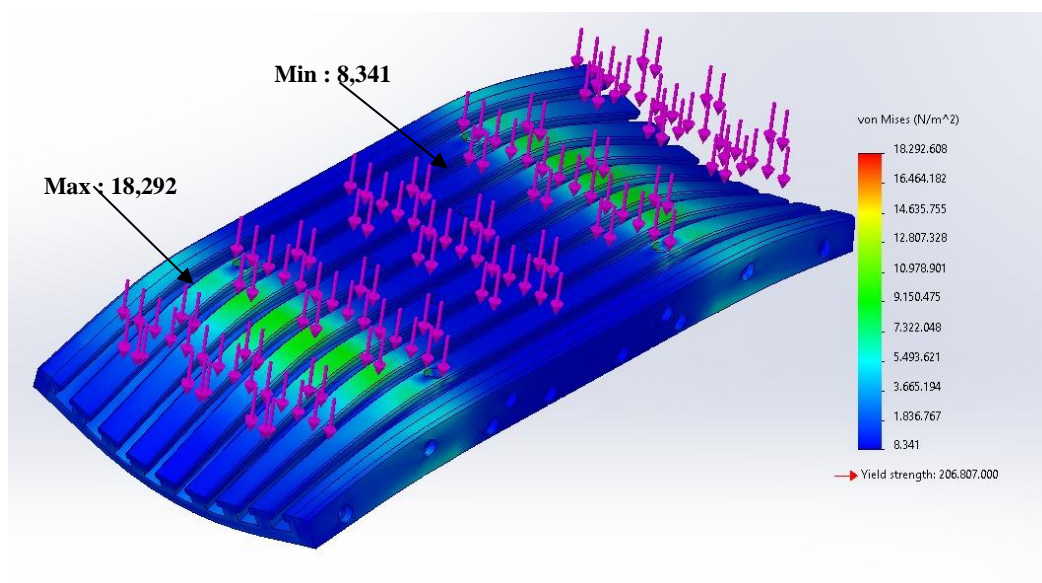
Gambar 6 Strain (regangan)

Gaya seberat 3.500 kg, yang mencakup beban meja dan benda kerja, diberikan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6. Selanjutnya, pada bed milling mesin frais dilakukan analisis statik untuk menilai defleksi dan regangan (*displacement*), sebagai verifikasi kemampuan struktur dalam menahan beban. Hasil pemodelan strain menunjukkan nilai sebesar 1,002.

Struktur *bed milling* mesin frais dirancang agar mampu menerima beban statik total 7.400 kg. Simulasi tegangan *von Mises* yang ditampilkan pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa tegangan maksimum masih di bawah *yield strength* sebesar 206 N/m². Berdasarkan nilai defleksi tertinggi, performa desain ini relatif sebanding dengan desain pada studi terdahulu. Tujuan dari rancangan ini adalah mengoptimalkan struktur agar dapat mengurangi biaya produksi komponen table bed yang dibuat menggunakan material cor.

E. Analisa Von Misses Stress pada Bad Keseluruhan

Dalam analisis *numerik* ini, metode elemen hingga diterapkan menggunakan perangkat lunak untuk memecah struktur utama menjadi elemen-elemen saling terhubung yang lebih kompleks. Perhitungan dilakukan berdasarkan metode CAE. Hasil Equivalent *von Mises* stress dapat dilihat pada Gambar 7 Setelah proses simulasi selesai, diperoleh beberapa parameter hasil, termasuk tegangan *von Mises*, regangan 1st *principal*, tegangan 3rd *principal*, dan nilai *displacement*,



Gambar 7. *von misses stress*

Dapat dilihat bagian *von misses stress* (N/m²) Bagian maksimum sebesar 18,292 N/m² yang dimana nilai tersebut didapatkan dari pemodelan *CAE* dengan pembebanan sebesar 7400 kg (berat keseluruhan, tabel 2), nilai tegangan rendah dapat diambil nilai 8,341 N/m² dengan pembebanan 7400kg (berat keseluruhan, tabel 2), sedangkan untuk nilai *yield strength* didapatkan 206 N/m² dapat diambil kesimpulan bahwa tegangan yang terjadi pada *von misses stress* pada *Bad* aman tidak melewati batas aman-nya.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

1. *Von mises stress* pada meja frais memiliki nilai 36.585 N/m² dari pemodelan *CAE* sedangkan nilai terendahnya nilai 16.681N/m² dengan pembebanan 1500 kg, pada nilai *yield strength* didapatkan 206,807N/m², tegangan yang terjadi pada *von misses stress* aman.
2. Hasil simulasi pemodelan *displacement* pada meja frais menunjukkan nilai deformasi maksimum sebesar $5,740 \times 10^2$ mm. Nilai tersebut masih berada dalam ambang batas toleransi desain, sehingga dapat disimpulkan bahwa kekakuan struktural basis meja frais mencukupi untuk memastikan stabilitas operasional dan memenuhi kriteria keamanan penggunaan berdasarkan analisis struktur yang telah dilakukan.
3. Besar dan arah gaya *Strain* pada *table bed* dilakukan analisis statik terdapat defleksi desain struktur mampu menahan beban yang diberikan sebesar 1500 kg dan didapatkan nilai sebesar $5.010^e \times 10^5$ pada pemodelannya.
4. Material struktur *bed milling* mesin frais menggunakan baja karbon tipe AISI 304. Berdasarkan hasil simulasi numerik, tegangan maksimum von Mises yang terdeteksi mencapai 18.292 N/m², sedangkan tegangan minimum berada pada 8.341 N/m², di bawah kondisi pembebanan statik sebesar 3.500 kg. Dibandingkan dengan nilai *yield strength* material sebesar $2,06 \times 10^8$ N/m², tegangan maksimum yang terjadi hanya sebesar ~0,0089% dari batas elastis material, sehingga secara struktural berada dalam zona aman dan tidak menimbulkan deformasi plastis permanen.

B. SARAN

1. Disarankan perlu adanya ketelitian lebih pada Pemodelan *bed milling mesin frais* saat melakukan perhitungan dan saat menginput data percobaan pada *software* simulasi untuk meminimalisir terjadinya salah perhitungan akibat dari *human error*.
2. Disarankan perlu adanya penggunaan software lain untuk Pemodelan *bed milling mesin frais* untuk mendapatkan hasil pemodelan yang lebih maksimal serta penambahan perhitungan analitik.
3. Disarankan perlu dilakukannya validasi Pemodelan *bed milling mesin frais* dari hasil perhitungan teori dan simulasi menggunakan metode eksperimental agar

hasil teori dan simulasi dapat dibandingkan dengan hasil uji laboratorium secara aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Pamulang Kampus Serang, rekan-rekan dosen dan mahasiswa, serta Tim Peneliti Teknik Mesin atas dukungan dan partisipasinya dalam kegiatan ini. Terima kasih juga kepada semua pihak yang telah berkontribusi, baik secara moral maupun material. Semoga kerja sama ini terus berlanjut dan memberikan manfaat bagi masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, H., Juma, D., & Jahuddin, M. R. (2020). Penerapan Metode Elemen Hingga Untuk Desain Dan Analisis Pembebanan Rangka Chassis Mobil Model Tubular Space Frame. *ILTEK : Jurnal Teknologi*, 15(02), 96–102. <https://doi.org/10.47398/iltek.v15i02.32>
- Abimanyu, J. A. A., Rohmat, N., & Arif, S. (2022). Analisis Rangka Pada Mesin Pencacah Kertas Menggunakan Software Solidworks. *Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi*, 4(1), 27. <https://doi.org/10.32493/jiptek.v4i1.25823>
- Ariansyah, R., Studi, P., Mesin, T., Teknik, F., & Yogyakarta, U. N. (2016). *PROSES PEMBUATAN PLAT COVER*.
- Cornelia, B., Rohman, M., Agus, D., & Ratnawati, D. (2020). Analisis tegangan , deformasi , dan retak pada gas turbine blade dengan metode elemen hingga Analysisvoltage , deformation , and cracks in the gas turbine blade with hinggaack element method carburizing. *Jurnal Taman ...*, 8(2), 47–54. <https://jurnal.ustjogja.ac.id/index.php/tamanvokasi/article/view/8425>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Demattacco, F. (2024). *Journal Mechanical Engineering (JME)*. Analisa Pengaruh Variasi Putaran Dan Feed Rate Dan Laju Korosi Pada Baja Karbon Sedan*Journal Mechanical Engineering (JME)*. 2(3), 240–247.
- Dural, H., & Ünal, H. (2012). The effect of graphite particle size on the mechanical and tribological properties of epoxy composites. *Polymer Composites*, 33(1), 86–94.
- Hafid Abdul. (2008). Uji Awal Upgrade Mesin Frais Konvensional Menjadi Mesin Frais CNC Berbasis PC. *Sigma Epsilon*, 12(1), 22–28.
- Heriana, H. (2019). Pengujian Ledakan Blast Explosion TNT dengan Pemodelan Menggunakan LS DYNA. *Prosiding SENIATI*, 1–6.
- Kutz, M. (2013). *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Engineering Mechanics* (Vol. 1). Wiley.
- Metode, M., & Hingga, E. (2011). 50 Analisa Tegangan-Regangan Produk Tongkat Lansia Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga Santoso Mulyadi 1. 4, 50–58.
- Mulyadi, S. (2011). Analisa Tegangan-Regangan Produk Tongkat Lansia Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal ROTOR*, 4, 1.