

Analisis Kekuatan Struktur Berbagai Tipe Cakar pada Mesin Penyiang Gulma Menggunakan Metode *Finite Element Analysis*

Angger Bagus Prasetyo^{1,*}, Kartinasari Ayuhikmatin Sekarjati², Iman Pradana A Assagaf³, Arbye S⁴, Dimas Ardiansyah Halim⁵, Iqbal Zulfikar Alief Utama⁶, Akhmad Nurdin⁷, Sutrisna⁸

^{1,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman, Potrobangsari, Magelang Utara, Magelang, Jawa Tengah, 56116

²Program Studi Teknologi Industri, Program Pendidikan Vokasi, Universitas AKPRIND Indonesia, Jl. Kalisahak, Klitren, Gondokusuman, Yogyakarta, DI Yogyakarta, 55222

³Program Studi Teknik Manufaktur Industri Agro, Politeknik ATI Makassar, Jl. Sunu No.220, Suangga, Kec. Tallo, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90211

^{6,7}Program Studi Teknologi Rekayasa Perancangan Manufaktur, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman, Potrobangsari, Magelang Utara, Magelang, Jawa Tengah, 56116

⁸Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Jl. Babarsari, Canodngcatur, Depok, Sleman, Yogyakarta, 55281

*anggerbagus@untidar.ac.id

Diterima: 05 06 2026

Direvisi: 24 06 2026

Disetujui: 31 07 2026

ABSTRAK

Cakar mesin penyiang gulma (*cultivator*) didesain untuk beroperasi pada medan lahan basah dinamis yang berpotensi menimbulkan gaya dorong berlebih dan risiko kegagalan struktural. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi tegangan ekuivalen von Mises dan faktor keamanan guna menentukan konfigurasi desain cakar yang paling aman dan handal. Analisis struktural dilakukan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbasis *Autodesk Fusion 360* dengan menerapkan kondisi pembebanan statis tunggal sebesar 200 N pada empat variasi geometri cakar, yaitu tipe C, tipe L, tipe vertikal, dan tipe horizontal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh nilai tegangan berada di bawah batas luluh material mild steel (207 MPa) sehingga seluruh draf dinyatakan aman. Nilai tegangan von Mises maksimum dan faktor keamanan minimum secara berurutan adalah 45,618 MPa dan 4,538 untuk tipe C; 60,522 MPa dan 3,42 untuk tipe L; 39,33 MPa dan 5,263 untuk tipe vertikal; serta 48,43 MPa dan 5,699 untuk tipe horizontal. Proses validasi model mengonfirmasi akurasi tinggi dengan deviasi numerik analitis manual maksimal hanya sebesar 0,02% pada tipe C. Sebagai rekomendasi, cakar tipe vertikal ditetapkan sebagai desain yang paling optimal karena paling efektif dalam mereduksi konsentrasi tegangan lokal dan menghasilkan struktur dengan integritas tinggi terhadap risiko beban kejut.

Kata kunci: Desain Cakar, Mesin Penyiang Gulma, Tegangan von Mises, Faktor Keamanan, *Finite Element Analysis* (FEA).

ABSTRACT

The cultivator claws of a weeding machine are designed to operate within dynamic wetland terrains that potentially induce excessive thrust forces and structural failure risks during operation. This study aims to evaluate the equivalent von Mises stress distribution and safety factors to determine the most secure and reliable claw design configuration. Structural analysis was performed using *Finite Element Analysis* (FEA) via *Autodesk Fusion 360* by applying a single static loading condition of 200 N across four claw geometric variations: Type C, Type L, vertical type, and horizontal type. The simulation results demonstrated that all stress values remained well below the material yield strength of mild steel (207 MPa). The maximum von Mises stress and minimum safety factor values were 45.618 MPa and 4.538 for Type C; 60.522 MPa and 3.42 for Type L; 39.33 MPa and 5.263 for the vertical type; and 48.43 MPa and 5.699 for the horizontal type, respectively. Model validation exhibited high accuracy with a minimal analytical manual deviation of 0.02% for Type C. In conclusion, the vertical type claw is recommended as the most optimal design due to its superior capacity to reduce local stress concentrations and provide high structural integrity against shock load risks.

Keywords: Claw Design, Weeder, Von Mises Stress, Safety Factor, *Finite Element Analysis* (FEA)

PENDAHULUAN

Pengendalian gulma merupakan salah satu permasalahan utama dalam budidaya tanaman. Gulma yang tidak dikendalikan dapat mengurangi hasil panen hingga 30–60%, tergantung pada jenis tanaman dan kondisi lahan.[1]. Pengendalian gulma dapat dilakukan melalui beberapa metode, yaitu penyiangan manual, pengendalian kimiawi, pengendalian biologis, dan penyiangan mekanis.[2]. Peningkatan resistensi gulma terhadap herbisida mengakibatkan residu herbisida yang lebih tinggi, berdampak terhadap kesehatan serius bagi hewan dan manusia melalui rantai makanan [3]. Penyiangan adalah salah satu kegiatan pengolahan tanah yang paling penting untuk mengendalikan tanaman yang tidak diinginkan di antara tanaman padi [4]. Penyiangan mekanis telah menarik perhatian karena keuntungannya, seperti tidak adanya kontaminasi kimia, efektivitas yang cepat, peningkatan sifat fisik tanah, dan peningkatan aerasi tanah [5]. Teknik dan peralatan penyiangan mekanis yang efisien sangat penting untuk produksi padi berkualitas tinggi [6].

Penyiangan mekanis menjadi perhatian besar karena memiliki berbagai keuntungan, seperti tidak adanya kontaminasi kimia, efektivitas kerja yang tinggi, serta mampu memperbaiki sifat fisik tanah lumpur sawah. Metode penyiangan mekanis dapat menjaga permukaan tanah tetap longgar sehingga memastikan infiltrasi air berjalan dengan baik [7]. Penyiangan mekanis dapat diaplikasikan di antara baris maupun dalam baris tanaman dengan mencabut, memotong, atau menggemburkan gulma. Meskipun demikian, gulma yang tumbuh sangat dekat dalam baris tanaman sulit dihilangkan, dan penggunaan alat penyiangan mekanis masih jarang diterapkan oleh petani akibat harga pembelian alat yang mahal. Penyiangan mekanis yang efisien sangat krusial untuk menunjang produksi padi berkualitas tinggi. Hasil efektivitas penyiangan mekanis ini sangat dipengaruhi oleh parameter teknis seperti bentuk cakar, jumlah cakar, serta sudut kemiringan cakar saat dioperasikan[8].

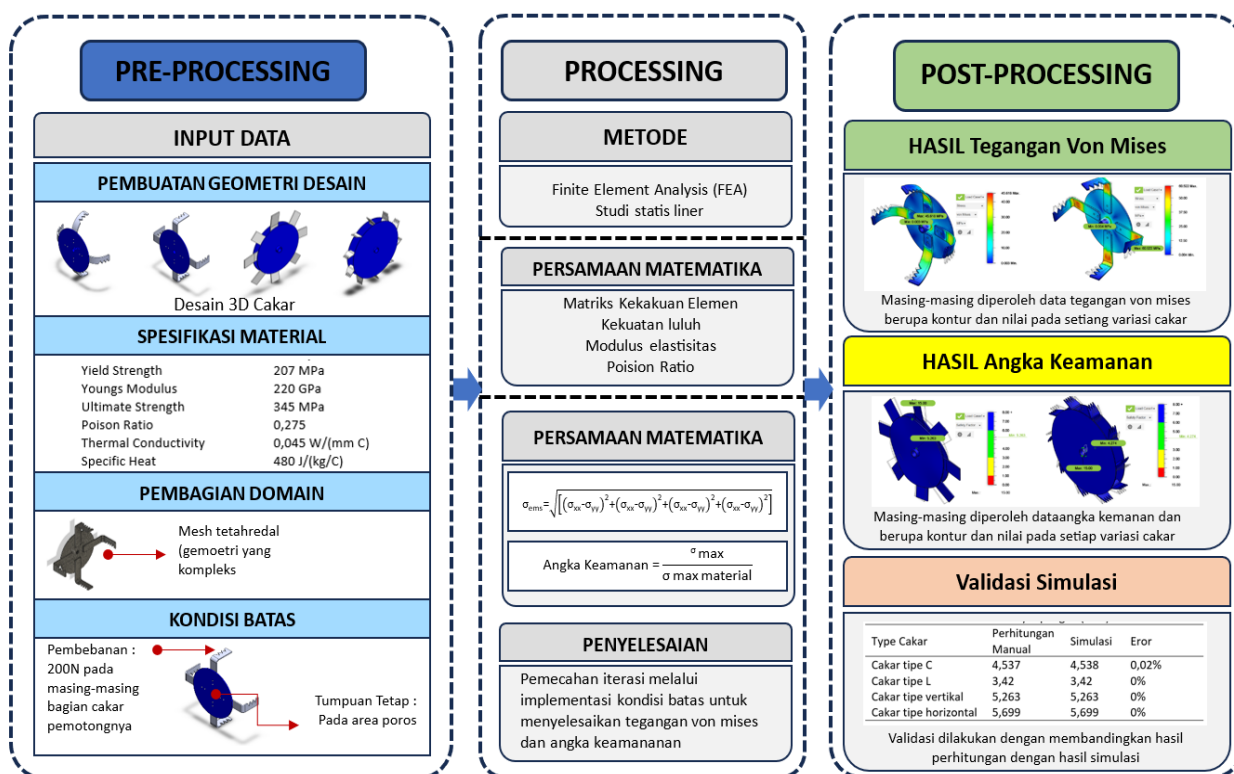
Penentuan beban kerja pada cakar mesin merupakan aspek yang krusial dianalisis guna mengetahui karakteristik gaya dinamis yang bekerja. Cakar penyanggul gulma didesain untuk beroperasi pada variasi medan yang berlumpur, semi-lumpur dan semi keras. Secara mekanis, berpotensi menimbulkan terjadinya gaya dorong, gaya tahan tanah, dan beban berlebih (*overload*), gaya tahanan tanah (*soil resistance*), dan beban kejutan (*overload*) [9]. Berat beban kerja dinamis yang diterima komponen cakar, analisis perancangan pada bagian cakar menjadi vital guna memastikan kehandalan operasional (*operational reliability*) serta mencegah terjadinya patah ketika dioperasikan di sawah. Mengingat beratnya beban kerja yang diterima komponen kontak ini, analisis perancangan pada bagian cakar menjadi sangat penting dilakukan untuk memastikan keandalan operasionalnya [10] di segala kondisi lumpur sawah di Indonesia. Teknologi pencitraan dan pemodelan saat ini sudah berkembang pesat [11] sehingga menyediakan fitur efektif guna mendeteksi kesalahan geometri [12] dalam menyelesaikan permasalahan rekayasa[13]. Salah satu teknologi pemodelan berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menjadi tren dalam dunia industri manufaktur karena mampu mengevaluasi distribusi tegangan, konsentrasi regangan dan angka keamanan. Metode ini telah terbukti mampu mendeteksi area kritis (*hotspot stress*), umur kelelahan hingga optimalisasi bentuk geometri komponen melalui visual [14]. Pendekatan berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) [15] menjadi pendekatan berbasis metode yang paling komprehensif dalam menganalisis faktor keamanan. Parameter ini menjamin keamanan struktur ketika menerima beban tarik maupun beban tekan [16][14], [17]. Selain itu, metode ini telah banyak digunakan untuk menganalisis tegangan, regangan, lelah, modal [18] hingga optimalisasi desain [19] [20].

Studi penelitian terdahulu, telah melakukan analisis struktur pada mesin penyanggul, salah satunya melakukan analisis pada rangka penyanggul gulma material AISI 316L menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dan memperoleh nilai tegangan *von Mises* sebesar $2,51 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ [16]. Penelitian mengenai struktur rangka telah banyak dilakukan, namun masih terdapat celah penelitian yang bisa dikembangkan salah satunya adalah studi komparatif mengenai pengaruh variasi geometri cakar terhadap akumulasi tegangan akibat penetrasi tanah yang masih jarang diteliti. Kebanyakan penelitian terdahulu berfokus pada kekuatan matematis rangka, sedangkan komponen cakar yang berinteraksi langsung dengan media tanah jarang dilakukan analisis kekuatan struktur yang mendalam. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada analisis struktur komparatif secara spesifik

antara emuat cakar *cultivator* dengan pendekatan simulasi berbasis pendekatan *Equivalent von Mises Stress*. Penelitian ini tidak hanya menyajikan visualisasi kontur sebaran tegangan, melainkan mengukur secara mekanis fenomena tegangan pada diskontinuitas sudut geometri pada masing masing cakar *cultivator*. Berdasarkan penjelasan diatas, tujuan penelitian ini adalah menganalisis korelasi variasi geometri terhadap tingkat penurunan konsentrasi tegangan ekuivalen *von Mises* dan peningkatan nilai faktor keamanan minimum secara terukur. Luaran penelitian ini diharapkan mampu menyajikan geometri cakar yang optimal, efisien dan memiliki margin keamanan tertinggi untuk dapat diimplementasikan secara riil dilahan pertanian.

METODE PENELITIAN

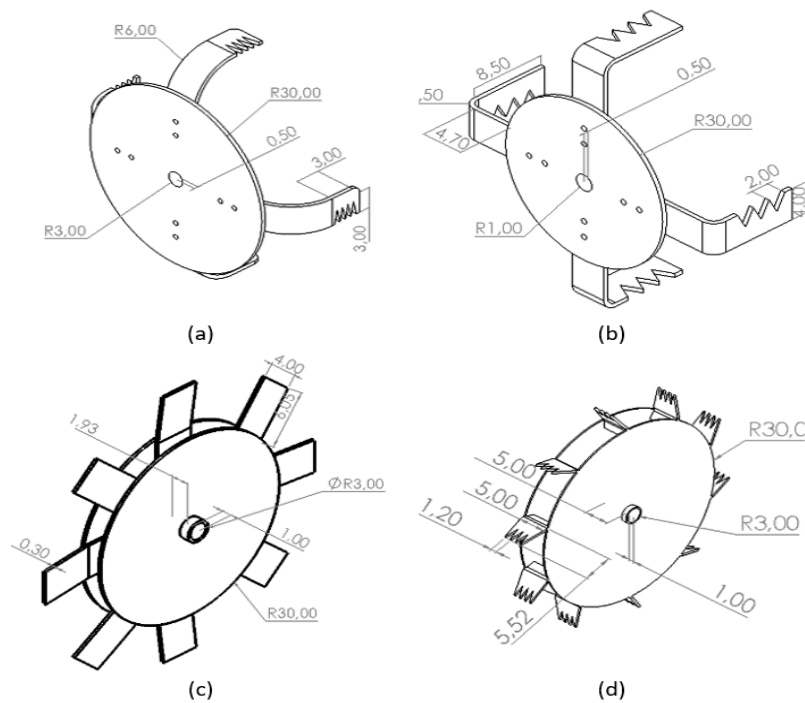
Terdapat beberapa tahapan yang harus dilakukan oleh seorang engineer pada saat melakukan simulasi, Menurut [21], [22] tahapan yang harus dilakukan diantaranya desain 3D, pembagian mesh, penentuan batas kondisi, dan pemodelan matematis [23], [24]. Secara rinci mengenai tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

1.1 Pre-Proceesing

Tahapan *pre-processing* merupakan tahap awal yang dilakukan sebelum proses simulasi dan analisis cakar *cultivator*. Desain variasi geometri cakar dibuat menggunakan perangkat lunak *Fusion 360*. Geometri yang dikembangkan mengacu pada bentuk cakar yang umum digunakan di lapangan serta mempertimbangkan kebutuhan operasional petani. Selain aspek fungsional, kemudahan transportasi, pemasangan, dan pengoperasian juga menjadi pertimbangan dalam proses perancangan. Variasi geometri cakar *cultivator* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2a, Gambar 2b, Gambar 2c, dan Gambar 2d.



Gambar 2. Desain cakar (a) Tipe C, (b) Tipe L, (c) Tipe vertikal, (d) Tipe horizontal

Bahan yang digunakan dalam pembuatan cakar cultivator pada penelitian ini menggunakan material mild steel, pemilihan material tersebut dipilih karena banyak diaplikasikan di lapangan dan harganya terjangkau [16]. Cakar cultivator akan dioperasikan menggunakan mesin dengan kapasitas sebesar 1,5 Hp. Secara umum, parameter yang digunakan pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Parameter Simulasi

Deskripsi	Nilai
Jenis material	<i>Steel, Mild</i>
Bentuk	<i>Isotropic</i>
Kekuatan Luluh	207 MPa
Modulus Elastisitas	220 GPa
Kekuatan Tarik	345 MPa
Rasio Poisson	0,275
Konduktivitas Termal	0,045 W/(mm C)
Panas Spesifik	480 J/(kg/C)
Beban	200 N

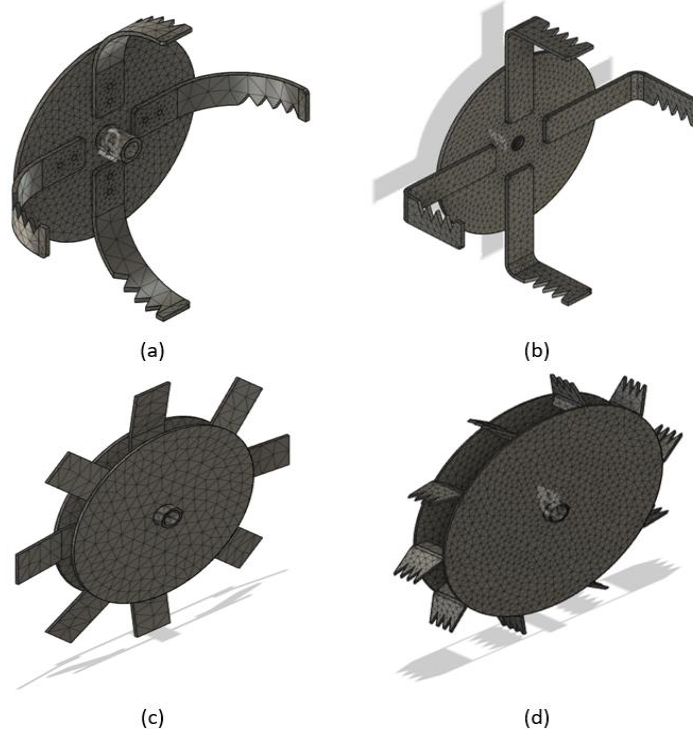
Mesh

Mesh merupakan tahapan penting yang wajib dilakukan sebelum tahap *processing*, hal ini akan berpengaruh terhadap keberhasilan simulasi pemodelan desain [25], [26]. *Mesh* merupakan bagian proses yang mempunyai tingkat kerumitan yang kompleks dalam simulasi [27]. Hasil *mesh* akan berpengaruh terhadap waktu, konvergensi dan keakuratan dalam simulasi [12], [28]. Kesalahan dalam pembuatan mesh akan berakibat *error* dalam simulasi, dan berdampak terhadap pengulangan simulasi dan memakan waktu lebih lama [28], [29]. Ada tiga jenis mesh yang dipergunakan dalam simulasi diantaranya adalah *tetrahedral mesh*, *hexahedral mesh* dan *polyhedral mesh*. Pada penelitian ini, jenis mesh yang diterapkan adalah mesh tetrahedral. Jenis ini dipilih karena memiliki tingkat fleksibilitas tinggi dan adaptasi dalam memetakan geometri khususnya cakar cultivator yang memiliki geometri

dan diskontinuitas sudut yang bergaram [30], [31]. Visualisasi *mesh* ditunjukkan pada Gambar 3a, Gambar 3b, Gambar 3c, dan Gambar 3d. Guna menjamin independensi hasil simulasi, parameter kontrol *mesh* menggunakan skala ukuran berbasis *Curvature Based Mesh Size*. Ukuran *mesh absolut* sebesar 2,0mm pada area kritis (ujung pemotong dan daerah filet menggunakan *fitur local mesh refinement* dan ukuran elemen global 5,0 mm pada pirisan cakar. *Growth rate* diatur dengan nilai standart 1,5 agar perubahan dapat bertransisi secara halus demi menjaga kestabilan matriks kekuatan elemen. Kualitas *mesh* dipantau melalui indikator *Average Jacobian Matrix* dan *Aspect Ratio*. Implementasi parameter diatas menghasilkan kepadatan domain diskretisasi yang bervariasi pada setiap tipe cakar, menyesuaikan dengan kompleksitas geometrinya. Detail jumlah entitas *mesh* untuk keempat variasi dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil *Mesh*

Tipe Cakar	<i>Nodes</i>	<i>Elements</i>
Cakar Tipe C	12723	5959
Cakar Tipe L	10867	5380
Cakar Tipe vertikal	6754	3130
Cakar Tipe horizontal	24096	11567



Gambar 3. *Mesh* cakar (a) Tipe C, (b) Tipe L, (c) Tipe vertikal, (d) Tipe horizontal

Safety Factor

Sifat beban yang bekerja menjadi faktor kunci dalam penentuan kriteria keamanan perancangan struktur, hal ini dikarenakan karakter beban tersebut berdampak terhadap stabilitas dan interitas dari struktur komponen. Berdasarkan [32] Indikator keamanan dari sebuah desain dilihat dari nilai minimum dari *safety factor*-nya . Nilai tertinggi Faktor keamanan dapat ditentukan dengan perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan tegangan luluh suatu bahan [33]. Ketepatan menentukan angka keamanan tergantung pada beban kerja yang diidentifikasi. Pembebanan yang terjadi di lapangan tidak selalu bersifat statis sempurna melainkan mengalami fluktuasi gaya, getaran dan kejutan mekanis selama siklus. Oleh sebab itu, penentuan angka keamanan tidak

diperkenankan harus sesuai dengan komponen yang menerima beban. Sebagai acuan dalam proses perancangan, kriteria angka keamanan berdasarkan metode pembebanan dapat dilihat pada Tabel 2. Kemudian, untuk mevalidasi nilai angka keamanan dapat divalidasi dengan persamaan matematis dibawah ini:

$$Safety\ Factor = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max\ material}} \quad (1)$$

SF adalah faktor keamanan, σ_{max} adalah tegangan material yang diijinkan, $\sigma_{max\ material}$ adalah tegangan pada material.

Tabel 2. Kriteria Berdasarkan Metode Pembebanan [34].

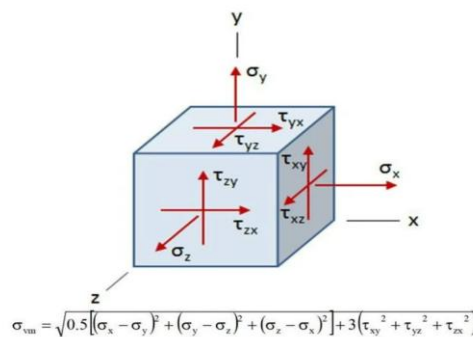
Jenis Beban	Kriteri Angka Keamanan
Beban statis	1,5 – 2,0
Beban dinamis/berulang	2,0 – 3,0
Beban kejut	3,0 – 5,0
Beban berubah ubah	5,0 – 10,0

Von Mises Stress

Menurut kriteria luluh *von mises*, suatu bahan tertentu tidak akan mulai mengalami keruntuhan selama nilai maksimum energi distorsi tidak melebihi energi distorsi yang diperlukan untuk menghasilkan bahan tersebut dalam uji tarik [35]. Tegangan *von mises* adalah nilai tegangan ekuivalen yang digunakan untuk menentukan apakah suatu material tertentu akan mulai luluh, dimana suatu material tertentu tidak akan luluh selama nilai tegangan *von mises* maksimum tidak melebihi kekuatan luluh material tersebut [36], [37]. Ilustrasi komponen tegangan yang bekerja dalam koordinat kartesius (x,y,z) yang menjadi dasar perhitungan tegangan ekuivalen von mises ditunjukkan pada Gambar 7. Representasi enam kubus terdiri dari tegangan normal ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) bekerja secara tegak lurus dengan permukaan bidang elemen, sedangkan tegangan geser ($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) sejajar dengan permukaan bidang permukaan [38], [39].

Tegangan *von mises* memungkinkan para insinyur untuk memahami kinerja bagian yang dibebani secara kompleks dengan uji tarik uniaksial yang sederhana. Kriteria EMS telah menjadi yang paling banyak digunakan dalam industri dan sains, antara lain di menentukan tegangan uniaksial ekivalen, batas kekuatan luluh atau parameter lain yang digunakan misalnya dalam persamaan konstitutif [40], [41]. persamaan akhir untuk kriteria (*Equivalent of von Mises Stress*) EMS tegangan setara dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma_{ems} = \sqrt{\left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]}$$



Gambar 4. Enam komponen tegangan digunakan untuk merepresentasikan persamaan tegangan *von mises*. [42]

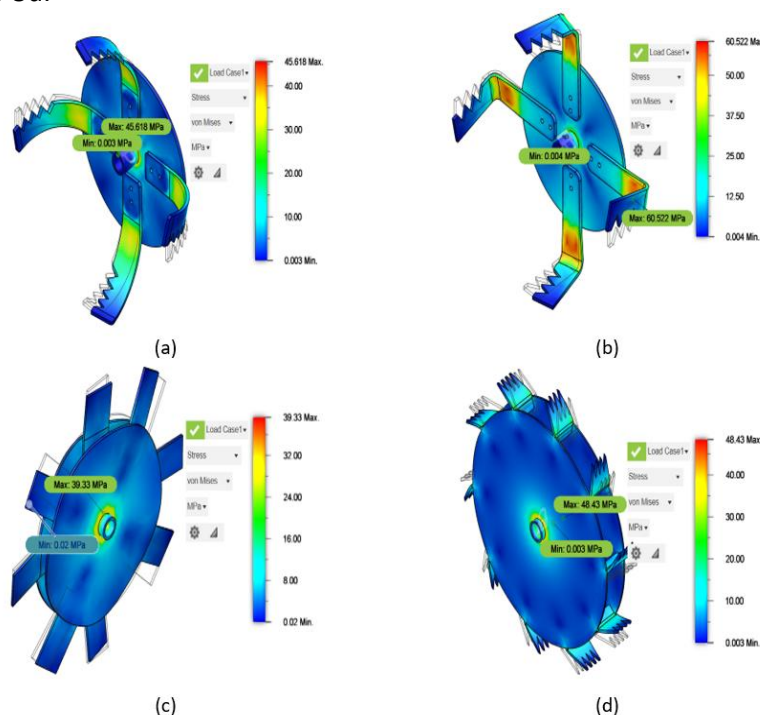
Formulasi matematis diatas digunakan untuk memprediksi nilai ambang batas kegagalan suatu material. Formulasi matematis ini bermanfaat untuk para insinyur melakukan evaluasi keamanan struktur dalam menerima beban dengan menyederhanakan nilai tegangan uniaxial tunggal dengan data uji tarik material . Sifat komparatif

dari hasil tarik dan tegangan setara *von mises* memungkinkan kita menghitung nilai fungsional dengan cepat, seperti faktor keamanan. Bila menggunakan kekuatan luluh sebagai tegangan maksimum yang diijinkan, faktor keamanan harus lebih dari satu agar desain tidak mengalami deformasi permanen[43]. Secara sederhana, faktor keamanan ini memberikan target kinerja minimum mutlak untuk desain [40].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Von Mises Stress

Teori energi distorsi *von mises* merupakan salah satu kriteria yang digunakan oleh para desainer untuk memprediksi kegagalan struktur, tegangan *von Mises* idealnya digunakan untuk material ulet [11]. Penentu keamanan sebuah material saat digunakan terletak pada tegangan *von Mises*-nya. Kegagalan terjadi apabila nilai tegangan *von Mises*-nya melebihi dari kekuatan material sebenarnya [44]. Berdasarkan hasil simulasi pemodelan Tipe cakar *cultivator* dengan beban 200N diperoleh nilai tegangan *von Mises* secara berturut-turut 25,618 MPa, 60,522 MPa, 39,33 MPa dan 48,43 MPa. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 5a, Gambar 5b, Gambar 5c, dan Gambar 5d.



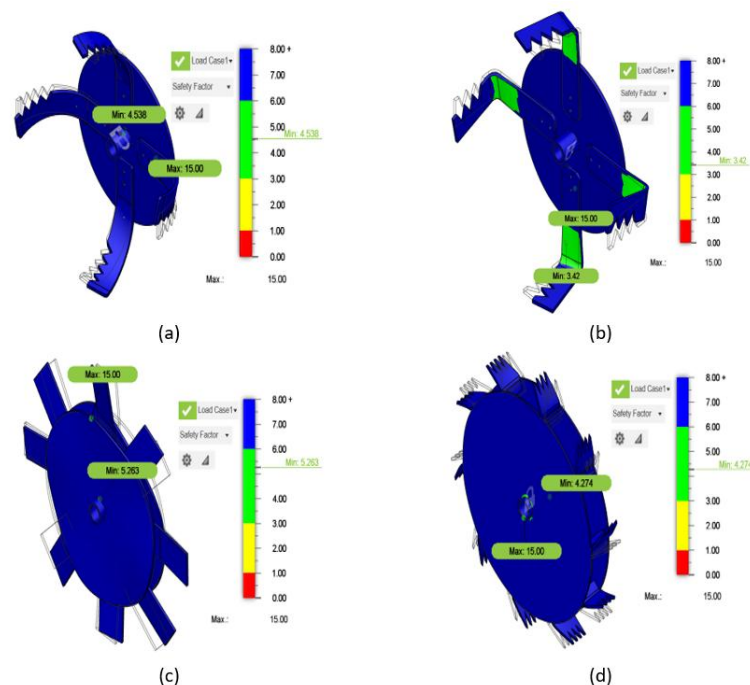
Gambar 5. *Von Mises Stress* Cakar (a) Tipe C (b) Tipe L, (c) Tipe Vertikal, (d) Tipe Horizontal

Gambar 5 menunjukkan bahwa cakar tipe L menghasilkan nilai tegangan *von Mises* tertinggi sebesar 60,522 MPa. Kenaikan nilai tegangan disebabkan oleh adanya akumulasi tegangan yang terlokalisasi pada area tekukan geometri cakar. Sudut tajam tersebut bertindak sebagai *stress raiser* yang memfokuskan distribusi gaya akibat terjadinya diskontinuitas geometri, sehingga membuat cakar tipe L menjadi konfigurasi yang paling rentan terhadap konsentrasi tegangan. Hal ini sejalan dengan teori mekanika material yang menyatakan bahwa diskontinuitas geometri suatu komponen menyebabkan akumulasi tegangan pada titik tertentu [45]. Selain itu, kriteria tegangan *von mises* dijadikan indikator kegagalan sebuah material ulet yang handal dalam analisis desain [46]. Sebaliknya, cakar tipe vertikal mencatatkan nilai tegangan *von Mises* terendah sebesar 39,33 MPa. Rendahnya nilai tegangan ini dipengaruhi oleh profil geometri tipe vertikal yang dirancang lurus dan minim tekukan. Karakteristik linear tersebut memungkinkan aliran tegangan dari ujung bilah menuju poros tumpuan berjalan secara kontinu, sehingga gaya luar dapat didistribusikan secara merata ke seluruh penampang struktur.

Sementara itu, cakar tipe C menghasilkan nilai tegangan sebesar 45,618 MPa. Transisi geometrinya yang melengkung secara gradual terbukti mampu memandu dan meredam sebaran garis tegangan lebih baik daripada tipe L yang menekuk kaku. Terakhir, cakar tipe horizontal menghasilkan nilai tegangan sebesar 48,43 MPa. Keberadaan kontur gerigi tajam pada tipe ini menciptakan titik-titik diskontinuitas kecil yang menerima beban secara terlokalisasi pada luasan penampang yang sempit. Namun, konstruksi piringan utamanya masih cukup kokoh dalam menopang transfer beban menuju area poros tumpuan.

Safety Factor

Faktor keamanan dapat didefinisikan sebagai rasio ketahanan suatu struktur terhadap beban, yang diterapkan dimaksudkan untuk mencakup semua ketidakpastian tentang kekuatan, beban, dan teori mekanis [47]. Simulasi pembebanan ini dilakukan guna memudahkan para *engineer* melakukan evaluasi terhadap keamanan struktur dari cakar dalam menahan tegangan sebelum mengalami kegagalan. Hasil simulasi pemodelan tipe cakar cultivator dengan beban 200N diperoleh nilai angka keamanan sebesar 4,538, 3,42, 5,263 dan 4,274, sebagai mana yang diperlihatkan pada Gambar 6a, Gambar 6b, Gambar 6c, dan Gambar 6d. Kontur warna merupakan representasi dari hasil simulasi yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak, pada umumnya ditunjukkan dengan berbagai warna [30]. Kontur warna pada gambar tersebut menunjukkan daerah yang memiliki angka keamanan tertinggi diwujudkan dengan kontur berwarna biru, sedangkan kontur yang berwarna hijau hingga kekuningan memiliki makna angka keamanan rendah yang menjadi daerah kritis pembebanan. Pada cakar berbentuk L menunjukkan kontur warna hijau lebih dominan di area cakar yang mengindikasikan terjadinya konsentrasi tegangan yang berakibat penurunan angka keamanan. Sebaliknya tipe cakar lainnya didominasi oleh kontur berwarna biru yang mengartikan distribusi tegangan yang lebih merata artinya desain cakar memiliki kemampuan dalam menahan beban kerja yang baik [48]. Hal tersebut sudah sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan distribusi tegangan yang merata, dapat menahan beban secara baik [45].



Gambar 6. *Safety Factor* Cakar (a) Tipe C (b) Tipe L, (c) Tipe Vertikal, (d) Tipe Horizontal

Berdasarkan Gambar 6 menunjukkan angka keamanan tertinggi dihasilkan oleh cakar tipe horizontal sebesar 5,699, hal ini dikarenakan bentuk geometri penampang piringan yang memiliki momen inersia area jauh lebih besar dalam menahan beban momen puntir maupun bending poros. Karakteristik tersebut memungkinkan gaya

luar disalurkan secara merata ke seluruh struktur piringan tanpa membebani satu bilah cakar secara tunggal. Lalu angka keamanan terendah dihasilkan oleh cakar tipe L sebesar 3,420, rendahnya nilai angka kamanan ini dikarenakan keberadaan tekukan siku pada lengan cakar yang bertindak sebagai area konsentrasi tegangan tinggi, sehingga secara otomatis mendegradasi margin keamanan komponen. Kemudian cakar tipe vertikal memperoleh nilai angka keamanan sebesar 5,263 dikarenakan profil geometri tipe vertikal yang lurus dan linear mampu mendistribusikan aliran tegangan dengan baik dari ujung pisau menuju poros tumpuan tanpa terhambat oleh adanya diskontinuitas sudut. Sedangkan cakar tipe C memperoleh nilai faktor keamanan sebesar 4,538. Hal ini dipengaruhi oleh profil kelengkungan yang memicu terbentuknya momen bending lokal sekunder, ketiadaan sudut tajam yang radikal membuat gaya luar dapat diredam dan didistribusikan secara bertahap di sepanjang busur lengkungannya.

Validasi Simulasi

Validasi simulasi pemodelan tipe cakar cultivator dengan membandingkan hasil simulasi dengan perhitungan manual. Hasil penelitian ini, diperoleh nilai angka keamanan tipe cakar C, cakar L, cakar vertikal dan cakar horizontal ditunjukkan pada Tabel 3. Perhitungan secara aktual dan simulasi pada perangkat lunak *Autodesk Fusion 360* telah didapat, maka langkah berikutnya yakni validasi data yang bertujuan untuk mengetahui penyimpangan yang terjadi keduanya [49].

Perhitungan analisis diperoleh dari turunan langsung hukum dasar mekanika material tentang kriteria luluh (*yield criterion*) unaksial pada material ulet. Berdasarkan teori kegagalan nilai *safety factor* dapat diselesaikan menggunakan rumus persamaan (1).

$$\text{Safety Factor} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max \text{ material}}} \quad (1)$$

Sebagai contoh kalkulasi manual pada cakar tipe C, dengan memasukkan nilai tegangan simulasi ($\sigma_{\max}=45,618$ MPa) kedalam rumus, maka didapatkan nilai:

$$\text{Safety Factor} = \frac{207 \text{ MPa}}{45,618 \text{ MPa}} = 4,537$$

Prosedur erhitungan teoritis diterapkan pada ketiga variasi geometri cakar menggunakan nilai tegangan masing masing cakar. Nilai penyimpangan dihitung untuk mengukur deviasi antara hasil perhitungan manual dan simulasi komputer. Data komparatif hadil validasi tersebut dirangkum secara komperhensif pada Tabel 3.

Tabel 3. Penyimpangan (*error*)

Tipe Cakar	Perhitungan Manual	Simulasi	Eror
Cakar Tipe C	4,537	4,538	0,02%
Cakar Tipe L	3,42	3,42	0%
Cakar Tipe vertikal	5,263	5,263	0%
Cakar Tipe horizontal	5,699	5,699	0%

Berdasarkan Tabel 3, proses validasi memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi. Nilai penyimpangan terbesar ditemukan pada cakar tipe C dengan nilai eror sebesar 0,02%. Sedangkan tipe yang lain menunjukkan kesesuaian data yang sempurna sebesar 0,00%. hal ini menunjukkan bahwa metode simulasi memiliki tingkat keakurasian yang baik sehingga memudahkan para *engineer* untuk menganalisis ataupun mengevaluasi performa struktur secara ilmiah [38], [39].

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis kekuatan struktur menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada kondisi pembebanan statis 200 N, seluruh variasi desain cakar cultivator dinyatakan aman untuk dioperasikan karena nilai tegangan *von Mises* maksimumnya berada jauh di bawah kekuatan luluh material *mild steel* (207 MPa) dengan nilai faktor keamanan yang memenuhi standar perancangan mekanis ($SF > 2$). Hasil validasi mengkonfirmasi bahwa pemodelan berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) memiliki kepresisian yang tinggi dan mampu meminimalisir penyimpangan data. Sebagai rekomendasi desain cakar yang optimal adalah cakar tipe vertikal karena mereduksi konsentrasi tegangan dan menghasilkan angka keamanan yang tinggi terhadap resiko beban kejut. Penelitian berikutnya diharapkan pengembangan pemodelan dinamis berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) atau *Discrete Element Method* (DEM).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. S. Chaudhary, N. A. Chaudhary, R. V. Bhabhor, A. Gora, dan R. N. Singh, "Design and development of a multi-crop power weeder," *Pharma Innov. J.*, vol. 12, no. 5, hal. 4691–4698, 2023.
- [2] M. Telaumbanua, Witaningsih, B. Lanya, A. Haryanto, S. Suharyatun, dan F. K. Wisnu, "Performance Comparison of the Implementations of Single Row Power Weeder (Single Engine) and Multi-Row Power Weeder (Twin-Engine) in Rice Fields," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1038, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1038/1/012061.
- [3] A. J. Bennett, R. Yadav, dan P. Jha, "Using soybean chaff lining to manage waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) in a soybean–corn rotation," *Weed Sci.*, vol. 71, no. 4, hal. 395–402, 2023, doi: DOI: 10.1017/wsc.2023.34.
- [4] S. S. Mohan, G. Sanjana, D. Avinash, M. Rohitha, dan D. A. Kumar, "Performance Evaluation of Power Weeder in Sugarcane Crop," *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, no. December, hal. 70–81, 2020, doi: 10.9734/cjast/2020/v39i3831097.
- [5] A. Ranji, M. Gholami, dan D. Mohammad, "Evaluation of agronomic , technical , economic , and environmental issues by analytic hierarchy process for rice weeding machine," *Energy Reports*, vol. 8, hal. 774–783, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.12.028.
- [6] C. Liu *et al.*, "Benefits of mechanical weeding for weed control, rice growth characteristics and yield in paddy fields," *F. Crop. Res.*, vol. 293, hal. 108852, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108852>.
- [7] H. B. Prasad, D. Ganapathi, dan V. Balasundaram, "Development and Field Evaluation of Rotary Power Weeder for Dryland Crops," *Res. J. Agric. Sci.*, vol. 10, no. 2, hal. 349–352, 2019, [Daring]. Tersedia pada: www.rjas.org.
- [8] Irzal dan N. Erizon, "Untuk Gapoktan Tunas Sakato Desa Toboh Palabah Pariaman Innovation Of The Appropriate Technology Application For Rice Sugar," *VOMEK*, vol. 2, no. 4, hal. 106–111, 2020, doi: <https://doi.org/10.24036/vomek.v2i4.143>.
- [9] P. D. Soden, B. A. Adeyefa, Y. S. Wong, dan M. A. Millar, "Loads, Stresses, and deflections in Bicycle Frames," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 21, no. 4, hal. 185–195, 1986, doi: 10.1243/03093247V214185.
- [10] A. B. Prasetyo dan K. A. Sekarjati, "Design engineering and analysis of the horizontal and vertical type of power weeder machine claw cultivator on the safety factor using the FEA method," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2927, no. 1, 2024, doi: 10.1063/5.0194013.
- [11] A. Muhammad, M. A. H. Ali, dan I. H. Shanono, "Finite Element Analysis of a connecting rod in ANSYS: An overview," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 736, no. 2, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/736/2/022119.
- [12] A. B. Prasetyo dan K. A. Sekarjati, "Desain dan Analisis Frekuensi Natural Rangka Mesin Penyiang Gulma Menggunakan Metode Finite Element Analysis Design and Analysis of Natural Frequency Weed Weeding Machine Frames Using the Finite Element Analysis Method," *J. Ris. Sains dan Teknol.*, vol. 6, no. 2, hal. 181–187, 2022, doi: 10.30595/jrst.v6i2.14428.
- [13] M. J. Jweeg, H. A. Hamzah, M. Al-Waily, dan M. A. Al-Shammari, "A Finite Element Simulation of Nano Effects on Stress Distribution in a Below Knee Prosthetic," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1067, no. 1, hal. 012141, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1067/1/012141.
- [14] R. I. Yaqin, A. B. Prasetyo, P. Pritiansyah, M. H. Amrullah, dan B. M. T. Pakpahan, "Studi Numerik Umur Kelelahan (Fatigue Life) Pada Propeller Kapal Penangkap Ikan Dengan Kapasitas Mesin 24 Hp," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 6, no. 1, hal. 8–17, 2020, doi: 10.31884/jtt.v6i1.245.
- [15] A. B. Prasetyo dan K. A. Sekarjati, "Finite Element Simulation of Power Weeder Machine Frame," *Indones. J. Comput. Eng. Des.*, vol. 4, no. 2, hal. 26–34, 2022, doi: <https://doi.org/10.35806/ijoced.v4i2.291>.
- [16] A. B. Prasetyo *et al.*, "Finite Element Analysis (FEA) of blade weed design using Ansys workbench," *Sinergi*, vol. 26, no. 3, hal. 371, 2022, doi: 10.22441/sinergi.2022.3.012.

- [17] R. I. Yaqin, B. H. Priyambodo, A. B. Prasetyo, dan M. L. Umar, "Penerapan Metode Elemen Hingga Dalam Pemilihan Bahan Pada Desain Pisau Mesin Pencacah Plastik," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 6, no. 2, hal. 85–98, 2021, doi: 10.20527/sjmekinematika.v6i2.190.
- [18] F. Arifin, M. S. Alaydrus, dan A. B. Prasetyo, "Desain dan analisis Cassava Chopper Machine Desain dan Analisis Cassava Chopper Machine," *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 15, no. 1, hal. 97–102, 2023, doi: 10.28989/angkasa.v15i1.1638.
- [19] Q. Lai, Q. Yu, dan J. Dong, "Dynamic analysis of rotary tiller gearbox based on EDEM, ADAMS and ANSYS," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 36, no. 2, hal. 1153–1160, 2019, doi: 10.3233/JIFS-169889.
- [20] A. Kešner, R. Chotěborský, M. Linda, M. Hromasová, E. Katinas, dan H. Sutanto, "Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment," *Biosyst. Eng.*, vol. 209, hal. 125–138, 2021, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012.
- [21] A. B. Prasetyo, F. Fauzun, A. A. Azmi, dan R. I. Yaqin, "Studi Numerik Kontur Pola Aliran Fluida Pendinginan Pada Mold Injeksi Molding," *Infotekmesin*, vol. 12, no. 1, hal. 104–109, 2021, doi: 10.35970/infotekmesin.v12i1.493.
- [22] A. B. Prasetyo, F. Fauzun, A. A. Azmi, dan S. H. Yaqin, Rizqi Ilmal, Pranoto, "Simultaneous Cooling Analysis of Injection Molding Plastic Products with Cooling System Variations," *J. Penelit. Saintek*, vol. 25, no. 2, hal. 173–183, 2020, doi: 10.21831/jps.v25i2.34574.
- [23] F. Anggara, D. Romahadi, A. L. Avicenna, dan Y. H. Irawan, "Numerical analysis of the vortex flow effect on the thermal-hydraulic performance of spray dryer," *Sinergi*, vol. 26, no. 1, hal. 23, 2022, doi: 10.22441/sinergi.2022.1.004.
- [24] A. B. Prasetyo, K. A. Sekarjati, dan I. R. Putra, "Analisis Numerik Frekuensi Natural dan Mode Bentuk Rangka Mesin Pengaduk Gula Aren Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Energy, Mater. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 1, hal. 1–9, 2025, doi: <https://doi.org/10.61844/jemmttec.v4i01.970>.
- [25] A. B. Prasetyo, A. A. Azmi, D. S. Pamuji, dan R. Yaqin, "Pengaruh Perbedaan Mesh Terstruktur dan Mesh Tidak Terstruktur Pada Simulasi Sistem Pendinginan Mold Injeksi Produk Plastik," *Pros. Nas. Rekayasa Teknol. Ind. dan Inf. XIV Tahun 2019*, vol. 2019, no. November, hal. 400–406, 2019.
- [26] A. B. Prasetyo dan K. A. Sekarjati, "Analisis Struktur Desain Pisau Pengupas Tempurung Kelapa Menggunakan ANSYS 19.2," *Semin. Nas. Ris. Inov. Teknol.*, vol. 1, no. 1, hal. 417–423, 2022.
- [27] A. B. Prasetyo, K. A. Sekarjati, dan Sutrisna, "Numerical analysis of the influence iron type on Von Mises Stress and safety parameters for compost processing machine frame construction," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1151, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1151/1/012058.
- [28] A. B. Prasetyo dan F. Fauzun, "Numerical study of effect of cooling channel configuration and size on the product cooling effectiveness in the plastic injection molding," *MATEC Web Conf.*, vol. 197, hal. 8–11, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201819708019.
- [29] A. B. Prasetyo, K. A. Sekarjati, dan S. Haryo, "Design And Analysis of The Effect of Variation Of compression Force on Allen Key Using Finite Element Analysis Method," *SJME Kinemat.*, vol. 7, no. 1, hal. 39–52, 2022, doi: 10.20527/sjmekinematika.v7i.
- [30] A. B. Prasetyo, "Analisis Numerik Perpindahan Panas Pada Saluran Pendingin Plastik Injeksi Molding Menggunakan Polyhedral Mesh," *Teknol. manufaktur*, vol. 11, no. 02, hal. 70–79, 2019, doi: <https://doi.org/10.33504/manutech.v11i02.113>.
- [31] K. A. Sekarjati, T. Rusianto, A. A. P. Susatriawan, dan A. B. Prasetyo, "Analisis Variasi Desain Beriket Towing Bar Menggunakan Metode Elemen Hingga Terhadap Nilai Keamanan Desain," *J. Energy, Mater. Manuf. Technol.*, vol. 3, no. 2, hal. 22–28, 2024, doi: <https://doi.org/10.61844/jemmttec.v3i02.776>.
- [32] W. A. B. T.-F. of M. C. D. Altabay, *Chapter 2 - Load and stress analysis*. Elsevier, 2024.
- [33] L. A. N. Wibawa, "Pengaruh diameter baut terhadap kekuatan rangka main landing gear pesawat UAV menggunakan metode elemen hingga," *J. Polimesin*, vol. 17, no. 01, hal. 26–32, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <http://e-jurnal.pnl.ac.id/index.php/polimesin/article/view/828>.
- [34] K. Z. V. Dobrovolsky, *Machine Elements : a textbook*. Moscow: Peace, 1973.
- [35] H. L. Huang, *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021*. Taiwan: SDC Publications, 2021.
- [36] B. Silwal dan P. Sergeant, "Thermally induced mechanical stress in the stator windings of electrical machines," *Energies*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: 10.3390/en11082113.
- [37] F. A. Arifin, M. S. Alaydrus, dan A. B. Prasetyo, "Desain dan analisis Cassava Chopper Machine," *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 15, no. 1, hal. 85, 2023, doi: 10.28989/angkasa.v15i1.1638.
- [38] S. Sutrisna, A. B. Prasetyo, dan F. R. A. Juniari, "Design and Analysis of the Komatsu Pc400 Excavator'S Tooth Bucket Thickness Using the Finite Element Method," *Int. J. Mech. Eng. Technol. Appl.*, vol. 5, no. 2, hal. 130–138, 2024, doi:

10.21776/mechta.2024.005.02.2.

- [39] B. Purnama, M. Darmayani, dan A. B. Prasetyo, "Numerical Study of the Effect of Notch Geometry (Standard , Elliptical , Diamond) on Excavator Bucket Tooth Strength Based on Finite Element Analysis," *Infotekmesin*, vol. 17, no. 01, hal. 74–81, 2026, doi: 10.35970/infotekmesin.v17i1.3032.
- [40] A. Nieslony, "A critical analysis of the Mises stress criterion used in frequency domain fatigue life prediction," *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 10, no. 38, hal. 177–183, 2016, doi: 10.3221/IGF-ESIS.38.24.
- [41] A. B. Prasetyo, K. A. Sekarjati, dan Sutrisna, "Numerical analysis of the influence iron type on Von Mises Stress and safety parameters for compost processing machine frame construction," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1151, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1151/1/012058.
- [42] R. Patel *et al.*, "A Transdisciplinary Approach for Analyzing Stress Flow Patterns in Biostructures," *Math. Comput. Appl.*, vol. 24, no. 2, hal. 47, 2019, doi: 10.3390/mca24020047.
- [43] R. I. Yaqin, M. L. Umar, S. H. Pranoto, A. B. Prasetyo, dan B. H. Priyambodo, "Studi Perancangan Pisau Pada Mesin Pencacah Plastik Menggunakan Finite Element Analysis," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 7, no. 1, hal. 44, 2021, doi: 10.31884/jtt.v7i1.320.
- [44] R. G. Karmankar, "Analysis of Von- Mises-Stress for Interference Fit and Pull- Out States By Using Finite Element Method," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 11, hal. 1367–1374, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.26447.79520.
- [45] F. Beer, E. R. Jr. Johnston, J. DeWolf, dan D. Mazurek, *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill Education, 2011.
- [46] L. D. Shigley, J. E. ; Mitchell, *Perencanaan Teknik Mesin*, 4 th. Jakarta: Erlangga, 1999.
- [47] M. Matsuo dan A. Asoka, "A Statistical Study on A Conventional 'Safety Factor Method,'" *Chem. Pharm. Bull.*, vol. 20, no. 10, hal. 2278–2281, 1972.
- [48] A. J. Asmara, I. Nadiansyah, A. J. Magmadian, A. A. Dhombo, H. Sraun, dan A. B. Prasetyo, "Desain dan Analisis Tegangan Double Crane Hook Kapasitas 5 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga," in *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVIII Tahun 2023 (ReTII)*, 2023, vol. 2023, no. November, hal. 121–125.
- [49] F. Anggara, "Validasi Nilai Simulasi Faktor Keamanan Pada Putaran Kritis Poros ST41," *Quantum Tek. J. Tek. Mesin Terap.*, vol. 2, no. 1, hal. 32–37, 2020, doi: 10.18196/jqt.020120.