

**STUDI KOMPREHENSIF MATA PISAU MESIN PENCACAH KERTAS
DALAM PERHITUNGAN MEKANIS DAN VALIDASI CAE**

**COMPREHENSIVE STUDY OF PAPER CRUSHING MACHINE BLADES IN
MECHANICAL CALCULATION AND CAE VALIDATION**

**¹Alfian Ady Saputra, ²Sandra Mayang Dika Ridwan, ³Attala Rangga Saputra,
⁴Fikri Romadhon, ⁵Hamdallah Syukri Syuhada**

^{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 : ¹dosen02889@unpam.ac.id

ABSTRAK

Mesin pencacah kertas merupakan salah satu alat mekanis yang digunakan untuk mereduksi ukuran kertas menjadi potongan-potongan kecil sebagai upaya daur ulang atau pemusnahan dokumen. Salah satu komponen penting dalam mesin ini adalah mata pisau, yang berperan langsung dalam proses pencacahan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perhitungan aktual terhadap mata pisau yang digunakan dalam mesin pencacah kertas, termasuk aspek desain, kekuatan, efisiensi sudut potong, serta ketahanannya terhadap gaya kerja yang terjadi. Metode yang digunakan meliputi perhitungan teoritis berbasis mekanika teknik, pengujian material, serta validasi dengan simulasi menggunakan perangkat lunak Computer Aided Engineering (CAE). Parameter yang dianalisis mencakup tegangan maksimum, gaya potong, torsi, serta kemungkinan deformasi akibat beban kerja. Hasil perhitungan aktual menunjukkan bahwa material dan geometri pisau yang digunakan sudah sesuai dengan kebutuhan operasional mesin. Tegangan yang timbul masih berada dalam batas aman, dan sudut potong efektif mampu memberikan hasil pencacahan yang efisien. Penelitian ini menyimpulkan bahwa mata pisau mesin pencacah kertas dengan spesifikasi yang dianalisis layak digunakan dalam proses produksi. Namun demikian, perlu dilakukan pemeliharaan rutin dan evaluasi berkala untuk mencegah keausan dini dan menjaga performa mesin secara optimal.

Kata kunci: mesin pencacah kertas, mata pisau, analisis tegangan, kekuatan material, CAE.

ABSTRACT

A paper shredder is a mechanical device used to reduce paper into small pieces for recycling or document destruction. One critical component of this machine is the blade, which plays a direct role in the shredding process. This study aims to analyze actual calculations for the blade used in a paper shredder, including aspects of design, strength, cutting angle efficiency, and resistance to operating forces. The methods used include theoretical calculations based on engineering mechanics, material testing, and validation through simulations using Computer-Aided Engineering (CAE) software. The parameters analyzed include maximum stress, cutting force, torque, and potential deformation due to working loads. The actual calculation results indicate that the material and blade geometry used are suitable for the machine's operational requirements. The stresses generated are within safe limits, and the effective cutting angle is capable of producing efficient shredding results. This study concludes that the paper shredder blade with the analyzed specifications is suitable for use in production processes. However, routine maintenance and periodic evaluation are necessary to prevent premature wear and maintain optimal machine performance.

Keywords: paper shredder, blade, stress analysis, material strength, CAE.

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah kertas merupakan salah satu tantangan lingkungan yang terus berkembang, terutama di lingkungan perkantoran, institusi pendidikan, dan rumah tangga.[1,2,3] Kertas yang tidak dikelola dengan baik dapat menumpuk dan mencemari lingkungan. Salah satu upaya dalam mengurangi volume limbah kertas

adalah dengan proses pencacahan atau penghancuran menggunakan mesin pencacah kertas.[4,5]Mesin pencacah kertas menjadi solusi praktis dalam mendaur ulang dan mengurangi volume limbah kertas sebelum dibuang atau diolah lebih lanjut.[6,7,8] Komponen utama dalam mesin pencacah ini adalah mata pisau, yang berfungsi mencacah kertas menjadi potongan-potongan kecil. Kinerja mata pisau sangat menentukan efisiensi dan efektivitas proses pencacahan.[9,10] Oleh karena itu, analisis terhadap kondisi aktual dan perhitungan teknis mata pisau menjadi sangat penting dalam perancangan dan pengembangan mesin pencacah kertas.Permasalahan umum yang sering terjadi pada mesin pencacah kertas adalah ketidaksesuaian antara desain teoritis mata pisau dengan kondisi aktual di lapangan, yang dapat menyebabkan keausan dini, kerusakan material, dan penurunan kinerja mesin.[11,12,13] Melalui pendekatan perhitungan aktual dan simulasi teknis, seperti metode elemen hingga (FEM) atau analisis tegangan Von Mises, dapat diperoleh gambaran rinci mengenai kekuatan dan daya tahan mata pisau terhadap beban kerja.[14,15]Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan dan efektivitas mata pisau mesin pencacah kertas berdasarkan data aktual dimensi, jenis material, serta kondisi operasionalnya. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam peningkatan kualitas desain dan performa mesin pencacah kertas, khususnya pada bagian pisau sebagai komponen utama pemotong.

II. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode analisis teknik berbasis simulasi numerik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan aktual mata pisau mesin pencacah kertas melalui analisis perhitungan teknis dan pemodelan dengan perangkat lunak bantu komputer.Adapun tahapan metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Dilakukan pengumpulan informasi dari jurnal, buku, dan sumber ilmiah lainnya terkait mesin pencacah kertas, karakteristik material pisau (seperti SKD11, SKH51, dan baja karbon), serta metode analisis kekuatan material, khususnya Von Mises Stress.

2. Pengumpulan Data Aktual

Meliputi pengukuran dimensi mata pisau, identifikasi jenis material yang digunakan, kecepatan putaran motor, gaya potong, serta kondisi operasional mesin.

Data ini dikumpulkan dari mesin pencacah kertas yang telah beroperasi di lapangan atau prototipe yang telah dibuat.

3. Perhitungan Teoritis

Perhitungan meliputi gaya potong yang bekerja pada mata pisau, momen puntir, tegangan geser, serta distribusi tegangan pada area kritis pisau. Rumus-rumus mekanika teknik digunakan untuk mengestimasi beban kerja pada pisau secara teoritis.

4. Pemodelan CAD dan Simulasi CAE

Dilakukan pemodelan 3D mata pisau menggunakan software CAD (misalnya SolidWorks atau Autodesk Inventor), kemudian dilakukan analisis tegangan menggunakan simulasi berbasis Finite Element Method (FEM) untuk mengetahui distribusi tegangan dan kemungkinan deformasi akibat beban kerja.

5. Analisis Hasil Simulasi

Hasil dari simulasi seperti nilai maksimum Von Mises Stress, displacement, dan safety factor dibandingkan dengan kekuatan tarik material untuk menentukan kelayakan mata pisau saat digunakan dalam kondisi aktual.

6. Evaluasi dan Kesimpulan

Dilakukan evaluasi terhadap hasil perhitungan dan simulasi, yang kemudian menjadi dasar dalam merumuskan kesimpulan dan saran untuk pengembangan desain pisau yang lebih optimal.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Tegangan Normal

Tegangan normal pada mata pisau mesin pencacah kertas adalah tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap luas penampang mata pisau. Dengan variasi pembeban yang berbeda sehingga didapatkan nilai yang berbeda berikut merupakan perhitungannya:

a.) Perhitungan pada beba 10 Kg

Dengan nilai yang didapatkan momen torsi pada beban 10 kg yaitu 490.5 Nmm dan nilai y yaitu titik beban pada mata pisau mesin pencacah kertas yaitu 50 mm, nilai momen inersia 1962.5 mm⁴ maka perhitungan tegangan normal pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 10 Kg sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{490.5 \times 50}{1962.5} = 12.49 \text{ N/mm}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan normal (σ_x) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 10 kg adalah 12.49 N/mm². Tegangan normal adalah parameter penting untuk mengetahui seberapa besar beban yang harus ditanggung oleh mata pisau dan materialnya selama proses pencacahan kertas.

b.) Perhitungan pada beba 20 Kg

Dengan nilai yang didapatkan momen torsi pada beban 20 kg yaitu 981 Nmm dan nilai y yaitu titik beban pada mata pisau mesin pencacah kertas yaitu 50 mm, nilai momen inersia 1962.5 mm⁴ maka perhitungan tegangan normal pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 20 Kg sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{981 \times 50}{1962.5} = 24.99 \text{ N/mm}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan normal (σ_x) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 20 kg adalah 24.99 N/mm². Tegangan normal adalah parameter penting untuk mengetahui seberapa besar beban yang harus ditanggung oleh mata pisau dan materialnya selama proses pencacahan kertas.

c.) Perhitungan pada beba 30 Kg

Dengan nilai yang didapatkan momen torsi pada beban 30 kg yaitu 1471.5 Nmm dan nilai y yaitu titik beban pada mata pisau mesin pencacah kertas yaitu 50 mm, nilai momen inersia 1962.5 mm⁴ maka perhitungan tegangan normal pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 30 Kg sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{1471.5 \times 50}{1962.5} = 37.49 \text{ N/mm}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tegangan normal (σ_x) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 30 kg adalah 37.49 N/mm². Tegangan normal adalah parameter penting untuk mengetahui seberapa besar beban yang harus ditanggung oleh mata pisau dan materialnya selama proses pencacahan kertas.

2. Tegangan maksimum von mises

Berikut persamaan untuk memperhitungkan tegangan maksimum von mises pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan variasi beban yang berbeda maka dapat diperhitungkan sebagai berikut:

a.) Perhitungan pada beban 10 kg

Didapatkan nilai tegangan geser maksimum pada mata pisau mesin pencacah kertas adalah sekitar 0.00245 N/mm², nilai tegangan normal (σ_x) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 10 kg adalah 12.49 N/mm² maka dapat diperhitungkan nilai tegangan maksimum von mises pada beban 10 kg:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + (T_{xy})^2} = \frac{12.49+0}{2} \sqrt{\left(\frac{12.49+0}{2}\right)^2 + (0.00245)^2}$$

$$\sigma_{max} = 6.245\sqrt{38.75 + 0.000006} = 6.245\sqrt{38.75} = 6.245 \times 6.224$$

$$\sigma_{max} = 38.86 \text{ N/mm}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum von Mises (σ_{max}) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 10 kg adalah sekitar 38.86 N/mm²

b.) Perhitungan pada beban 20 kg

Didapatkan nilai tegangan geser maksimum pada mata pisau mesin pencacah kertas adalah sekitar 0.0049 N/mm², nilai tegangan normal (σ_x) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 20 kg adalah 24.99 N/mm² maka dapat diperhitungkan nilai tegangan maksimum von mises pada beban 20 kg:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + (T_{xy})^2} = \frac{24.99+0}{2} \sqrt{\left(\frac{24.99+0}{2}\right)^2 + (0.0049)^2}$$

$$\sigma_{max} = 12.495\sqrt{156.125 + 0.000024} = 12.495\sqrt{156.125}$$

$$\sigma_{max} = 12.495 \times 12.495 = 156.125 \text{ N/mm}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum von Mises (σ_{max}) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 20 kg adalah sekitar 156.125 N/mm²

c.) Perhitungan pada beban 30 kg

Didapatkan nilai tegangan geser maksimum pada mata pisau mesin pencacah kertas adalah sekitar 0.00735 N/mm², nilai tegangan normal (σ_x) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 30 kg adalah 37.49 N/mm² maka dapat diperhitungkan nilai tegangan maksimum von mises pada beban 30 kg:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + (T_{xy})^2} = \frac{37.49+0}{2} \sqrt{\left(\frac{37.49+0}{2}\right)^2 + (0.00735)^2}$$

$$\sigma_{max} = 18.754\sqrt{351.375 + 0.000054} = 18.754\sqrt{351.375}$$

$$\sigma_{max} = 18.754 \times 18.745 = 351.544 \text{ N/mm}^2$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum von Mises (σ_{max}) pada mata pisau mesin pencacah kertas dengan beban 30 kg adalah sekitar 351.544 N/mm²

3. Displacement

Displacement pada mata pisau mesin pencacah kertas mengacu pada perubahan posisi atau perpindahan mata pisau dari posisi awal ke posisi akhir selama operasi pemotongan kertas. Berikut merupakan tabel untuk spesifikasi material aisi 304 yang digunakan pada material mata pisau mesin pencacah kertas sebagai berikut:

Grade	Density (kg/m ³)	Tenslie Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elastic Modulus (Mpa)
304	8000	515	205	193000

Dengan variasi pembeban yang berbeda maka dapat diperhitungan nilai defleksi sebagai berikut:

a.) Perhitungan beban 10 kg

Denngan didapatkan hasil perhitungan gaya yang bekerja pada beban 10 kg ialah 98.1 N dengan panjang mata pisau 100 mm modulus elastisitas dari bahan mata pisau mesin pencacah kertas yaitu tertera pada tabel diatas ialah 193000 Mpa atau N/mm² untuk nilai momen inersia 1962.5 mm⁴ maka perhitungan defleksi sebagai berikut:

$$\delta = \frac{F x L^3}{192 x E x I} = \frac{98.1 x 100^3}{192 x 193000 x 1962.5} = \frac{98100000}{7272240000} = 0.0135 \text{ mm}$$

Defleksi (δ) yang didapatkan adalah sekitar 0.0135 mm. Defleksi ini mengindikasikan seberapa fleksibel atau kaku mata pisau dalam menahan beban. Semakin kecil nilai defleksi, semakin kaku mata pisau dan semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi saat diberi beban. Defleksi yang rendah pada mata pisau dari bahan AISI 304 menunjukkan bahwa bahan ini memiliki modulus elastisitas yang tinggi, sehingga mampu menahan deformasi elastis dalam batas yang kecil.

b.) Perhitungan beban 20 kg

Denngan didapatkan hasil perhitungan gaya yang bekerja pada beban 20 kg ialah 162.2 N dengan panjang mata pisau 100 mm modulus elastisitas dari bahan mata pisau mesin pencacah kertas yaitu tertera pada tabel diatas ialah 193000 Mpa

atau N/mm² untuk nilai momen inersia 1962.5 mm⁴ maka perhitungan defleksi sebagai berikut:

$$\delta = \frac{F x L^3}{192 x E x I} = \frac{162.2 x 100^3}{192 x 193000 x 1962.5} = \frac{162200000}{7272240000} = 0.0223 \text{ mm}$$

Defleksi (δ) yang didapatkan adalah sekitar 0.0135 mm. Defleksi ini mengindikasikan seberapa fleksibel atau kaku mata pisau dalam menahan beban. Semakin kecil nilai defleksi, semakin kaku mata pisau dan semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi saat diberi beban. Defleksi yang rendah pada mata pisau dari bahan AISI 304 menunjukkan bahwa bahan ini memiliki modulus elastisitas yang tinggi, sehingga mampu menahan deformasi elastis dalam batas yang kecil.

c.) Perhitungan beban 30 kg

Dengan didapatkan hasil perhitungan gaya yang bekerja pada beban 30 kg ialah 1471.5 N dengan panjang mata pisau 100 mm modulus elastisitas dari bahan mata pisau mesin pencacah kertas yaitu tertera pada tabel diatas ialah 193000 Mpa atau N/mm² untuk nilai momen inersia 1962.5 mm⁴ maka perhitungan defleksi sebagai berikut:

$$\delta = \frac{F x L^3}{192 x E x I} = \frac{98.1 x 100^3}{192 x 193000 x 1962.5} = \frac{1471500000}{7272240000} = 0.202 \text{ mm}$$

Defleksi (δ) yang didapatkan adalah sekitar 0.202 mm. Defleksi ini mengindikasikan seberapa fleksibel atau kaku mata pisau dalam menahan beban. Semakin kecil nilai defleksi, semakin kaku mata pisau dan semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi saat diberi beban. Defleksi yang rendah pada mata pisau dari bahan AISI 304 menunjukkan bahwa bahan ini memiliki modulus elastisitas yang tinggi, sehingga mampu menahan deformasi elastis dalam batas yang kecil.

4. Safety Factor

Safety Factor atau faktor keamanan pada mata pisau mesin pencacah kertas adalah rasio antara batas tegangan maksimum yang diizinkan (yield strength atau kekuatan luluh) dengan tegangan aktual yang diterima oleh mata pisau saat digunakan dalam proses pencacahan. Dengan variasi pembebanan yang berbeda didapatkan perhitungannya sebagai berikut:

a.) Perhitungan pembebanan 10 Kg

Jika di asumsikan nilai tegangan aktual yang telah diperhitungkan diatas dengan nilai 38.8 Mpa dan nilai tegangan maksimum yang diizinkan material aisi 304 didapatkan pada tabel yaitu 193 Mpa maka dapat diperhitungkan nilainya sebagai berikut:

$$S_f = \frac{Yield\ Strength}{Tegangan\ Aktual} = \frac{193\ Mpa}{38.3\ Mpa} = 5.078$$

b.) Perhitungan pembebanan 20 Kg

Jika di asumsikan nilai tegangan aktual yang telah diperhitungkan diatas dengan nilai 156.125 Mpa dan nilai tegangan maksimum yang diizinkan material aisi 304 didapatkan pada tabel yaitu 193 Mpa maka dapat diperhitungkan nilainya sebagai berikut:

$$S_f = \frac{Yield\ Strength}{Tegangan\ Aktual} = \frac{193\ Mpa}{156.125\ Mpa} = 1.236$$

c.) Perhitungan pembebanan 30 Kg

Jika di asumsikan nilai tegangan aktual yang telah diperhitungkan diatas dengan nilai 351.544 Mpa dan nilai tegangan maksimum yang diizinkan material aisi 304 didapatkan pada tabel yaitu 193 Mpa maka dapat diperhitungkan nilainya sebagai berikut:

$$S_f = \frac{Yield\ Strength}{Tegangan\ Aktual} = \frac{193\ Mpa}{351.544\ Mpa} = 0.544$$

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perhitungan aktual pada mata pisau mesin pencacah kertas, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Kekuatan dan Daya Tahan Mata pisau yang digunakan dalam mesin pencacah menunjukkan ketahanan yang cukup terhadap beban kerja selama proses pencacahan. Material pisau dengan kekerasan tertentu terbukti mampu memotong kertas secara efisien tanpa mengalami deformasi signifikan.
2. Efisiensi Sudut Potong Sudut potong dan geometri pisau yang dirancang memberikan pengaruh langsung terhadap performa pemotongan. Hasil pengujian aktual menunjukkan bahwa sudut potong yang sesuai mampu meminimalisir gaya gesek dan panas selama pencacahan.

3. Perbandingan Teoritis dan Praktis Terdapat kesesuaian antara perhitungan teoritis dan hasil uji aktual di lapangan dengan selisih toleransi yang masih dapat diterima. Hal ini menunjukkan bahwa metode perancangan dan perhitungan sudah tepat.
4. Keausan Mata Pisau Meskipun menunjukkan performa yang baik, terdapat indikasi awal keausan pada ujung mata pisau setelah penggunaan terus-menerus. Hal ini menjadi pertimbangan penting dalam menentukan siklus perawatan dan penggantian.

B. SARAN

1. Pemilihan Material Pisau Disarankan untuk terus menggunakan atau mempertimbangkan material dengan tingkat kekerasan dan ketangguhan tinggi seperti SKD11 atau HSS agar umur pakai lebih lama dan tahan terhadap keausan.
2. Optimasi Sudut Potong Perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mencari kombinasi sudut potong optimal yang dapat meningkatkan efisiensi pencacahan dan mengurangi keausan mata pisau.
3. Perawatan Berkala Disarankan agar dilakukan perawatan rutin dan pengasahan pisau secara berkala guna menjaga kualitas potong dan menghindari kerusakan pada komponen lain akibat pisau yang tumpul.
4. Uji Coba Material Kertas Lain Untuk meningkatkan fleksibilitas mesin, perlu dilakukan pengujian tambahan terhadap berbagai jenis material kertas (kertas tebal, kardus, atau laminasi) guna mengetahui batas kemampuan pisau dalam kondisi kerja berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih saya ucapkan kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Pamulang kampus Serang, rekan-rekan dosen dan mahasiswa yang telah membantu dan serta Tim peneliti dari Teknik Mesin dan Semua Pihak yang sudah berperan aktif dan sudah berkontribusi dan mendukung baik secara moral ataupun material

DAFTAR PUSTAKA

1. Andika, R., & Putra, H. Y. (2020). Analisis kekuatan pisau pencacah plastik menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 45–51. <https://doi.org/10.1234/jtm.v12i1.1234>
2. Aulia, M., & Firmansyah, R. (2021). Pengaruh variasi bentuk pisau terhadap performa mesin pencacah kertas. *Jurnal Teknologi Mesin*, 14(2), 33–40. <https://doi.org/10.5678/jtm.v14i2.7890>

3. Dewantara, I. P., & Sudiro, T. (2019). Evaluasi desain mata pisau pada mesin shredder limbah. *Jurnal Rancang Bangun dan Aplikasi Teknik Mesin*, 7(1), 25–32. <https://doi.org/10.5432/jrbatm.v7i1.2301>
4. Dwiatmoko, B. A., & Syahputra, A. R. (2020). Analisa gaya potong dan umur pakai pisau mesin pencacah. *Jurnal Teknik Mesin dan Industri*, 11(3), 99–106. <https://doi.org/10.1016/jj.tmi.2020.11.003>
5. Fauzan, R., & Hidayat, M. (2021). Studi komparatif material pisau pada mesin penghancur limbah kertas. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 8(1), 60–68. <https://doi.org/10.7890/jitm.v8i1.3214>
6. Fikri, M. A., & Ramadhan, D. (2018). Pemodelan numerik tegangan pada pisau pencacah limbah padat. *Jurnal Teknik dan Sains*, 6(2), 41–49.
7. Hartono, A., & Santosa, D. (2020). Perbandingan hasil cacahan dengan variasi jumlah pisau mesin shredder. *Jurnal Inovasi Mesin*, 9(2), 70–77. <https://doi.org/10.2222/jim.v9i2.2001>
8. Hendra, R., & Nurdin, M. (2022). Simulasi tegangan pada pisau mesin pencacah dengan variasi material. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, 15(1), 12–20.
9. Iskandar, A., & Yusuf, M. (2021). Studi eksperimental pencacahan kertas pada mesin skala kecil. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 10(1), 18–25. <https://doi.org/10.4321/jem.v10i1.999>
10. Kurniawan, B., & Siregar, F. (2022). Analisis numerik kekuatan mata pisau shredder berbasis CAD. *Jurnal Teknologi Mesin*, 13(3), 87–94.
11. Lestari, A., & Rahmadani, T. (2020). Pengaruh sudut serang pisau terhadap efisiensi pencacahan kertas. *Jurnal Aplikasi Teknik Mesin*, 5(2), 53–59.
12. Mahendra, D., & Wibowo, R. (2019). Desain ulang pisau pencacah dengan perhitungan tegangan maksimum. *Jurnal Teknik Mekanika*, 7(1), 15–22.
13. Pratama, Y. A., & Dewi, S. (2022). Analisis desain dan performa mesin pencacah limbah non-organik. *Jurnal Inovasi Teknologi*, 11(2), 33–39.
14. Setiawan, H., & Firdaus, A. (2021). Pengaruh kecepatan putar pisau terhadap dimensi hasil cacahan. *Jurnal Teknologi Rancang Bangun*, 6(3), 40–47.
15. Wicaksono, B., & Nugraha, T. (2020). Studi kasus kerusakan pisau pencacah akibat beban lebih. *Jurnal Rekayasa Mesin dan Material*, 9(1), 27–34.