



RANCANG BANGUN MESIN PENCACAH SAMPAH PLASTIK TIPE CRUSHER DENGAN BILAH MONOLITIK GANDA

Muhammad Luthfi^{1a}, Dedi Suwandi², Badruzzaman², Laila Amaria², Bagas Juniansyah²

¹Prodi Teknik Mesin, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Indramayu

²Prodi Perancangan Manufaktur, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Indramayu

Korespondensi:

^a Prodi Teknik Mesin, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Indramayu
mhm.luthfi@polindra.ac.id

ABSTRAK

Banyaknya sampah plastik membawa dampak negatif untuk kesehatan dalam jangka panjang sehingga perlu proses daur ulang yang sebelumnya dicacah terlebih dahulu. Sistem pencacah saat ini yang menggunakan gabungan dari kepingan bilah memiliki kelemahan yaitu kemungkinan terjadi slip yang besar dari tiap kepingan bilah pada penggunaan yang lama atau secara terus menerus. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi proses perancangan hingga pengujian performa mesin pencacah sampah tipe crushing dengan bilah monolitik ganda yang parameter ujinya kualitas hasil cacahan karena pengaruh kecepatan putaran bilah dan jenis/tebal sampah yang belum diteliti sebelumnya pada tipe bilah ini. Metode penelitian yang digunakan dimulai dari proses perancangan, simulasi pembebanan, fabrikasi, serta pengujian yang dilakukan secara eksperimen dengan variasi kecepatan putaran bilah dan jenis sampah uji. Dari hasil perancangan, didapatkan hasil estimasi kebutuhan daya motor adalah berkisar 3,8 hp dengan Safety Factor dari rangka sebesar 15. Bilah yang dibuat, dihasilkan dari pembubutan benda kerja poros besar utuh dan dibentuk sesuai pola dari gambar kerja. Sedangkan hasil pengujian menunjukkan bahwa jenis atau tebal sampah lebih berpengaruh pada dimensi hasil cacahan, dengan hasil cacahan terkecil dihasilkan dari jenis sampah industri, akrilik dengan dimensi 2,72 mm – 31,78 mm. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencacah 500 gram plastik berkisar 1 menit.

Kata kunci: Mesin Crusher, Sampah Plastik, Bilah Monolitik Ganda, Daur Ulang.

ABSTRACT

The large amount of plastic waste has long-term negative impacts on health, thus recycling processes, which typically involve shredding beforehand, are necessary. The current shredding system that uses a combination of blades has a weakness which is the possibility of large slippage of each blade during prolonged or continuous use. This research aims to investigate the design process until the test of the performance of a crushing type of waste shredding machine with double monolithic blades whose test parameters are the quality of the shredded results due to the influence of blade rotation speed and type/thickness of waste which have not been previously studied on this type of blade. The design results estimated the motor power requirement at approximately 3.8 hp, with a frame safety factor 15. The blades were fabricated by machining a solid large-diameter shaft into shapes based on the work drawings. The experimental results indicate that the type or thickness of waste has a greater effect on the dimensions of the shredded output. The smallest shredded dimensions were produced from industrial waste, specifically acrylic, ranging from 2.72 mm to 31.78 mm. Meanwhile, the time required to shred 500 grams of plastic was approximately 1 minute.

Keywords: *Crusher Machine, Plastic Waste, Double Monolithic Blade, Recycling.*

1. PENDAHULUAN

Sampah masih menjadi salah satu masalah yang perlu diperhatikan di Indonesia. Dari data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Timbunan sampah di negara ini per 2023 mencapai 17,4 juta ton/tahun dengan persentase sampah yang tidak terkelola mencapai 33,53% atau mencapai 5.847 ton/tahun [1]. Dari banyaknya timbunan sampah tersebut, sampah plastik menjadi penyumbang sampah terbesar kedua sebesar 18.68% per tahun 2023 [2]. Banyaknya sampah plastik ini tentunya membawa dampak negatif untuk kesehatan dalam jangka panjang, seperti kanker, dan kerusakan jaringan tubuh [3]. Sampah plastik juga termasuk sebagai jenis sampah yang sulit terurai oleh tanah, sehingga dapat merusak dan mencemari tanah serta air tanah [4].

Pengelolaan sampah plastik pun tidak bisa dilakukan dengan sembarangan, seperti dengan hanya ditimbun, ataupun menggunakan proses pembakaran. Dengan pembakaran sampah plastik, efeknya dapat menyebabkan kerusakan pada sistem pernapasan jika dilakukan terus menerus [5]. Sehingga, dibutuhkan penanganan khusus dalam proses pengelolaan sampah, yang salah satunya dapat dilakukan dengan proses daur ulang menjadi barang lain yang dapat dimanfaatkan kembali. Proses daur ulang sampah plastik dapat dimulai dengan proses pencacahan sampah plastik itu sendiri. Biasanya sampah plastik yang lebih memungkinkan untuk dicacah adalah sampah plastik dari botol-botol plastik. Untuk melakukan proses pencacahan sampah plastik, dibutuhkan mesin yang mampu mencacahnya dengan hasil yang baik dan cepat. Mesin pencacah menggunakan prinsip gaya geser (F_p) untuk mencacah material yang dapat didekati dengan persamaan (1), dimana τ adalah tegangan geser dan A adalah luas penampang material yang dipotong yang dapat dihitung sebagai hasil kali dari tebal bilah dan tebal material plastik yang dipotong [6].

$$F_p = \tau A \quad (1)$$

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa dari mesin pencacah ini baik melalui simulasi ataupun eksperimen. Kategori penelitian yang pertama terfokus pada sistem poros yang digunakan pada mesin pencacah, yang dapat dibagi menjadi sistem poros tunggal dan ganda [7]–[9]. Poros tunggal biasanya memanfaatkan pemotong statis untuk membantu bilah yang diputar (pemotong dinamis) oleh poros dalam mencacah objek. Dari penelitian penelitian tersebut, disimpulkan bahwa poros ganda memiliki kelebihan dalam kecenderungan tingkat kemungkinan objek dapat tercacah yang lebih besar karena dua poros yang berputar memungkinkan objek lebih mudah tertangkap dan tercacah. Namun, kelemahan dari sistem ini adalah bilah yang akan lebih cepat aus karena interaksi antar bilah yang lebih intens [7].

Beberapa penelitian lain berfokus pada geometri dari bilah yang digunakan dalam mesin pencacah. Beberapa modifikasi dalam hal ini diantaranya adalah penggunaan jumlah ujung pemotong bilah yang berbeda yang digunakan [10], [11]. Dalam penelitian oleh [10], penulis berasumsi semakin banyak ujung bilah yang digunakan memiliki kelemahan, yaitu bilah mengabaikan material tanpa memotong. Terlebih lagi, saat merobek material keras, bilah cenderung berbalik melawan putaran poros sebelum berputar dan membentur lagi pada permukaan yang sama. Meskipun begitu, pernyataan ini belum diinvestigasi lagi lebih mendalam lewat eksperimen pada penelitian tersebut. Beberapa penelitian juga menggunakan ketebalan bilah pemotong yang berbeda dan menghasilkan performa yang berbeda yang dapat dinilai berdasarkan tegangan von Mises, regangan geser elastis, dan deformasi [10], [12]–[14]. Namun, yang perlu diperhatikan juga bahwa pada penelitian penelitian yang berbeda tersebut, terdapat perbedaan parameter lain, seperti material dari bilah, diameter bilah, dan jumlah ujung bilah. Sehingga, perbedaan performa juga mungkin disebabkan oleh faktor-faktor tersebut.

Penelitian-penelitian selanjutnya berfokus pada modifikasi dari orientasi penempatan bilah. Beberapa orientasi yang digunakan dalam penelitian-penelitian sebelumnya diantaranya, orientasi sejajar, bentuk X, bentuk V, dan spiral baik menggunakan bilah tunggal ataupun sejajar [15], [16]. Dari penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa orientasi sejajar menghasilkan waktu pemotongan tercepat, namun cacahan terkecil dihasilkan oleh bentuk X [15]. Sedangkan, orientasi spiral menghasilkan efisiensi tertinggi [16].

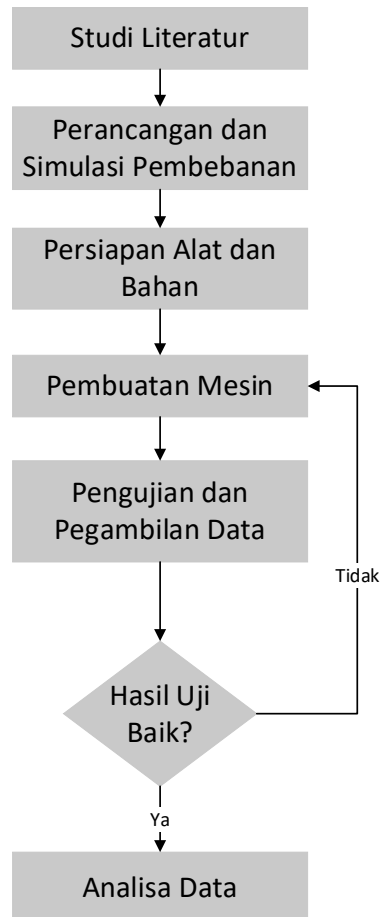
Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan tersebut, masih terdapat banyak pengembangan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa dari mesin pencacah. Dari sistem mesin pencacah yang digunakan pada penelitian yang telah disebutkan sebelumnya, bilah satuan disusun menjadi kumpulan bilah yang dihubungkan oleh poros melalui lubang dalam bilah tersebut. Penggunaan sistem ini memiliki kelemahan yaitu kemungkinan terjadi slip yang besar dari tiap potongan bilah pada penggunaan yang lama atau secara terus menerus, sehingga pencekaman dalam

proses pemotongan tidak maksimal, apalagi untuk penggunaan terus menerus yang akan menimbulkan aus pada sambungan antara poros dan bilah satuan. Untuk memperbaiki hal tersebut, solusi yang diajukan adalah dengan penggunaan bilah monolitik yang berasal dari satu poros panjang yang melalui proses permesinan, yang belum pernah digunakan sebelumnya di penelitian penelitian lain. Lebih lanjut lagi, menurut persamaan (1), luas penampang A merupakan fungsi dari ketebalan dari material yang dipotong dan tebal pisau pencacah yang mempengaruhi gaya geser yang digunakan untuk merobek material [6]. Hal ini secara tidak langsung diduga dapat mempengaruhi kualitas hasil cacahan. Kualitas hasil cacahan dari proses dapat dinilai dari luas permukaan hasil cacahan ataupun persentase hasil cacahan.

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, performa mesin yang dinilai dari kualitas cacahan yang dipengaruhi oleh variasi kecepatan putaran bilah, jenis/tebal botol cacahan pada saat proses belum diinvestigasi lebih lanjut menggunakan sistem bilah monolitik ganda. Sehingga, dalam penelitian ini, dilakukan proses perancangan, pembuatan, hingga uji performa mesin menggunakan parameter parameter tersebut

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Politeknik Negeri Indramayu dengan beberapa tahapan, dimulai dari perancangan konsep, pembuatan dan perakitan, dan uji performa mesin. Pengambilan data pada tahapan uji performa mesin dilakukan menggunakan metode eksperimen. Berikut diagram alir dari penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Simulasi pembebanan dilakukan menggunakan software Solidwork 2021 untuk meninjau tingkat keamanan dari rangka yang akan dibuat. Sedangkan dalam proses pembuatan, poros berbahan VCN berukuran diameter awal 140 mm

dibentuk menjadi pisau monolitik melalui proses pembubutan dengan mengikuti spesifikasi dari benda kerja. Bahan yang digunakan dalam pengujian mesin ini adalah jenis sampah rumahan (berupa plastik pecahan ember, toples yang berbahan polypropylene) dengan tebal minimum berkisar 1,19 mm, dan jenis sampah industri (berupa akrilik) dengan tebal minimum berkisar 2,84 mm. Pengukuran kecepatan putaran dilakukan dengan menggunakan tachometer non kontak. Berat bahan botol plastic yang digunakan untuk setiap variasi adalah berkisar 1 kg. Hasil akhir dari proses cacahan kemudian diukur dimensi panjang dan lebar. Desain eksperimen dari penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.

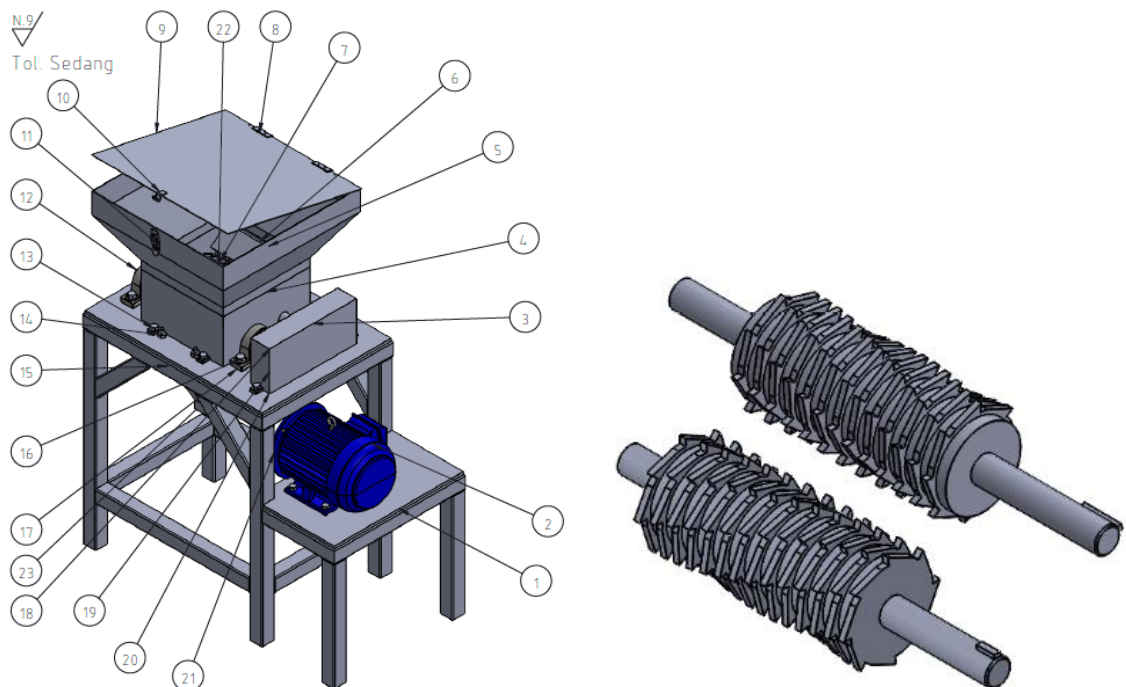
Tabel 1. Desain Eksperimen

Variabel Bebas	Variabel Kontrol	Variabel Terikat
Kecepatan Putaran Bilah	Berat sampah sebelum proses cacahan	Berat hasil cacahan Dimensi hasil cacahan
Jenis/Tebal Botol Sampah		

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perancangan Mesin

Dalam proses perancangan mesin ini, bilah pencacah dari sistem pisau ganda yang berputar berlawanan arah, dengan total 27 bilah dirancang memiliki ketebalan 8 mm dengan diameter bilah sebesar 135 mm. Setiap bilah memiliki 8 mata bilah dengan celah antar bilah dirancang memiliki jarak 12 mm. Tinggi mata bilah pencacah dari masing masing bilah adalah 10 mm dengan jarak panjang busur antara ujung mata bilah yang satu dengan ujung bilah setelahnya adalah 10 mm. Bilah dirancang bukan sebagai susunan atau tumpukan lempengan bilah terpisah, namun sebagai hasil proses pembentukan dari satu poros benda kerja. Konsep rancangan dari mesin pencacah botol plastik ini adalah sebagai berikut.



Gambar 2. Desain Rancangan Mesin dan Pisau

Tabel 1. Keterangan Bagian-Bagian Mesin

No.	Nama Komponen
1.	Plat dudukan motor listrik
2.	Motor listrik
3.	Plat penutup transmisi
4.	Body
5.	Hopper atas
6.	Plat pengarah
7.	Pisau 1
8.	Engsel
9.	Penutup atas
10.	Pengait kunci
11.	Pengunci
12.	Bearing
13.	Baut M14
14.	Mur M14
15.	Baut M17
16.	Mur M17
17.	Rangka
18.	Roda gigi
19.	Spocket T15
20.	Sprocket T33
21.	Rantai
22.	Pisau 2
23.	Hopper Bawah

Untuk menghitung gaya potong pisau (F_p), torsi pemotongan (T_p) digunakanlah persamaan (1) dan persamaan (2) dimana A adalah luas penampang target yang dipotong, τ adalah tegangan geser plastik yang diizinkan [17]. Dalam perancangan ini, τ untuk plastik tipe PP adalah $17,60 \text{ N/mm}^2$ yang merupakan 0,577 kali dari kekuatannya yang sebesar $30,518 \text{ N/mm}^2$ [18]–[20], A yang mengalami kontak langsung dalam satu kali proses pemotongan adalah $54,4 \text{ mm}^2$, dan r yang merupakan jari-jari pisau pemotong sebesar $0,0675 \text{ m}$.

$$F_p = \tau A = 17,6 \text{ N/mm}^2 \times 54,4 \text{ mm}^2 = 957,44 \text{ N}$$

$$T_p = F_p r \quad (2)$$

$$= 957,44 \text{ N} \times 0,0675 \text{ m} = 64,627 \text{ Nm}$$

Sedangkan torsi tanpa beban (T_{tb}) yang merupakan torsi ketika pisau pemotong tidak dikenai benda kerja, torsi total (T_{total}), dan kecepatan putaran pisau pemotong ω (rad/s) digunakanlah persamaan di bawah ini dengan n yang digunakan adalah 350 rpm berdasarkan pertimbangan konversi putaran dari puli pada poros motor dan puli pada poros pemotong dengan ukuran roda gigi di pasaran, dan I merupakan momen inersia total dua pisau yang diestimasi dari software Solidworks. Sedangkan, α yang merupakan percepatan sudut (rad/s²) dengan asumsi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan sudut konstan sebesar 5 detik.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

$$= \frac{2\pi(350)}{60} = 36,66 \text{ rad/s}$$

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t} \quad (4)$$

$$= \frac{(36,66-0) \text{ rad/s}}{5 \text{ s}} = 7,33 \text{ rad/s}^2$$

$$\begin{aligned} T_{tb} &= I\alpha \\ &= 0,0469 \text{ kg m}^2 \times 7,33 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 0,343 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (5)$$

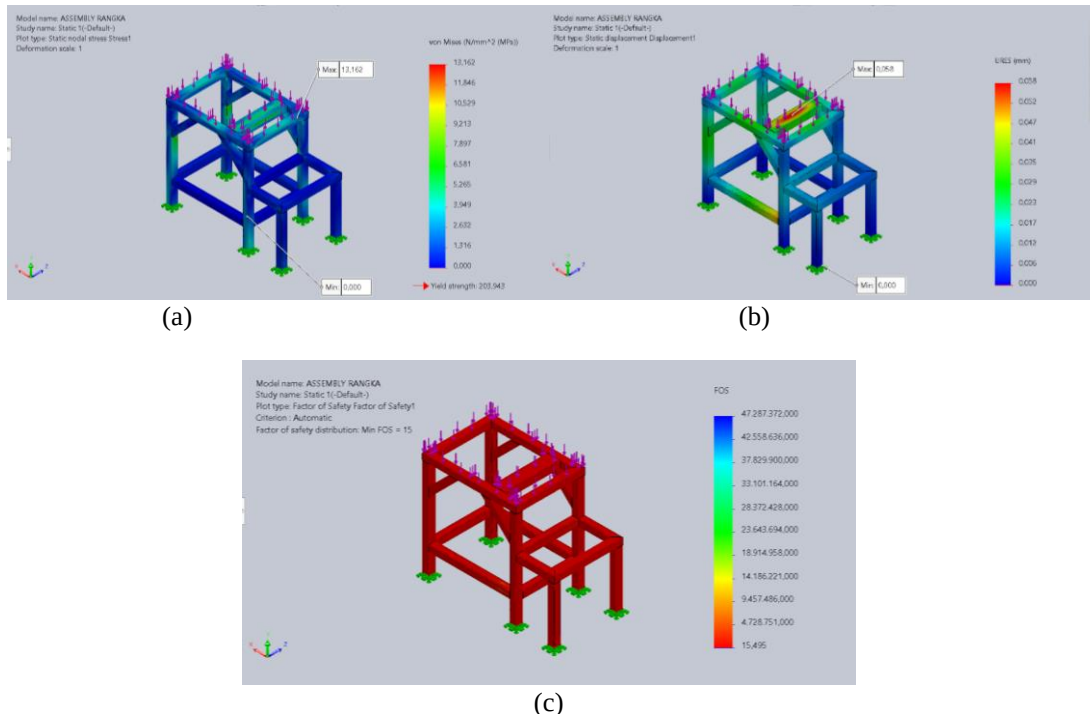
$$\begin{aligned} T_{total} &= T_p + T_{tb} \\ &= 64,627 \text{ Nm} + 0,343 \text{ Nm} = 64,971 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (6)$$

Sehingga daya mekanik minimal yang dibutuhkan (P_m), serta daya motor minimal (P_{motor}) dengan factor keamanan yang digunakan sebesar 1,2 agar mesin dapat menghancurkan sampah plastik di segala kondisi, dapat dihitung menggunakan persamaan 7 dan persamaan 8.

$$\begin{aligned} T_{total} &= T_p + T_{tb} \\ &= 64,971 \text{ Nm} \times 36,66 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 2381,29 \text{ W} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T_{total} &= T_p + T_{tb} \\ &= 1,2 \times 2381,29 \text{ W} = 2857,56 \text{ W} = 3,8 \text{ hp} \end{aligned} \quad (8)$$

Sedangkan pada proses perancangan selanjutnya, rangka dari mesin disimulasikan untuk menahan beban total sebesar 126,84 kg dengan material Galvanized Steel. Hasil simulasi statik dari rangka mesin ini ditampilkan di Gambar 3. Dari hasil simulasi, tegangan maksimum sebesar 12,1 MPa dialami di bagian rangka yang mengalami pembebanan secara langsung dengan *displacement* maksimal hanya berkisar 0,058 mm di bagian rangka yang terbebani langsung tersebut. Dari Gambar 3 (c), dapat dilihat bahwa rangka mesin memiliki *Safety Factor* minimal sebesar 15 sehingga dikatakan aman.



Gambar 3. Hasil Simulasi Rangka Mesin Berupa (a) Stress (b) Displacement (c) Safety Factor

3.2 Pembuatan dan Uji Performa Mesin

Pembuatan pisau pencacah dari mesin ini adalah melalui proses pembubutan dari 2 poros tunggal bahan VCN dengan diameter awal sebesar 140 mm dan dibentuk sesuai gambar kerja yang telah dibuat, yaitu panjang masing masing bilah berkisar 294-300 mm dan diameter total pisau sebesar 135 mm. Bagian tengah dari poros besar yang dibentuk sebagai bilah pencacah dilubangi dengan diameter 35 mm sedalam 5 cm untuk selanjutnya dimasukkan poros dengan diameter yang sama sebagai bagian yang tersambung langsung ke bearing sebagai penopang yang kemudian poros kecil penopang tersebut melalui proses pengelasan agar lebih kuat. Hasil dari pembuatan dan perakitan mesin ditampilkan di Gambar 4. Cara kerja dari mesin ini adalah dengan mencacah sampah plastik menggunakan dua sistem pisau yang berputar berlawanan arah satu sama lain. Motor listrik yang digunakan adalah motor listrik AC induksi 1 fasa dengan daya 4 hp dengan kecepatan putaran maksimal sebesar 1400 rpm.

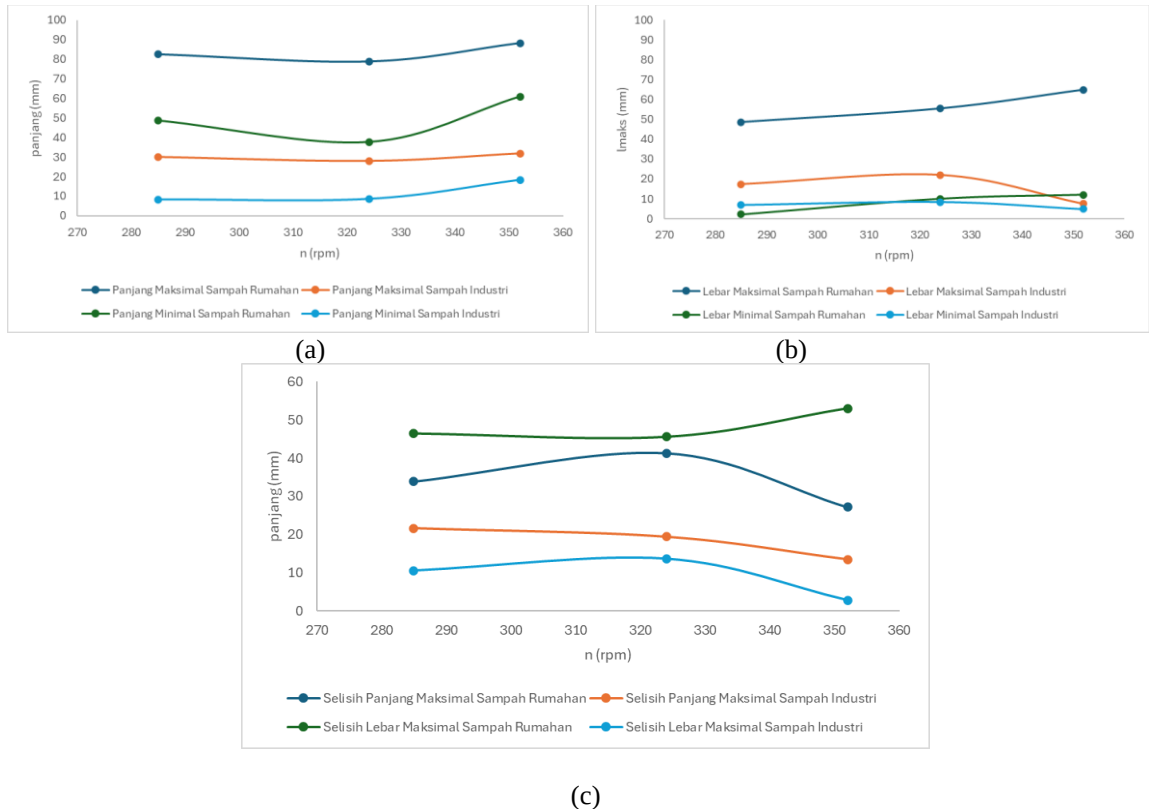


Gambar 4. Hasil Fabrikasi Mesin

Hasil dari pengujian dengan variasi kecepatan putaran dan jenis sampah ditampilkan pada Tabel 2. Dari hasil tersebut, dibuat grafik yang ditampilkan pada Gambar 5. Dari grafik tersebut, dapat dilihat, bahwa untuk rentang variasi kecepatan putaran yang digunakan pada pengujian ini, kecepatan putaran tidak berpengaruh signifikan pada panjang ataupun lebar maksimal dan minimal. Hal ini dapat ditinjau menggunakan nilai koefisien korelasi R^2 antara n dengan dimensi minimal dan maksimal yang berkisar 15,4 - 68,6%, kecuali lebar maksimal dan lebar minimal pada sampah rumahan dengan nilai R^2 sebesar 94,6 - 96,7%. Hal yang serupa juga terjadi antara kecepatan putaran dengan selisih dimensi maksimal, dengan nilai koefisien korelasi R^2 yang hanya berkisar 15,2 - 88,37%. Model regresi yang digunakan adalah regresi linier.

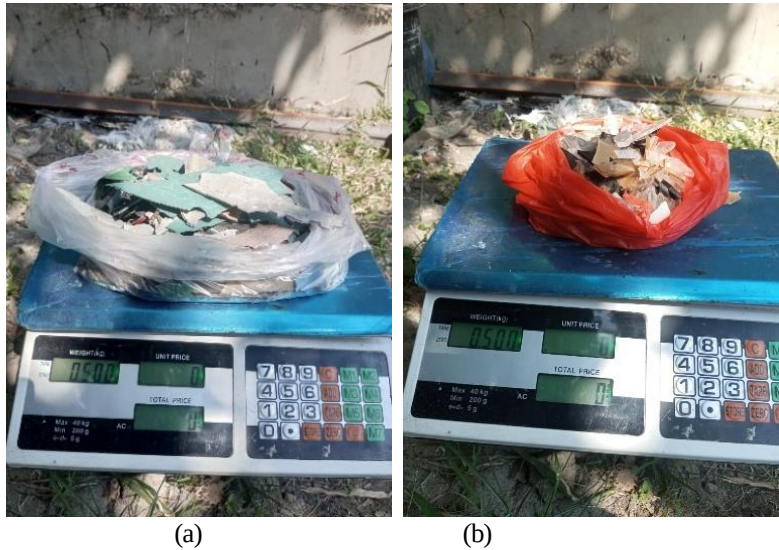
Tabel 2. Hasil Pengujian Mesin

Jenis Sampah	Tebal Sampah (mm)	n (rpm)	Dimensi Cacahan (mm)						Berat Awal Sampah (gram)	Berat Cacahan (gram)
			Panjang Maksimal (mm)	Panjang Minimal (mm)	Selisih Panjang Maksimal (mm)	Lebar Maksimal (mm)	Lebar Minimal (mm)	Selisih Lebar Maksimal (mm)		
Sampah Rumahan	1,19	285	82,6	48,7	33,9	48,71	2,24	46,47	500	500
		324	79	37,7	41,3	55,6	10	45,6	500	495
		352	88,2	61	27,2	65	12	53	500	495
Sampah Industri	2,84	285	29,96	8,29	21,67	17,48	6,93	10,55	500	445
		324	27,97	8,56	19,41	22,03	8,36	13,67	500	492
		352	31,78	18,31	13,47	7,64	4,92	2,72	500	500



Gambar 5. Grafik Dimensi Hasil Cacahan (a) Panjang (b) Lebar (c) Selisih Dimensi Maksimal dan Minimal

Selanjutnya, dari Gambar 5, jenis sampah yang berbeda, lebih berpengaruh signifikan pada dimensi hasil cacahan. Jenis sampah industri memiliki dimensi yang jauh lebih kecil dibandingkan sampah rumahan. Hal ini disebabkan karakteristik sampah industri yang berupa akrilik yang lebih kaku dibandingkan sampah rumahan. Sehingga, dalam proses pencacahan, hasil cacahan dari sampah industri memiliki dimensi yang lebih kecil meskipun dengan tebal yang jauh lebih besar. Selain itu, faktor selisih jarak antar bilah dengan tebal bilah yang mencapai 2 mm di tiap sisi kiri dan kanan bilah menjadi salah satu faktor lebih sulit tercacahnya sampah rumahan yang bersifat lebih fleksibel dengan ketebalan yang hanya berkisar 1,19 mm. Sedangkan, berat hasil cacahan dari berat awal sampel yang dimasukkan ke mesin pencacah baik untuk sampah rumahan, ataupun industri tidak terpengaruh terlalu besar dengan adanya variasi kecepatan putaran. Waktu rata rata yang dibutuhkan untuk mencacah 500 gram plastik tersebut adalah 1 menit. Sehingga, dalam 1 jam atau 60 menit, dapat dicacah sampah plastik seberat 30 kg. Hasil cacahan dari penelitian ini mendekati hasil penelitian yang telah dilakukan oleh [15], [21], yang menghasilkan dimensi cacahan berkisar 4-8,5 cm dengan kapasitas berkisar 33,26 kg/jam. Namun, dengan mesin yang menggunakan bilah monolitik ini, kerusakan pada sambungan antara kepingan pisau dan poros dapat dihindari untuk proses pemakaian yang lama karena struktur kepingan pisau menyatu secara permanen yang dibentuk dari satu poros besar melalui pembubutan. Hasil cacahan secara visual baik sampah rumahan dan industri ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Cacahan Secara Visual dari (a) Sampah Rumahan (b) Sampah Industri

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut. Mesin pencacah plastik yang dirancang memiliki 2 sistem pisau yang berputar berlawanan arah, dengan total 27 bilah dirancang memiliki ketebalan 8 mm dengan jarak antar bilah sebesar 12 mm, yang membutuhkan daya motor minimal sebesar 3,8 hp dan memiliki *Safety Factor* rangka sebesar 15. Selain itu, sistem pisau pencacah dibuat menggunakan proses pembubutan dari benda kerja poros besar utuh dan dibentuk sesuai pola dari gambar kerja, bukan tumpukan dari kepingan pisau. Selanjutnya, hasil pengujian mesin menunjukkan bahwa mesin dapat mencacah plastik industri berupa akrilik, dan plastik rumahan berupa toples dan ember dengan waktu proses 1 menit untuk 500 gram sampah. Kemudian, variasi kecepatan putaran untuk rentang yang digunakan tidak berpengaruh signifikan pada dimensi cacahan, namun dimensi cacahan lebih dipengaruhi jenis plastik yang dicacah, dengan dimensi terkecil dihasilkan untuk jenis sampah industri yang berkisar 2,72 mm – 31,78 mm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Indramayu atas dukungan pembiayaan kegiatan penelitian ini dengan nomor kontrak 0724/PL42.PL42.9/AL.04/2024 sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, “Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah.” Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, “KOMPOSISI SAMPAH.” Accessed: Feb. 11, 2024. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- [3] Y. W. Firmansyah *et al.*, “Keberadaan Plastik di Lingkungan, Bahaya terhadap Kesehatan Manusia, dan Upaya Mitigasi: Studi Literatur,” *J. Serambi Eng.*, vol. 6, Oct. 2021, doi: 10.32672/jse.v6i4.3471.
- [4] N. Karuniastuti, “BAHAYA PLASTIK TERHADAP KESEHATAN DAN LINGKUNGAN,” *Swara Patra Maj. Ilm. PPSDM Migas*, vol. 3, no. 1 SE-Articles, Dec. 2013, [Online]. Available: <http://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/43>
- [5] I. Sasputra, S. Koamesah, and S. Rante, “PENGARUH PAPARAN ASAP BAKARAN SAMPAH PLASTIK TERHADAP GAMBARAN SEL-SEL INFLAMASI DAN GAMBARAN

- HISTOPATOLOGI PARU MENCIT,” *Cendana Med. J.*, vol. 8, no. 3 SE-Articles, Nov. 2020, doi: 10.35508/cmj.v8i3.3495.
- [6] V. Boljanovic, *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. Industrial Press, 2014. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=e-WMObwib4EC>
- [7] M. K. Biddinika, M. Syamsiro, A. N. Hadiyanto, Z. Mufrodi, and F. Takahashi, “Technology for public outreach of fuel oil production from municipal plastic wastes,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2797–2801, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.424>.
- [8] R. Ekman, “Development of a Plastic Shredder,” LUND UNIVERSITY, 2018.
- [9] A. Tegegne, A. Tsegaye, E. Ambaye, and R. Mebrhatu, “Development of Dual Shaft Multi Blade Waste Plastic Shredder for Recycling Purpose,” *Int. J. Res. Sci. Innov.*, vol. 6, no. 1, pp. 49–55, 2019.
- [10] S. Ravi, “UTILIZATION OF UPGRADED SHREDDER BLADE AND RECYCLING THE WASTE PLASTIC AND RUBBER TYRE,” in *2nd European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Paris: IEOM Society International, 2018, pp. 3208–3216.
- [11] N. Raji, R. Kuku, S. Ojo, and S. Hunvu, “DESIGN DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF WASTE PLASTIC SHREDDER,” *J. Prod. Eng.*, vol. 23, pp. 22–28, Jun. 2020, doi: 10.24867/JPE-2020-01-022.
- [12] B. P. Akash, Christina, K. S. Darshan, and Manoj, “PLASTIC WASTE MANAGEMENT BY MECHANICAL SHREDDER MACHINE,” *Internation Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education*, vol. 5, no. 2. IJARIE, pp. 3218–3223, 2019.
- [13] M. F. Nasr and K. A. Yehia, “Stress Analysis of a Shredder Blade for Cutting Waste Plastics,” *J. Int. Soc. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 9–12, 2019, doi: 10.21608/jisse.2019.20292.1017.
- [14] P. Kumaran, N. Lakshminarayanan, A. V Martin, R. George, and J. JoJo, “Design and analysis of shredder machine for e - waste recycling using CATIA,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 993, no. 1, p. 12013, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/993/1/012013.
- [15] F. Burlian, I. Yani, Ivfransyah, and J. Arie S, “Rancang Bangun Alat Penghancur Sampah Botol Plastik Kapasitas ± 33 Kg/Jam,” *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 4, no. SE-Teknik Mesin, pp. M-17-M-23, Jan. 2020, [Online]. Available: <https://journal.uhamka.ac.id/index.php/teknoka/article/view/4286>
- [16] J. H. Wong, W. M. Karen, S. A. Bahrin, B. L. Chua, G. J. Melvin, and N. J. Siambun, “Wear Mechanisms and Performance of PET Shredder Blade with Various Geometries and Orientations,” *Machines*, vol. 10, no. 9. 2022. doi: 10.3390/machines10090760.
- [17] A. Prayadi, D. Arifin, and R. Widiatmoko, “Rancang Bangun Mesin Pencacah Plastik Pet dengan Kapasitas 20 Kg/Jam,” *J. CRANKSHAFT*, vol. 7, pp. 43–52, Aug. 2024, doi: 10.24176/cra.v7i3.13249.
- [18] C. A. Harper, Ed., *Modern Plastics Handbook*, 1st Editio. New York: McGraw-Hill Education, 2000. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070267145>
- [19] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education, 2020. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=-CcREQAAQBAJ>
- [20] W. F. Smith and J. Hashemi, *Foundations of Materials Science and Engineering*, 7th Editio. in McGraw-Hill series in materials science and engineering. McGraw-Hill, 2023. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=1QUESgAACAAJ>
- [21] Dian Anisa Rokhmah Wati and Agung Samudra, “RANCANG BANGUN MESIN PENCACAH SAMPAH PLASTIK,” *Steam Eng.*, vol. 4, no. 1 SE-Articles, pp. 9–13, Sep. 2022, doi: 10.37304/jptm.v4i1.5180.