

REVIEW KINERJA MESIN PENCACAH PLASTIK SEKALA KECIL (RUMAH) UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH RUMAH TANGGA

Eky Muhammad Fauziy¹, Hendi Saryanto², Dan Mugsidi³

ekymuhammadfauziy@gmail.com¹, hendisaryanto@uhamka.ac.id², ftii@uhamka.ac.id³

Universitas Muhammadiyah Prof.Dr.Hamka

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah polimer domestik pasca-konsumsi saat ini memerlukan strategi intervensi yang efektif langsung dari sumbernya, salah satunya melalui pemanfaatan teknologi tepat guna berupa mesin pencacah plastik skala mikro-komunitas. Tujuan utama dari tinjauan literatur (literature review) ini adalah untuk menganalisis secara kritis dan mengevaluasi metrik performansi mekanis, efisiensi konsumsi energi, serta kelayakan tekno-ekonomi dari mesin pencacah plastik skala kecil dalam memproses limbah rumah tangga. Metodologi analisis dilakukan dengan menelaah data empiris dari berbagai riset riil terkait parameter desain sasis, geometri ruang hancur, metalurgi pisau pemotong, serta dinamika karakteristik material polimer input seperti Polyethylene Terephthalate (PET), High-Density Polyethylene (HDPE), dan Polypropylene (PP). Hasil tinjauan menunjukkan bahwa konfigurasi mesin dengan sistem poros ganda (double shaft counter-rotating) memiliki kapabilitas yang jauh lebih superior dalam mengatasi tingkat heterogenitas dan variabilitas geometri limbah domestik dibandingkan dengan sistem poros tunggal (single shaft), yang sering kali mengalami kendala kemacetan mekanis (clogging) akibat lilitan plastik fleksibel. Dari aspek metalurgi, penggunaan baja perkakas tipe AISI D2 yang diberi perlakuan panas (heat treatment) hingga mencapai kekerasan 58 HRC terbukti mampu mereduksi laju keausan abrasif akibat kontaminan eksternal dan menjaga konsistensi ukuran serpihan (flakes output) pada rentang ideal 6–10 mm. Analisis energi spesifik menunjukkan bahwa integrasi komponen roda gila (flywheel) dan perangkat Variable Frequency Drive (VFD) mampu menekan konsumsi energi spesifik total hingga 18% serta mereduksi lonjakan arus mula mekanis. Secara tekno-ekonomi, implementasi mesin ini di tingkat Bank Sampah dinilai sangat layak secara finansial dengan proyeksi Internal Rate of Return (IRR) mencapai 24,8% dan masa pengembalian modal (Payback Period) selama 14,2 bulan, didukung oleh penurunan emisi akustik hingga 74 dB(A) yang aman untuk kawasan padat penduduk. Tinjauan ini memberikan arah rekomendasi bagi standardisasi manufaktur mesin daur ulang lokal yang ramah energi, aman, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Mesin Pencacah Plastik, Tujuan Tinjauan, Poros Ganda, Polimer Domestik, Analisis Tekno-Ekonomi.

ABSTRACT

The escalating volume of post-consumer domestic polymer waste necessitates effective intervention strategies directly at the source, primarily through the utilization of appropriate technology such as community-scale micro-plastic shredding machines. The primary objective of this literature review is to critically analyze and evaluate the mechanical performance metrics, energy consumption efficiency, and techno-economic feasibility of small-scale plastic shredding machines in processing household waste. The analytical methodology involves a comprehensive review of empirical data from various real-world studies concerning chassis design parameters, crushing chamber geometry, cutting blade metallurgy, and the dynamic characteristics of input polymer materials, including Polyethylene Terephthalate (PET), High-Density Polyethylene (HDPE), and Polypropylene (PP). The review findings indicate that configurations utilizing a double-shaft counter-rotating system exhibit significantly superior capabilities in managing the high heterogeneity and geometric variability of domestic waste compared to single-shaft systems, which frequently suffer from mechanical clogging caused by flexible plastic wrapping. Metallurgically, the employment of AISI D2 tool steel subjected to comprehensive heat treatment to achieve a hardness of 58 HRC is proven effective in reducing abrasive wear rates from external

contaminants, thereby maintaining a consistent flake output size within the ideal range of 6–10 mm. Specific energy consumption analysis demonstrates that integrating a flywheel component and a Variable Frequency Drive (VFD) device can suppress the total specific energy consumption by up to 18% while mitigating mechanical inrush current spikes. Techno-economically, implementing this machine at the community Waste Bank level is deemed financially highly viable, with a projected Internal Rate of Return (IRR) of 24.8% and a payback period of 14.2 months, supported by a reduction in acoustic emissions to 74 dB(A), which is safe for densely populated areas. This review provides strategic recommendations for the manufacturing standardization of localized recycling hardware that is energy-efficient, safe, and sustainable.

Keywords: Plastic Shredding Machine, Review Objective, Double-Shaft, Domestic Polymer, Techno-Economic Analysis.

PENDAHULUAN

Manajemen limbah plastik sektor domestik tetap menjadi salah satu tantangan lingkungan paling krusial di era modern. Volume plastik yang dihasilkan dari aktivitas rumah tangga terus meningkat seiring dengan ketergantungan masyarakat pada kemasan sekali pakai. Pendekatan konvensional seperti pengumpulan dan pembuangan langsung ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) terbukti tidak berkelanjutan akibat keterbatasan lahan dan potensi pencemaran jangka panjang. Oleh karena itu, reduksi volume mekanis di tingkat hulu atau komunitas lokal menjadi strategi intervensi yang sangat penting untuk memotong rantai distribusi limbah sebelum mencemari ekosistem yang lebih luas.

Dalam rantai daur ulang mekanis, mesin pencacah plastik skala kecil memegang peran sentral sebagai teknologi intermediasi. Mesin ini berfungsi mengubah limbah plastik pasca-konsumsi yang berukuran besar menjadi serpihan (flakes) homogen dengan densitas curah yang lebih tinggi. Proses pengecilan ukuran ini tidak hanya mempermudah proses logistik dan transportasi, tetapi juga merupakan tahapan preparasi wajib sebelum material polimer dapat diproses lebih lanjut melalui ekstrusi atau pencetakan injeksi. Efektivitas dari seluruh proses daur ulang hilir sangat bergantung pada kualitas luaran yang dihasilkan pada fase awal penanganan mekanis ini.

Meskipun urgensi teknologi ini sangat tinggi, performansi mesin pencacah skala kecil sering kali dibatasi oleh kendala teknis dan operasional. Variabilitas jenis polimer rumah tangga mulai dari PET, HDPE, hingga PP memiliki karakteristik mekanis dan ketangguhan yang berbeda, yang menuntut optimasi pada sistem transmisi daya dan geometri pisau potong. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengevaluasi secara kritis metrik kinerja mesin pencacah plastik skala kecil melalui lima domain utama: desain mekanis, analisis daya, optimasi pisau, variabilitas material, dan dampak tekno-ekonomi, guna memberikan arah pengembangan teknologi daur ulang yang lebih efisien di masa depan.

Desain Mekanis, Permodelan Sasis, dan Konfigurasi Poros Penggerak

Pengembangan konfigurasi mekanis pada rancang bangun mesin pencacah plastik skala kecil sangat menentukan fungsionalitas struktural serta keandalan operasional jangka panjang saat diimplementasikan di lingkungan domestik [1]. Rekayasa struktural yang diintegrasikan pada komponen utama, seperti poros (shaft) utama dan ruang hancur (crushing chamber), dituntut untuk mampu meredam sekaligus menahan beban kejut dinamis (dynamic shock load) tinggi yang terjadi secara konstan saat mata pisau melakukan kontak tumbukan pertama dengan material polimer keras pasca-konsumsi. Penentuan dimensi internal ruang pencacah harus dikalibrasi secara cermat dengan mempertimbangkan volume maksimum material masuk agar dapat mengeliminasi potensi fenomena kemacetan mekanis (clogging) akibat penumpukan material, yang secara drastis dapat menghentikan putaran poros secara mendadak serta menurunkan efisiensi

volumetrik mesin [2]. Modifikasi geometri eksternal pada komponen corong pengumpan (hopper) juga menjadi fokus riset fungsional guna menjamin perlindungan keselamatan operator dari risiko serangan balik material (kickback) sekaligus mengendalikan laju aliran input material secara manual agar beban mekanis yang didistribusikan ke poros tetap berada di bawah batas ambang batas defleksi material yang diizinkan [3].

Kajian komparatif mengenai efektivitas kinematika antara sistem poros tunggal (single shaft) dan sistem poros ganda (double shaft) menjadi domain perdebatan teknis yang sangat signifikan dalam literatur manufaktur tepat guna di Indonesia. Sistem dengan konfigurasi poros tunggal umumnya menjadi pilihan utama untuk aplikasi skala mikro-komunitas atau industri rumah tangga karena menawarkan kesederhanaan dalam proses fabrikasi mekanis, kemudahan perawatan, serta kebutuhan biaya investasi komponen yang relatif lebih murah, meskipun konfigurasi ini menyimpan kelemahan inheren berupa tingginya risiko akumulasi material plastik jenis fleksibel seperti film tipis yang cenderung melilit sumbu poros dan menurunkan laju produksi [4]. Sebaliknya, adopsi teknologi sistem poros ganda counter-rotating menawarkan kapabilitas destruksi polimer yang jauh lebih superior melalui pemanfaatan kombinasi gaya geser (shearing force) dan gaya robek tinggi yang dihasilkan oleh interaksi intermeshing antar-pisau, sehingga sangat efektif untuk mereduksi material dengan tingkat heterogenitas dan variabilitas geometri yang tinggi [5]. Kendati demikian, kompleksitas mekanis pada sistem transmisi poros ganda memerlukan sistem sinkronisasi roda gigi yang sangat presisi, yang berimplikasi langsung pada peningkatan bobot total sasis serta membutuhkan ruang penempatan komponen yang jauh lebih luas [6].

Evaluasi terhadap aspek integritas dan stabilitas struktural sasis penyangga utama menjadi parameter kritis berikutnya dalam upaya menjamin siklus hidup operasional mesin pencacah plastik di tingkat tapak [10]. Pemanfaatan metode berbasis komputasi seperti Analisis Elemen Hingga (Finite Element Analysis - FEA) telah diadopsi secara luas oleh para peneliti lokal untuk memetakan distribusi tegangan von Mises, mendeteksi konsentrasi tegangan (stress concentration), serta memprediksi titik rawan kegagalan fatik struktural akibat paparan getaran frekuensi tinggi yang diinduksi oleh putaran motor penggerak serta beban dampak pemotongan polimer yang fluktuatif [7]. Fenomena kegagalan mekanis berupa deformasi plastis permanen atau perambatan retak pada sambungan las sasis sering kali dilaporkan terjadi apabila sasis utama tidak memiliki kekakuan bending (bending stiffness) yang memadai untuk menahan torsi puntir selama proses destruksi berlangsung [8]. Solusi rekayasa yang direkomendasikan mencakup pemilihan profil material baja struktural karbon rendah yang rigid (seperti ASTM A36 atau ST37), osilasi pengelasan sambungan, serta penempatan posisi dudukan bantalan (bearing) yang benar-benar koaksial demi menjaga kelurusan sumbu poros utama dan meminimalkan kerugian mekanis akibat gesekan berlebih selama pengoperasian kontinu [9].

Analisis Kebutuhan Daya, Dinamika Torsi, dan Efisiensi Sistem Transmisi

Penentuan dan pemilihan kapasitas daya nominal motor penggerak merupakan salah satu tahapan paling kritis dalam fase perancangan mesin pencacah plastik skala kecil karena menentukan titik temu antara kelayakan teknis mekanis dan efisiensi konsumsi energi operasional [11]. Motor penggerak, baik berupa motor induksi listrik maupun motor bakar internal bensin, wajib dikalibrasi agar mampu memproduksi torsi awal (starting torque) yang cukup masif untuk mengatasi inersia rotasional total sistem mekanis serta menahan lonjakan beban dampak sesaat ketika polimer dengan ketebalan tinggi mulai mengalami penetrasi pemotongan [12]. Kesalahan teoritis dalam mengkalkulasi kebutuhan daya minimum ini sering kali menjadi penyebab utama terjadinya fenomena

kemacetan putaran motor (stalling), yang apabila terjadi secara repetitif tidak hanya menurunkan produktivitas pemrosesan tetapi juga memicu akumulasi panas berlebih (thermal overload) yang dapat merusak isolasi kumparan internal motor listrik [13]. Oleh karena itu, integrasi perangkat kontrol elektronik eksternal seperti Variable Frequency Drive (VFD) atau penggunaan sistem kendali putaran otomatis (rotation control) mulai banyak diuji coba untuk memodulasi karakteristik kecepatan putar poros sekaligus membatasi lonjakan arus start awal (inrush current) agar tetap ramah terhadap kapasitas jaringan listrik rumah tangga konsumen [14].

Mekanisme transmisi daya yang bertugas menyalurkan energi kinetik dari poros motor penggerak menuju poros utama pencacah memegang peranan yang tidak kalah penting dalam menentukan efisiensi mekanis keseluruhan sistem pencacah limbah polimer [15]. Mengingat sebagian besar penggerak mula komersial beroperasi pada karakteristik kecepatan rotasi tinggi dengan luaran torsi yang relatif rendah, implementasi sistem reduksi kecepatan mekanis seperti kombinasi sistem puli-sabuk (pulley-belt) atau sproket-rantai (sprocket-chain) yang dikopel dengan unit kotak roda gigi (reducer gearbox) menjadi prasyarat mutlak untuk menggandakan nilai torsi operasional [16]. Transmisi daya berbasis sabuk (V-belt) menawarkan keunggulan fungsional berupa fitur perlindungan slip inherent yang bertindak sebagai sekering mekanis pelindung poros motor dari beban kejutan ekstrem yang tidak terduga, walaupun jenis transmisi ini memiliki efisiensi transmisi daya yang sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan sistem transmisi roda gigi langsung akibat adanya kerugian gesek kinetik dan slip makro, [17]. Optimasi penentuan rasio reduksi pada unit gearbox terbukti menjadi parameter desain utama dalam menjaga stabilitas pasokan gaya potong konstan yang dibutuhkan untuk memotong struktur rantai kimia polimer yang ulet [18].

Metrik utama yang digunakan untuk menilai performansi energi dari mesin pencacah plastik skala kecil ini difokuskan pada analisis Nilai Konsumsi Energi Spesifik (Specific Energy Consumption - SEC), yang didefinisikan sebagai rasio jumlah energi listrik total yang dihabiskan (kWh) per satuan massa serpihan plastik bersih yang berhasil diproduksi (kg). Nilai SEC ini sangat fluktuatif dan dipengaruhi secara simultan oleh tingkat kekerasan material polimer input, laju pengumpanan (feed rate), serta kondisi ketajaman mata pisau potong yang terpasang pada poros utama pencacah [19]. Rancang bangun mesin pencacah lokal yang mengabaikan aspek keseimbangan dinamis poros rotasi cenderung membuang sebagian besar daya output dari motor menjadi bentuk energi parasit seperti kebisingan akustik tinggi dan getaran struktur sasis, yang pada gilirannya menurunkan efisiensi termodinamika total sistem dan meningkatkan biaya marjinal listrik per kilogram sampah yang diolah. Melalui perhitungan matematika mekanika benda tegar, optimasi massa roda gila (flywheel) dapat diterapkan sebagai penyimpan energi kinetik cadangan guna menstabilkan fluktuasi kebutuhan daya motor selama siklus pencacahan berlangsung [20].

Optimasi Metalurgi, Geometri, dan Mekanisme Keausan Pisau Pemotong

Efisiensi pemotongan mekanis dan pemenuhan standar kualitas dimensi geometris serpihan plastik (flakes output) sangat dikendalikan oleh parameter desain geometri serta tingkat ketajaman mata pisau pencacah yang terpasang secara heliks maupun radial pada poros putar. Karakteristik sudut potong (cutting angle) dan sudut bebas (clearance angle) pada setiap baji mata pisau harus dikalibrasi secara sangat presisi melalui simulasi numerik untuk meminimalkan besaran gaya tekan normal yang diperlukan untuk menginisiasi kegagalan mekanis lokal (local mechanical failure) pada dinding polimer [21]. Desain sudut potong yang terlampaui lancip memang mampu menawarkan ketajaman awal yang sangat superior pada fase pengujian awal, namun karakteristik fisik ini

menyimpang dari aspek ketahanan jangka panjang karena ujung pisau menjadi sangat rentan mengalami rompal mikro (edge chipping) akibat beban dampak tinggi, sedangkan sudut yang terlalu tumpul akan memicu lonjakan kebutuhan torsi poros yang membebani motor penggerak secara drastis [22]. Penentuan jarak celah udara (clearance gap) antara susunan pisau statis yang terpasang kaku pada dinding chamber dan susunan pisau dinamis yang berputar konstan juga wajib berada pada batas toleransi minimum agar plastik lembaran tipis tidak melosot lolos tanpa terpotong [23], [24].

Pemilihan jenis material dan paduan metalurgi untuk komponen pisau pencacah merupakan sebuah bentuk kompromi teknis antara pemenuhan aspek ketahanan aus abrasif (abrasive wear resistance) yang tinggi, ketangguhan dampak (impact toughness) yang mumpuni, serta keterjangkauan biaya pengadaan material di pasar domestik. Penggunaan baja perkakas kualitas tinggi seperti tipe AISI D2 (baja paduan tinggi karbon dan kromium), baja H13, atau per baja daun bekas (SUP9) sering diadopsi dalam rancang bangun nasional karena struktur mikronya mampu mempertahankan ketajaman mikro dalam durasi penggunaan yang relatif lama di bawah paparan beban dampak repetitif [25], [26]. Tahapan perlakuan panas (heat treatment) yang komprehensif, meliputi proses pengerasan (hardening) melalui pemanasan fase austenit dilanjutkan dengan pendinginan cepat (quenching) serta proses tempering berulang, menjadi prasyarat mutlak untuk mencapai nilai kekerasan optimal pada skala Rockwell yang berkisar antara 55-60 HRC [22], [27]. Kegagalan dalam menerapkan siklus metalurgi yang tepat ini akan mengakibatkan pisau pencacah mengalami deformasi plastis yang cepat berupa penumpukan dini atau bahkan mengalami kegagalan katastrofik berupa patah getas struktural apabila tidak sengaja menghantam kontaminan non-plastik keras [5], [25].

Analisis terhadap mekanisme keausan pisau (blade wear mechanisms) beserta penentuan siklus perawatan preventifnya menjadi fokus riset operasional yang sangat krusial untuk menjamin konsistensi kinerja mesin pencacah sepanjang siklus hidup ekonomisnya. Fenomena keausan abrasif merupakan jenis kerusakan yang paling dominan dijumpai pada pisau pencacah lokal, yang dipicu oleh kontak friksional konstan antara permukaan aktif pisau dengan partikel pengotor abrasif seperti silika pasir halus atau akibat keberadaan zat aditif penguat polimer yang terkandung di dalam limbah domestik pasca-konsumsi [28]. Seiring berjalannya akumulasi waktu operasi mesin, degradasi ketajaman mata pisau potong secara linier akan meningkatkan koefisien gesek permukaan, menurunkan laju kapasitas produksi aktual mesin (throughput), serta menghasilkan kontaminasi fraksi ukuran partikel cacahan yang tidak seragam akibat terjadinya mekanisme robekan paksa alih-alih pemotongan bersih [29]. Inovasi rekayasa dalam bentuk perancangan sistem pisau modular (detachable blades) atau geometri mata pisau tipe flat tipe zig-zag terbukti menjadi solusi praktis terbaik yang memungkinkan operator melakukan aktivitas pengasahan mandiri atau penggantian komponen pisau secara parsial tanpa harus melakukan pembongkaran total pada unit poros utama pencacah [24], [30].

Pengaruh Karakteristik, Morfologi, dan Heterogenitas Polimer terhadap Perilaku Pencacahan

Tantangan operasional dan teknis terbesar yang membedakan pengoperasian mesin pencacah plastik skala kecil untuk limbah rumah tangga dengan unit penghancur skala industri besar adalah tingginya tingkat heterogenitas serta variabilitas sifat mekanis-termal dari polimer input yang masuk ke dalam sistem secara acak. Limbah polimer domestik di Indonesia secara konsisten didominasi oleh aliran material Polyethylene Terephthalate (PET) yang berasal dari botol kemasan produk minuman, High-Density Polyethylene (HDPE) dari wadah kosmetik dan detergen, serta Polypropylene (PP) dari kemasan makanan rigid [31]. Karakteristik material PET yang memiliki kekuatan tarik (tensile

strength) intrinsik yang tinggi serta ketangguhan impak yang mumpuni menuntut kebutuhan pasokan gaya geser mekanis yang jauh lebih masif untuk menginisiasi kegagalan patah jika dibandingkan dengan struktur makromolekul PP atau Low-Density Polyethylene (LDPE) yang cenderung lebih lunak dan fleksibel [32], [33]. Heterogenitas bawaan ini memicu terjadinya fluktuasi beban torsi sesaat yang sangat ekstrem pada poros utama mesin pencacah, sehingga menuntut para insinyur perancang untuk menetapkan batas aman kekuatan mekanis komponen berdasarkan skenario beban terburuk dari jenis polimer dengan ketangguhan tertinggi [34].

Karakteristik morfologi fisik awal, konfigurasi geometris, serta ketebalan dinding dari produk plastik pasca-konsumsi juga memegang peranan interaktif yang sangat kuat dalam mempengaruhi laju pengumpanan volumetrik (feed rate) serta dinamika geser di dalam ruang pencacah. Produk plastik lembaran tipis fleksibel seperti kantong belanja plastik (LDPE) atau kemasan saset laminasi memiliki nilai densitas curah (bulk density) yang sangat rendah namun memiliki sifat deformasi elastis yang tinggi, yang dalam banyak kasus operasional justru menyebabkannya cenderung menggumpal, terlilit pada poros berputar, atau menyumbat lubang-lubang perforasi pada saringan bawah (screen) [35], [36]. Sebaliknya, limbah polimer kaku (rigid plastics) dengan ketebalan dinding struktural yang tinggi menunjukkan perilaku mekanis yang bertolak belakang; material ini cenderung mengalami fenomena melompat-lompat (bouncing) di dalam ruang pencacah akibat gaya impak pisau sebelum akhirnya berhasil dicengkeram secara kuat oleh mata pisau, yang berakibat pada penurunan efisiensi volumetrik sesaat dari mesin pencacah tersebut jika tidak dilengkapi dengan mekanisme penekan material [4], [37].

Kualitas akhir dari produk serpihan plastik daur ulang (flakes output) dievaluasi secara ketat berdasarkan dua indikator utama, yaitu tingkat homogenitas distribusi ukuran partikel cacahan dan minimalisasi pembentukan fraksi halus berupa debu plastik (fines atau mikroplastik sekunder). Pencapaian ukuran serpihan plastik yang seragam sangat menentukan keberhasilan parameter pemrosesan termal pada tahapan daur ulang hilir berikutnya seperti proses ekstrusi peletisasi atau pencetakan injeksi, karena variasi ukuran yang terlalu lebar akan memicu laju pelelehan yang tidak seragam di dalam barrel ekstruder dan menghasilkan cacat struktural pada produk akhir [38]. Dimensi geometris serpihan plastik ini dikontrol secara mekanis melalui penempatan pelat saringan perforasi (screen mesh) di bagian kolong bawah ruang pencacah, di mana diameter lubang saringan menjadi pembatas waktu retensi material di dalam mesin [39]. Namun demikian, reduksi diameter lubang saringan yang terlalu kecil demi mengejar homogenitas tinggi akan membatasi laju pengeluaran material secara drastis, memperpanjang waktu retensi tumbukan, dan memicu kenaikan suhu lokal akibat disipasi viskos polimer yang berisiko melelehkan plastik secara prematur dan menyumbat saringan secara total [40].

Analisis Tekno-Ekonomi, Manajemen Operasional, dan Kelayakan Finansial Komunitas

Keberlanjutan jangka panjang dari implementasi teknologi tepat guna berupa mesin pencacah plastik skala kecil di sektor domestik atau unit pengolahan sampah komunitas seperti Bank Sampah dan TPS3R sangat ditentukan oleh pemenuhan parameter kelayakan ekonomi operasional. Analisis tekno-ekonomi komprehensif wajib dilakukan untuk memetakan secara detail struktur komponen biaya investasi awal (Capital Expenditure - CAPEX) yang mencakup biaya pengadaan unit mesin, instalasi kelistrikan, dan modifikasi ruang kerja, serta struktur biaya operasional bulanan (Operational Expenditure - OPEX) yang meliputi biaya konsumsi energi listrik atau bahan bakar, upah tenaga kerja operator, dan biaya perawatan periodik seperti pengasahan ulang mata pisau yang aus [41], [42]. Sebuah sistem rekayasa mesin pencacah plastik baru dinilai memiliki nilai keekonomian

yang rasional dan sehat apabila total biaya pemrosesan mekanis per kilogram plastik yang dikeluarkan mampu berada di bawah nilai selisih harga jual (margin) antara bahan baku sampah plastik mentah dan produk serpihan plastik (flakes) siap industri di pasar pengepul daur ulang lokal [43], [44].

Akurasi proyeksi kelayakan investasi jangka panjang pada proyek tata kelola limbah berbasis komunitas ini diukur secara kuantitatif melalui indikator finansial standar seperti Nilai Sekarang Bersih (Net Present Value - NPV), Tingkat Pengembalian Internal (Internal Rate of Return - IRR), dan Masa Pengembalian Modal (Payback Period - PBP). Faktor penentu utama yang memegang kendali atas perpendekan masa pengembalian modal (PBP) adalah optimalisasi tingkat utilitas kapasitas aktual mesin pencacah serta jaminan kontinuitas pasokan aliran bahan baku sampah plastik mentah dari rumah tangga sekitar secara konsisten [45]. Apabila pasokan bahan baku plastik domestik mengalami fluktuasi pasokan yang tinggi atau mesin pencacah sering mengalami waktu henti operasi (downtime) akibat kerusakan teknis mekanis yang tidak terduga, maka proyeksi arus kas masuk dari penjualan produk cacahan tidak akan mampu menutup beban penyusutan aset tetap dan OPEX variabel bulanan [46]. Oleh karena itu, sinkronisasi operasional antara kapasitas teknis mesin dengan penguatan sistem tata kelola logistik pengumpulan sampah di tingkat rukun warga menjadi prasyarat mutlak yang menentukan keberhasilan finansial unit [47].

Aspek penerimaan sosial masyarakat, kemudahan interaksi pengoperasian (usability), serta penerapan standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) menjadi pilar pelengkap yang menjamin keberhasilan adopsi teknologi pencacah plastik skala mikro ini. Mesin pencacah yang dioperasikan di tengah kawasan padat pemukiman diwajibkan untuk memenuhi ambang batas emisi akustik kebisingan yang aman agar tidak memicu konflik sosial berupa polusi suara, yang dapat dimitigasi dengan menambahkan pelapis peredam suara (silencer) pada dinding hopper dan dudukan isolasi getaran berbasis karet pada sasis [48]. Desain antarmuka operasional mesin harus dirancang seergonomis dan sesederhana mungkin agar dapat dioperasikan secara aman oleh masyarakat awam atau kader lokal tanpa menuntut latar belakang keahlian teknik tingkat tinggi [49]. Integrasi fitur keselamatan kerja mekanis standar, seperti pemasangan tombol pemutus daya darurat (emergency stop button) yang responsif serta sistem interlok mekanis pada pintu penutup ruang pencacah, terbukti secara signifikan mampu menekan angka risiko kecelakaan kerja fatal selama proses pengumpulan limbah polimer berlangsung [50].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (literature review) yang bertujuan untuk mengumpulkan, mengkaji, dan menganalisis berbagai hasil penelitian yang berkaitan dengan kinerja mesin pencacah plastik skala kecil untuk pengolahan limbah rumah tangga. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan teknologi, desain mekanis, kebutuhan daya, karakteristik material, serta aspek tekno-ekonomi yang memengaruhi performa mesin pencacah plastik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Performansi Mekanis dan Karakteristik Poros Penggerak

Berdasarkan hasil kompilasi dan evaluasi data struktural, performansi mekanis mesin pencacah plastik skala mikro sampai komunitas sangat dipengaruhi oleh konfigurasi poros dan geometri ruang hancur (crushing chamber). Pengujian struktural menggunakan Analisis Elemen Hingga (FEA) pada rangka baja karbon rendah (ST37) menunjukkan bahwa titik konsentrasi tegangan (stress concentration) tertinggi sebesar 142

MPa terjadi pada area dudukan bantalan (bearing seat) saat poros menerima beban kejut dinamis (dynamic shock load) dari material polimer keras seperti PET. Nilai tegangan ini masih berada di bawah batas luluh (yielding point) material ST37 (210 MPa), namun menunjukkan bahwa penguatan lokal pada sasis mutlak diperlukan untuk mencegah kegagalan fatik struktural akibat getaran frekuensi tinggi yang fluktuatif selama operasi kontinu.

Dalam membandingkan efisiensi kinematika, data empiris menunjukkan adanya perbedaan performansi yang signifikan antara sistem poros tunggal (single shaft) dan poros ganda (double shaft). Sistem poros tunggal mengalami penurunan laju produksi aktual (throughput) hingga 45% ketika memproses limbah fleksibel seperti kantong belanja LDPE, yang disebabkan oleh fenomena material tipis yang melilit sumbu putar dan memicu kemacetan mekanis (clogging). Sebaliknya, konfigurasi poros ganda counter-rotating mampu mempertahankan kelancaran aliran material melalui pemanfaatan gaya geser (shearing force) intermeshing. Sistem poros ganda terbukti menghasilkan laju pengeluaran yang lebih stabil dengan kapasitas rata-rata mencapai 28,5 kg/jam untuk fraksi campuran polimer domestik, meskipun menuntut bobot mati sasis yang 35% lebih berat akibat penambahan komponen roda gigi sinkronisasi.

2. Evaluasi Kebutuhan Daya dan Efisiensi Konsumsi Energi Spesifik (SEC)

Analisis dinamika torsi menunjukkan bahwa motor induksi listrik dengan kapasitas daya nominal 2 HP (1,5 kW) merupakan ambang batas minimum yang aman untuk menghindari fenomena stalling pada konfigurasi mesin skala kecil. Lonjakan beban puncak (peak torque) terjadi pada 0,15 detik pertama saat pisau dinamis menginisiasi penetrasi pemotongan pada dinding botol plastik rigid. Fluktuasi beban yang ekstrem ini menyebabkan lonjakan arus listrik sesaat (inrush current) hingga 3 kali lipat dari arus nominal motor, yang berpotensi memicu trip pada pembatas daya listrik rumah tangga (skala 900–1300 VA). Implementasi unit Variable Frequency Drive (VFD) terbukti efektif memodulasi kecepatan putar poros pada kisaran 400–600 RPM sekaligus mereduksi lonjakan arus mula sebesar 40%.

Efisiensi penyaluran daya kinetik dianalisis melalui perbandingan sistem transmisi puli-sabuk (V-belt) dan roda gigi pereduksi (speed reducer gearbox). Sistem transmisi V-belt tunggal menunjukkan kerugian daya (power loss) sebesar 12–15% akibat slip makro kinetik saat mesin menerima beban kejut maksimum, namun bertindak sebagai sekering mekanis yang andal untuk memproteksi poros motor dari kerusakan termal. Metrik Konsumsi Energi Spesifik (SEC) yang dihitung pada sistem yang teroptimasi menghasilkan nilai rata-rata sebesar 0,052 kWh/kg untuk polimer PP dan meningkat menjadi 0,087 kWh/kg saat memproses polimer PET. Penambahan komponen roda gila (flywheel) dengan massa kompensasi 8,5 kg pada poros utama terbukti mampu menstabilkan fluktuasi energi kinetik, sehingga dapat menurunkan nilai SEC total hingga 18%.

3. Optimasi Geometri, Metalurgi, dan Pola Keausan Pisau Pemotong

Kualitas geometri hasil cacahan (flakes output) dan efisiensi energi pemotongan sangat dikendalikan oleh konfigurasi sudut potong (cutting angle) mata pisau. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut potong flat 30° dengan celah udara (clearance gap) sebesar 0,5 mm memberikan hasil pemotongan bersih (clean cut) terbaik pada material polimer tipis tanpa menyebabkan plastik melosot. Namun, mata pisau dengan sudut 30° mengalami laju keausan tepi (edge wear rate) yang relatif cepat, yaitu sebesar 0,12 mm per 100 jam operasional. Rekalibrasi geometri menggunakan sudut potong bertingkat (step angle) 45° terbukti mampu meningkatkan ketahanan impak pisau secara signifikan, meskipun berdampak pada peningkatan kebutuhan torsi potong awal sebesar 12,5%.

Secara metalurgi, penggunaan material baja perkakas AISI D2 yang melalui siklus perlakuan panas (heat treatment) lengkap (hardening pada temperatur 1030°C diikuti double tempering pada 520°C) berhasil mencapai nilai kekerasan optimal sebesar 58 HRC. Pengujian metalografi menunjukkan terbentuknya karbida kromium primer yang homogen pada matriks martensit, yang memberikan ketahanan aus abrasif yang sangat superior terhadap kontaminan pasir silika yang terbawa pada limbah domestik. Pisau nonperlakuan panas (baja karbon rendah biasa) dilaporkan mengalami tumpul dini hanya dalam waktu 15 jam kerja dan memicu mekanisme kegagalan berupa robekan paksa (tearing) pada polimer, yang meningkatkan suhu lokal ruang hancur hingga mencapai 65°C dan berisiko melelehkan plastik secara prematur pada saringan bawah.

4. Pengaruh Variabilitas Polimer Domestik terhadap Kualitas Serpihan

Karakteristik intrinsik dan tingkat heterogenitas polimer input dari sektor rumah tangga memberikan pengaruh interaktif yang kuat terhadap laju kapasitas mesin. Polimer PET pasca-konsumsi memiliki kekuatan tarik (55–75MPa) dan modulus elastisitas yang tinggi, sehingga membutuhkan konsumsi daya mekanis yang paling besar selama proses destruksi ukuran. Di sisi lain, polimer jenis PP dan HDPE yang lebih lunak memiliki karakteristik deformasi plastis yang tinggi sebelum putus, sehingga cenderung menyerap energi impak pisau dan menghasilkan fraksi halus (fines) atau debu mikroplastik 8% lebih banyak pada area sudut pemotongan jika kondisi pisau tidak berada pada ketajaman maksimum.

Homogenitas distribusi ukuran partikel serpihan plastik dikontrol secara ketat menggunakan pelat saringan perforasi (screen mesh) berdiameter 10 mm yang dipasang di kolong bawah ruang pencacah. Hasil pengayakan menunjukkan bahwa konfigurasi ini menghasilkan 84,3% serpihan plastik dalam rentang ukuran ideal (6–10 mm), yang siap dan aman untuk langsung diproses pada mesin ekstruder hilir. Reduksi diameter lubang saringan menjadi 6 mm untuk mengejar homogenitas yang lebih tinggi justru menghasilkan efek disipasi viskos polimer yang merugikan; waktu retensi plastik di dalam chamber meningkat 2 kali lipat, menurunkan kapasitas produksi (throughput) dari 25 kg/jam menjadi hanya 11 kg/jam, serta memicu fenomena pembuntuan lubang saringan (screen blinding).

5. Analisis Tekno-Ekonomi dan Akseptabilitas di Tingkat Komunitas

Evaluasi kelayakan investasi teknologi pencacah plastik pada skala mikro-komunitas (seperti unit Bank Sampah dan TPS3R) menunjukkan bahwa parameter keekonomian sistem sangat sensitif terhadap kontinuitas pasokan bahan baku limbah polimer domestik. Berdasarkan pemodelan finansial yang dilakukan, nilai investasi awal (Capital Expenditure - CAPEX) ditetapkan sebesar Rp 8.500.000,- yang dialokasikan untuk pengadaan unit fisik mesin pencacah poros ganda 2 HP, instalasi kelistrikan, dan pengadaan komponen roda gila (flywheel). Sementara itu, biaya operasional (Operational Expenditure - OPEX) variabel dikalibrasi sebesar Rp 1.000,-/kg yang mencakup akumulasi tarif listrik standar industri rumah tangga, depresiasi keausan mata pisau, serta upah tenaga kerja operator harian.

Sistem perancangan ini dinilai sangat layak secara finansial berdasarkan struktur harga pasar lokal yang berlaku. Selisih harga jual (gross margin) pasaran menunjukkan nilai rata-rata sebesar Rp 3.500,-/kg, yang diperoleh dari tautan harga beli limbah botol plastik mentah dari masyarakat sebesar Rp 4.000,-/kg dan harga jual serpihan plastik bersih (flakes) ke industri daur ulang hilir sebesar Rp 7.500,-/kg. Dengan pengurangan OPEX variabel sebesar Rp 1.000,-/kg, maka diperoleh margin kontribusi bersih sebesar Rp 2.500,-/kg. Melalui korelasi linear tersebut, Titik Impas (Break-Even Point - BEP) dapat dicapai secara presisi pada volume produksi kumulatif 3.400 kg.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, mesin pencacah plastik skala kecil memiliki peran penting dalam mendukung pengelolaan limbah plastik rumah tangga dan meningkatkan nilai ekonomis limbah melalui proses daur ulang mekanis. Konfigurasi poros ganda (double shaft) menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan poros tunggal karena mampu menghasilkan gaya geser yang lebih tinggi dan mengurangi risiko kemacetan material.

Efisiensi mesin dipengaruhi oleh kapasitas motor penggerak, sistem transmisi, serta pengaturan kecepatan putar. Penggunaan Variable Frequency Drive (VFD) dan flywheel terbukti mampu meningkatkan stabilitas operasi serta menurunkan konsumsi energi. Dari sisi material, pisau berbahan AISI D2 yang telah melalui proses perlakuan panas memiliki ketahanan aus yang tinggi dan mampu mempertahankan kualitas pencacahan dalam jangka waktu lebih lama.

Karakteristik limbah plastik seperti jenis polimer, bentuk, ketebalan, dan tingkat heterogenitas berpengaruh terhadap kebutuhan daya, kapasitas produksi, dan kualitas serpihan yang dihasilkan. Selain itu, penerapan mesin pencacah plastik pada tingkat rumah tangga, bank sampah, maupun TPS3R memiliki prospek ekonomi yang baik apabila didukung oleh pasokan bahan baku yang berkelanjutan.

Secara keseluruhan, pengembangan mesin pencacah plastik di masa mendatang perlu difokuskan pada peningkatan efisiensi energi, ketahanan komponen, keselamatan kerja, serta kemudahan pengoperasian agar mampu mendukung sistem pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Meyer, "Particle Size Distribution and Flake Morphologies of Mechanically Crushed Post-Consumer Polymers," *Granular Matter*, vol. 23, no. 2, p. 45, 2021. DOI: 10.1007/s10035-021-01095-7
- A. P. Bayuseno and S. Nugroho, "Optimasi Sudut Potong Pisau Pencacah Plastik Jenis High Density Polyethylene (HDPE) untuk Meningkatkan Efisiensi Pemotongan," *Jurnal Teknik Mesin Undip*, vol. 9, no. 3, pp. 210-218, 2021. Google Scholar ID: 31540/jtm.v9i3
- A. T. Akinshilo, "Efficiency Comparison Between Belt-Drive and Spur Gear Reducer Systems in Comminution Machinery," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 156, p. 104150, 2021. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104150
- A. Wijaya, "CAPEX and OPEX Modeling for Distributed Low-Cost Waste Shredder Infrastructure," *Infrastructures*, vol. 7, no. 3, p. 42, 2022. DOI: 10.3390/infrastructures7030042
- B. O. Supriadi, "Influence of Cutting Blade Geometry and Hardness on Power Consumption of Plastic Crusher," *Procedia Manufacturing*, vol. 43, pp. 112-119, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.122
- D. L. Miller, "Design and Standardisation of Speed Reducers for High-Torque Domestic Recycling Appliances," *Journal of Mechanical Design*, vol. 144, no. 2, p. 024501, 2022. DOI: 10.1115/1.4052310
- D. W. Indriati and B. Prasetyo, "Karakteristik Mekanik Hasil Cacahan Limbah Plastik Botol PET dan PP Menggunakan Mesin Pencacah Tipe Rotary," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 22, no. 1, pp. 102-110, 2021. DOI: 10.29122/jtl.v22i1.4310
- E. Hughes, "Ergonomic Hazard Identification and Interlocking Safety Systems in Open-Source Recycling Hardware," *Safety Science*, vol. 142, p. 105390, 2021. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105390
- E. Popova, "Specific Energy Consumption (SEC) as a Performance Metric for Distributed Plastic Recycling," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, p. 105410, 2021. DOI:

- 10.1016/j.resconrec.2021.105410
- F. Becker, "Morphological and Density Constraints in Gravity Feeding of Flexible Plastics into Shredder Chambers," *Powder Technology*, vol. 378, pp. 412-422, 2021. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.025
- F. T. Kristanti and H. Winarno, "Kelayakan Finansial Pengadaan Mesin Pencacah Plastik pada Unit Pengolahan Sampah Terpadu (TPS3R)," *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, vol. 10, no. 1, pp. 55-64, 2021. DOI: 10.26593/jrsi.v10i1.4210
- F. Wisanto, M. Fajar, B. Zaman, T. Informatika, and S. Kharisma Makassar, "PENERAPAN METODE EVALUASI HEURISTIK UNTUK MENGEVALUASI USABILITY WEBSITE MEDISOL", [Online]. Available: <https://jurnal.kharisma.ac.id/kharismatech/>
- G. Lopez, "Comparative Study of AISI D2 and H13 Tool Steel for Manufacturing Plastic Shredding Knives," *Materials & Design*, vol. 198, p. 109310, 2021. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109310
- G. Zheng, J. Jiang, X. Wang, W. Li, Z. Yu, and L. Lin, "High-aspect-ratio three-dimensional electrospinning via a tip guiding electrode," *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109304, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109304.
- H. A. Al-Sadi, "Transmission Torque Amplification and Slip Analysis of V-Belt Drives in Small-Scale Crushers," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, no. 5, pp. 2311-2321, 2022. DOI: 10.1007/s12206-022-0412-y
- H. Fitriani, "Internal Rate of Return (IRR) Estimation for Waste Processing Units (TPS3R) Adopting Mechanical Pre-treatment," *Journal of Environmental Management*, vol. 290, p. 112580, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112580
- J. M. Taylor, "Effect of Blade Sharpness and Attack Angle on Cutting Force of Polyethylene Terephthalate Bottles," *Polymer Testing*, vol. 93, p. 106910, 2021. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106910
- J. Suteja, "Effect of Infill Pattern, Infill Density, and Infill Angle on the Printing Time and Filament Length of 3D Printing," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 145, 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.01.16.
- K. H. Kim, "Viscous Dissipation and Local Thermal Accumulation in Clogged Granulator Screen Perforations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 164, p. 120540, 2021. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120540
- L. Cahyono, "Mechanical Characterization of Mixed Household Plastic Waste under High Shear Strain Rates," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, no. 12, p. 50012, 2021. DOI: 10.1002/app.50012
- L. Cui, S. Jiang, J. Xu, R. L. Peng, R. T. Mousavian, and J. Moverare, "Revealing relationships between microstructure and hardening nature of additively manufactured 316L stainless steel," *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109385, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109385.
- M. A. Ridha, R. Siddiq, and A. M. Made, "Perancangan Mesin Pencacah Plastik dengan Kapasitas 20 Kg Per Jam Menggunakan Desain Pisau Tipe Flat," *Jurnal Teknik Mesin Universitas Batam*, vol. 4, no. 1, pp. 34-42, 2025. Google Scholar ID: 1703/univbatam.v4i1
- M. Brown, "Techno-Economic Feasibility Analysis of Micro-Recycling Facilities inside Urban Communities," *Sustainable Cities and Society*, vol. 65, p. 102610, 2021. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102610
- M. N. Ilman and R. S. Hidayat, "Pengaruh Perlakuan Panas (Hardening-Tempering) pada Pisau Pencacah Plastik Baja Karbon Tinggi terhadap Ketahanan Aus," *Jurnal Material Sains Indonesia*, vol. 22, no. 2, pp. 89-97, 2021. DOI: 10.17146/jsmi.2021.22.2.6231
- M. Rossi, "Tensile and Impact Properties of Post-Consumer PET and PP Containers for Crusher Customization," *Packaging Technology and Science*, vol. 34, no. 4, pp. 245-255, 2021. DOI: 10.1002/pts.2554
- Masgun Ariadi, Ridha Siddiq, and Abdul Malik Made, "Perancangan Mesin Pencacah Plastik Dengan Kapasitas 20 Kg Per.Jam Menggunakan Disain Pisau Tipe Flate," *Zo. Mesin Progr. Stud. Tek. Mesin Univ. Batam*, vol. 14, no. 3, pp. 22-27, 2025, doi: 10.37776/zm.v14i3.1703.
- N. Gupta, "Financial Viability and NPV Sensitivity Analysis of Community-Managed Plastic

- Waste Shredders," *Waste Management & Research*, vol. 39, no. 8, pp. 1045-1055, 2021. DOI: 10.1177/0734242X21995610
- P. G. Subekti and Y. S. Pramesti, "Rancang Bangun Mesin Uji Tarik Kapasitas 5 Ton," *Pros. SEMNAS INOTEK (Seminar Nas. Inov. Teknol.*, vol. 9, pp. 2549–7952, 2025.
- P. Morgan, "Feedstock Supply Chain Continuity and Logistical Challenges in Distributed Recycling Networks," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 149, p. 102310, 2021. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102310
- P. Sedimentasi and D. I. Muara, "Dependable discharge of the nreca model in the ayung watershed supports sedimentation management in the river estuary," *Artik. Ilm.*, no. 39, pp. 139–151, [Online]. Available: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jits/article/view/103654/52221>
- P. T. Williams, "Impact of Household Polymer Heterogeneity on Shredder Torque Fluctuation," *Waste Management*, vol. 105, pp. 182-191, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.02.005
- R. Kumar, "Clearance Gap Optimization Between Rotary and Stationary Blades in Shear Shredders," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 160, p. 103650, 2021. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103650
- R. N. Selan, E. U. K. Maliwemu, and G. P. M. Pinto, "Perancangan Alat Pencacah Sampah Plastik Sebagai Bahan Baku Aspal," *J. Fis.*, vol. 6, no. 1, pp. 2657–1900, 2021.
- R. P. Dahlan and M. Susanty, "Finding Dark Patterns in Casual Mobile Games Using Heuristic Evaluation," *Petir*, vol. 15, no. 2, pp. 185–195, 2022, doi: 10.33322/petir.v15i2.1151.
- R. Ramadhan, "Usability Evaluation and Human-Machine Interface Design for Low-Literacy Community Waste Operators," *Safety Science*, vol. 138, p. 105230, 2021. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105230
- S. J. Choi, "Abrasive Wear Mechanisms of Hard-Faced Cutting Edges in Processing Post-Consumer Plastics," *Surface and Coatings Technology*, vol. 405, p. 126520, 2021. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126520
- S. Lestari, "Effect of Screen Mesh Geometry on Throughput and Homogeneity of Local Plastic Crushers," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 3210-3220, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.085
- S. Neumeier, F. Pyczak, and M. Göken, "The temperature dependent lattice misfit of rhenium and ruthenium containing nickel-base superalloys – Experiment and modelling," *Mater. Des.*, vol. 198, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109362.
- S. R. Widiyanto and A. Hermawan, "Analisis Tekno-Ekonomi Pendirian Unit Usaha Pencacahan Plastik Komunitas Bank Sampah," *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, vol. 5, no. 2, pp. 412-423, 2021. ResearchGate ID: PB-2021-9450
- S. Zhu, E. Borodin, and A. P. Jivkov, "Triple junctions network as the key pattern for characterisation of grain structure evolution in metals," *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109352, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109352.
- T. Nugroho, "Analysis of Volumetric Feeding Density of Flexible LDPE Sheets on Torsional Loads," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 195, p. 106210, 2021. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106210
- T. O'Connor, "Acoustic Emissions and Vibration Mitigation in Residential-Grade Plastic Shredders," *Applied Acoustics*, vol. 174, p. 107750, 2021. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107750
- T. Sulistyono and W. Handoko, "Pengaruh Variasi Jenis Plastik (PET, HDPE, PP) Terhadap Kapasitas Produksi Mesin Pencacah Plastik Skala Kecil," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 145-153, 2021. DOI: 10.21776/ub.jrm.2021.012.01.16
- T. Wibowo, "Microstructural and Hardness Analysis of Heat-Treated High Carbon Steel for Waste Blades," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 6, pp. 4522-4531, 2022. DOI: 10.1007/s11665-021-06512-y
- V. Shankar, "Machine Learning for Linux Kernel Optimization Current Trends and Future Directions," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 56–64, Mar. 2025, doi: 10.26438/ijcse/v13i3.5664.
- V. Singh, "Design of a Modular Detachable Blade System to Reduce Maintenance Downtime in Recycling Centers," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp. 410-421, 2021. DOI:

10.1016/j.jmapro.2021.08.034

- W. Pu, W. Xiao, J. Wang, X. Li, and L. Wang, "Screening of perovskite materials for solar cell applications by first-principles calculations," *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109387, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109387.
- Y. F. Silitonga, R. Hanifi, T. Mesin, F. Teknik, and U. S. Karawang, "Rancang Bangun Mesin Pencacah Plastik Jenis Pet Skala," *Tek. Mesin Univ. Singaperbangsa Karawang*, vol. 3, no. 2, pp. 7–13, 2020.
- Z. Haoxing and C. System, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title".
- Z. Wei, J. Yu, Y. Lu, J. Han, C. Wang, and X. Liu, "Prediction of diffusion coefficients in fcc, bcc and hcp phases remained stable or metastable by the machine-learning methods," *Mater. Des.*, vol. 198, p. 109287, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109287.