RANCANG BANGUN DAN EVALUASI KINERJA MESIN PENGUPAS KULIT BUAH AREN TIPE BERTINGKAT

Design and Performance Evaluation of a Multi-Stage Sugar Palm Fruit Peeling Machine

Yuni Ernita*, Sri Aulia Novita, Fithra Herdian, Zulnadi, Fanny Yuliana Batubara, Rio Valery Allen
Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh, Lima Puluh Kota, Indonesia
* Email: yuniernita00@gmail.com

ABSTRAK

Buah aren (*Arenga pinnata* Merr.) merupakan komoditas perkebunan yang memiliki potensi ekonomi tinggi sebagai bahan baku pembuatan kolang-kaling. Namun, proses pengupasan kulit buah pada industri rumah tangga masih dilakukan secara manual sehingga membutuhkan waktu lama, memiliki kapasitas produksi yang rendah, serta berisiko menyebabkan kecelakaan kerja. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membuat, menguji kinerja, dan menganalisis kelayakan ekonomi mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat sebagai alternatif mekanisasi dalam pengolahan kolang-kaling skala kecil. Penelitian dilaksanakan melalui tahapan identifikasi kebutuhan, perancangan dengan pendekatan rekayasa teknik, pembuatan prototipe, pengujian fungsional, pengujian kinerja, analisis ekonomi, dan analisis sensitivitas. Parameter yang diamati meliputi kapasitas efektif, persentase buah terkupas, buah tidak terkupas, buah pecah, serta biaya operasional mesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin memiliki dimensi 100,69 cm × 56,89 cm × 147,61 cm dengan sumber tenaga berupa motor bensin berdaya 3,5 HP. Kapasitas efektif mesin mencapai 34,5 kg bahan terkupas/jam, dengan berat total bahan keluaran rata-rata 0,483 kg per ulangan, yang terdiri atas 0,431 kg bahan terkupas dan 0,052 kg bahan tidak terkupas, sedangkan sisa umpan berupa kulit dan cangkang yang terbuang. Persentase bahan tidak terkupas sebesar 10,8% dari bahan keluaran, dan persentase bahan pecah sebesar 19,7% dari bahan terkupas, dengan rendemen kolang-kaling sebesar 14,4% dari umpan awal. Analisis ekonomi menghasilkan biaya tetap Rp2.076.766/tahun, biaya tidak tetap Rp25.872,73/jam, biaya pokok pengupasan Rp775,02/kg, dan titik impas (BEP) 4.614,4 kg/tahun atau setara dengan 133,7 jam operasi per tahun pada asumsi 2.400 jam kerja/tahun serta upah jasa pengupasan manual Rp1.200/kg. Analisis sensitivitas menunjukkan biaya pokok berada pada rentang Rp764,94–Rp861,97/kg dan titik impas pada rentang 3.194,7–8.304,9 kg/tahun. Mesin ini layak secara ekonomi untuk industri pengolahan kolang-kaling skala usaha kecil, namun persentase bahan pecah yang masih tinggi perlu ditekan sebelum mesin direkomendasikan untuk produksi kolang-kaling mutu utama.
Kata kunci — buah aren; kolang-kaling; mesin pengupas; pengupasan bertingkat; titik impas

ABSTRACT

Sugar palm fruit (Arenga pinnata Merr.) is a plantation commodity with high economic potential as a raw material for kolang-kaling production. However, fruit peeling in household-scale industries is still performed manually, resulting in long processing times, low production capacity, and occupational accident risks. This study aimed to design, fabricate, evaluate the performance of, and analyze the economic feasibility of a multi-stage sugar palm fruit peeling machine as a mechanization alternative for small-scale kolang-kaling processing. The study comprised needs identification, engineering design, prototype fabrication, functional testing, performance testing, economic analysis, and sensitivity analysis. The observed parameters included effective capacity, percentages of peeled, unpeeled, and broken kernels, and machine operating costs. The machine measured 100.69 cm × 56.89 cm × 147.61 cm and was powered by a 3.5 HP gasoline engine. Its effective capacity reached 34.5 kg of peeled kernels per hour, with an average total output mass of 0.483 kg per replication, comprising 0.431 kg of peeled kernels and 0.052 kg of unpeeled kernels. Unpeeled kernels accounted for 10.8% of the total output, broken kernels for 19.7% of the peeled kernels, and the kolang-kaling yield for 14.4% of the initial input. The economic analysis resulted in a fixed cost of IDR 2,076,766/year, a variable cost of IDR 25,872.73/h, a unit peeling cost of IDR 775.02/kg, and a break-even point (BEP) of 4,614.4

kg/year, equivalent to 133.7 operating hours per year, assuming 2,400 operating hours annually and a manual peeling service charge of IDR 1,200/kg. The sensitivity analysis showed that the unit peeling cost ranged from IDR 764.94 to IDR 861.97/kg, while the BEP ranged from 3,194.7 to 8,304.9 kg/year. The machine is economically feasible for small-scale kolang-kaling processing industries, although the relatively high proportion of broken kernels must be reduced before it can be recommended for premium-grade kolang-kaling production.
Keywords — sugar palm fruit; kolang-kaling; peeling machine; multi-stage peeling; break-even point

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara tropis yang memiliki keanekaragaman hayati tinggi, termasuk tanaman aren (Arenga pinnata Merr.) yang tersebar hampir di seluruh wilayah kepulauan (Amin, 2020). Tanaman aren memiliki nilai ekonomi yang tinggi karena hampir seluruh bagian tanaman dapat dimanfaatkan sebagai sumber pangan, bahan baku industri, maupun produk bernilai tambah (Amin, 2020; Purnama, 2018). Produk utama yang dihasilkan meliputi nira, gula aren, ijuk, pati, dan buah muda yang diolah menjadi kolang-kaling (Purnama, 2018). Diversifikasi produk tersebut menjadikan tanaman aren sebagai salah satu komoditas agroindustri yang berkontribusi terhadap peningkatan pendapatan masyarakat pedesaan serta mendukung pengembangan ekonomi berbasis sumber daya lokal (Ramdani *et al*., 2023).

Kolang-kaling merupakan salah satu produk olahan buah aren yang memiliki permintaan cukup tinggi, terutama selama bulan Ramadan dan pada hari-hari besar keagamaan (Purwanti & Nugrahini, 2018). Selain digunakan sebagai bahan pangan, kolang-kaling juga mengandung serat pangan, galaktomanan, dan berbagai mineral yang bermanfaat bagi kesehatan, sehingga permintaan pasar terus meningkat. Peningkatan permintaan tersebut perlu diimbangi dengan teknologi pengolahan yang mampu meningkatkan kapasitas produksi sekaligus menjaga kualitas produk (Ramdani *et al*., 2023).

Industri pengolahan kolang-kaling di Indonesia sebagian besar masih berskala rumah tangga dengan tingkat mekanisasi yang rendah (Purnama, 2018). Salah satu tahapan yang masih menjadi kendala adalah proses pengupasan kulit buah aren setelah direbus (Amin, 2020). Pengupasan umumnya dilakukan secara manual menggunakan pisau atau alat sederhana sehingga membutuhkan tenaga kerja yang besar, waktu proses relatif lama, kapasitas produksi rendah, serta berpotensi menyebabkan kecelakaan kerja akibat penggunaan alat tajam secara terus-menerus (Ramdani *et al*., 2023; Darmawan, 2020). Selain itu, hasil pengupasan manual sering menghasilkan tingkat kerusakan buah yang cukup tinggi sehingga menurunkan mutu produk akhir (Leo *et al*., 2023).

Perkembangan mekanisasi pertanian telah menghasilkan berbagai mesin pengupas untuk komoditas pertanian, seperti kopi, kakao, pinang, kemiri, dan buah-buahan lainnya (Nurudin & Sakti, 2014; Khoryanton & Sumiyarso, 2022; Gili *et al*., 2026). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan mekanisme rol, silinder, maupun sistem gesek dapat meningkatkan kapasitas kerja serta mengurangi beban kerja operator (Sugandi et al., 2017). Namun demikian, karakteristik fisik buah aren yang memiliki kulit keras, permukaan licin setelah perebusan, serta bentuk buah yang tidak seragam menyebabkan mekanisme pengupasan pada komoditas ini memerlukan desain khusus agar proses pengupasan berlangsung efektif tanpa meningkatkan tingkat kerusakan buah (Amin, 2020).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan mesin pengupas buah aren menggunakan mekanisme rol tunggal maupun sistem penumbuk (Amin, 2020; Harianja *et al*., 2023). Akan tetapi, sebagian besar penelitian tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain kapasitas kerja yang relatif rendah, persentase buah tidak terkupas yang masih tinggi, serta belum disertai analisis kelayakan ekonomi sebagai dasar implementasi pada industri kecil (Darmawan, 2020; Harianja et al., 2023). Selain itu, pembahasan mengenai hubungan antara desain mekanisme pengupasan dan performa mesin masih terbatas, sehingga diperlukan pengembangan desain yang lebih efektif (Leo *et al*., 2023).

Beberapa variasi desain mekanisme pengupasan buah aren juga pernah dikembangkan dengan pendekatan yang berbeda-beda. Salah satu desain menggunakan sistem penggerak ganda, yaitu kombinasi tenaga manusia dan motor (elektromotor atau motor bakar) (Darmawan, 2020); pendekatan ini memiliki kelemahan berupa potensi penurunan keandalan dan konsistensi kinerja mesin apabila salah satu sistem penggerak mengalami gangguan atau tidak tersinkronisasi dengan baik. Desain lain menggunakan rol penggilas dengan prinsip gesekan untuk mengupas kulit buah (Sarif *et al*., 2018); pendekatan ini berisiko menyebabkan kerusakan buah apabila gesekan yang diberikan terlalu kuat,

permukaan rol cepat aus, serta menghasilkan pengupasan yang tidak merata apabila tekanan gesekan tidak seragam. Sebagai pengembangan lanjutan dari desain-desain tersebut, beberapa upaya juga diarahkan pada mekanisme rol ganda yang mengupas buah dengan cara menjepitnya di antara dua rol yang berputar berlawanan arah dalam satu tahap proses (Amin, 2020; Harianja *et al*., 2023). Pendekatan ini menuntut penyetelan celah antarrol yang presisi karena ukuran buah aren tidak seragam, sehingga buah berukuran kecil berpotensi lolos tanpa terkupas, sedangkan buah berukuran besar berisiko pecah akibat jepitan yang berlebihan. Variasi desain tersebut menunjukkan bahwa upaya mekanisasi pengupasan buah aren terus berkembang melalui berbagai pendekatan mekanisme, baik sistem penggerak ganda, rol gesek, maupun rol ganda; akan tetapi, evaluasi kinerja secara kuantitatif maupun analisis kelayakan ekonomi umumnya belum diungkapkan secara rinci dalam desain-desain tersebut, sehingga semakin memperkuat urgensi penelitian ini yang mengintegrasikan pengujian kinerja dan analisis ekonomi teknik secara komprehensif.

Penelitian mengenai mekanisasi pengolahan hasil pertanian terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan efisiensi proses produksi. Berbagai desain mesin pengupas telah dikembangkan dengan menggunakan mekanisme silinder, rol, sekrup, maupun sistem abrasif untuk meningkatkan kapasitas kerja dan menekan kehilangan hasil (Sugandi *et al*., 2020). Pada komoditas buah keras, penggunaan mekanisme rol dinilai mampu menghasilkan gaya tekan dan gaya gesek yang lebih stabil dibandingkan dengan mekanisme tumbukan, sehingga kerusakan produk dapat diminimalkan (Sarif *et al*., 2018). Selain itu, sistem rol memiliki konstruksi yang relatif sederhana, biaya manufaktur yang lebih rendah, dan kemudahan penerapan pada industri skala kecil (Sarif *et al*., 2018).

Penelitian mengenai mesin pengupas khusus untuk buah aren masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian hanya berfokus pada aspek desain mesin tanpa mengevaluasi secara komprehensif kinerja teknis maupun kelayakan ekonominya. Oleh karena itu, pengembangan mesin pengupas buah aren yang tidak hanya memiliki kapasitas kerja tinggi, tetapi juga layak secara ekonomi, masih menjadi kebutuhan penting untuk mendukung modernisasi agroindustri berbasis aren.

Berdasarkan hasil kajian literatur, terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang masih perlu diteliti lebih lanjut. Sebagian besar mesin pengupas buah aren yang telah dikembangkan masih menghasilkan kapasitas kerja yang relatif rendah dan belum mampu menekan persentase buah yang tidak terkupas (Darmawan, 2020). Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada aspek perancangan mekanik, sedangkan evaluasi performa mesin dan analisis ekonomi masih sangat terbatas. Selanjutnya, belum banyak penelitian yang mengkaji efektivitas penggunaan mekanisme pengupasan bertingkat dalam meningkatkan efisiensi pengupasan dan menurunkan tingkat kerusakan buah, sehingga celah ini belum dibahas secara eksplisit dalam literatur yang tersedia. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang mengintegrasikan aspek desain teknik, pengujian kinerja, serta analisis kelayakan ekonomi dalam satu kajian yang komprehensif.

Secara kuantitatif, kesenjangan tersebut tampak dari capaian penelitian terdahulu. Alat pemecah tipe dua roller bergerigi mencapai 435,3 kg/jam dengan biaya pokok Rp55,58/kg, tetapi titik impasnya 35.743,58 kg/tahun dan rendemennya hanya 15% (Harahap, 2018), sehingga lebih sesuai untuk industri skala menengah. Sementara itu, alat semi-mekanis berbasis gaya tekan mencapai 738 ± 136 buah/jam dengan bahan tidak terkupas sebesar 11,70 ± 2,88% (Eka, 2015). Penelitian lain hanya melaporkan kapasitas rancangan, yaitu 80 kg/jam (Leo et al., 2023) dan 50 kg/jam (Harianja et al., 2023), atau berfokus pada perancangan mesin tanpa data pengujian (Amin, 2020; Darmawan, 2020; Ramdani et al., 2023). Tidak satu pun yang mengukur persentase bahan yang pecah, sehingga kerusakan bahan akibat besarnya gaya pengupasan belum pernah dikuantifikasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada mekanisme pengupasan bertingkat, yaitu dua tingkat poros pengupas disusun secara seri dalam satu ruang pengupas sehingga buah yang belum terkupas sempurna pada tingkat pertama langsung memperoleh perlakuan ulang pada tingkat kedua tanpa perlu pengumpanan kembali oleh operator. Konfigurasi ini membagi gaya tekan dan gaya gesek ke dalam dua tahap yang lebih ringan, sehingga persentase buah yang tidak terkupas dapat ditekan tanpa meningkatkan intensitas gesekan yang berisiko merusak buah. Kebaruan tersebut diuji secara empiris melalui tiga indikator terukur: (1) persentase bahan tidak terkupas pada satu kali pengumpanan, (2) persentase bahan pecah sebagai indikator kerusakan akibat pembagian gaya dua tahap, dan (3) biaya pokok pengupasan serta titik impas sebagai indikator kelayakan penerapannya. Dengan demikian,

penelitian ini mengevaluasi aspek teknis sekaligus kelayakan ekonomi bagi industri kolang-kaling pada skala usaha kecil.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat, menguji kinerjanya yang meliputi kapasitas efektif, persentase buah terkupas, buah tidak terkupas, dan buah pecah, serta menganalisis kelayakan ekonominya yang mencakup biaya tetap, biaya tidak tetap, biaya pokok pengupasan, titik impas (*break even point*/BEP), serta analisis sensitivitas terhadap asumsi ekonomi yang digunakan, sehingga diharapkan dapat menjadi solusi teknologi tepat guna untuk mengatasi kendala pengupasan manual serta menjadi dasar penerapan mekanisasi pada industri pengolahan kolang-kaling skala usaha kecil.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret sampai Juni 2026. Kegiatan rancang bangun, pembuatan komponen, dan pengujian mesin dilaksanakan di Workshop Logam, Kayu, dan Beton Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh.

B. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam pembuatan mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat disajikan pada Tabel 1, sedangkan bahan yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Alat Penelitian

No.	Jenis Alat/Mesin	Spesifikasi/Merek	Satuan
1	Mesin las listrik	BX6-250 amper	1 unit
2	Mesin gerinda	Maxita A24SBF	1 unit
3	Mesin bor tangan	Maxtec	1 unit
4	Mesin bor duduk	Borsch Drill GMB 13 RE	1 unit
5	Meteran	Essen 15 m	1 buah
6	Jangka sorong	Mitutoyo	1 buah
7	Palu	Stanley	1 buah
8	*Toolkits*	Tekiro	1 set
9	Timbangan	Nagata	1 unit
10	Rol siku	Emco Australia 1980	1 unit
11	Kacamata las otomatis	Rumixx	1 buah
12	Sikat kawat	Golok freed	1 unit

Tabel 2. Bahan Penelitian

No.	Nama Bahan	Spesifikasi	Kebutuhan
1	Besi siku	40 mm × 40 mm × 3 mm, 6 m	2 batang
2	Besi plat	Tebal 6 mm	1 lembar
3	Besi strip	Tebal 9 × 75 mm	1 batang
4	Mata gerinda potong	Enka T41	8 buah
5	Mata gerinda asah	Nippon Resibon	2 buah
6	Elektroda	2,6 mm	2 kotak
7	Baut, mur, ring	Ø12	20 buah
8	Baut, mur, ring	Ø16	16 buah
9	*Bearing* UCP 205	Ø25	4 buah
10	Besi poros	Ø25	1 batang
11	*Pulley* 4 inch	Type B	1 buah
12	*Pulley* 6 inch	Type B	1 buah
13	*Pulley* 8 inch	Type B	2 buah
14	*V-belt*	Type B-44	1 buah
15	*V-belt*	Type B-61	1 buah

C. Tahapan Pelaksanaan

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan identifikasi masalah pada proses pengupasan kulit buah aren melalui observasi dan studi literatur terhadap mesin pengupas buah aren yang sudah ada. Selanjutnya dilakukan pembuatan komponen-komponen mesin sesuai desain gambar, kemudian dilakukan uji fungsional untuk memastikan setiap komponen bekerja sebagaimana mestinya; jika belum berfungsi dengan baik, dilakukan perbaikan hingga seluruh komponen berfungsi secara optimal. Tahap selanjutnya adalah uji kinerja untuk mengetahui kemampuan kerja mesin secara menyeluruh. Jika hasil uji kinerja belum sesuai dengan target, dilakukan modifikasi desain untuk memperoleh kinerja yang lebih baik.

D. Rancangan Fungsional

Rancangan fungsional menjelaskan fungsi masing-masing komponen penyusun mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat beserta keterkaitan antarkomponen. Rangka utama berfungsi sebagai tempat kedudukan seluruh komponen sekaligus menopang beban mesin (Gili *et al*., 2026). Ruang pengupas merupakan tempat berlangsungnya proses pengupasan buah yang disusun dalam dua tingkat, yaitu tingkat pertama sebagai tempat pengupasan awal dan tingkat kedua sebagai tempat pengupasan lanjutan bagi buah yang belum terkupas sempurna. Mata pengupas berfungsi sebagai komponen aktif yang mengupas kulit buah aren, sedangkan kisi-kisi pada setiap tingkat berfungsi menahan buah agar tetap bersentuhan dengan mata pengupas sekaligus meloloskan buah menuju tingkat berikutnya. *Hopper* berfungsi sebagai tempat masuknya buah aren sebelum menuju ruang pengupas, dan *outlet* merupakan tempat keluarnya buah yang telah dikupas setelah diproses di ruang pengupas. Tuas pengumpan berfungsi untuk menarik bahan dari *hopper* menuju ruang pengupas. Motor bakar digunakan sebagai sumber tenaga utama, sementara *pulley* dan *V-belt* berfungsi sebagai media penghantar daya dari motor ke poros. Poros berfungsi meneruskan daya dan putaran antarkomponen, dan *bearing* berfungsi membatasi gerak serta mengurangi gesekan pada poros yang terpasang di dalamnya.

E. Rancangan Struktural

Rancangan struktural menggambarkan secara garis besar spesifikasi fisik mesin pengupas kulit buah aren untuk mempermudah perhitungan dinamis komponen dan penentuan tata letak komponen pendukung. Rangka mesin menggunakan besi siku tebal 3 mm dan lebar 4 cm dengan ukuran panjang 72,88 cm, lebar 46 cm, dan tinggi 124,7 cm. Ruang pengupas terbuat dari besi siku dengan panjang 25 cm, lebar 33,8 cm, dan tinggi 52,2 cm, disusun dalam dua tingkat, masing-masing dilengkapi dengan satu poros pengupas dan satu kisi penahan. Mata pengupas (mata pencacah) berjumlah 10 buah yang terbagi merata pada kedua tingkat poros pengupas, terbuat dari besi strip berukuran panjang 15 cm dan lebar 2,5 cm dengan tangkai dari besi pejal setebal 0,9 cm (9 mm). *Outlet* terbuat dari besi strip berukuran 5×3 mm dengan panjang 65,31 cm dan lebar 24,8 cm. Sumber tenaga berasal dari motor bakar berkapasitas 3,5 HP dengan kecepatan putar rata-rata 2.448 rpm. Transmisi daya menggunakan 4 buah *pulley* berukuran 4, 6, dan 8 inci serta 2 buah *V-belt*. Poros pengupas berjumlah 2 buah dan masing-masing terbuat dari besi berdiameter 1 inci dengan panjang 1 m, seluruhnya ditopang oleh 4 buah *bearing* tipe UCP 205 berukuran 1 inci. Seluruh komponen tersebut dirangkai menjadi satu kesatuan mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat.

F. Rancang Bangun Mesin secara Teknik

Pertimbangan perancangan alat mengacu pada desain konseptual yang telah ditetapkan, mencakup aspek bentuk, fungsi, serta inovasi yang diterapkan (Fadeyibi & Ajao, 2020). Perancangan mesin merupakan proses perencanaan suatu sistem yang mencakup berbagai aspek terkait karakteristik mesin, produk, struktur, alat, maupun instrumen (Sugandi *et al*., 2020). Rancang bangun mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat dilakukan melalui pendekatan rekayasa teknik yang meliputi perhitungan kebutuhan daya, perancangan poros, serta perancangan sistem transmisi *pulley* dan *V-belt*, sebagai dasar penentuan spesifikasi struktural mesin yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya.

Perhitungan kebutuhan daya pengupasan didasarkan pada estimasi torsi (momen puntir) yang harus disediakan oleh poros pengupas untuk mengatasi gaya tekan dan gaya gesek antara mata pengupas dan buah aren. Daya yang dibutuhkan (P) berbanding lurus dengan torsi (T) dan kecepatan sudut (ω) poros, mengikuti hubungan $P = T \times \omega$ (Fadeyibi & Ajao, 2020), dengan $\omega = 2\pi n/60$ (n = kecepatan

putar poros dalam rpm). Dengan demikian, torsi pada suatu poros dapat diturunkan sebagai $T = P/\omega = 60P/2\pi n$. Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan torsi pada poros motor penggerak dengan torsi pada poros silinder pengupas, mengingat penurunan kecepatan putar oleh sistem transmisi akan meningkatkan torsi yang tersedia pada poros yang digerakkan, sesuai dengan prinsip kekekalan daya pada sistem transmisi ideal. Penentuan daya motor penggerak mempertimbangkan estimasi torsi pengupasan maksimum dan target kecepatan putar poros pengupas. Berdasarkan pertimbangan tersebut, dipilih motor bakar berkapasitas 3,5 HP yang mampu menyediakan daya dengan margin keamanan terhadap fluktuasi beban selama proses pengupasan berlangsung.

Perancangan poros pengupas mempertimbangkan kemampuan poros dalam menahan tegangan geser akibat torsi puntir yang diteruskan dari motor penggerak. Diameter poros ditentukan berdasarkan torsi rencana dan tegangan geser izin bahan poros, dengan mempertimbangkan faktor koreksi akibat beban kejut (*shock load*) dan lenturan (*bending*) yang mungkin timbul selama proses pengupasan berlangsung, sebagaimana dalam pendekatan perhitungan diameter poros pada rancang bangun mesin pengupas hasil pertanian (Fadeyibi & Ajao, 2020). Diameter poros minimum (Df) yang disyaratkan ditentukan dengan pendekatan tegangan geser sebagaimana Fadeyibi dan Ajao (2020): $Df^3 = [16/(\pi Su)] \times \sqrt{[(Kt \cdot Mt)^2 + (Kb \cdot Mb)^2]}$, dengan Su = tegangan geser izin bahan poros berulir pasak, Mt = momen torsi rencana, Mb = momen lentur rencana, serta Kt dan Kb masing-masing merupakan faktor koreksi kejut dan kelelahan untuk momen torsi dan momen lentur. Berdasarkan perhitungan tersebut, dipilih poros pejal berdiameter 1 inci yang dinilai mampu menahan beban torsi dan beban radial tanpa mengalami defleksi maupun kegagalan struktural, sekaligus kompatibel dengan ukuran bantalan (*bearing*) tipe UCP 205 yang tersedia secara komersial.

Perancangan sistem transmisi daya menggunakan pendekatan perhitungan rasio kecepatan *pulley*, yaitu perbandingan diameter *pulley* penggerak dengan *pulley* yang digerakkan sebagaimana pada Persamaan (3), untuk memperoleh kecepatan putar akhir poros pengupas yang sesuai dengan kebutuhan proses pengupasan. Rancangan transmisi menggunakan konfigurasi dua tahap reduksi melalui 4 buah *pulley* (4, 6, dan 8 inci) dan 2 buah *V-belt* tipe B, dengan mempertimbangkan panjang keliling sabuk dan jarak antarpusat poros agar tegangan sabuk tetap berada pada rentang yang direkomendasikan untuk mencegah slip maupun keausan dini pada sabuk, mengacu pada pendekatan perhitungan rasio kecepatan dan panjang sabuk pada rancang bangun mesin pengupas berbasis rol dan puli (Fadeyibi & Ajao, 2020). Panjang sabuk (L) ditentukan berdasarkan jarak sumbu antarpuli (C) serta diameter kedua puli (D1 dan D2) dengan mengikuti persamaan $L = 2C + (\pi/2)(D1+D2) + (D1-D2)^2/4C$, sehingga jarak pemasangan antarpuli dapat disesuaikan agar tegangan sabuk tetap berada dalam rentang kerja yang direkomendasikan.

Perancangan bantalan (*bearing*) dilakukan dengan mempertimbangkan beban radial yang bekerja pada poros akibat berat poros pengupas beserta mata pengupas dan gaya reaksi pengupasan, yang dievaluasi terhadap kapasitas dinamis (*dynamic load rating*, Cr) bantalan menggunakan persamaan umur bantalan $L10 = (Cr/Pr)^3 \times 10^6$ putaran, atau dalam satuan jam operasi $L10h = [10^6/(60n)] \times (Cr/Pr)^3$, dengan Pr sebagai beban radial ekuivalen yang bekerja pada bantalan. Berdasarkan pendekatan tersebut, dipilih bantalan tipe *pillow block* (UCP 205) yang memiliki kapasitas beban dan umur pakai yang memadai untuk kondisi operasi mesin, serta memudahkan pemasangan dan penyetelan kesejajaran poros pada rangka.

Analisis kekuatan rangka dilakukan dengan memeriksa tegangan tekan yang bekerja pada kaki rangka akibat berat total mesin, menggunakan persamaan tegangan sederhana $\sigma = F/A$, dengan F sebagai gaya tekan yang diterima oleh setiap kaki rangka dan A sebagai luas penampang profil besi siku yang digunakan. Tegangan aktual tersebut kemudian dibandingkan dengan tegangan izin bahan (σijin) untuk memperoleh faktor keamanan (*safety factor*) SF = σijin/σaktual, guna memastikan rangka mampu menopang beban seluruh komponen mesin (kerangka, tabung pengupas, silinder pengupas, motor bakar, dan *hopper*) tanpa mengalami kegagalan struktural selama pengoperasian.

Keseluruhan hasil perhitungan rancangan teknik tersebut selanjutnya diwujudkan dalam bentuk spesifikasi struktural mesin sebagaimana telah diuraikan pada bagian rancangan struktural, sebelum dilanjutkan ke tahapan uji fungsional dan uji kinerja mesin.

G. Pengujian Kinerja Mesin

Pengujian kinerja mesin bertujuan memperoleh data kemampuan kerja mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat secara kuantitatif dan kualitatif. Parameter yang diamati meliputi kapasitas

mesin, persentase bahan tidak terkupas, persentase bahan pecah, rendemen, kecepatan putar, volume ruang pengupas, dan laju pengumpanan.

Bahan uji berupa buah aren yang telah direbus hingga kulit dan cangkangnya melunak, kemudian ditiriskan dan didinginkan hingga suhu ruang sebelum diumpankan. Buah yang digunakan berasal dari satu sumber panen dengan tingkat kematangan seragam, yaitu buah muda yang endospermanya masih lunak, berwarna putih bening, dan belum mengeras. Setiap ulangan menggunakan umpan seberat 3 kg buah aren rebus utuh, yaitu buah yang masih lengkap dengan kulit dan cangkangnya, yang ditimbang menggunakan timbangan digital. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali ulangan pada kondisi operasi yang sama, yaitu kecepatan putar motor pada kisaran 2.400–2.500 rpm, celah antara mata pengupas dan kisi-kisi yang tidak diubah antarulangan, serta pengumpanan yang dilakukan secara manual oleh satu operator melalui tuas pengumpan.

Prosedur pengukuran setiap parameter dilakukan sebagai berikut. Waktu pengupasan (t) diukur menggunakan *stopwatch*, dimulai sejak umpan pertama masuk ke *hopper* hingga bahan terakhir keluar melalui *outlet*. Seluruh keluaran mesin dipisahkan secara manual menjadi tiga fraksi, yaitu bahan terkupas utuh, bahan pecah, dan bahan tidak terkupas (bahan yang masih terbungkus kulit atau cangkang), kemudian masing-masing fraksi ditimbang. Berat bahan terkupas (Wp) merupakan penjumlahan bahan utuh dan bahan pecah, sedangkan berat total bahan keluaran (Wt) merupakan penjumlahan bahan terkupas dan bahan tidak terkupas. Selisih antara berat umpan awal (Wa = 3 kg) dan Wt merupakan berat kulit serta cangkang yang terbuang dan tidak dihitung sebagai hasil. Kecepatan putar poros diukur menggunakan *tachometer* pada poros motor dan poros pengupas.

Selain parameter pada Persamaan (1)–(5), dihitung pula persentase bahan pecah sebagai perbandingan berat bahan pecah terhadap berat bahan terkupas (Wp) dan rendemen sebagai perbandingan berat bahan terkupas terhadap berat umpan awal (Wa). Seluruh nilai rata-rata parameter turunan dihitung dari rata-rata berat dan rata-rata waktu ketiga ulangan agar konsisten dengan definisi persamaan yang digunakan.

Penelitian ini tidak menyertakan perlakuan pengupasan manual sebagai kontrol pembanding. Oleh karena itu, seluruh parameter kinerja yang dilaporkan merupakan capaian mesin pada kondisi pengujian tersebut dan tidak digunakan untuk mengklaim besaran peningkatan efisiensi terhadap metode pengupasan manual.

Kapasitas mesin merupakan kemampuan mesin mengupas buah aren dalam waktu tertentu, dihitung dengan Persamaan (1).

$$C = Wp / t \quad (1)$$

Keterangan:
C = Kapasitas pengupasan buah aren (kg/jam)
Wp = Berat bahan terkupas (kg) = berat bahan utuh + berat bahan pecah
t = Lama pengupasan (jam)

Persentase tidak terkupas merupakan persentase buah aren yang tidak terkupas, dihitung dengan Persamaan (2).

$$Wx = (Wr / Wt) \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:
Wx = Persentase tidak terkupas (%)
Wt = Berat total bahan keluaran (kg) = Wp + Wr, bukan berat umpan awal
Wr = Berat bahan tidak terkupas (kg)

Kecepatan putar merupakan kecepatan putaran yang dialirkan pada mesin pengupas kulit buah aren, dihitung dengan persamaan (3).

$$n1 / n2 = D2 / D \quad (3)$$

Keterangan:
n1 = Kecepatan putar *pulley* 1 (rpm)
n2 = Kecepatan putar *pulley* 2 (rpm)
D1 = Diameter *pulley* 1 (inci)

D2 = Diameter *pulley* 2 (inci)

Volume ruang pengupas dihitung menggunakan persamaan (4).

$$V = T \times L \times P \quad (4)$$

Keterangan:
V = Volume persegi panjang (cm^3)
T = Tinggi (cm)
L = Lebar (cm)
P = Panjang (cm)

Laju pengumpanan dihitung dengan membagi berat awal buah aren dengan waktu yang dibutuhkan, sebagaimana pada Persamaan (5).

Laju pengumpanan = Berat awal buah aren (kg) / Waktu yang dibutuhkan (jam) (5)

F. Analisis Ekonomi Teknik

Analisis ekonomi teknik digunakan untuk mengetahui kelayakan pembuatan dan pengoperasian mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat, meliputi biaya tetap, biaya tidak tetap, biaya pokok, dan titik impas (break-even point*/BEP).*

Biaya tetap adalah biaya yang harus dikeluarkan secara tetap pada periode waktu tertentu, walaupun mesin tidak digunakan, dan terdiri atas biaya penyusutan, bunga modal, dan biaya gudang. Biaya penyusutan merupakan penurunan nilai mesin akibat pertambahan umur pemakaian (Melly *et al*., 2020), dihitung dengan Persamaan (6).

$$D = (P - S) / N \quad (6)$$

Keterangan:
D = Biaya penyusutan (Rp/tahun)
P = Harga jual (Rp)
S = Harga akhir (Rp) = 10% × P
N = Perkiraan umur ekonomis mesin (tahun)

Bunga modal diperhitungkan untuk mengembalikan nilai modal yang ditanam, dihitung dengan persamaan (7).

$$I = i(P)(N + 1) / 2N \quad (7)$$

Keterangan:
I = Bunga modal (Rp/tahun)
i = Suku bunga bank (12%/tahun)

Biaya gudang dihitung dengan Persamaan (8).

$$G = 0{,}5\% \times P \quad (8)$$

G = Biaya gudang (Rp/tahun)

Total biaya tetap mesin diperoleh dari penjumlahan ketiga komponen tersebut, dihitung dengan Persamaan (9).

$$BT = D + I + G \quad (9)$$

BT = Biaya tetap (Rp/tahun)

Biaya tidak tetap merupakan biaya yang besarnya bergantung pada jam kerja pemakaian mesin, terdiri atas biaya bahan bakar, biaya perawatan, dan upah operator. Biaya bahan bakar dihitung dengan persamaan (10).

$$Bbb = (e / t) \times Hbb \quad (10)$$

Keterangan: Bbb = Biaya bahan bakar (Rp/jam); e = Jumlah bahan bakar yang digunakan (liter); t = Waktu mesin hidup (jam); Hbb = Harga bahan bakar (Rp/liter)

Biaya perawatan dihitung dengan persamaan (11).

$$Bm = 1{,}2\%(P - S) / 100\ jam \quad (11)$$

Bm = Biaya perawatan (Rp/jam)

Upah operator dihitung dengan Persamaan (12).

$$O = (u \times j) / x \quad (12)$$

Keterangan:
O = Upah operator (Rp/jam)
u = Upah (Rp/hari)
x = Jam kerja (jam/hari)
j = Jumlah tenaga kerja (orang)

Biaya pokok merupakan biaya yang diperlukan mesin untuk setiap unit produksi. Menurut Melly *et al*. (2020), biaya pokok dihitung dengan Persamaan (13).

$$BP = (BT/X + BTT) / C \quad (13)$$

Keterangan:
BP = Biaya pokok (Rp/kg)
X = Jumlah jam kerja (jam/tahun)

Titik impas (break-even point*/BEP) merupakan kondisi mesin beroperasi tanpa kerugian maupun keuntungan, yaitu ketika jumlah pendapatan sama besar dengan jumlah biaya. Menurut Melly* et al. *(2020), BEP dihitung menggunakan persamaan (14).*

$$BEP = BT / (R - (BTT/C)) \quad (14)$$

Keterangan: BEP = Break-even point (kg/tahun); R = Upah jasa pengupasan manual (Rp/kg)

HASIL DAN PEMBAHASAN

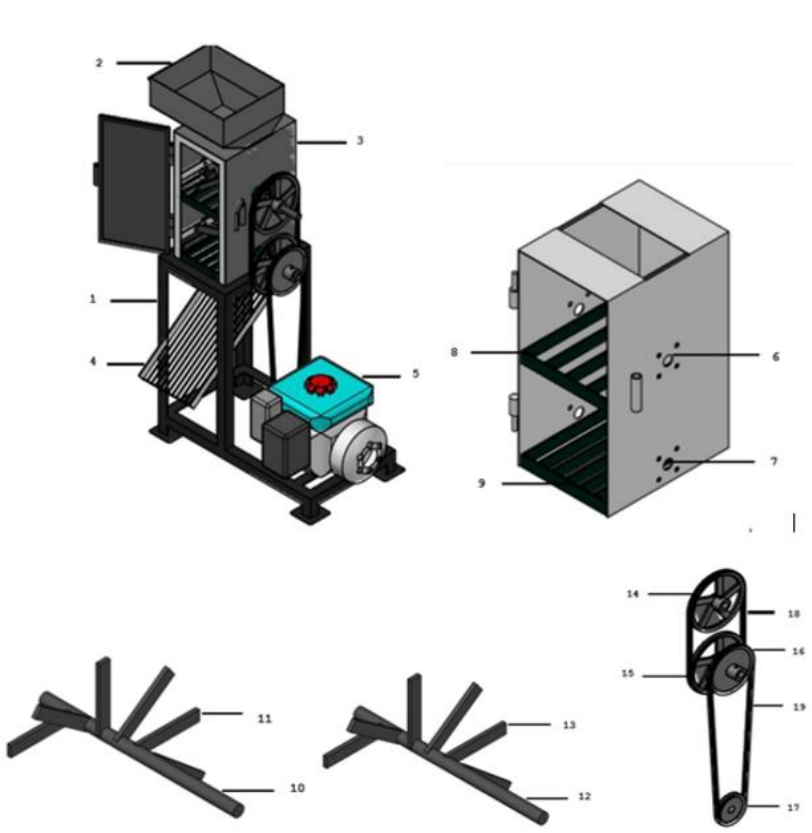
A. Spesifikasi Mesin Pengupas Kulit Buah Aren

Hasil rancang bangun berupa mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat yang terdiri atas komponen *hopper*, rangka utama, ruang pengupas, *pulley* dan *V-belt*, *outlet*, mata pengupas, motor bakar, poros, serta pintu ruang pengupas. Ukuran dan bahan setiap komponen disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komponen pada Rancang Bangun Mesin Pengupas Kulit Buah Aren

No.	Nama Komponen	Ukuran	Keterangan
1	*Hopper*	P 35,4 cm; L 29,2 cm; T 22,71 cm	Besi plat tebal 1 mm
2	Rangka utama	P 72,88 cm; L 46 cm; T 124,7 cm	Besi siku 40×40 mm tebal 3 mm dan besi strip 5×3 mm tebal 3 mm
3	Ruang pengupas	P 25 cm; L 33,8 cm; T 52,2 cm	Besi siku 3×3 dan besi plat tebal 2 mm
4	*Pulley* dan *V-belt*	*Pulley* 8 inch (2 buah), 4 inch (1 buah), 6 inch (1 buah)	*V-belt* tipe B-44 dan B-61
5	*Outlet*	P 65,31 cm; L 24,8 cm	Besi strip tebal 3 mm dan besi bulat pejal Ø8 mm
6	Mata pengupas	P 15 cm; L 2,5 cm; tebal 0,9 cm	Besi strip P 10 cm tebal 6 mm
7	Motor bakar	*Bore* × *stroke* 63 × 46 mm	Motor bakar 3,5 HP
8	Poros	P 1 m; Ø 1 inch	Besi as diameter 1 inch
9	Pintu ruang pengupas	P 25 cm; tebal 4 mm; T 52,2 cm	Besi bulat Ø10 mm dan besi plat tebal 2 mm

Setelah seluruh komponen selesai dibuat, dilakukan perakitan mulai dari pemasangan ruang pengupas dan poros utama, mata pengupas, *outlet*, motor bakar 3,5 HP pada dudukannya, hingga pemasangan *pulley* beserta *V-belt*. Mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat beserta komponennya ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Mesin Pengupas Kulit Buah Aren Tipe Bertingkat

Hasil rancang bangun menghasilkan mesin dengan spesifikasi akhir sebagai berikut: panjang mesin 100,69 cm, lebar mesin 56,89 cm, tinggi mesin 147,61 cm, panjang ruang pengupas 33,8 cm, tinggi ruang pengupas 52,3 cm, jumlah mata pengupas 10 buah, diameter poros 1 inch, *pulley* motor bakar 4 inch, *pulley* poros 8 inch, daya motor bakar 3,5 HP, dan kecepatan putar akhir 1.632 rpm. Pengoperasian mesin dilakukan dengan menyiapkan buah aren yang telah direbus beserta wadah penampung hasil pengupasan, memastikan seluruh komponen dan poros berfungsi dengan baik, memasukkan bahan melalui *hopper*, menghidupkan motor bakar, hingga buah yang telah terkupas keluar melalui *outlet*.

Rancangan *hopper* pada mesin ini mengacu pada prinsip pengarahan bahan menuju ruang pengupas sebagaimana dikemukakan oleh Purnama (2018) dalam perancangan *hopper* mesin pengupas buah aren, yaitu bentuk corong yang menyempit ke arah lubang masuk ruang pengupas untuk memastikan buah aren mengalir secara gravitasi tanpa tersumbat sebelum proses pengupasan berlangsung.

Ditinjau dari aspek rancang bangun secara teknis, mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat ini dirancang berdasarkan prinsip pengupasan bertahap (*multi-stage peeling*), yaitu penyusunan dua tingkat poros pengupas secara seri dalam satu ruang pengupas. Buah aren yang masuk melalui *hopper* terlebih dahulu dikupas pada tingkat pertama oleh mata pengupas yang berputar di atas kisi-kisi penahan, kemudian buah yang telah terkupas maupun yang belum terkupas sempurna jatuh secara gravitasi menuju tingkat kedua untuk memperoleh pengupasan lanjutan sebelum keluar melalui *outlet*. Mekanisme ini berbeda dengan mesin pengupas rol tunggal maupun rol ganda yang menyelesaikan seluruh proses pengupasan dalam satu tahap, karena pembagian kerja ke dalam dua tingkat memungkinkan intensitas gaya tekan dan gaya gesek pada masing-masing tingkat diatur lebih rendah dengan durasi kontak total yang justru lebih panjang, sehingga persentase buah tidak terkupas dapat ditekan tanpa memperbesar risiko kerusakan buah akibat gaya yang terlalu terkonsentrasi pada satu tahap (Amin, 2020; Sarif *et al*., 2018; Le *et al*., 2019). Prinsip pengupasan bertahap tersebut sejalan dengan mekanisme *peeling machine* yang mengombinasikan beberapa tahap perlakuan pengupasan

pada komoditas hortikultura lain, yang terbukti mampu menekan tingkat kerusakan buah dibandingkan dengan pengupasan yang dilakukan dalam satu tahap (Le *et al*., 2019).

Rangka utama mesin dirancang menggunakan besi siku tebal 3 mm berukuran 4×4 cm dengan konfigurasi persegi panjang berukuran panjang 72,88 cm, lebar 46 cm, dan tinggi 124,7 cm. Pemilihan profil siku ini didasarkan pada pertimbangan bahwa penampang siku memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan beban statis komponen (motor bakar, poros pengupas, mata pengupas, dan bantalan) serta beban dinamis akibat getaran putaran poros dan gaya reaksi pengupasan, sementara proses fabrikasinya (pemotongan dan pengelasan) relatif sederhana dan berbiaya rendah dibandingkan dengan profil kanal atau pipa kotak (Gili et al., 2026). Tinggi rangka 124,7 cm juga disesuaikan dengan ergonomi operator agar proses pengumpanan bahan melalui *hopper* dan pengambilan hasil pada *outlet* dapat dilakukan dalam posisi berdiri yang nyaman.

Ruang pengupas berukuran panjang 25 cm, lebar 33,8 cm, dan tinggi 52,2 cm dirancang dalam dua tingkat yang tersusun secara vertikal, sehingga tinggi ruang tersebut memadai untuk menempatkan poros pengupas tingkat pertama dan tingkat kedua beserta kisi-kisi penahannya. Celah antara mata pengupas, kisi-kisi, dan dinding ruang pengupas pada setiap tingkat dibuat cukup sempit untuk memastikan seluruh permukaan buah aren bersentuhan dengan mata pengupas, namun tetap menyediakan ruang gerak yang memadai agar buah tidak tersangkut. Sepuluh mata pengupas yang terbuat dari besi strip berukuran panjang 15 cm dan lebar 2,5 cm dipasang mengelilingi kedua poros pengupas dengan jarak antarmata yang seragam, sehingga buah mengalami kontak berulang pada tingkat pertama dan kembali memperoleh perlakuan serupa pada tingkat kedua selama poros berputar. Konfigurasi bertingkat ini sejalan dengan prinsip rancangan mata pengupas pada mesin sejenis, yaitu memaksimalkan frekuensi kontak permukaan bergerigi dengan bahan untuk mempercepat proses pengupasan (Nurudin & Sakti, 2014; Khoryanton & Sumiyarso, 2022).

Kedua poros pengupas pada tingkat pertama dan tingkat kedua menggunakan besi pejal berdiameter 1 inci sepanjang 1 m yang secara keseluruhan ditopang oleh 4 buah bantalan (*bearing*) tipe UCP 205. Pemilihan diameter poros 1 inci mempertimbangkan kemampuan poros meneruskan momen puntir (torsi) dari motor bakar 3,5 HP tanpa mengalami defleksi berlebih selama proses pengupasan berlangsung, sedangkan penggunaan bantalan tipe *pillow block* (UCP) dipilih karena kemudahan pemasangan pada rangka, toleransi kesejajaran (*misalignment*) poros yang lebih baik, serta kemudahan perawatan dibandingkan dengan jenis bantalan lain (Melly et al., 2020). Keempat bantalan tersebut ditempatkan pada kedua ujung masing-masing poros pengupas untuk mendistribusikan beban radial secara merata dan mengurangi gesekan berlebih yang dapat menimbulkan panas maupun keausan dini pada poros.

Sistem transmisi daya dirancang menggunakan konfigurasi dua tahap reduksi kecepatan melalui 4 buah *pulley* (ukuran 4, 6, dan 8 inci) dan 2 buah *V-belt* tipe B. Tahap pertama mereduksi kecepatan putar motor bakar dari 2.448 rpm menjadi 1.632 rpm melalui pasangan *pulley* 4 inci dan 6 inci, sedangkan tahap kedua meneruskan kecepatan tersebut dari poros pengupas tingkat pertama ke poros pengupas tingkat kedua melalui pasangan *pulley* 8 inci ke 8 inci tanpa reduksi tambahan, sehingga kedua tingkat pengupas berputar pada kecepatan yang sama. Rancangan dua tahap ini dimaksudkan untuk memperoleh kecepatan putar akhir yang sesuai dengan kebutuhan proses pengupasan, yaitu cukup tinggi untuk menghasilkan kapasitas kerja yang memadai, namun tidak terlalu tinggi sehingga berisiko meningkatkan persentase buah pecah akibat benturan yang terlalu keras antara mata pengupas dan buah aren. Prinsip perhitungan rasio kecepatan *pulley* mengikuti Persamaan (3), sebagaimana lazim diterapkan dalam rancangan sistem transmisi mesin pengupas hasil pertanian (Sugandi et al., 2017).

Hopper dirancang berbentuk corong segi empat yang menyempit ke arah bawah, dengan ukuran panjang 35,4 cm, lebar 29,2 cm, dan tinggi 22,71 cm, menggunakan bahan pelat besi tebal 1 mm, sesuai dengan prinsip pengarahan bahan sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, mengacu pada Purnama (2018). Pada sisi keluaran, *outlet* dirancang menggunakan besi strip tebal 3 mm dan besi bulat pejal berdiameter 8 mm dengan panjang 65,31 cm dan lebar 24,8 cm, membentuk saluran yang cukup lebar untuk mengalirkan buah aren yang telah terkupas keluar dari ruang pengupas tanpa terjadi penumpukan atau penyumbatan. Pintu ruang pengupas turut dirancang menggunakan besi bulat berdiameter 10 mm sebagai poros engsel dan pelat besi tebal 2 mm sebagai daun pintu, sehingga memudahkan akses untuk perawatan maupun pembersihan ruang pengupas tanpa harus membongkar seluruh rangkaian mesin.

Secara keseluruhan, rancang bangun mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat ini menunjukkan keterpaduan antara pertimbangan kekuatan struktural rangka, efisiensi mekanisme

pengupasan dan transmisi daya, serta kemudahan operasional dan perawatan, sehingga mendukung capaian kinerja mesin yang dibahas pada bagian berikutnya.

B. Analisis Perhitungan Teknik Rancang Bangun Mesin

Analisis perhitungan teknik dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian antara spesifikasi struktural mesin yang telah dirancang (Tabel 3) dengan beban kerja yang harus ditanggung selama proses pengupasan, meliputi perhitungan daya dan torsi, diameter poros, umur bantalan, sistem transmisi, serta kekuatan rangka.

Daya motor bakar sebesar 3,5 HP setara dengan $P = 3{,}5 \times 745{,}7$ W = 2.610 W. Kecepatan sudut pada poros motor (n = 2.448 rpm) adalah $\omega 1 = 2\pi n/60 = 2\pi(2.448)/60 = 256{,}34$ rad/s, sehingga torsi pada poros motor adalah $T1 = P/\omega 1 = 2.610/256{,}34 = 10{,}18$ Nm. Pada poros silinder pengupas, kecepatan putar akhir (n = 1.632 rpm) menghasilkan kecepatan sudut $\omega 2 = 2\pi(1.632)/60 = 170{,}89$ rad/s, sehingga torsi pada poros silinder pengupas adalah $T2 = P/\omega 2 = 2.610/170{,}89 = 15{,}27$ Nm. Peningkatan torsi dari poros motor ke poros silinder pengupas ini konsisten dengan prinsip kekekalan daya pada sistem transmisi, yaitu penurunan kecepatan putar akibat reduksi *pulley* diimbangi dengan peningkatan torsi yang tersedia untuk melakukan kerja pengupasan.

Diameter poros minimum dihitung menggunakan torsi rencana T2 = 15,27 Nm sebagai kontrol utama, dengan tegangan geser izin bahan poros berulir pasak $Su = 40 \times 10^6$ Pa dan faktor koreksi torsi Kt = 1,0 (Fadeyibi & Ajao, 2020). Dengan demikian, $Df^3 = 16T2/(\pi Su) = (16 \times 15{,}27)/(\pi \times 40 \times 10^6) = 1{,}944 \times 10^{-6}$ m³, atau Df = 0,0125 m = 12,5 mm. Mengingat data pembebanan lentur (*bending*) belum tersedia dari hasil pengukuran langsung, perhitungan ini terbatas pada kontrol torsional sebagai pendekatan konservatif. Diameter poros aktual yang digunakan (1 inci = 25,4 mm) berada jauh di atas diameter minimum hasil perhitungan tersebut, menunjukkan bahwa poros memiliki margin keamanan yang memadai terhadap beban torsi, sekaligus disesuaikan dengan ukuran standar lubang bantalan UCP 205 yang tersedia secara komersial.

Konsistensi satuan pada perhitungan tersebut dapat ditelusuri sebagai berikut: T2 dinyatakan dalam N·m dan Su dalam N/m², sehingga 16T2/(πSu) menghasilkan satuan m³, yaitu $(16 \times 15{,}27$ N·m$)/(3{,}1416 \times 40 \times 10^6$ N/m²$) = 1{,}944 \times 10^{-6}$ m³ dan $Df = (1{,}944 \times 10^{-6})^{(1/3)}$ m = 0,0125 m = 12,5 mm. Dengan diameter poros aktual 25,4 mm, faktor keamanan terhadap pembebanan puntir, apabila dinyatakan sebagai perbandingan kapasitas torsi, adalah $(25{,}4/12{,}5)^3 \approx 8{,}4$. Perlu ditegaskan bahwa nilai tersebut hanya berlaku untuk pembebanan torsional; kontrol terhadap momen lentur (suku Kb·Mb pada persamaan diameter poros) belum dapat dilakukan karena data pembebanan lentur tidak diukur pada penelitian ini, sehingga faktor keamanan sebenarnya akan lebih kecil daripada nilai tersebut.

Bantalan (*bearing*) tipe UCP 205 berdiameter lubang 1 inci memiliki kapasitas beban dinamis (*dynamic load rating*) katalog sebesar Cr = 14 kN. Beban radial aktual yang bekerja pada bantalan berasal dari berat silinder pengupas beserta poros dan gaya reaksi pengupasan, yang untuk mesin berskala kecil seperti ini diperkirakan berada pada orde puluhan hingga ratusan newton, jauh lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas dinamis bantalan. Dengan demikian, bantalan UCP 205 yang dipilih memiliki umur pakai (L10) dan margin keamanan yang memadai untuk beban kerja mesin.

Verifikasi sistem transmisi dilakukan dengan membandingkan rasio kecepatan putar hasil pengujian terhadap rasio diameter *pulley* menggunakan Persamaan (3): n1/n2 = D2/D1 = 6 inci/4 inci = 1,5. Nilai ini, apabila dikalikan dengan kecepatan putar awal (2.448 rpm), menghasilkan 2.448/1,5 = 1.632 rpm. Nilai ini sama dengan kecepatan putar akhir hasil pengujian pada Tabel 4, sehingga menunjukkan bahwa sistem transmisi *pulley* dan *V-belt* bekerja sesuai dengan rancangan teknik yang telah dirancang.

Kekuatan rangka dianalisis dengan memeriksa tegangan tekan pada kaki rangka akibat berat total mesin. Luas penampang profil besi siku 40 × 40 × 3 mm dihitung sebagai $A = t(2b - t) = 3(2 \times 40 - 3) = 231$ mm² $= 231 \times 10^{-6}$ m². Dengan estimasi berat total mesin (rangka, tabung pengupas, silinder pengupas, motor bakar, dan *hopper*) sebesar ± 70 kg (686,7 N) yang ditopang oleh 4 kaki rangka secara merata, maka gaya tekan pada setiap kaki adalah F = 686,7/4 = 171,7 N. Dengan demikian, tegangan tekan aktual $\sigma = F/A = 171{,}7/(231 \times 10^{-6}) = 0{,}74 \times 10^6$ Pa = 0,74 MPa. Dibandingkan dengan tegangan izin baja karbon rendah (σijin ≈ 140 MPa), diperoleh faktor keamanan SF = σijin/σaktual = 140/0,74 ≈ 189, yang menunjukkan bahwa rangka memiliki margin keamanan struktural yang sangat besar terhadap beban statis dari komponen mesin.

Nilai SF ≈ 189 tersebut hanya menggambarkan pembebanan tekan statis aksial, sehingga tidak dapat langsung dibaca sebagai ukuran keandalan rangka secara keseluruhan. Sebagai pelengkap, dilakukan kontrol terhadap tekuk (*buckling*) pada kaki rangka setinggi 1,247 m dengan profil siku 40 × 40 × 3 mm ($A = 231$ mm²; momen inersia minimum $I \approx 1{,}39 \times 10^{-8}$ m⁴; $E = 200 \times 10^9$ Pa). Beban kritis Euler diperoleh sebesar $P_{cr} = \pi^2 EI/(KL)^2 = (9{,}8696 \times 200 \times 10^9 \times 1{,}39 \times 10^{-8})/(1 \times 1{,}247)^2 \approx 17{,}6 \times 10^3$ N, sehingga faktor keamanan terhadap tekuk masih sekitar 103 terhadap beban 171,7 N per kaki. Kedua nilai faktor keamanan yang besar tersebut menunjukkan bahwa pemilihan profil siku 40 × 40 × 3 mm tidak ditentukan oleh kriteria kekuatan, melainkan oleh kebutuhan kekakuan rangka terhadap getaran poros pengupas, ketersediaan ukuran profil di pasaran, serta kemudahan pengelasan.

Secara keseluruhan, hasil analisis perhitungan teknik menunjukkan bahwa seluruh komponen utama mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat, meliputi poros, bantalan, sistem transmisi, dan rangka, telah dirancang dengan margin keamanan yang memadai terhadap beban kerja aktual, sehingga mendukung keandalan mesin selama pengujian kinerja yang dibahas pada bagian berikutnya.

C. Uji Kinerja Mesin Pengupas Kulit Buah Aren

Pengujian kinerja mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat menggunakan motor bakar 3,5 HP dilakukan sebanyak 3 ulangan, dengan umpan 3 kg buah aren rebus utuh pada setiap ulangan. Umpan tersebut merupakan buah aren yang masih lengkap dengan kulit dan cangkangnya, sehingga bahan keluaran mesin berupa daging buah (kolang-kaling) hanya merupakan sebagian kecil dari berat umpan, sedangkan kulit dan cangkang keluar sebagai limbah dan tidak ditimbang sebagai hasil. Hasil uji kinerja mesin disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Kinerja Mesin Pengupas Kulit Buah Aren Tipe Bertingkat

No.	Parameter Hasil Pengujian	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Rata-rata
1	Berat umpan awal, Wa (kg)	3	3	3	3
2	Waktu (detik)	39,28	50,24	45,33	44,95
3	Bahan terkupas, Wp (kg)	0,427	0,427	0,439	0,431
4	Bahan tidak terkupas, Wr (kg)	0,081	0,036	0,040	0,052
5	Berat total bahan keluaran, Wt (kg)	0,508	0,463	0,479	0,483
6	Kulit dan cangkang terbuang (kg)	2,492	2,537	2,521	2,517
7	Rendemen terhadap umpan awal (%)	14,2	14,2	14,6	14,4
8	Kapasitas (kg/jam)	39,1	30,6	34,9	34,5
9	Persentase tidak terkupas (%)	15,9	7,8	8,4	10,8
10	Bahan utuh (kg)	0,357	0,330	0,350	0,346
11	Bahan pecah (kg)	0,070	0,097	0,089	0,085
12	Persentase bahan pecah (%)	16,4	22,7	20,3	19,7
13	Kecepatan putar awal (rpm)	2.445	2.5	2.4	2.448
14	Kecepatan putar akhir (rpm)	1.63	1.666	1.6	1.632
15	Laju pengumpan (kg/jam)	275,0	215,0	238,3	240,3

Keterangan Tabel 4: Wt = Wp + Wr; berat kulit dan cangkang terbuang dihitung sebagai selisih antara berat umpan awal (Wa) dan Wt. Nilai rata-rata untuk parameter turunan (rendemen, kapasitas, persentase, dan laju pengumpan) dihitung dari rata-rata berat dan rata-rata waktu pada ketiga ulangan.

Berdasarkan Tabel 4, masih terdapat bahan yang tidak terkupas akibat bahan yang menempel pada ruang pengupas. Bahan tersebut tidak termasuk kehilangan hasil karena dapat dikupas kembali. Waktu pengupasan pada ketiga ulangan relatif konsisten, sehingga menunjukkan kestabilan kinerja mesin antarpengujian.

Neraca massa pengujian menjelaskan perbedaan antara berat umpan awal dan berat bahan keluaran pada Tabel 4. Dari umpan 3 kg buah aren rebus utuh pada setiap ulangan, berat total bahan keluaran (Wt) rata-rata hanya 0,483 kg, yang terdiri atas 0,431 kg bahan terkupas dan 0,052 kg bahan tidak terkupas. Sedangkan sisanya sebesar rata-rata 2,517 kg merupakan kulit dan cangkang buah yang terbuang selama proses. Dengan demikian, rendemen kolang-kaling terhadap umpan awal adalah 14,4%. Persentase bahan tidak terkupas dihitung terhadap berat total bahan keluaran (Wt), sedangkan persentase bahan pecah dihitung terhadap berat bahan terkupas (Wp).

Kapasitas mesin dihitung menggunakan Persamaan (1) berdasarkan rata-rata bahan terkupas dan waktu pengupasan, yaitu:

$$C = Wp / t = 0{,}431\ kg / 0{,}01249\ jam = 34{,}5\ kg/jam \quad (1)$$

Kapasitas efektif pada penelitian ini dihitung berdasarkan berat bahan terkupas per satuan waktu sesuai Persamaan (1), sehingga nilai 34,5 kg/jam merupakan laju keluaran kolang-kaling, bukan laju pengumpanan buah aren. Dengan rendemen 14,4%, laju pengumpanan yang setara adalah sekitar 240 kg buah/jam. Sebagai pembanding, kapasitas 435,3 kg/jam yang dilaporkan Harahap (2018) berbasis bahan yang diumpankan dengan rendemen 15%, sehingga setara dengan sekitar 65 kg kolang-kaling/jam. Perbandingan pada basis keluaran menunjukkan bahwa kapasitas mesin ini berada di bawah alat tersebut, yang konsisten dengan perbedaan skala penerapan keduanya. Kapasitas rancangan sebesar 80 kg/jam yang dilaporkan oleh Leo *et al*., (2023) juga lebih tinggi, meskipun nilai tersebut merupakan target rancangan yang tidak disertai basis perhitungan maupun data pengujian sehingga tidak dapat dibandingkan secara setara.

Perbedaan kapasitas tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan mekanisme kerja, dimensi ruang pengupas, jumlah dan konfigurasi mata pengupas, serta kecepatan putar poros pada masing-masing mesin. Pada mesin bertingkat, bahan harus melewati dua tingkat pengupas secara berurutan sehingga waktu tinggal bahan di dalam ruang pengupas menjadi lebih panjang. Konsekuensinya, kapasitas per satuan waktu relatif lebih rendah, tetapi ketuntasan pengupasan pada satu kali pengumpanan menjadi lebih baik, sebagaimana tercermin dari persentase bahan tidak terkupas sebesar 10,8% tanpa pengumpanan ulang. Perbandingan ini bersifat indikatif karena kondisi pengujian, tingkat kematangan bahan, dan definisi kapasitas pada masing-masing penelitian tidak seragam, serta karena Leo *et al*., (2023) tidak melaporkan persentase bahan tidak terkupas maupun bahan pecah sebagai pembanding mutu hasil.

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa laju pengumpan pada setiap ulangan selalu lebih tinggi daripada kapasitas efektif mesin, dengan selisih rata-rata sekitar 205,8 kg/jam. Perbedaan tersebut terjadi karena laju pengumpan dihitung dari berat awal seluruh bahan yang dimasukkan dibagi dengan waktu proses, sedangkan kapasitas mesin dihitung berdasarkan berat bahan yang berhasil terkupas. Kedua parameter menunjukkan pola yang searah, yaitu menurun dari Ulangan 1 ke Ulangan 2 dan meningkat kembali pada Ulangan 3. Hasil ini menunjukkan bahwa laju pengumpanan memengaruhi kapasitas efektif mesin. Oleh karena itu, pengumpanan bahan perlu diatur secara seimbang agar kapasitas kerja tetap optimal dan waktu kontak bahan dengan mata pengupas cukup untuk menghasilkan pengupasan yang baik. Persentase bahan tidak terkupas dihitung dengan persamaan (2):

$$Wx = (Wr / Wt) \times 100\% = (0{,}052\ kg / 0{,}483\ kg) \times 100\% = 10{,}8\% \quad (2)$$

Nilai persentase tidak terkupas sebesar 10,8% dihitung berdasarkan berat total bahan keluaran (Wt = Wp + Wr = 0,483 kg). Bahan yang tidak terkupas masih dapat dikupas ulang sehingga tidak mengalami kehilangan hasil yang bersifat permanen. Data pada Tabel 4 juga menunjukkan kecenderungan yang berlawanan antara persentase bahan tidak terkupas dan persentase bahan pecah. Pada Ulangan 2 dan Ulangan 3, persentase bahan tidak terkupas menurun dibandingkan dengan Ulangan 1, sedangkan persentase bahan pecah meningkat. Kondisi tersebut menunjukkan adanya *trade-off* antara ketuntasan pengupasan dan tingkat kerusakan bahan. Tekanan dan gesekan yang lebih kuat pada kedua tingkat pengupas dapat meningkatkan efektivitas pengupasan, tetapi sekaligus meningkatkan risiko bahan pecah. Oleh karena itu, pengaturan celah, tekanan, dan kecepatan putar pada masing-masing tingkat pengupas perlu dioptimalkan agar persentase bahan yang tidak terkupas rendah dan persentase bahan yang pecah tetap terkendali.

Persentase bahan pecah sebesar 19,7% merupakan nilai yang cukup tinggi dan berimplikasi langsung terhadap mutu kolang-kaling. Kolang-kaling diperdagangkan dalam bentuk butiran utuh yang kenyal dan bening; butiran yang pecah kehilangan bentuk, lebih cepat kehilangan air, serta lebih rentan mengalami perubahan tekstur dan warna selama penyimpanan, sehingga umumnya masuk dalam kategori mutu rendah dengan harga jual yang lebih rendah. Dengan tingkat kerusakan tersebut, hanya sekitar 80,3% bahan yang terkupas (0,346 kg dari 0,431 kg per ulangan) yang berpotensi memperoleh harga mutu utama. Oleh karena itu, kelayakan teknis mesin ini belum dapat dinyatakan tercapai sepenuhnya, dan penurunan persentase bahan pecah menjadi prioritas perbaikan berikutnya, antara lain melalui penurunan kecepatan putar poros pengupas tingkat kedua, pelebaran celah antara mata pengupas dan kisi-kisi, penggantian mata pengupas bersudut tajam dengan mata bersudut tumpul atau

berlapis elastomer, serta pengaturan laju pengumpanan agar tidak terjadi penumpukan bahan di dalam ruang pengupas. Nilai tersebut juga perlu diverifikasi pada jumlah ulangan yang lebih banyak dan pada tingkat kematangan buah yang berbeda, mengingat kekerasan endosperma buah aren sangat dipengaruhi oleh umur panen dan lama perebusan.

Kecepatan putar akhir dihitung menggunakan Persamaan (3) melalui dua tahap reduksi. Reduksi pertama pada pulley 4 inch dan 6 inch menghasilkan kecepatan 1.632 rpm, dan reduksi kedua pada pulley 8 inch ke 8 inch tetap menghasilkan 1.632 rpm sebagai kecepatan putar akhir mesin.

Berdasarkan Tabel 4, kecepatan putar akhir pada ketiga ulangan berada pada kisaran 1.600–1.666 rpm, lebih rendah daripada kecepatan putar awal yang berkisar antara 2.400–2.500 rpm. Penurunan kecepatan tersebut terjadi akibat reduksi transmisi *pulley* dan V-belt sesuai dengan rasio diameter *pulley* yang digunakan. Nilai kecepatan putar akhir yang relatif seragam menunjukkan bahwa sistem transmisi bekerja secara konsisten pada setiap pengujian. Kestabilan putaran ini mendukung keseragaman kerja mata pengupas serta konsistensi waktu proses dan kapasitas mesin. Volume ruang pengupas dihitung dengan persamaan (4):

$$V = T \times L \times P = 52{,}3\ cm \times 25\ cm \times 33{,}8\ cm = 44.193{,}5\ cm^3 \quad (4)$$

D. Analisis Ekonomi Mesin Pengupas Kulit Buah Aren

Analisis ekonomi mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat meliputi biaya pembuatan mesin, harga jual, serta biaya pengoperasian mesin (biaya tetap, biaya tidak tetap, biaya pokok, dan titik impas). Pendekatan analisis ekonomi teknik yang digunakan dalam penelitian ini sejalan dengan metode yang diterapkan oleh Sugandi *et al*. (2017), Novita *et al*. (2024), Ernita *et al*. (2025), dan Wongnaa *et al*. (2025), yang juga menggunakan parameter biaya tetap, biaya tidak tetap, biaya pokok, dan titik impas sebagai indikator kelayakan penerapan mesin pada skala usaha kecil.

Tabel 5. Biaya Bahan Pembuatan Mesin

No.	Uraian	Jumlah	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Total (Rp)
1	Besi siku 4×4 cm	2	Batang	100	200
2	Plat besi 1 mm	4	Meter	100	400
3	Besi pejal	1	Meter	120	120
4	*Bearing* 205	4	Buah	50	200
5	*Pulley* Ø4 inch	1	Buah	125	125
6	*Pulley* Ø6 inch	1	Buah	80	80
7	*Pulley* Ø8 inch	2	Buah	65	130
8	Belt	2	Buah	31	62
9	Motor bakar	1	Unit	3.050.000	3.050.000
10	Elektroda 2,6 mm	1	Kotak	35	35
11	Elektroda 2,0 mm	1	Kg	20	20
12	Baut dan mur ring Ø12	4	Pasang	2	8
13	Baut dan mur ring Ø16	16	Pasang	4	64
	Total biaya bahan				4.494.000

Selain biaya bahan, biaya pembuatan mesin juga mencakup biaya tenaga kerja dan sewa peralatan bengkel. Biaya tenaga kerja dihitung dari 4 orang pekerja selama 4 hari dengan upah Rp120.000/hari, yaitu:

$$Btk = J \times H \times U = 4\ orang \times 4\ hari \times Rp120.000 = Rp1.920.000 \quad (15)$$

Biaya sewa peralatan bengkel dihitung dari 8 jam kerja per hari selama 4 hari dengan tarif sewa Rp10.000/jam, yaitu:

$$8\ jam \times 4\ hari \times Rp10.000 = Rp320.00 \quad (16)$$

Total biaya pembuatan mesin merupakan penjumlahan biaya bahan, biaya tenaga kerja, dan biaya sewa peralatan, yaitu Rp4.494.000 + Rp1.920.000 + Rp320.000 = Rp6.734.000.

Harga jual mesin ditetapkan dengan margin laba sebesar 20% dari total biaya pembuatan, yaitu 20% × Rp6.734.000 = Rp1.346.800, sehingga total harga jual (P) mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat adalah Rp6.734.000 + Rp1.346.800 = Rp8.080.800.

Biaya tetap mesin dihitung menggunakan Persamaan (6)–(9) dengan umur ekonomis mesin (N) 5 tahun, harga akhir (S) 10% dari harga jual, dan suku bunga bank (i) 12%/tahun. Biaya penyusutan (D) sebesar Rp1.454.544/tahun, bunga modal (I) sebesar Rp581.817,60/tahun, dan biaya gudang (G) sebesar Rp40.404/tahun, sehingga diperoleh biaya tetap total:

$$BT = D + I + G = Rp1.454.544 + Rp581.817,60 + Rp40.404 = Rp2.076.765,60/tahun \quad (9)$$

Biaya tidak tetap dihitung menggunakan persamaan (10)–(12). Biaya bahan bakar (Bbb) sebesar Rp15.000/jam (konsumsi 1,25 liter/jam pada harga Rp12.000/liter), biaya perawatan (Bm) sebesar Rp872,73/jam, dan upah operator (O) sebesar Rp10.000/jam, sehingga diperoleh biaya tidak tetap total:

$$Btt = Bbb + Bm + O = Rp15.000 + Rp872,73 + Rp10.000 = Rp25.872,73/jam \quad (12)$$

Biaya pokok pengupasan dihitung menggunakan Persamaan (13) dengan kapasitas mesin 34,5 kg/jam dan asumsi jam kerja 2.400 jam/tahun. Asumsi tersebut setara dengan 8 jam kerja per hari selama 25 hari kerja per bulan selama 12 bulan, yaitu skenario pemanfaatan penuh apabila mesin dioperasikan sebagai unit jasa pengupasan bersama pada satu sentra pengolahan kolang-kaling. Karena permintaan kolang-kaling bersifat musiman dan memuncak menjelang Ramadan, asumsi ini merupakan batas atas pemanfaatan; pengaruh jam operasi yang lebih rendah terhadap biaya pokok dan titik impas diuraikan dalam analisis sensitivitas. Ringkasan hasil analisis ekonomi mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat disajikan pada Tabel 6.

$$BP = (BT/X + Btt) / C = (865,32 + 25.872,73) / 34,5 = Rp775,02/kg \quad (13)$$

Titik impas (BEP) dihitung menggunakan Persamaan (14) dengan upah jasa pengupasan manual (R) sebesar Rp1.200/kg:

$$BEP = BT / (R - (Btt/C)) = 2.076.765,60 / (1.200 - 749,93) = 4.614,4 \text{ kg/tahun} \quad (14)$$

Tabel 6. Biaya Pengoperasian Mesin Pengupas Kulit Buah Aren Tipe Bertingkat

No.	Uraian	Nilai	No.	Uraian	Nilai
1a	Harga jual (Rp)	8.080.800	3	Biaya penyusutan (Rp/tahun)	1.454.544
1b	Umur ekonomis mesin (tahun)	5	4	Biaya modal (Rp/tahun)	581.818
1c	Harga akhir (Rp)	808.08	5	Biaya gudang (Rp/tahun)	40.404
1d	Suku bunga (%)	12	6	Biaya operator (Rp/jam)	10
1e	Upah operator (Rp/hari)	80	7	Biaya bahan bakar (Rp/jam)	15
1f	Upah jasa pengupasan manual (Rp/kg)	1.2	8	Biaya perawatan (Rp/jam)	872,73
1g	Jumlah operator (orang)	1	9	Biaya tetap (Rp/tahun)	2.076.766
1h	Jam kerja mesin (jam/tahun)	2.4	10	Biaya tidak tetap (Rp/jam)	25.872,73
1i	Konsumsi bahan bakar (L/jam)	1,25	11	Biaya pokok (Rp/kg)	775,02
1j	Harga bahan bakar (Rp/L)	12	12	*Break even point* (kg/tahun)	4.614,4
2	Kapasitas (kg/jam)	34,5	13	BEP setara jam operasi (jam/tahun)	133,7

Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat mencapai titik impas pada produksi 4.614,4 kg/tahun, atau setara dengan sekitar 133,7 jam operasi per tahun pada kapasitas 34,5 kg/jam. Nilai tersebut hanya sekitar 5,6% dari kapasitas tahunan mesin sebesar 82.800 kg, sehingga titik impas dapat dicapai dengan pemanfaatan yang relatif ringan dan sesuai dengan pola produksi kolang-kaling yang bersifat musiman. Biaya pokok pengupasan sebesar Rp775,02/kg juga masih berada di bawah upah jasa pengupasan manual sebesar Rp1.200/kg, sehingga penerapan mesin berpotensi menekan biaya pengupasan sekitar 35%. Perlu ditegaskan bahwa kedua nilai tersebut hanya berlaku pada seperangkat asumsi tertentu, yaitu harga jual mesin Rp8.080.800, umur ekonomis 5 tahun, suku bunga 12%/tahun, jam kerja 2.400 jam/tahun, harga bahan bakar Rp12.000/liter, upah operator Rp80.000/hari, dan upah jasa pengupasan manual Rp1.200/kg. Ketahanan kesimpulan tersebut terhadap perubahan asumsi diuji melalui analisis sensitivitas yang disajikan pada Tabel 7. Temuan ini sejalan dengan Ramdani *et al*. (2023), yang menyatakan bahwa

penerapan mesin pengupas berpotensi meningkatkan efisiensi pengolahan kolang-kaling pada skala usaha kecil.

Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah satu asumsi pada satu waktu (one-factor-at-a-time) terhadap empat peubah yang paling tidak pasti, yaitu jumlah jam kerja per tahun, biaya pembuatan mesin, harga bahan bakar, dan upah jasa pengupasan manual. Hasilnya disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Analisis Sensitivitas Biaya Pokok dan Titik Impas Terhadap Perubahan Asumsi

No.	Skenario asumsi	Biaya tetap (Rp/tahun)	Biaya pokok (Rp/kg)	BEP (kg/tahun)
1	Basis: X = 2.400 jam/tahun; P = Rp8.080.800; BBM Rp12.000/L; R = Rp1.200/kg	2.076.766	775,02	4.614,4
2	Jam kerja turun menjadi 1.800 jam/tahun	2.076.766	783,38	4.614,4
3	Jam kerja turun menjadi 1.200 jam/tahun	2.076.766	800,10	4.614,4
4	Jam kerja turun menjadi 600 jam/tahun	2.076.766	850,26	4.614,4
5	Biaya pembuatan naik 20% (P = Rp9.696.960)	2.492.119	785,09	5.600,2
6	Biaya pembuatan turun 20% (P = Rp6.464.640)	1.661.412	764,94	3.650,5
7	Harga bahan bakar naik 20% (Bbb = Rp18.000/jam)	2.076.766	861,97	5.719,4
8	Upah jasa pengupasan manual turun (R = Rp1.000/kg)	2.076.766	775,02	8.304,9
9	Upah jasa pengupasan manual naik (R = Rp1.400/kg)	2.076.766	775,02	3.194,7

Keterangan: pada skenario 5 dan 6, biaya perawatan ikut berubah karena dihitung dari (P − S), sehingga biaya tidak tetap masing-masing menjadi Rp26.047,27/jam dan Rp25.698,18/jam.

Berdasarkan Tabel 7, biaya pokok pengupasan berada pada rentang Rp764,94–Rp861,97/kg pada seluruh skenario yang diuji dan tetap berada di bawah upah jasa pengupasan manual sebesar Rp1.200/kg. Peubah yang paling berpengaruh terhadap biaya pokok adalah harga bahan bakar, karena komponen tersebut menyumbang sekitar 58% dari total biaya tetap. Sebaliknya, penurunan jam operasi dari 2.400 jam menjadi 600 jam per tahun hanya menaikkan biaya pokok sebesar 9,7% karena porsi biaya tetap per jam relatif kecil dibandingkan dengan biaya tidak tetap. Titik impas paling peka terhadap upah jasa pengupasan manual, dengan rentang 3.194,7–8.304,9 kg/tahun. Bahkan pada skenario paling tidak menguntungkan, titik impas hanya setara dengan sekitar 241 jam operasi per tahun atau 10% dari kapasitas tahunan mesin. Dengan demikian, kelayakan ekonomi mesin ini cukup kukuh terhadap perubahan asumsi sepanjang mesin benar-benar dimanfaatkan dan upah jasa pengupasan manual tidak turun di bawah Rp1.000/kg. Di luar rentang asumsi tersebut, kelayakan ekonomi perlu dihitung kembali.

KESIMPULAN

Mesin pengupas kulit buah aren tipe bertingkat telah berhasil dirancang dan dibangun dengan dimensi 100,69 cm × 56,89 cm × 147,61 cm, menggunakan sumber tenaga motor bensin 3,5 HP, 10 mata pengupas yang terbagi pada dua tingkat poros pengupas, serta sistem transmisi pulley dan V-belt yang menghasilkan kecepatan putar akhir 1.632 rpm. Hasil uji kinerja pada tiga ulangan dengan umpan 3 kg buah aren rebus utuh per ulangan menunjukkan mesin bekerja dengan kapasitas efektif 34,5 kg bahan terkupas/jam, persentase bahan tidak terkupas 10,8% (0,052 kg) terhadap bahan keluaran dan persentase bahan pecah 19,7% (0,085 kg) terhadap bahan terkupas, serta rendemen kolang-kaling 14,4% terhadap umpan awal, dengan waktu proses yang relatif konsisten antarulangan. Persentase bahan pecah yang masih tinggi menunjukkan bahwa mesin ini belum sepenuhnya memenuhi kriteria kelayakan teknis dari sisi mutu produk, sehingga penurunan tingkat kerusakan bahan menjadi agenda perbaikan utama sebelum mesin direkomendasikan untuk produksi kolang-kaling mutu utama.

Berdasarkan asumsi harga jual mesin Rp8.080.800, umur ekonomis 5 tahun, suku bunga 12%/tahun, jam kerja 2.400 jam/tahun, dan upah jasa pengupasan manual Rp1.200/kg, diperoleh biaya tetap sebesar Rp2.076.766/tahun, biaya tidak tetap sebesar Rp25.872,73/jam, biaya pokok pengupasan sebesar Rp775,02/kg, dan titik impas pada produksi 4.614,4 kg/tahun atau setara dengan sekitar 133,7 jam operasi per tahun. Analisis sensitivitas menunjukkan biaya pokok tetap berada pada rentang Rp764,94–Rp861,97/kg dan titik impas pada rentang 3.194,7–8.304,9 kg/tahun ketika jam operasi, biaya pembuatan, harga bahan bakar, dan upah jasa pengupasan manual divariasikan. Dengan demikian,

kelayakan ekonomi mesin ini dinyatakan berlaku dalam batas asumsi tersebut dan tidak digeneralisasi untuk struktur biaya atau pola pemanfaatan yang berbeda.

Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa jumlah ulangan yang masih terbatas, yaitu tiga ulangan pada satu tingkat kematangan bahan, serta tidak adanya perlakuan pengupasan manual sebagai kontrol. Oleh karena itu, penelitian ini tidak mengklaim besaran peningkatan efisiensi pada metode manual. Penelitian lanjutan disarankan mencakup pengujian terkendali yang membandingkan kinerja mesin dengan pengupasan manual pada bahan yang sama, optimasi kecepatan putar dan celah pengupas untuk menekan persentase bahan yang pecah, serta pengujian pada berbagai tingkat kematangan buah aren dan lama perebusan.

DAFTAR PUSTAKA

Amin, Y. D. A. 2020. Pembuatan mesin pengupas buah aren (*Arenga pinnata* Merr.) [Tugas Akhir]. Politeknik Negeri Jember. https://sipora.polije.ac.id/6458/

Darmawan, M. 2020. Uji kinerja alat pengupas buah kolang-kaling sumber tenaga penggerak ganda [Tugas Akhir]. Politeknik Negeri Jember. https://sipora.polije.ac.id/12318/

Eka, S. P. D. 2015. *Rancang bangun alat pengupas buah aren (Arenga pinnata) semi mekanis* [Tugas Akhir]. Universitas Andalas. http://scholar.unand.ac.id/1322/

Ernita, Y., Herdian, F., Novita, S. A., Hasman, E., Allen, R. V., Melly, S., Malrianti, Y., Alamanda, A. R., Alfarizi, H., Alfadli, R., & Saputra, A. 2025. Design and development of cocoa bean roasting machine. *AIP Conference Proceedings, 3277*(1), 020020. https://doi.org/10.1063/5.0269494

Fadeyibi, A., & Ajao, O. F. 2020. Design and performance evaluation of a multi-tuber peeling machine. *AgriEngineering, 2*(1), 55–71. https://doi.org/10.3390/agriengineering2010004

Gili, M. B. D., Mikael, F., & Batik, S. 2026. Analisis kekuatan rangka mesin pemecah cangkang kemiri menggunakan metode elemen hingga. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material, 10*(1). https://ejournal.up45.ac.id/index.php/Jurnal_ENGINE/article/view/2159

Harahap, M. A. 2018. *Rancang bangun alat pemecah buah aren (Arenga pinnata)* [Skripsi]. Universitas Sumatera Utara. https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/11713

Harianja, G., Riantonius S., F., Siahaan, E. W. B., & Tarigan, K. 2023. Rancang bangun mesin pemipih kolang-kaling dengan kapasitas 50 kg/jam. *Jurnal Teknologi Mesin, 4*(1), 80–88. https://doi.org/10.46930/teknologimesin.v4i1.3333

Khoryanton, A., & Sumiyarso, B. 2022. Modifikasi mesin pengupas kulit biji kopi kering sistem *rotary peeler* untuk menaikkan kualitas produk. *Jurnal Rekayasa Mesin, 17*(2), 213–222.

Le, L. M., Nguyen, T. C., Pham, B. T., Ly, H.-B., Le, V. M., & Le, T.-T. 2019. Development and identification of working parameters for a lychee peeling machine combining rollers and a pressing belt. *AgriEngineering, 1*(4), 550–566. https://doi.org/10.3390/agriengineering1040040

Leo, C., Hutagalung, N., Muliadi, A., Siahaan, E. W. B., & Sitanggang, H. 2023. Rancang bangun mesin pengupas buah aren semi mekanis dengan kapasitas waktu produksi 80 kg/jam. *Jurnal Teknologi Mesin, 4*(2). https://www.jurnal.universitasdarmaagung.ac.id/teknologimesin/article/view/3344

Melly, S., Ernita, Y., Novita, S. A., & Zulnadi. 2020. *Manajemen Mesin Pertanian 1: Kajian Konsep Dasar Manajemen Mesin Pertanian* (Vol. 1). Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh.

Novita, S. A., Herdian, F., Ernita, Y., Zulnadi, Hasman, E., Allen, R. V., Djinis, M. E., & Yudistira. 2024. Uji kinerja mesin pengupas kulit kopi kering. *Technologica, 3*(1), 1–9. https://doi.org/10.55043/technologica.v3i1.118

Nurudin, R., & Sakti, A. M. 2014. Rancang bangun mesin pengupas kulit kopi. *Jurnal Rekayasa Mesin, 1*(2), 11–15. https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin/article/view/6437

Purnama, F. 2018. Rancang bangun *hopper* pada mesin pengupas buah aren (*Arenga pinnata* Merr.) menjadi kolang-kaling [Skripsi]. Universitas Syiah Kuala. https://etd.usk.ac.id/

Purwanti, & Nugrahini, T. 2018. Pemanfaatan buah kolang-kaling dari hasil perkebunan sebagai pangan fungsional. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pangan*, 25–33.

Ramdani, R., Saleh, A., Nugraha, Y. A., & Rofik, M. A. 2023. Rancang bangun mesin pengupas buah pohon aren (kolang-kaling). *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, 9*(1), 430–440. https://doi.org/10.5281/zenodo.7545980

Sarif, R., Afif, M. I., Ramadhan, G., Hendra, H., Irzal, I., Anas, I., & Djinis, M. 2018. Analisa ekonomi dan uji kinerja pada mesin pencacah daun dan ranting gambir tipe *roller*. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology, 2*(1), 1–10.

Sugandi, W. K., Kramadibrata, M. A. M., Widyasanti, A., & Putri, A. R. 2017. Uji kinerja dan analisis ekonomi mesin pengupas bawang merah (MPB TEP-0315). *Jurnal Keteknikan Pertanian, 25*(2), 95–102.

Sugandi, W. K., Kramadibrata, M. A. M., Yusuf, A., & Putra, E. A. 2020. Uji kinerja dan analisis ekonomi mesin pemecah cangkang kemiri sunan MPC KS-0218 jenis ayakan getar. *Teknotan: Jurnal Industri Teknologi Pertanian, 14*(2), 37–46. https://doi.org/10.24198/jt.vol14n2.1

Wongnaa, C. A., Asempah, M. K., Akudugu, M. A., Abokyi, E., & Awunyo-Vitor, D. 2025. Financial and economic viability of cassava peeling technology and constraints to adoption in Ghana. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, 17*(7), 979–993. https://doi.org/10.1080/20421338.2025.2577550