Indonesian Journal of Community Services
Vol. 8 No. 2, November 2026
http://jurnal.unissula.ac.id/index.php/ijocs
DOI: http://dx.doi.org/10.30659/ijocs.8.2.214-221

Penerapan Mesin Pencacah Tembakau dengan Pengumpanan Pneumatik bagi Petani di Desa Gulang Kabupaten Kudus

Implementation of a Tobacco Shredding Machine with Pneumatic Feeding for Farmers in Gulang Village, Kudus Regency

[1]Taufiq Hidayat [*], [1]Qomaruddin, [1]Ratri Rahmawati, [1]Sugeng Slamet, [1]Slamet Khoeron, [1]Muhammad Luqman Saiful Fikri

[1] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muria Kudus, Kudus, Indonesia

*Corresponding Author
Jl. Lingkar Luar Gondangmanis Kudus
E-mail: Taufiq.hidayat@umk.ac.id

Received:	Revised:	Accepted:	Published:
27 April 2026	23 August 2026	27 October 2026	22 November 2026

Abstrak

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan menerapkan mesin pencacah tembakau dengan pengumpanan pneumatik untuk meningkatkan kapasitas pengolahan pascapanen petani di Desa Gulang, Kabupaten Kudus. Kegiatan meliputi identifikasi kebutuhan mitra, perancangan dan pembuatan mesin, pelatihan pengoperasian dan perawatan, serta pendampingan manajemen usaha. Evaluasi kinerja dilakukan secara deskriptif dengan menyetarakan berat bahan yang diolah menjadi 1 kg. Waktu pencacahan manual adalah 2 jam/kg, sedangkan mesin membutuhkan 20 menit/kg. Berdasarkan konversi waktu, kapasitas pencacahan meningkat dari 0,50 menjadi 3,00 kg/jam. Kapasitas mesin mencapai enam kali kapasitas manual, setara kenaikan 500%, sedangkan waktu pencacahan berkurang 83,33%. Proyeksi enam jam operasi efektif menghasilkan output 3 kg untuk manual dan 18 kg untuk mesin; angka tersebut bukan hasil pengukuran produksi harian. Penerapan mesin menunjukkan potensi peningkatan kapasitas pengolahan tembakau. Pengujian berulang, pengukuran keseragaman rajangan, dan pencatatan biaya operasional diperlukan untuk menilai variasi kinerja dan kelayakan ekonomi.

Kata kunci: kapasitas pengolahan; pengumpanan pneumatik; teknologi tepat guna; tembakau

Abstract

This community service program aimed to apply a tobacco cutting machine with pneumatic feeding to increase farmers' postharvest processing capacity in Gulang Village, Kudus Regency. Activities included partner needs assessment, machine design and manufacture, operation and maintenance training, and business management assistance. Performance was evaluated descriptively using an equivalent processing mass of 1 kg. Manual cutting required 2 hours/kg, whereas machine cutting required 20 minutes/kg. These processing times correspond to capacities of 0.50 and 3.00 kg/hour, respectively. Machine capacity was six times manual capacity, representing a 500% increase, while processing time decreased by 83.33%. A projection for six effective operating hours gives outputs of 3 kg manually and 18 kg using the machine; these figures are projections rather than measured daily outputs. The machine offers potential to increase tobacco processing capacity. Repeated measurements, quantitative assessment of cut uniformity, and operating cost records are needed to evaluate performance variability and economic feasibility

Keywords: *Appropriate technology; pneumatic feeding; processing capacity; tobacco*

PENDAHULUAN

Penanganan pascapanen merupakan bagian penting dalam pemanfaatan komoditas pertanian. Teknologi pengolahan perlu dipilih sesuai skala usaha, kondisi bahan, dan kemampuan pengguna agar manfaatnya dapat diterapkan dalam kegiatan produksi. Kajian teknologi pascapanen bagi petani skala kecil menekankan perlunya akses terhadap teknologi yang sesuai dan pendampingan penerapannya (Jarman et al., 2023). Penanganan kehilangan hasil juga memerlukan perhatian terhadap tahapan proses dan kondisi operasional yang sebenarnya (Nath et al., 2024).

Desa Gulang, Kecamatan Mejobo, Kabupaten Kudus merupakan lokasi mitra kegiatan pengabdian ini. Berdasarkan observasi dan diskusi dengan kelompok tani, salah satu kendala pengolahan tembakau adalah proses pencacahan yang masih dilakukan secara manual. Proses tersebut membutuhkan waktu dan keterlibatan pekerja sehingga membatasi kapasitas pengolahan pada waktu kerja yang tersedia. Karena itu, kebutuhan mitra diarahkan pada alat pencacah yang dapat digunakan dalam kegiatan pascapanen dan disertai pelatihan pengoperasian serta perawatan.

Mekanisasi bagi petani skala kecil perlu mempertimbangkan kesesuaian kapasitas, akses pengguna, dan dukungan penerapannya (Sims & Kienzle, 2017). Teknologi tepat guna juga perlu ditempatkan dalam kebutuhan lokal dan keberlanjutan pemanfaatannya (Amiolemen et al., 2012; Diaz Anadon et al., 2016). Dengan demikian, pengadaan mesin perlu diikuti transfer keterampilan agar mitra dapat memahami prosedur penggunaan, mengenali gangguan dasar, dan melakukan pemeliharaan rutin.

Penerapan mesin perajang tembakau yang disertai pelatihan penggunaan, perawatan, dan manajemen usaha telah dilaporkan oleh Novita et al. (2019). Kegiatan tersebut memberikan konteks bagi penerapan teknologi pengolahan pada kelompok masyarakat. Kinerja mesin pada lokasi yang berbeda tetap perlu dievaluasi berdasarkan bahan, kondisi operasi, serta cara pencatatan waktu yang digunakan. Nilai kapasitas dari kegiatan lain tidak langsung digunakan sebagai kapasitas mesin pada program ini.

Selain kebutuhan teknis, mitra memerlukan penguatan pencatatan usaha dan pengenalan pemasaran digital. Adopsi teknologi digital oleh petani skala kecil berhadapan dengan hambatan akses dan kapasitas pengguna (Satria et al., 2025). Program ini memadukan penerapan mesin pencacah dengan pengumpanan pneumatik, pelatihan pengoperasian dan perawatan, serta pendampingan manajemen usaha. Tujuan kegiatan adalah mempercepat pencacahan tembakau pada mitra dan mengevaluasi perubahan kapasitas secara deskriptif berdasarkan waktu pengolahan untuk berat bahan yang sama.

METODE

Tempat dan Waktu

Kegiatan dilaksanakan di Desa Gulang, Kecamatan Mejobo, Kabupaten Kudus, selama enam bulan. Pelaksanaan mencakup identifikasi kebutuhan mitra, perancangan dan pembuatan mesin, pelatihan, penerapan alat, serta monitoring dan evaluasi.

Khalayak Sasaran

Sasaran kegiatan adalah kelompok tani tembakau Desa Gulang yang menjalankan pengolahan pascapanen. Mitra dipilih berdasarkan keterlibatannya dalam pengolahan tembakau, penggunaan pencacahan manual, dan kesediaan mengikuti pelatihan serta pendampingan. Identifikasi kebutuhan dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara, dan diskusi kelompok terarah atau focus group discussion (FGD).

Indonesian Journal of Community Services
Vol. 8 No. 2, November 2026
http://jurnal.unissula.ac.id/index.php/ijocs
DOI: http://dx.doi.org/10.30659/ijocs.8.2.214-221

Metode Pengabdian

Pendekatan kegiatan bersifat partisipatif berbasis teknologi tepat guna. Kebutuhan mitra menjadi dasar perancangan mesin dan penyusunan materi pelatihan. Tahap awal berupa observasi dan FGD untuk memetakan hambatan pencacahan dan pengelolaan usaha. Tahap berikutnya adalah perancangan, manufaktur, dan uji fungsi sebelum mesin diterapkan pada kegiatan mitra.

Mesin menggunakan pengumpanan pneumatik untuk mendorong bahan menuju unit pisau. Komponen utamanya meliputi rangka, unit pencacah, tempat penampung, aktuator pneumatik, kompresor, dan motor penggerak. Uji fungsi awal diarahkan pada kesiapan pengumpanan dan pencacahan sebelum demonstrasi kepada mitra. Parameter tekanan, putaran motor, dan dimensi pisau tidak digunakan sebagai variabel pembanding karena tidak tersedia sebagai data pengujian pada laporan yang dianalisis.

Sosialisasi Menjelaskan Tujuan, Tahapan, dan Peran Mitra

Pelatihan teknis dilakukan melalui demonstrasi dan praktik pengoperasian, pengaturan sistem pneumatik, pembersihan unit pisau, pemeriksaan kompresor, serta keselamatan kerja. Pendampingan dilanjutkan pada penggunaan mesin dalam pengolahan bahan. Pelatihan manajemen usaha mencakup pengenalan pencatatan biaya, harga pokok produksi, pengelolaan keuntungan, serta pemasaran melalui media sosial dan *marketplace*.

Indikator Keberhasilan

Keberhasilan teknis dinilai dari penurunan waktu pencacahan untuk 1 kg bahan dan kenaikan kapasitas pengolahan yang dihitung dari waktu tersebut. Indikator pendampingan meliputi kemampuan pengoperasian dan perawatan dasar, sedangkan kegiatan manajemen usaha diarahkan pada pemahaman pencatatan usaha dan pemasaran. Dua kelompok indikator terakhir dibahas secara kualitatif karena tidak tersedia skor evaluasi peserta. Tidak ditetapkan persentase peningkatan keterampilan atau pendapatan tanpa data pendukung.

Metode Evaluasi

Evaluasi menggunakan perbandingan deskriptif waktu pencacahan manual dan mesin pada berat acuan 1 kg. Waktu acuan yang dikonfirmasi pelaksana kegiatan adalah 2 jam/kg untuk manual dan 20 menit/kg untuk mesin. Kapasitas dihitung dengan membagi berat bahan dengan waktu proses. Rekaman tiap ulangan belum tersedia, sehingga tidak dihitung simpangan baku, interval kepercayaan, maupun uji signifikansi.

$$P = Q / t \quad (1)$$

Keterangan: P adalah kapasitas pencacahan (kg/jam), Q adalah berat bahan (kg), dan t adalah waktu pencacahan (jam). Pengurangan waktu dan peningkatan kapasitas dihitung sebagai berikut:

$$\text{Penghematan waktu} = [(t_{manual} - t_{mesin}) / t_{manual}] \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{Kenaikan kapasitas} = [(P_{mesin} - P_{manual}) / P_{manual}] \times 100\% \quad (3)$$

Monitoring dilaporkan dilakukan secara berkala melalui pengamatan penggunaan alat dan wawancara mitra. Hasil pengamatan digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan pendampingan operasional. Proyeksi output dihitung dengan $Q = P \times t$ pada durasi operasi efektif yang ditentukan, dan dibedakan dari hasil produksi harian terukur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Kebutuhan dan Penerapan Mesin

Diskusi dengan mitra menempatkan pencacahan sebagai salah satu hambatan pengolahan pascapanen. Hasil identifikasi tersebut menjadi dasar penerapan mesin dengan sistem

Indonesian Journal of Community Services
Vol. 8 No. 2, November 2026
http://jurnal.unissula.ac.id/index.php/ijocs
DOI: http://dx.doi.org/10.30659/ijocs.8.2. 214-221

pengumpanan pneumatik. Dokumentasi diskusi dan tahapan perancangan serta manufaktur ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Diskusi kelompok terarah dengan mitra untuk identifikasi kebutuhan

Alat pencacah tembakau diterapkan pada kegiatan pengolahan pascapanen mitra di Desa Gulang. Sistem pengumpanan pneumatik digunakan untuk mendorong bahan menuju unit pisau. Berdasarkan waktu proses yang dikonfirmasi untuk 1 kg tembakau, pencacahan manual membutuhkan 120 menit dan pencacahan menggunakan mesin membutuhkan 20 menit. Perbandingan ini menunjukkan pengurangan waktu pada berat bahan yang sama. Durasi operasi berkelanjutan dan frekuensi gangguan belum dapat dinilai secara kuantitatif dari data waktu tersebut.



Gambar 2. Perancangan, manufaktur, dan bentuk mesin pencacah tembakau

Keseragaman rajangan diamati secara kualitatif dalam laporan kegiatan, tetapi belum disertai pengukuran ukuran potongan maupun pemerataan pengeringan. Karena itu, perbaikan mutu dan pengeringan masih merupakan potensi yang perlu diuji. Literatur menempatkan teknologi tepat guna dalam konteks pengembangan yang sesuai kebutuhan pengguna (Amiolemen et al., 2012; Diaz Anadon et al., 2016).

Indonesian Journal of Community Services
Vol. 8 No. 2, November 2026
http://jurnal.unissula.ac.id/index.php/ijocs
DOI: http://dx.doi.org/10.30659/ijocs.8.2.214-221

Sosialisasi dan Pendampingan Pengguna



Gambar 3. Sosialisasi program dan pengenalan teknologi kepada mitra



Gambar 4. Dokumentasi penerapan dan pendampingan penggunaan mesin

Sosialisasi memberikan pengenalan tujuan program dan teknologi kepada mitra (Gambar 3). Demonstrasi dan praktik selanjutnya diarahkan pada pengoperasian serta perawatan mesin (Gambar 4). Materi keselamatan kerja dan pemeliharaan diperlukan agar penggunaan alat tidak hanya bergantung pada kehadiran tim pendamping. Pendampingan manajemen usaha dan pemasaran dilakukan sebagai pelengkap penerapan teknologi (Gambar 5). Kegiatan ini memberikan pengenalan pencatatan biaya dan pengelolaan pemasaran. Dokumentasi membuktikan pelaksanaan kegiatan, tetapi belum cukup untuk menyatakan perubahan pengetahuan, perilaku pencatatan, atau penjualan secara kuantitatif. Hambatan adopsi teknologi pada petani skala kecil tetap perlu diperhatikan dalam pendampingan berikutnya (Satria et al., 2025).



Gambar 5. Pelatihan manajemen usaha dan pemasaran bagi mitra

Evaluasi Waktu dan Kapasitas Pengolahan

Perbandingan utama menggunakan berat acuan yang sama, yaitu 1 kg tembakau. Tabel 1 menyajikan waktu pencacahan dan kapasitas hasil konversi waktu. Jumlah pekerja tidak dimasukkan sebagai hasil utama karena keterlibatan aktualnya selama pencatatan waktu belum dikonfirmasi.

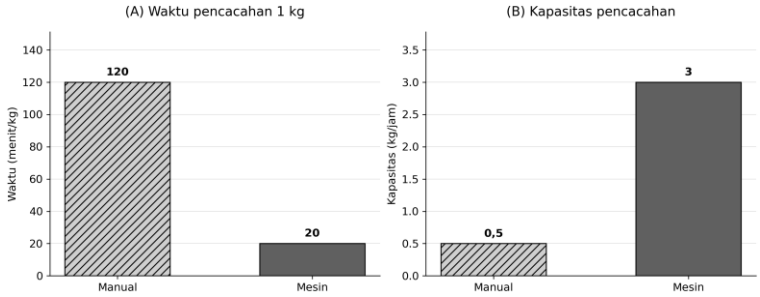
Indonesian Journal of Community Services
Vol. 8 No. 2, November 2026
http://jurnal.unissula.ac.id/index.php/ijocs
DOI: http://dx.doi.org/10.30659/ijocs.8.2. 214-221

Tabel 1. Perbandingan waktu dan kapasitas pencacahan manual dan mesin

Parameter	Manual	Mesin	Perubahan (%)
Berat bahan acuan (kg)	1,00	1,00	0,00
Waktu pencacahan (menit/kg)	120,00	20,00	−83,33
Kapasitas pencacahan (kg/jam)	0,50	3,00	+500,00

Keterangan: Perubahan = [(mesin − manual)/manual] × 100%. Kapasitas dihitung sebagai berat bahan dibagi waktu proses. Nilai merupakan perbandingan deskriptif, bukan rerata antarulangan. Berdasarkan Tabel 1, waktu pencacahan turun dari 120 menjadi 20 menit/kg, sehingga penghematan waktunya sebesar 83,33%. Kapasitas manual adalah 1 kg/2 jam = 0,50 kg/jam, sedangkan kapasitas mesin adalah 1 kg/(1/3 jam) = 3,00 kg/jam. Dengan demikian, kapasitas mesin mencapai enam kali kapasitas manual atau meningkat 500%. Persentase penghematan waktu dan kenaikan kapasitas berbeda karena keduanya menggunakan besaran pembanding yang berbeda.

Grafik pada Gambar 6 menampilkan dua besaran pada panel terpisah agar satuan menit/kg dan kg/jam tidak tercampur. Nilai kapasitas bukan pengukuran tambahan yang independen, melainkan konversi langsung dari waktu proses untuk berat acuan 1 kg. Karena tidak tersedia data antarulangan, grafik tidak dilengkapi batang galat.



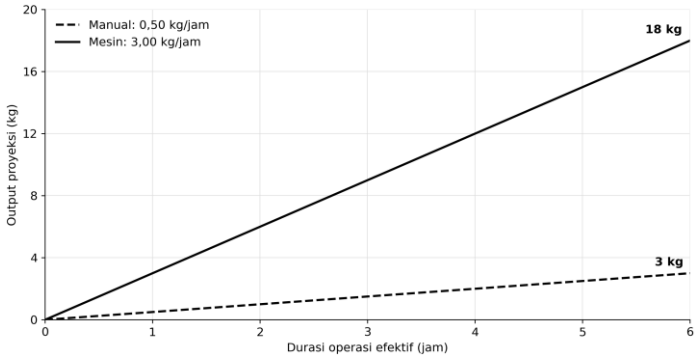
Gambar 6. Waktu pencacahan 1 kg bahan (A) dan kapasitas hasil konversi waktu (B)

Jumlah tenaga kerja pada naskah awal adalah empat orang untuk manual dan dua orang untuk mesin. Jika jumlah tersebut berlaku sepanjang pengukuran waktu yang sama, produktivitas tenaga kerja secara bersyarat adalah 0,125 dan 1,500 kg/orang-jam. Nilai tersebut belum ditetapkan sebagai hasil utama karena durasi keterlibatan pekerja aktif belum tercatat secara terperinci.

Untuk menggambarkan implikasi kapasitas terhadap perencanaan kerja, output diproyeksikan menggunakan Q = P × t. Pada enam jam operasi efektif, metode manual berkapasitas 0,50 × 6 = 3 kg, sedangkan mesin berkapasitas 3,00 × 6 = 18 kg. Selisih kapasitas pengolahan pada durasi tersebut adalah 15 kg. Nilai ini merupakan proyeksi aritmetis berdasarkan waktu acuan, bukan hasil pengukuran produksi harian.

Proyeksi mengasumsikan bahan tersedia, laju pengolahan tetap, dan waktu operasi merupakan waktu efektif pencacahan. Waktu persiapan, istirahat, pengisian bahan, pembersihan, pemeliharaan, dan gangguan belum dimasukkan. Proyeksi output terhadap durasi operasi efektif ditampilkan pada Gambar 7.

Indonesian Journal of Community Services
Vol. 8 No. 2, November 2026
http://jurnal.unissula.ac.id/index.php/ijocs
DOI: http://dx.doi.org/10.30659/ijocs.8.2.214-221



Gambar 7. Proyeksi output berdasarkan kapasitas manual 0,50 kg/jam dan mesin 3,00 kg/jam

Kurva pada Gambar 7 merupakan proyeksi laju tetap. Angka 3 kg dan 18 kg pada enam jam operasi efektif tidak dapat dinyatakan sebagai realisasi produksi harian tanpa pencatatan operasi. Biaya bahan baku, energi listrik dan kompresor, tenaga kerja aktual, pemeliharaan, serta penjualan belum tersedia secara lengkap. Oleh karena itu, penghematan biaya, peningkatan laba, dan waktu pengembalian investasi belum ditetapkan.

Perbandingan waktu menunjukkan perbedaan kapasitas pada kondisi yang dilaporkan, tetapi belum cukup untuk mengukur variasi kinerja antarulangan. Data asli tiap sesi diperlukan untuk menghitung rata-rata, simpangan baku, interval kepercayaan, serta memilih uji statistik yang sesuai dengan rancangan pengukuran. Oleh karena itu, artikel ini menggunakan analisis deskriptif dan tidak menyajikan nilai uji-t, p, atau ukuran efek dari perhitungan terdahulu.

Pengukuran lanjutan perlu mencatat berat bahan, waktu proses, jumlah pekerja aktif, kondisi bahan, dan gangguan operasi pada setiap ulangan. Kesetaraan kondisi bahan dan batas awal–akhir pencatatan waktu perlu dijaga agar perbandingan kedua metode dapat ditafsirkan secara konsisten. Keseragaman rajangan juga belum dievaluasi melalui distribusi ukuran potongan. Peningkatan kapasitas tidak langsung membuktikan peningkatan mutu tembakau; mutu memerlukan indikator pengujian tersendiri sesuai konteks penanganan bahan (Xiao et al., 2025).

Keberhasilan Kegiatan

Indikator teknis menunjukkan pengurangan waktu dari 120 menjadi 20 menit/kg serta kenaikan kapasitas dari 0,50 menjadi 3,00 kg/jam. Berdasarkan nilai acuan tersebut, penerapan mesin memenuhi arah keberhasilan teknis berupa percepatan pencacahan dan peningkatan kapasitas pengolahan pada mitra. Besarnya penghematan waktu adalah 83,33%, sedangkan kenaikan kapasitas adalah 500% atau enam kali kapasitas manual. Sosialisasi, praktik penggunaan mesin, dan pelatihan manajemen usaha telah didokumentasikan. Namun, ketercapaian kemandirian pengguna dan peningkatan pemahaman manajemen belum dapat dinyatakan dalam persentase karena skor evaluasi tidak tersedia. Keberlanjutan program memerlukan pencatatan penggunaan mesin, kendala operasi, perawatan, dan hasil usaha secara berkala. Evaluasi lanjutan tersebut diperlukan agar manfaat program dapat dinilai melampaui perubahan kapasitas pencacahan.

KESIMPULAN

Penerapan mesin pencacah tembakau dengan pengumpanan pneumatik pada mitra di Desa Gulang mengurangi waktu pengolahan 1 kg bahan dari 120 menjadi 20 menit, setara penghematan waktu 83,33%. Kapasitas hasil konversi waktu meningkat dari 0,50 menjadi 3,00 kg/jam atau enam kali kapasitas manual. Sosialisasi, pendampingan teknis, serta pelatihan manajemen usaha melengkapi penerapan mesin. Hasil kinerja bersifat deskriptif; keberhasilan keterampilan pengguna, mutu rajangan, dan dampak ekonomi masih memerlukan evaluasi kuantitatif serta pengukuran berulang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Muria Kudus yang telah memberikan dukungan dan fasilitasi sehingga kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada kelompok tani tembakau di Desa Gulang, Kecamatan Mejobo, Kabupaten Kudus atas partisipasi aktif dan kerja sama selama pelaksanaan kegiatan.

DAFTAR PUSTAKA

Amiolemen, S. O., Ologeh, I. O., & Ogidan, J. A. (2012). Climate Change and Sustainable Development: The Appropriate Technology Concept. Journal of Sustainable Development, 5(5). https://doi.org/10.5539/jsd.v5n5p50

Diaz Anadon, L., Chan, G., Harley, A. G., Matus, K., Moon, S., Murthy, S. L., & Clark, W. C. (2016). Making technological innovation work for sustainable development. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(35), 9682–9690. https://doi.org/10.1073/pnas.1525004113

Jarman, A., Thompson, J., McGuire, E., Reid, M., Rubsam, S., Becker, K., & Mitcham, E. (2023). Postharvest technologies for small-scale farmers in low- and middle-income countries: A call to action. In Postharvest Biology and Technology (Vol. 206). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112491

Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C. M., & Zare, D. (2024). Research and Technologies to Reduce Grain Postharvest Losses: A Review. In Foods (Vol. 13, Number 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/foods13121875

Novita, M., Buchori, A., & Mujahidin, A. (2019). Diseminasi teknologi mesin perajang tembakau dalam upaya menerapkan ekoteknologi di Desa Tumbrasanom Kecamatan Kedungadem Kabupaten Bojonegoro. Journal of Dedicators Community, 3(2), 91–98. https://doi.org/10.34001/jdc.v3i2.814

Satria, D., Maghraby, W., & Setyanti, A. M. (2025). Digital agricultural technology for smallholder farmers: Barriers and opportunities in Indonesia. SOCA: Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian, 18(3), 267–281. https://doi.org/10.24843/SOCA.2024.v18.i03.p01

Sims, B., & Kienzle, J. (2017). Sustainable agricultural mechanization for smallholders: What is it and how can we implement it? Agriculture, 7(6), 50. https://doi.org/10.3390/agriculture7060050

Xiao, G., Wang, L., Pan, T., Chen, Z., Yu, L., Wang, H., Min, T., Xiao, A., Zhou, M., Guo, J., Tan, X., & Shao, S. (2025). Insights into tobacco leaf quality deterioration under long-term storage by investigating dynamic phytochemical and metabolite profile variations. BMC Plant Biology, 25(1). https://doi.org/10.1186/s12870-025-06375-3

AI Disclosure

Generative Artificial Intelligence (AI) and AI-assisted technologies were used solely to improve the readability and organization of the manuscript. All outputs generated through these tools were carefully reviewed, edited, and validated by the author to ensure accuracy, completeness, and alignment with the study's original content. The author assumes full responsibility and accountability for the integrity of the work, including its analysis, interpretation, and conclusions. AI tools were not used for data generation, data analysis, or as a substitute for scholarly judgment, and are not listed as authors or co-authors of this study.

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2026 Author(s). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.