

Pemberdayaan Petani Melalui Pemanfaatan Limbah Kayu Manis Sebagai Energi Alternatif Dengan Pirolisis Drum Tertutup di Nagari Malalak Kabupaten Agam

Empowerment of Farmers through the Utilization of Cinnamon Wood Waste as an Alternative Energy Source Using Closed-Drum Pyrolysis in Nagari Malalak, Agam Regency

Darwison^{1*)}, Zaini¹, Silvia Permata Sari², Deddi Prima Putra³, Firman Ridwan⁴, Fauzan Wafi¹, Annita Elfia Rosa¹, Afwan Nasution¹, dan Ghina Salsabila¹

1. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Andalas, Padang, Indonesia
2. Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, University of Andalas, Padang, Indonesia
3. Department of Pharmacy, Faculty of Pharmacy, University of Andalas, Padang, Indonesia
4. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Andalas, Padang, Indonesia

^{*)} Email korespondensi: darwison@eng.unand.ac.id

ABSTRACT

Nagari Malalak Timur is a major cinnamon (*Cinnamomum burmannii*) production center, but faces critical post-harvest challenges. Weather-dependent drying processes delay sales, while abundant stem and leaf waste are openly burned, causing severe air pollution and energy loss. This community empowerment program explicitly aims to solve these environmental and economic issues by converting cinnamon stem waste into clean alternative energy using an optimized closed-drum pyrolysis system, while simultaneously enhancing farmers' technical capacities. The participatory action research approach involved the Toboh Organik Farmers Group. Implementation stages included waste potential mapping, fabricating a 30-kg-capacity pyrolyzer equipped with a Raspberry Pi Pico microcontroller and an electric blower for precise thermal control, and conducting comprehensive operational, maintenance, and safety (K3) training. Charcoal quality was evaluated against the SNI 01-6235-2000 standard. The intervention yielded significant improvements. Technologically, the pyrolyzer achieved a high conversion efficiency of 38%, producing premium charcoal with a calorific value of 6,780 kcal/kg and 6.2% moisture content. Environmentally, the integrated re-burning system reduced hazardous smoke emissions by 60% compared to open burning. Socio-economically, the program successfully decreased agricultural waste by over 60% and increased farmers' overall income by 30–35% through the creation of a new marketable product. These findings confirm that the introduction of controlled, locally adapted pyrolysis technology not only resolves waste and weather-dependency problems but also fosters rural energy self-sufficiency. The establishment of the "Malalak Hijau" enterprise highlights the program's substantial contribution to sustainable community empowerment and circular economy practices.

Keywords: Biomass Charcoal, Closed-Drum Pyrolysis, Clean Energy, Cinnamon Waste, Farmer Empowerment

Received | December 16, 2025; Accepted | March 21, 2026; Published | March 31, 2026

Jurnal Hilirisasi IPTEKS. 9(1): 2026

^{*)} Correspondence | Darwison, Department Electrical Engineering, Faculty Engineering, Universitas Andalas, Padang, dan Indonesia;

Email | darwison@eng.unand.ac.id
 DOI | <https://doi.org/10.25077/jhi.v9i1>
 ISSN (Online) | 2621-7198

 CC BY-SA 4.0

Copyright © 2026 by Authors. Published by Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Andalas.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY-SA 4.0) International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

PENDAHULUAN

Kayu manis (*Cinnamomum burmannii*) merupakan salah satu komoditas unggulan Sumatera Barat yang banyak dimanfaatkan dalam industri pangan, kesehatan, dan kosmetik global (Imanudin *et al.*, 2022; Mulyanti *et al.*, 2023). Di Nagari Malalak Timur, Kabupaten Agam, tingginya produktivitas perkebunan rakyat (Ilfania *et al.*, 2021) justru menyisakan persoalan lingkungan dan ekonomi yang serius. Berdasarkan pendataan lapangan, Kelompok Tani Toboh Organik menghasilkan limbah pascapanen berupa batang inti dan daun kayu manis dalam jumlah kuantitatif yang sangat besar, yakni mencapai ± 1 ton per bulan. Selama ini, limbah organik tersebut tidak dimanfaatkan dan lazim dimusnahkan melalui praktik pembakaran terbuka di area perkebunan.

Dengan tingginya volume limbah batang kayu manis (± 1 ton/bulan) yang dibakar secara terbuka telah memicu pencemaran polusi udara (asap pekat) dan pemborosan potensi bioenergi secara massal (Jabir *et al.*, 2025; Hasanah & Rukmana, 2023), sementara di saat yang bersamaan, masyarakat tani setempat justru mengalami krisis energi dan masih mengandalkan bahan bakar konvensional yang mahal untuk kebutuhan pengolahan pascapanen dan rumah tangga (Abdullah & Nugroho, 2021; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, 2020).

Dalam satu dekade terakhir, konversi limbah biomassa menjadi energi alternatif telah banyak dieksplorasi karena potensi nilai kalornya yang sangat baik (Fitriana & Febrina, 2021; Tamrin *et al.*, 2024). Melalui sintesis kegiatan terdahulu, penggunaan teknologi pirolisis drum tertutup secara analitis terbukti mampu memperbaiki retensi panas, meningkatkan nilai kalor arang, serta menurunkan emisi partikulat secara radikal dibandingkan metode karbonisasi tradisional yang terbuka (Wahyuni *et al.*, 2020; Wibowo & Pradana, 2021). Di ranah implementasi pengabdian, penerapan ekonomi sirkular berbasis pemanfaatan limbah bioenergi dapat menciptakan nilai tambah komoditas dan memperkuat ketahanan desa (Darmawan & Susanti, 2022; Yuliana & Hakim, 2021). Lebih jauh lagi, integrasi teknologi turunan seperti alat destilasi untuk daun aromatik juga terbukti mampu memperluas sumber pendapatan petani (Fauzi & Anwar, 2024).

Meskipun berbagai literatur telah membuktikan keunggulan pirolisis biomassa, celah pengabdian (*research gap*) dari kajian-kajian sebelumnya masih sangat kentara: sebagian besar riset pengolahan arang masih berskala laboratorium (Wahyuni *et al.*, 2020) atau hanya memanfaatkan material yang sudah umum seperti tempurung kelapa dan sekam padi (Tamrin *et al.*, 2024). Belum terdapat kajian komprehensif maupun kegiatan pemberdayaan yang menerapkan teknologi karbonisasi efisien secara spesifik untuk material limbah batang kayu manis berlignin tinggi di tingkat komunitas. Keterbatasan dan kekosongan implementasi inilah yang menyebabkan petani di Malalak Timur belum mampu mengadopsi inovasi secara mandiri, sehingga sangat membutuhkan introduksi teknologi tepat guna yang dibarengi dengan penguatan kelembagaan usaha lokal (Rahman & Putra, 2023).

Untuk mengisi kekosongan tersebut, kegiatan ini menawarkan kebaruan (*novelty*) yang ditegaskan secara eksplisit melalui dua aspek utama. *Pertama*, spesifikasi material: pemanfaatan limbah spesifik berupa batang kayu manis, yang memiliki karakteristik aromatik tinggi namun selama ini diabaikan. *Kedua*, kebaruan teknologi: penerapan sistem pirolisis drum tertutup yang sederhana dan aplikatif bagi masyarakat awam, yang telah dimodifikasi dengan mengintegrasikan sistem kelistrikan mandiri (penggunaan baterai VRLA, mikrokontroler *Raspberry Pi Pico*, dan *blower* elektrik berkecepatan terkontrol) serta mekanisme *re-burning* termal yang sukses menekan emisi asap hingga $\pm 60\%$. Inovasi teknis ini secara komprehensif dipadukan dengan pembentukan embrio kelembagaan unit usaha “Malalak Hijau” sebagai fondasi model ekonomi sirkular desa (Siregar, 2023).

Berdasarkan rumusan masalah dan kebaruan tersebut, tujuan kegiatan ini secara eksplisit dirumuskan untuk; 1. Menerapkan teknologi pirolisis drum tertutup berbantuan *blower* elektrik guna mengonversi limbah batang kayu manis menjadi sumber energi alternatif yang bersih dan efisien. 2. Menghasilkan produk arang biomassa bermutu tinggi yang memenuhi spesifikasi Standar Nasional Indonesia (SNI 01-6235-2000). 3. Meningkatkan kapasitas teknis serta keterampilan operasional Kelompok Tani Toboh Organik di Nagari Malalak Timur dalam mengelola teknologi energi terbarukan guna mendukung kemandirian energi dan sirkularitas ekonomi masyarakat (Rahman & Putra, 2023).

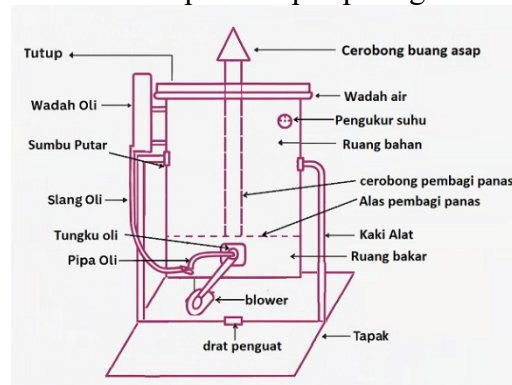
METODOLOGI

1. Desain Pengabdian/Pendekatan Kegiatan

Kegiatan pengabdian ini secara eksplisit menggunakan pendekatan *Participatory Action Research* (PAR) yang dipadukan dengan *Community Development* berbasis Teknologi Tepat Guna (TTG) (Darmawan & Susanti, 2022; Rahman & Putra, 2023). Justifikasi ilmiah pemilihan metode PAR didasarkan pada kemampuannya untuk mengintegrasikan masyarakat tidak hanya sebagai objek, melainkan sebagai subjek peneliti yang secara aktif memecahkan masalah lokalnya sendiri. Melalui siklus observasi, perencanaan, tindakan, dan refleksi bersama, pendekatan PAR memastikan bahwa introduksi inovasi teknologi energi (pirolisis) bersifat adaptif terhadap kondisi sosial-budaya setempat sehingga dapat direplikasi dan diadopsi oleh petani secara berkelanjutan (Siregar, 2023).

Selain itu, pendekatan *service-learning* juga diintegrasikan melalui keterlibatan tim akademik dalam transfer pengetahuan, demonstrasi pirolisis, serta pelatihan peningkatan keterampilan teknis. Model kegiatan ini sejalan dengan praktik pemberdayaan masyarakat pedesaan berbasis energi biomassa sebagaimana dijelaskan dalam berbagai kajian sebelumnya (Rahmawati, 2023; Widodo, 2020).

Adapun desain Pirolisator drum tertutup seperti gambar 1.



Gambar 1. Desain Pirolisator Drum Tertutup

2. Lokasi dan Waktu Kegiatan

Kegiatan dilaksanakan di area perkebunan kayu manis Nagari Malalak Timur, Kecamatan Malalak, Kabupaten Agam, Sumatera Barat, yang secara historis dan empiris merupakan sentra produksi utama komoditas tersebut (*Ilfania et al., 2021*). Waktu pelaksanaan kegiatan secara keseluruhan memakan durasi 8 bulan, yang berlangsung sejak bulan April hingga November 2025. Secara rinci, tahapan observasi dimulai dari survei lapangan awal pada 26 April 2025 seperti gambar 2 untuk memetakan kendala pengeringan, dilanjutkan survei pada 14 Juni 2025 untuk mengidentifikasi potensi limbah, proses instalasi dan pelatihan pada pertengahan tahun, hingga evaluasi akhir pada November 2025.



Gambar 2. Survei Lapangan Awal

3. Sasaran dan Mitra Kegiatan

Mitra kegiatan ini adalah Kelompok Tani Toboh Organik yang melibatkan 40 orang peserta. Karakteristik peserta didominasi oleh petani usia produktif (berkisar antara 35 hingga 55 tahun) dengan latar belakang pendidikan mayoritas menengah ke bawah. Peserta memiliki pengalaman bertani dan mengolah kayu manis secara tradisional selama lebih dari 10 tahun, namun sama sekali belum memiliki literasi terkait pemanfaatan teknologi energi terbarukan maupun kelistrikan mesin. Kriteria inklusi sasaran meliputi: kesediaan penuh mengikuti pelatihan dan memiliki timbunan limbah batang/daun minimal 100 kg/bulan (*Rahman & Putra, 2023*).

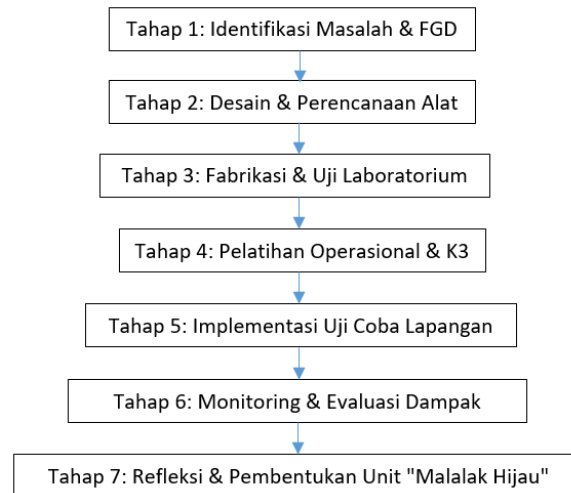
Mitra menyediakan kontribusi in-kind berupa lahan $\pm 200 \text{ m}^2$, bahan baku limbah kayu manis $\pm 1 \text{ ton}$ per siklus uji coba, serta dukungan biaya operasional lokal seperti gambar 3. Keterlibatan mitra yang kuat ini sejalan dengan prinsip pemberdayaan masyarakat berbasis kolaborasi dan kepemilikan lokal (*Hidayati & Yuliani, 2024*).



Gambar 3. Bahan Baku Limbah Kayu Manis

4. Tahapan Pelaksanaan Kegiatan

Untuk mempermudah replikasi metode kegiatan, keseluruhan alur kerja sistematis telah divisualisasikan ke dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 4. Tahapan ini merangkum proses dari hulu (identifikasi) ke hilir (penguatan kelembagaan) (Fauzi & Anwar, 2024).

Gambar 4. Diagram Alir (*Flowchart*) Tahapan Pelaksanaan Kegiatan

5. Reprodusibilitas Metodologi (Detail Teknis Operasional)

Untuk memastikan *reproducibility* (keterulangan metode secara ilmiah di lokasi lain), proses karbonisasi dilakukan menggunakan reaktor pirolisis drum tertutup berbahan plat *stainless steel*. Parameter teknis ditetapkan dengan kapasitas alat sebesar 30 kg biomassa kering per siklus (*batch*). Pembakaran disuplai oleh sirkulasi udara konstan menggunakan *blower* keong elektrik bersistem *speed control*, yang terintegrasi dengan sensor *load cell* dan mikrokontroler *Raspberry Pi Pico* untuk presisi pengaturan (Jabir et al., 2025; Wahyuni et al., 2020). Operasional pemanasan dirancang untuk secara bertahap mencapai dan mempertahankan suhu pirolisis pada rentang 350–600 °C, yang berlangsung secara stabil selama waktu proses 3 hingga 4 jam di dalam kondisi minim oksigen (Wibowo & Pradana, 2021).

6. Metode Evaluasi Keberhasilan

Metode evaluasi dilakukan menggunakan instrumen pengumpulan data berupa kuesioner *pre-test* (sebelum kegiatan) dan *post-test* (sesudah kegiatan) untuk mengukur peningkatan kognitif peserta, diiringi instrumen observasi unjuk kerja (*checklist*) untuk menilai keterampilan operasional alat. Evaluasi parameter ekonomi dan dampak sirkularitas dari evaluasi kegiatan menggunakan metode komparasi pendapatan pasca-intervensi (Yuliana & Hakim, 2021). Indikator keberhasilan dirumuskan secara spesifik dan terukur melalui empat parameter berikut:

1. Aspek Pengetahuan: Terjadi peningkatan skor evaluasi *post-test* petani terkait konsep pirolisis dan K3 minimal $\geq 70\%$.
2. Aspek Keterampilan: $\geq 80\%$ peserta terbukti mampu mengoperasikan reaktor pembakaran secara mandiri, termasuk merawat dan membersihkan komponen mikrokontroler kelistrikannya.

3. Aspek Lingkungan: Volume pembakaran terbuka atas limbah kayu manis berkurang minimal 60% (dari *baseline* ± 1 ton/bulan menjadi $<0,4$ ton/bulan).
4. Aspek Ekonomi: Terdapat peningkatan selisih pendapatan petani sebesar 30–35% yang bersumber dari hasil penjualan komersial briket/arang kayu manis yang diuji berdasarkan standar mutu SNI (*Badan Standardisasi Nasional, 2000*).

7. Etika Kegiatan (Opsional)

Seluruh kegiatan dilakukan berdasarkan prinsip sukarela, tidak merugikan, dan partisipatif. Petani memberikan persetujuan verbal dan tertulis untuk dokumentasi kegiatan, pengambilan data, dan penggunaan informasi non-sensitif untuk laporan. Tidak ada intervensi yang membahayakan atau merugikan peserta.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pelaksanaan pengabdian dan implementasi teknologi di Nagari Malalak Timur dievaluasi berdasarkan parameter keteknikan (kinerja termal) dan parameter sosial-ekonomi. Untuk memberikan struktur evaluasi kegiatan yang komprehensif, penyajian hasil diklasifikasikan secara eksplisit ke dalam dua kategori, yakni luaran utama (teknologi pirolisator dan kualitas arang) serta luaran tambahan (dampak ekologi, sosial-ekonomi, dan embrio teknologi destilasi).

1. Luaran Utama: Spesifikasi Teknologi, Kinerja Pirolisator, dan Mutu Bioenergi

1.1 Spesifikasi Teknis Alat (Pirolisator Drum Tertutup Terkontrol)

Luaran utama secara fisik dari kegiatan ini adalah satu unit sistem pirolisator drum tertutup berbantuan mekanik-elektrik. Berbeda dengan tungku tradisional yang mengandalkan konveksi udara bebas, inovasi pada alat ini mengintegrasikan sirkulasi udara paksa (*forced draft*) yang terkontrol (*Wahyuni et al., 2020*). Spesifikasi teknis dari alat yang dikembangkan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Pirolisator Drum Tertutup Terkontrol

No.	Komponen/Parameter	Spesifikasi / Detail
1	Tipe Reaktor	Drum tertutup (Panci Stainless Steel Modifikasi)
2	Kapasitas Produksi	30 kg biomassa (limbah batang kayu manis) per batch
3	Pengendali Kecepatan Udara	Blower keong elektrik dengan speed control (built-in)
4	Unit Pemrosesan Data	Mikrokontroler Raspberry Pi Pico
5	Sensor dan Layar	Sensor Load Cell & LCD 16x2 I2C Serial Interface
6	Sumber Daya Kelistrikan	Baterai VRLA Deep Cycle (Tianneng 12V 45Ah & SMT 12V 20Ah)
7	Mekanisme Reduksi Emisi	Sistem Re-burning (pembakaran ulang gas volatil)

1.2 Kinerja Termal dan Kualitas Arang (evaluasi kegiatan)

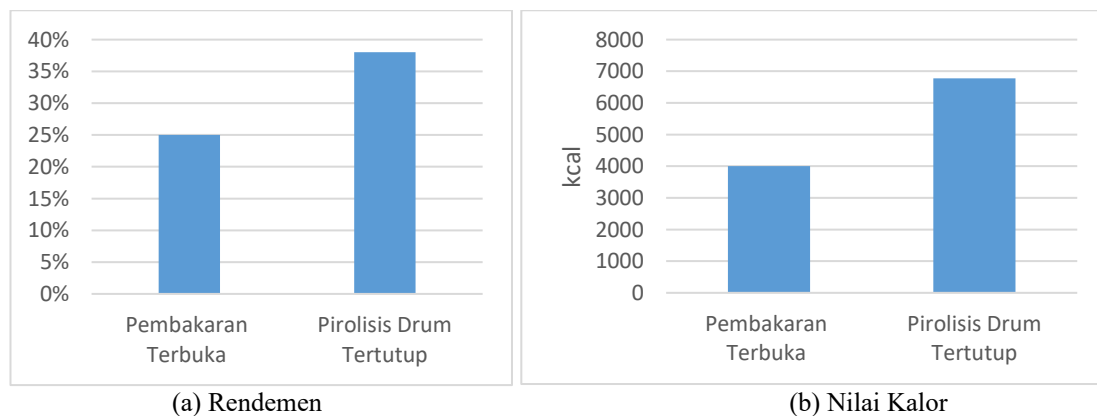
Secara operasional, pirolisator bekerja pada rentang suhu 350–600 °C selama 3–4 jam proses. Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi konversi biomassa kayu manis mencapai 38% seperti table 2. Secara ilmiah, tingginya rendemen ini disebabkan oleh mekanisme ruang kedap udara (kondisi *starved-oxygen*) yang mencegah terjadinya pembakaran sempurna

(*complete combustion*) menjadi abu. *Blower* elektrik berperan menyuplai panas secara merata tanpa memicu turbulensi oksigen berlebih di dalam reaktor.

Tabel 2. Parameter Kinerja Pirolisator

Parameter	Hasil Lapangan	Standar/Referensi
Kapasitas per siklus	30 kg biomassa kering	-
Waktu proses	3–4 jam	3–5 jam (literatur pirolisis biomassa)
Rentang suhu	350–600 °C	300–650 °C
Efisiensi konversi	38%	25–30% (karbonisasi tradisional)
Emisi asap	turun $\pm 60\%$	–

Sebagai pembuktian visual atas kinerja alat, Gambar 5 merepresentasikan komparasi nilai kalor (4000 kcal vs 6780 kcal) dan rendemen (25% vs 38%) antara metode pembakaran terbuka (*baseline*) dengan pirolisator drum tertutup.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Output Rendemen dan Nilai Kalor Arang Kayu Manis antara Pembakaran Terbuka dan Pirolisis Drum Tertutup

Uji laboratorium menunjukkan arang kayu manis memiliki nilai kalor sebesar 6.780 kcal/kg dengan kadar air 6,2% seperti gambar 6. Menginterpretasikan data ini secara teknologi, kadar lignin dan selulosa yang tinggi pada batang kayu manis berhasil dikonversi secara termokimia menjadi karbon padat berdensitas energi tinggi (Fitriana & Febrina, 2021). Temuan ini sejalan dan mengonfirmasi hasil kegiatan Wibowo & Pradana (2021), di mana sirkulasi gas panas dan minimasi oksigen terbukti meningkatkan nilai kalor. Dibandingkan dengan limbah organik biasa, arang batang kayu manis memberikan performa *high-grade biomass charcoal* yang sangat kompetitif dan telah memenuhi parameter SNI 01-6235-2000 (Badan Standardisasi Nasional, 2000).



Gambar 6. Pengujian Pembuatan Arang Kayu Manis

2. Luaran Tambahan: Reduksi Emisi, Dampak Ekologi, dan Sosial-Ekonomi

2.1 Hubungan Sebab-Akibat pada Reduksi Emisi dan Ekologi Tanah

Pembakaran terbuka (*open burning*) limbah pertanian secara langsung memicu emisi partikulat padat akibat suhu yang tidak terkontrol. Pengukuran menggunakan *smoke meter* menunjukkan pirolisator mampu menekan emisi asap hingga $\pm 60\%$. Hubungan sebab-akibat dari fenomena ini adalah fungsi sistem *re-burning*: gas volatil (tar dan asap) yang terlepas selama pirolisis tidak dibuang ke atmosfer, melainkan disalurkan kembali ke zona bakar primer (reaktor) untuk dijadikan bahan bakar tambahan. Hal ini mendukung temuan *Jabir et al. (2025)* bahwa inovasi drum pembakaran tertutup sangat efektif menurunkan emisi karbon monoksida dan polutan tidak terbakar seperti gambar 7. Selain perbaikan kualitas udara, luaran residu abu dan serpihan *biochar* dimanfaatkan untuk ekologi tanah. Terjadi peningkatan pH tanah kebun dari asam (5,2) menjadi lebih netral (5,5).



a. Sebelum

b. Sesudah

Gambar 7. Perbandingan Asap (a) Sebelum dan (b) Sesudah Teknologi Pirolisis

2.2 Evaluasi Dampak Sosial-Ekonomi (Kuantitatif)

Dampak hilirisasi IPTEKS pada masyarakat Toboh Organik direpresentasikan melalui Tabel 3. Intervensi teknologi terbukti mengatasi ketergantungan cuaca pada pengeringan limbah pascapanen. Perbandingan hasil kegiatan ini dengan literatur oleh *Darmawan & Susanti (2022)* dan *Siregar (2023)* menunjukkan kesamaan pola empiris, di mana konversi biomassa di tingkat komunitas desa langsung berimplikasi pada penurunan volume limbah dan pembukaan lapangan usaha sirkular yang baru.

Tabel 3. Data Kuantitatif Peningkatan Sosial-Ekonomi Mitra

No.	Indikator Evaluasi	Sebelum Program (Baseline)	Sesudah Program	Persentase Perbaikan
1	Volume Limbah Terbakar	± 1.000 kg / bulan	< 400 kg / bulan	Reduksi > 60%
2	Pemahaman Operasional & K3	< 20% (Awam Teknologi)	> 80% (Mandiri)	Peningkatan 60%
3	Nilai Jual Limbah Batang	Rp 0 (Tidak bernilai)	Rp 8.000 – 10.000 / kg	Penciptaan Nilai Baru
4	Pendapatan Agregat Petani	Nominal Dasar Penjualan Kulit	Basis Kulit + Briket Arang	Peningkatan 30–35%

Selain itu, Biochar dan abu hasil pembakaran kemudian diaplikasikan pada lahan kayu manis, dan uji tanah sederhana menunjukkan adanya peningkatan kualitas tanah, antara lain kenaikan pH dari 5,2 menjadi 5,5, peningkatan kapasitas tukar kation (KTK) yang terindikasi melalui uji organoleptik terhadap struktur tanah, serta perbaikan aerasi dan daya serap air. Temuan ini mendukung prinsip pertanian regeneratif yang menekankan pemanfaatan residu biomassa sebagai pembenah tanah untuk meningkatkan kesuburan dan kesehatan ekosistem lahan, sebagaimana diringkas pada Tabel 4.

Tabel 4. Dampak Biochar terhadap Kondisi Tanah

Indikator	Sebelum	Sesudah	Literatur Pembanding
pH tanah	5,2	5,5	Sutopo & Supriyadi (2022): biochar menaikkan pH 0,2–0,5
KTK	rendah	meningkat	Rahmawati (2023): biochar tingkatan KTK 10–15%
Aerasi	kurang baik	baik	Siregar (2023)

Sebagai inisiasi *luaran tambahan masa depan*, tim juga mulai merancang dan memperkenalkan prinsip kerja destilator daun kayu manis berbasis pemanasan oli (*thermal oil*), yang ke depannya ditargetkan untuk melengkapi portofolio produk bernilai tambah di Nagari Malalak Timur (Fauzi & Anwar, 2024).

3. Keunggulan, Keterbatasan Program, dan Peluang Pengembangan Strategis

Evaluasi kegiatan terhadap keseluruhan program menghasilkan identifikasi eksplisit terkait performa teknologi dan arah keberlanjutannya:

Keunggulan Program: Secara keilmuan dan teknis, integrasi instrumen kelistrikan (baterai VRLA, mikrokontroler *Raspberry Pi Pico*, sensor *load cell*) pada mesin pirolisator konvensional merupakan keunggulan mutlak. Hal ini meniadakan tebakan manual (firasat) petani terkait suhu pembakaran. Aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) juga meningkat drastis karena pekerja tidak lagi terpapar *heat stress* dan asap pekat secara langsung dari pembakaran terbuka (Jabir et al., 2025).

Keterbatasan Program: Secara materialis, penggunaan plat *stainless steel* standar sebagai ruang bakar reaktor memiliki keterbatasan, yakni rentan terhadap deformasi fisik jika dipapar fluktuasi suhu di atas 600 °C dalam jangka waktu yang sangat lama. Selain itu, proses produksi masih bersifat *batch* (30 kg per siklus) yang membutuhkan waktu jeda pendinginan sebelum siklus berikutnya dapat dimulai.

Peluang Pengembangan Strategis: Peluang pasca-program ini bersifat strategis dan prospektif. *Pertama*, dari segi infrastruktur energi, terdapat peluang eskalasi sistem dengan mengintegrasikan suplai kelistrikan perangkat elektronik menggunakan Pembangkit Listrik

Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*. *Kedua*, dari segi kelembagaan dan dampak turunan, unit embrio “Malalak Hijau” memiliki potensi besar untuk dilembagakan secara resmi menjadi Badan Usaha Milik Nagari (BUMNag) (Rahman & Putra, 2023). Hal ini akan memfasilitasi legalitas briket arang agar dapat menyuplai industri *food and beverage* di skala provinsi, merealisasikan kemandirian ekonomi sirkular tingkat makro bagi masyarakat desa (Tamrin et al., 2024; Yuliana & Hakim, 2021).

4. Evaluasi kegiatan Kualitatif

Hasil Evaluasi kegiatan Kualitatif menunjukkan:

- Petani merasa proses pirolisis lebih aman, tidak panas berlebih.
- Waktu kerja lebih efisien.
- Produk arang lebih stabil sehingga mudah dipasarkan.

Berikut memperlihatkan foto-foto kegiatan dengan kelompok tani Toboh Organik nagari malalak timur seperti pada gambar 8.



Gambar 8. Foto-foto kegiatan Pirolisis Drum Tertutup

KESIMPULAN DAN SARAN

Melalui metode *Participatory Action Research* (PAR), introduksi teknologi pirolisis drum tertutup berbantuan mikrokontroler berhasil mengonversi limbah kayu manis menjadi bioenergi berkualitas tinggi. Inovasi ini secara teknis menghasilkan rendemen arang 38%, nilai

kalor 6.780 kcal/kg, dan kadar air 6,2% (memenuhi SNI 01-6235-2000), serta efektif menekan emisi partikulat asap hingga 60%. Penerapan IPTEKS ini sukses memecahkan masalah lingkungan dengan mereduksi >60% limbah, sekaligus menaikkan pendapatan petani sebesar 30–35% melalui embrio usaha “Malalak Hijau”. Hal ini membuktikan bahwa teknologi tepat guna sangat efektif dalam mewujudkan kemandirian energi dan ekosistem ekonomi sirkular di pedesaan.

Kapasitas produksi perlu ditingkatkan dari skala *batch* menuju skala komersial dengan mengintegrasikan “Malalak Hijau” ke dalam Badan Usaha Milik Nagari (BUMNag), diiringi pendampingan standardisasi kemasan dan pemasaran digital (*digital marketing*). Dan kegiatan lanjutan disarankan berfokus pada: (1) otomatisasi reaktor berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan suhu jarak jauh; (2) penggantian reaktor *stainless steel* dengan baja karbon tinggi (*carbon steel*) agar tahan deformasi panas jangka panjang; dan (3) integrasi daya alat dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* untuk kemandirian energi total.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Andalas atas dukungan pendanaan penuh pada kegiatan ini melalui Program Kemitraan Masyarakat Terintegrasi dengan Kegiatan Mahasiswa (PKM-TKM) Tahun Anggaran 2025 (Nomor Kontrak: 27/UN16.19/PM.03.03/PKM-TKM/2025). Apresiasi dan penghargaan juga ditujukan kepada Kelompok Tani Toboh Organik, Nagari Malalak Timur, selaku mitra kegiatan, atas dedikasi, penyediaan lahan operasional, serta kolaborasi aktifnya dalam seluruh tahapan penerapan teknologi pirolisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., & Nugroho, D. P. (2021). Pemanfaatan limbah pertanian menjadi briket sebagai energi alternatif. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 8(2), 56–63.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 01-6235-2000: Arang kayu—Spesifikasi mutu dan metode uji*. Badan Standardisasi Nasional. (Catatan: Dipertahankan karena merupakan dokumen rujukan standar legal/SNI).
- Darmawan, A., & Susanti, E. (2022). Penerapan teknologi pirolisis untuk pemanfaatan limbah pertanian di pedesaan. *Jurnal Hilirisasi IPTEKS*, 5(2), 112–120. <https://doi.org/10.25077/jhi.v5i2.112>
- Fauzi, M., & Anwar, K. (2024). Introduksi teknologi destilasi terintegrasi untuk peningkatan nilai tambah komoditas lokal. *Jurnal Hilirisasi IPTEKS*, 7(1), 33–42. <https://doi.org/10.25077/jhi.v7i1.33>
- Fitriana, W., & Febrina, W. (2021). Analisis potensi briket bio-arang sebagai sumber energi terbarukan. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 10(2), 147–154. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i2.147-154>
- Hasanah, M. B., & Rukmana, R. L. (2023). Pemanfaatan limbah daun kayu manis sebagai bahan baku minyak atsiri: Kajian potensi dan proses. *Jurnal Kimia Indonesia*, 10(1), 11–18.
- Ilfania, M., Sari, R., & Hendri, M. (2021). Analisis kelayakan finansial perkebunan kayu manis (*Cinnamomum burmanii*) rakyat di Kecamatan Malalak Kabupaten Agam. *JOSETA: Journal of Socio-economics on Tropical Agriculture*, 3(2), 345–354. <https://doi.org/10.25077/joseta.v3i2.416>

- Imanudin, N., Kurniawan, M. F., & Rohmayanti, T. (2022). Potensi senyawa aktif ekstrak kayu manis Padang (*Cinnamomum burmanii*) sebagai inhibitor enzim aldose reductase secara molecular docking. *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, 6(2), 171–177. <https://doi.org/10.30595/jrst.v6i2.14262>
- Jabir, M., Selao, A., Zainal, M., Hamra, A., Yusuf, A. M., Rahmawati, R., Rajab, A., Ramadani, P., Iswati, S., Iswan, I., Sukma, A., & Ambar, A. S. N. (2025). Inovasi teknologi sistem pembakaran sampah ramah lingkungan terbuat dari drum bekas dalam mengurangi emisi asap. *BEMAS: Jurnal Bermasyarakat*, 5(2), 179–185.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2020). *Pedoman penggunaan energi terbarukan untuk industri rumah tangga dan pedesaan*. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi.
- Mulyanti, N., Hidayaturahmah, R., & Marcellia, S. (2023). Analisis minyak atsiri pada kulit kayu manis (*Cinnamomum burmanii*) dengan metode GASS. *Jurnal Farmasi Malahayati*, 6(2), 203–210.
- Rahman, T., & Putra, R. (2023). Pemberdayaan kelompok tani melalui inovasi energi terbarukan berbasis limbah biomassa. *Jurnal Hilirisasi IPTEKS*, 6(1), 45–55. <https://doi.org/10.25077/jhi.v6i1.45>
- Siregar, H. Y. (2023). Model ekonomi sirkular untuk pemberdayaan masyarakat berbasis bioenergi di pedesaan. *Buletin Ilmiah Nagari Membangun*, 4(1), 12–20.
- Tamrin, M. M., Dunggio, S., & Abdussamad, S. (2024). Peran briket limbah batok kelapa dalam meningkatkan kesejahteraan ekonomi masyarakat desa. *Jurnal Inovasi Pemberdayaan*, 2(1), 8–18.
- Wahyuni, A. K., Hidayat, S. P., & Rahayu, D. Y. (2020). Desain dan uji kinerja reaktor pirolisis drum tertutup untuk produksi arang ramah lingkungan. *Buletin Ilmiah Nagari Membangun*, 3(2), 123–130.
- Wibowo, H. R., & Pradana, D. A. (2021). Peningkatan efisiensi proses karbonisasi menggunakan sirkulasi gas panas. *Jurnal Rekayasa Proses*, 9(2), 71–78.
- Yuliana, S., & Hakim, L. (2021). Evaluasi dampak ekonomi sirkular pada pengolahan limbah perkebunan. *Jurnal Hilirisasi IPTEKS*, 4(3), 210–218. <https://doi.org/10.25077/jhi.v4i3.210>