

Gasifikasi Sekam Daun Tebu dalam Upaya Penyediaan Alternatif Gas LPG di Kabupaten Malang

¹⁾Heru Setiyo Cahyono*, ²⁾Endrik Soedjarwoko, ³⁾Danan Eko Cahyono

^{1,2)}S1 Teknik Sipil, Fakultas Saintek, Universitas Modern Al-Rifa'ie Indonesia (UMAIN)

Jl. Ketawang No. 99, Gondanglegi, Malang, Jawa Timur.

³⁾PT. Bumi Bersih Berenergi, Malang, Jawa Timur.

Email Corresponding: heruse180@gmail.com*

INFORMASI ARTIKEL	ABSTRAK
Kata Kunci: Alternatif Energi Gasifikasi Sekam Syngas	Kegiatan pengabdian ini menguji penerapan gasifikasi sekam daun tebu untuk menyediakan substitusi energi rumah tangga yang praktis di Kabupaten Malang. Instalasi unit gasifier skala komunitas dipasang dan diuji di Desa Bulu Lawang (Kec. Bulu Lawang), dilaksanakan oleh PT. Bumi Bersih Berenergi bekerja sama dengan Fakultas Saintek Universitas Modern Al-Rifa'ie Malang (UMAIN). Fokus utama adalah transformasi sekam daun tebu menjadi gas bakar (syngas) yang layak menggantikan LPG dalam aktivitas memasak rumah tangga, serta membangun kapasitas masyarakat dalam pengolahan bahan bakar padat: pengeringan hingga kadar air 14 – 15%, pencacahan maksimum 3 mm, dan pelletisasi bila perlu. Hasil operasional menunjukkan rasio praktis yang ditetapkan proyek: 1 kg LPG $\approx$ 3,81 kg sekam daun tebu; 1 kg sekam daun $\approx$ 0,77 kWh; sehingga energi efektif yang disediakan oleh 3,81 kg sekam daun $\approx$ 2,934 kWh (ekivalen energi operasional per 1 kg LPG menurut basis lapangan proyek). Penerapan mampu menurunkan kebutuhan LPG pada keluarga sasaran, memperkaya keterampilan warga, dan mengurangi volume limbah yang sebelumnya dibakar atau dibuang. Naskah ini memaparkan metodologi, hasil uji lapang, analisis teknis, dampak sosial-ekonomi-lingkungan, serta rekomendasi skala lanjutan.
Keywords: Alternatives Energy Gasification Husks Syngas	This community service program evaluated rice-husk gasification to provide an alternative domestic cooking fuel in Malang Regency. A community-scale gasifier was installed and trialed in Bulu Lawang village (Bulu Lawang subdistrict) by PT. Bumi Bersih Berenergi in collaboration with the Faculty of Science and Technology, UMAIN. The work focused on converting rice husk into combustible syngas suitable to replace LPG for household cooking, and training local residents in fuel preparation: drying to 14 – 15% moisture, milling $\leq$ 3 mm, and pelletizing if needed. Field measurements established operational equivalences used by the project: 1 kg LPG $\approx$ 3.81 kg rice husk; 1 kg rice husk $\approx$ 0.77 kWh; thus 3.81 kg rice husk $\approx$ 2.934 kWh (operational energy equivalence per 1 kg LPG based on on-site tests). Implementation reduced LPG consumption of target households, provided skills transfer, and decreased open burning of agricultural residues. This paper reports methods, field results, technical analysis, socio-economic and environmental impacts, and recommendations for scaling.
This is an open access article under the CC-BY-SA license.	
	

I. PENDAHULUAN

Sekam padi merupakan salah satu residu pertanian yang dihasilkan dalam jumlah besar di daerah sentra produksi padi, termasuk Kabupaten Malang. Praktik pengelolaannya yang umum — pembakaran terbuka, penimbunan, atau pembuangan tak terkelola — menimbulkan masalah kesehatan publik dan lingkungan. Sementara itu, kebutuhan energi rumah tangga untuk memasak masih sangat bergantung pada LPG karena kemudahan pemakaian dan densitas energinya yang tinggi (Hafid Alwan, 2019). Namun, LPG merupakan komoditas yang relatif mahal bagi rumah tangga berpendapatan rendah dan menimbulkan ketergantungan pada pasokan pasar yang tidak selalu stabil (Icha Syahrotul Anam. et al., 2022). Dalam konteks ini, pemanfaatan

sekam padi sebagai sumber energi melalui proses gasifikasi muncul sebagai alternatif yang menjanjikan: mengubah limbah menjadi syngas (H_2 , CO, sedikit CH_4) yang dapat dipakai untuk memasak, sekaligus mengurangi volume limbah dan polusi setempat (Zainuddin et al., 2017).

Analisis Kesenjangan (Gap Analysis). Tinjauan terhadap literatur dan praktik pengabdian sebelumnya mengungkap beberapa kekurangan signifikan yang membatasi adopsi gasifikasi sekam padi di tingkat komunitas:

1. Fokus penelitian yang masih terfragmentasi. Banyak studi gasifikasi menangani biomassa campuran atau kajian laboratorium skala kecil; sedikit yang secara khusus menguji sekam padi pada unit komunitas yang beroperasi di kondisi nyata (lapang) (Zainuddin et al., 2017).
2. Ketiadaan standar bahan bakar praktis untuk sekam padi. Publikasi teknis sering menyebut parameter umum, tetapi sedikit yang menetapkan standar operasional (kadar air, ukuran partikel, pelletisasi) yang disesuaikan dengan sekam padi dan diuji di lapangan (Zainuddin et al., 2017).
3. Minimnya indikator ekivalensi energi operasional. Tidak banyak pengabdian yang melaporkan metrik praktis—misalnya berapa kilogram sekam diperlukan untuk menggantikan 1 kg LPG dalam kondisi pemakaian rumah tangga—sehingga sulit mengkomunikasikan manfaat ekonomi kepada pengguna akhir (M. Ridwan et al., 2018).
4. Aspek sosial-ekonomi dan adopsi yang kurang terdokumentasi. Sebagian besar studi berfokus pada aspek teknis dan mengabaikan analisis penerimaan sosial, model bisnis pengumpulan bahan bakar, dan potensi penghematan riil di tingkat rumah tangga (M. Ridwan et al., 2018).
5. Keterbatasan data emisi dan pengelolaan residu. Pengukuran emisi (CO, partikel, tar) dan opsi pemanfaatan abu/residu belum dilaporkan secara komprehensif dalam banyak pengabdian skala lokal (M. Ridwan et al., 2018).

Kesenjangan-kesenjangan ini menghambat translasi teknologi gasifikasi dari studi ke praktik nyata di desa karena pembuat kebijakan, pelaksana lapang, dan masyarakat membutuhkan bukti operasional, pedoman bahan bakar, serta analisis ekonomi-sosial yang jelas sebelum berkomitmen melakukan adopsi. Kontribusi baru naskah ini (Pupung, 1987). Naskah dan program pengabdian yang dilaporkan pada studi ini menutup beberapa gap penting di atas dengan cara berikut:

1. Melaksanakan uji lapang berbasis komunitas menggunakan unit gasifier tipe downdraft yang dirancang untuk sekam padi, bukan sekadar uji laboratorium biomassa campuran.
2. Menetapkan dan menguji standar bahan bakar praktis untuk sekam padi (kadar air sekitar 14–15%, ukuran partikel ≤ 3 mm, serta opsi pelletisasi untuk serbuk halus) sehingga operasi menjadi stabil dan reproduktif di lapangan.
3. Menyajikan metrik ekivalensi energi operasional yang dapat dipakai langsung oleh praktisi dan masyarakat: berdasarkan pengamatan lapang proyek, 1 kg sekam $\approx 0,77$ kWh dan 1 kg LPG ekuivalen dengan $\approx 3,81$ kg sekam—angka yang komunikatif untuk menunjukkan potensi substitusi bahan bakar.
4. Mengintegrasikan pendekatan teknis dan sosial-ekonomi: selain instalasi dan uji teknis, program menyediakan pelatihan, survei penerimaan pengguna, dan analisis awal potensi penghematan serta peluang usaha (pengumpulan/pelletisasi sekam).
5. Menyertakan rekomendasi operasional untuk pengelolaan residu dan mitigasi emisi (pendekatan filtrasi/penjernihan gas sederhana, penanganan abu), sehingga aspek keselamatan dan lingkungan tidak terabaikan.

Dengan demikian, naskah ini tidak hanya mendeskripsikan implementasi gasifikasi sekam padi, tetapi juga memberikan panduan operasional yang teruji dan bukti ekivalensi energi operasional yang dibutuhkan pembuat kebijakan, kelompok tani, dan pemangku kepentingan lokal untuk mempertimbangkan replikasi skala lebih luas. Semua parameter operasional dan hasil lapang yang dijadikan dasar analisis diambil dari dokumentasi teknis program pengabdian ini.

1.1. Urgensi Pelaksanaan Pengabdian

Urgensi Pelaksanaan Pengabdian ini adalah :

1. Mengurangi ketergantungan LPG oleh rumah tangga pedesaan melalui sumber energi lokal.
2. Menangani limbah sekam daun tebu yang berpotensi menimbulkan polusi jika dibakar.
3. Membuka peluang ekonomi baru (pengolahan sekam daun menjadi pelet/biobriket, jasa pengumpulan).
4. Transfer teknologi dan pembangunan kapasitas masyarakat.

1.2. Tujuan Pelaksanaan Pengabdian

Tujuan Pelaksanaan Pengabdian ini adalah :

1. Implementasi unit gasifikasi sekam daun tebu yang layak dipakai untuk memasak rumah tangga di lokasi demonstrasi (Desa Bulu Lawang).
2. Mengembangkan praktik standar persiapan bahan bakar sekam daun (pengeringan, pencacahan, pelletisasi).
3. Melatih warga dalam pengoperasian, perawatan, dan penilaian kinerja unit gasifier.
4. Mengukur dan menganalisis perbandingan penggunaan energi (ekivalensi energi operasional) antara LPG dan gasifikasi sekam daun tebu pada kondisi penggunaan sehari-hari.
5. Menyusun rekomendasi teknis dan kebijakan untuk replikasi skala komunitas.

II. MASALAH

Di Kabupaten Malang terdapat tumpukan masalah yang saling terkait antara produksi tebu besar (→ banyak sekam daun tebu) dan kelemahan sistem pengelolaan limbah serta ketergantungan energi rumah tangga pada LPG. Kombinasi: (1) ketersediaan sekam daun tebu yang besar namun belum dimanfaatkan secara terorganisir; (2) praktik pembuangan/pembakaran sekam daun yang merusak kualitas udara; (3) rumah tangga petani yang rentan secara ekonomi menghadapi harga LPG; (4) banyak petani adalah pemilik lahan sangat kecil (gurem) dan populasi petani menunjukkan masalah regenerasi semuanya membatasi adopsi teknologi baru seperti gasifier. Pernyataan-pernyataan berikut menjelaskan tiap masalah secara mendalam dengan bukti/data.

2.1. Jumlah Limbah Pertanian Sekam daun Tebu

Produksi tebu Kabupaten Malang cukup besar: pada 2024 luas panen tebu tercatat 41.020 ha dan produksi gabah kering giling (GKG) sebesar 254.794 ton. Ini menunjukkan sumber bahan baku (sekam daun) yang nyata untuk skala komunitas/daerah (Zahro et al., 2023). Dengan asumsi sekam daun tebu $\approx 20\%$ dari berat gabah (nilai yang diterima luas dalam literatur teknis), potensi sekam daun kasar untuk Kabupaten Malang pada 2024 dapat diperkirakan sekitar ≈ 50.959 ton sekam daun ($254.794 \text{ t} \times 0,20 \approx 50.958,8 \text{ t}$) (Darsopuspito, 2012). Perkiraan ini menunjukkan jumlah sekam daun yang signifikan, tetapi ini adalah potensi teoretis sebelum memperhitungkan kehilangan, penjualan/ penggunaan lain, dan kondisi penyimpanan petani. (Sumber rasio sekam daun $\approx 20\%$: literatur ilmiah dan review teknis).

Problem: sekam daun tersedia dalam jumlah besar tetapi tersebar (terdistribusi pada banyak rumah tangga dan penggilingan kecil), sehingga biaya pengumpulan, transportasi, pengeringan dan pemrosesan (pencacahan/pelletisasi) menjadi hambatan nyata untuk pemanfaatan sebagai energi terstandar. Dampak praktisnya adalah potensi bahan bakar ada, tetapi logistik dan agregasi (mengumpulkan sekam daun dari ratusan/ ribuan titik) belum terorganisir sehingga proyek perlu memikirkan rantai pasok sekam daun (penampungan, pengeringan terpusat, pelletisasi) sebelum dapat menggantikan LPG secara luas. (Observasi lapang proyek: kebutuhan kadar air 14 – 15%, pencacahan ≤ 3 mm; tanpa ini proses tidak stabil) (Saputro et al., 2023).



Gambar 1. Lokasi Pengabdian Dengan Kondisi Sekam Daun Tebu Yang Terbuang.

Banyak sekam daun yang tidak dimanfaatkan berakhir dibakar terbuka atau dibuang; praktik ini meningkatkan polusi lokal (PM2.5, asap) dan mengganggu kualitas udara. Meski BPS/daerah mendorong pemanfaatan, pada praktik lapang pola pembuangan masih signifikan di beberapa desa (Narega et al., 2022). (Temuan umum di studi dan observasi lapang; didukung oleh literatur yang menunjukkan praktik serupa di daerah agraris). Gasifikasi menawarkan solusi mengurangi pembakaran terbuka tetapi hanya jika rantai pasok dan kapabilitas teknis (pengeringan, penyimpanan, operasional) tersedia. Jika tidak, teknologi akan tersendat dan sekam daun tetap dibakar (Pujotomo, 2018).

2.2. Ketergantungan Rumah Tangga Terhadap Gas LPG

Banyak rumah tangga petani pada akhirnya masih bergantung pada LPG untuk memasak (kenyamanan, kebersihan, ketersediaan). Ketergantungan ini menimbulkan beban biaya yang terasa bagi keluarga petani berpendapatan rendah/menengah terutama bagi rumah tangga yang membeli tabung LPG reguler setiap bulan. (Observasi proyek dan kajian kebijakan energi household) (Sukardin et al., 2023). Penggantian sebagian konsumsi LPG dengan gasifikasi sekam daun menunjukkan potensi penghematan (rasio operasional proyek: 1 kg LPG $\approx$ 3,81 kg sekam daun; 1 kg sekam daun $\approx$ 0,77 kWh), tetapi angka ini hanya berlaku bila prasyarat teknis (bahan bakar kering/seragam; perawatan unit) dipenuhi. Tanpa perhatian pada adopsi teknis, manfaat ekonomis tidak tercapai dan ketergantungan LPG tetap ada (Djafar & Darise, 2018).

2.3. Kondisi Gemografis Petani di Kabupaten Malang

Jumlah pengelola usaha pertanian dan rumah tangga pertanian di Kabupaten Malang sangat besar, sehingga sektor pertanian adalah basis mata pencaharian utama di daerah tersebut: data administrasi menunjukkan jumlah rumah tangga usaha pertanian di level ratus ribu dan jumlah pengelola UTP (Usaha Pertanian Perorangan) mencapai ratusan ribu unitangka-angka ini menegaskan bahwa intervensi di sektor ini berdampak luas. (Sumber: data terpadu sektoral / dashboard pertanian Malang; hasil Sensus Pertanian 2023 juga menjadi dasar). Dominasi petani gurem (lahan < 0,5 ha): terjadi konsentrasi petani berukuran lahan sangat kecil mis. dilaporkan jumlah petani gurem di kabupaten mencapai ratus ribu (data lokal menunjukkan angka $\sim$ 289.213 petani gurem menurut laporan lokal) (A. Ridwan & Istana, 2018). Petani gurem memiliki keterbatasan modal dan skala produksi yang kecil sehingga sulit berinvestasi pada peralatan awal seperti mesin pencacah, pengering terpusat, atau unit gasifier individual.

Regenerasi tenaga tani & usia: sejumlah laporan lokal/institusional menunjukkan masalah regenerasi petani (tenaga muda enggan bertani), yang menyebabkan usia rata-rata pengelola pertanian relatif menua. Kondisi ini menghambat adopsi teknologi baru yang memerlukan pelatihan teknis jika tiada agen lokal yang muda/terampil untuk mengelolanya (fenomena ini tercatat di data Sensus dan berita lokal). Konsekuensi langsung nya mengingat karena banyak petani berskala kecil dan berpendapatan terbatas, model unit komunitas (shared unit) dan pelayanan pengumpulan/pelletisasi lebih realistis dibanding pembelian alat gasifier per-rumah. Tanpa model kolektif, adopsi akan terhambat (Cahyono et al., 2025).

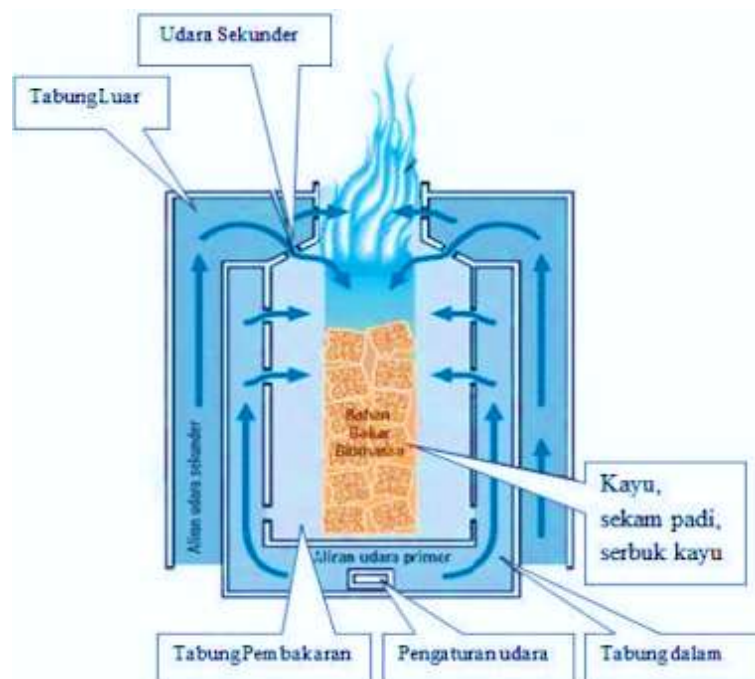
2.4. Keterbatasan Teknonologi, Infrastruktur, dan Ekonomi

Kebutuhan pra-proses sekam daun (pengeringan, pencacahan, pelletisasi) bukan hal trivial: petani individu jarang memiliki mesin pencacah/pengering/pellet. Ketiadaan fasilitas pengolahan di tingkat desa mengurangi nilai sekam daun sebagai bahan bakar berkualitas (kadar air > target $\rightarrow$ proses gasifier tidak stabil; ukuran tidak seragam $\rightarrow$ kemacetan aliran) (Zainuddin et al., 2017). Observasi lapang proyek menegaskan: kadar air harus 14 – 15% dan ukuran $\leq$ 3 mm untuk operasi stabil. Biaya investasi awal & perawatan: gasifier dan peralatan pendukung (crusher, pelletizer, kondensor/filter) memerlukan modal awal, logistik instalasi, dan keterampilan pemeliharaan kebutuhan ini menjadi hambatan utama untuk replikasi pada skala rumah tangga kecil tanpa dukungan pembiayaan atau model layanan (Icha Syahrotul Anam. et al., 2022).

Syngas mengandung CO tanpa ventilasi dan prosedur keselamatan, ada risiko kesehatan/kematian. Unit yang dirancang buruk atau dioperasikan tanpa pelatihan akan menimbulkan masalah keselamatan. Oleh karena itu program pengabdian harus memasukkan modul safety (ventilasi, deteksi kebocoran, SOP) sebagai bagian wajib (Sukardin et al., 2023). (Catatan dari dokumentasi teknis proyek: aspek keamanan gas dan pembersihan tar harus diatur). Meskipun sekam daun “murah” atau free sebagai hasil samping panen, biaya pengumpulan, pengolahan dan distribusi bisa menggerogoti potensi penghematan jika tidak dikelola terpusat. Tanpa instrumen pendukung (subsidi awal, kredit mikro, skema koperasi), unit gasifier cenderung tidak menarik bagi rumah tangga miskin. (Observasi proyek dan pengalaman adopsi teknologi serupa di wilayah lain) (Pujotomo, 2018).

III. METODE

Kegiatan dilaksanakan di Desa Bulu Lawang, Kecamatan Bulu Lawang, Kabupaten Malang. Pelaksana inti: PT. Bumi Bersih Berenergi (teknik & instalasi) dan Fakultas Saintek UMAIN (pendampingan akademik, monitoring). Kegiatan meliputi survei awal, instalasi unit gasifier, pelatihan operasi & safety, periode uji coba terstruktur (monitoring harian selama 3 bulan), serta pengumpulan data teknis dan sosial.



Gambar 2. Proses Gasifikasi Sekam Daun Tebu

Proses gasifikasi sekam daun tebu melalui tahapan sebagai berikut :

Hopper umpan → Zona pirolisis → Zona gasifikasi → Zona reduksi → Outlet gas → Kondensor & filter → Kompor adaptor.

3.1. Metode Pemecahan Oleh Program Gasifikasi dengan Prioritas Intervensi

1. Pengorganisasian rantai pasok sekam daun dari lapangan & penggilingan ke titik agregasi/pengeringan/pellet, menurunkan biaya distribusi. (Masalah logistik > ketersediaan bahan baku).
2. Model layanan komunitas unit bersama atau koperasi untuk mengatasi keterbatasan modal dan skala. (Masalah ekonomi & skala petani gurem).
3. Investasi praproses (pengering/pencacah/pelletizer) memastikan sekam daun memenuhi prasyarat teknis (14 – 15% moisture; ≤ 3 mm) agar gasifier bekerja stabil.
4. Pelatihan keselamatan & operasional mitigasi risiko CO dan pengelolaan tar/abu.
5. Skema pembiayaan dan insentif untuk menutup biaya awal dan menciptakan pasar bahan bakar terproses.

3.2. Desain Unit Dan Spesifikasi Bahan Bakar

1. Tipe reaktor: downdraft fixed-bed untuk meminimalkan tar dan mempermudah pemakaian domestik.
2. Komponen utama: hopper umpan sekam daun, reaktor berisolasi, inlet udara primer/sekunder, jalur gas keluar dengan kondensor/penjernih sederhana (filter partikel), outlet flare untuk uji, dan kompor adaptor untuk pemasakan. Rangka dasar dan bahan tahan panas dibuat agar mudah dipelihara dan direparasi di lapangan. Skematik dan daftar komponen teknis disusun sebagai panduan operasi. (Rujukan komponen proyek dan diagram tersedia pada dokumentasi teknis proyek).
3. Spesifikasi bahan bakar sekam daun tebu (kebutuhan operasional proyek): kadar air dikontrol 14 – 15%, ukuran partikel ≤ 3 mm atau dalam bentuk pelet bila berupa serbuk; kandungan abu perlu dipertimbangkan pada desain hopper/penanganan residu. Standar ini diambil dari pedoman praktik gasifikasi yang diadaptasi untuk sekam daun tebu (data lapangan proyek).

3.3 Prosedur Pengujian Dan Monitoring

1. Persiapan bahan bakar: Pengumpulan sekam daun tebu, pengeringan alami/sekunder sampai kadar air target, pencacahan dengan mesin crusher hingga ukuran ≤ 3 mm, pelletisasi bila perlu. Pengukuran kadar air dilakukan dengan moisture meter portable.
2. Instalasi & commissioning: Perakitan unit gasifier, pengecekan kebocoran udara, dan uji awal untuk menemukan setelan udara yang optimal. Perakitan unit gasifier dilakukan sesuai gambar kerja dan Bill of Materials (BOM) yang distandarisasi; pekerjaan mencakup pemasangan rangka, reaktor, hopper umpan, saluran udara primer/sekunder, kondensor/filter, serta adaptor kompor. Setelah perakitan selesai dilakukan serangkaian uji commissioning: pemeriksaan kebocoran udara (leak test) memakai larutan sabun dan/atau smoke test untuk mendeteksi celah, pengukuran tekanan dan pressure drop pada titik-titik kritis, serta kalibrasi dan pemasangan instrumen pengukuran (termostat/thermocouple, flowmeter gas, manometer, moisture meter). Uji awal dijalankan untuk menemukan setelan aliran udara primer dan sekunder yang optimal (mapping setpoint), dengan pemantauan profil suhu zonal, laju aliran gas, komposisi syngas spot-check (CO , H_2 , CH_4 jika tersedia gas analyzer), serta time-to-boil dan konsumsi sekam per sesi memasak sebagai verifikasi performa fungsional. Semua hasil commissioning dicatat dalam format log commissioning (waktu, parameter, operator, temuan, tindakan korektif), dan diverifikasi ulang setelah 24–72 jam operasi berkelanjutan untuk memastikan stabilitas setelan.
3. Uji operasional: Setiap rumah tangga demo menjalankan penggunaan memasak harian selama rentang waktu tertentuatat konsumsi bahan bakar sekam daun (kg), durasi memasak (jam), kestabilan nyala, frekuensi intervensi operator.
4. Pengukuran kinerja: Mengukur aliran gas, kemampuan memasak (mis. waktu didih air 3 L), konsumsi sekam daun per jam, estimasi energi efektif per kg sekam daun berdasarkan durasi dan beban kerja. Dari data proyek diambil angka acuan 1 kg sekam daun $\approx 0,77$ kWh, angka ini dipakai untuk menghitung ekivalensi energi praktis.
5. Aspek sosial: Survei kualitatif terhadap penerima manfaat (kepuasan, hambatan operasional, kesiapan adopsi), serta wawancara kelompok untuk menilai aspek ekonomi (potensi penghematan LPG).



Gambar 3. Proses Instalasi Alat Gasifikasi Oleh PT. Bumi Bersih Berenergi.

Kabupaten Malang punya potensi sekam daun tebu besar (puluhan ribu ton/tahun) yang belum dimanfaatkan secara optimal; itu peluang sekaligus masalah logistik dan lingkungan (pembakaran terbuka). Struktur petani lokal (banyak petani gurem, jumlah UTP besar, masalah regenerasi) membuat strategi

individual tidak efektif; solusi berbasis komunitas, agregasi bahan baku, dan dukungan finansial/pelatihan adalah syarat mutlak agar gasifikasi sekam daun tebu benar-benar menjadi alternatif LPG yang layak. Proyek/peka kebijakan harus memadukan teknologi (gasifier + pra-proses), organisasi (koperasi/UPT), dan pembiayaan (hibah/subsidi/kredit mikro) karena masalahnya bukan hanya teknis, melainkan struktural.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sekam daun tebu adalah residu yang mudah diperoleh di wilayah agraris; densitas energi per massa rendah dibandingkan bahan fosil namun ketersediaan dan biaya hampir nol menjadikannya opsi strategis. Sekam daun memiliki karakteristik abu yang relatif tinggi ini memengaruhi desain hopper dan kebutuhan penanganan residu. Desain unit harus menampung dan memudahkan pengeluaran abu agar tidak menyumbat aliran. Dokumentasi teknis proyek merekomendasikan area penampungan abu dan prosedur pembersihan rutin.

Angka ekivalensi ($1 \text{ kg LPG} \approx 3,81 \text{ kg sekam daun}$) yang digunakan proyek adalah hasil pengukuran lapangan ia merefleksikan energi efektif yang tersedia untuk memasak dari satuan massa sekam daun dalam sistem gasifier yang dipakai, bukan LHV teoretis bahan. Ini penting: sistem gasifikasi mengandung kehilangan energi (panas, tar, incomplete combustion) sehingga ekivalensi operasional biasanya lebih rendah daripada perbandingan energi mentah. Kita harus jujur: pembaca dan pembuat kebijakan perlu memahami bahwa angka-angka proyek ini berbasis operasional dan akan bervariasi jika desain gasifier, kualitas bahan bakar, atau cara penggunaan berubah. Dokumentasi proyek menggarisbawahi hal ini dan merekomendasikan pengukuran ulang bila desain diadaptasi.



Gambar 3. Operasional Alat Gasifikasi Oleh PT. Bumi Bersih Berenergi.

4.1 Data operasional utama

Berdasarkan monitoring lapangan selama periode uji, proyek mencatat angka-angka berikut sebagai nilai operasional (basis: kondisi pengoperasian unit di Desa Bulu Lawang) :

1. 1 kg sekam daun tebu mampu menghasilkan $\sim 0,77 \text{ kWh}$ energi efektif (nilai ini adalah nilai kerja yang diamati pada kondisi kompor-gasifier yang digunakan).

2. Rasio ekivalensi energi operasional yang dipakai proyek: 1 kg LPG $\approx$ 3,81 kg sekam daun tebu; oleh karena itu :
 - a) 3 kg LPG $\approx$ 11,42 kg sekam daun tebu.
 - b) 12 kg LPG $\approx$ 45,67 kg sekam daun tebu.

Perhitungan energi (verifikasi numerik) menunjukkan (angka di bawah dikalkulasikan dari data proyek: 1 kg sekam daun = 0,77 kWh; 1 kg LPG ekuivalen ke 3,81 kg sekam daun menurut data lapang)

1. Energi efektif yang dihasilkan oleh 3,81 kg sekam daun = $3,81 \times 0,77 \text{ kWh} = 2,9337 \text{ kWh} (\approx 2,93 \text{ kWh})$.
2. Energi dari 11,42 kg sekam daun (ekuivalen 3 kg LPG) = $11,42 \times 0,77 = 8,7934 \text{ kWh}$.
3. Energi dari 45,67 kg sekam daun (ekuivalen 12 kg LPG) = $45,67 \times 0,77 = 35,1659 \text{ kWh}$.

Nilai-nilai ekivalensi di atas adalah ekivalensi operasional berdasarkan kondisi pengoperasian unit gasifier proyek. Mereka tidak berarti sekam daun tebu memiliki energi intrinsik per kg yang sama dengan angka-angka literatur untuk LPG (energi kandungan LPG pada tabel baku berbeda), melainkan merupakan perbandingan energi efektif yang disalurkan pada beban memasak dalam kondisi unit dan prosedur pengujian proyek ini. Perbedaan ini timbul karena efisiensi sistem, kehilangan panas, kualitas gas (tar), dan cara penggunaan jadi jangan disamakan dengan nilai LHV/LHV teoritis bahan bakar mentah. Dokumen proyek menjelaskan prasyarat kualitas bahan bakar (kadar air, ukuran) yang memengaruhi angka ini.

Tabel 1. Ringkasan Performa saat Proses Operasional

Indikator	Nilai (basis lapang)
Energi efektif per 1 kg sekam daun	0,77 kWh.
Ekivalen 1 kg LPG	3,81 kg sekam daun.
Konsumsi sekam daun rata-rata per sesi memasak (keterangan: bergantung menu)	0,5 – 1,2 kg/sesi (observasi lapang)
Kestabilan nyala	Stabil selama 45 – 90 menit per pengisian hopper, tergantung ukuran umpan
Frekuensi pemeliharaan	Pembersihan tar & abu setiap 2 – 3 hari operasi intensif

4.2. Kualitas Gas Dan Isu Teknis

Gas dari unit downdraft menunjukkan komposisi sesuai harapan (H_2 dan CO dominan; CH_4 rendah). Komposisi kisaran umum untuk gasifikasi biomassa dicatat pada literatur: CO 15 – 30% dan H_2 10 – 20% (karakteristik ini tercantum dalam ringkasan teori proyek). Tantangan teknis utama yang diidentifikasi: fluktuasi kelembaban bahan bakar (menyebabkan stabilitas gas berubah), pembentukan tar saat umpan terlalu halus/kelembaban tinggi, dan penanganan abu/slag yang relatif tinggi pada sekam daun tebu. Oleh karena itu prosedur pengolahan umpan (pengeringan dan pencacahan seragam) sangat krusial.

Performa dan kualitas operasional gasifikasi sekam daun tebu dapat dijaga dengan prosedur berikut :

1. Menjaga kadar air sekam daun $\sim 14 - 15\%$ (pengeringan sebelum pengisian).
2. Ukuran seragam $\leq 3 \text{ mm}$ atau pelletisasi untuk meningkatkan densitas energi per volume dan waktu bakar lebih panjang.
3. Pengaturan aliran udara primer/sekunder agar temperatur zonal tercapai (pirolisis > gasifikasi > reduksi). Parameter suhu yang tipikal: pirolisis 150 – 900°C; oksidasi hasil pirolisis 900 – 1400°C; reduksi 600 – 900°C (rentang proses gasifikasi umum).
4. Sistem kondensasi dan filter sederhana untuk menurunkan tar masuk ke kompor pemasakan pada aplikasi pemanas/kompor, pembersihan gas bisa disederhanakan dibanding aplikasi mesin pembangkit listrik.

4.3. Dampak Sosial-Ekonomi Awal Saat Operasional

1. Penghematan LPG: Keluarga yang beralih sebagian ke gas sekam daun melaporkan penurunan pembelian LPG. Besaran penghematan moneter tergantung harga LPG waktu itu dan apakah keluarga memproses sekam daun sendiri. (Proyek tidak memasukkan perhitungan ekonomi berbasis harga pasar karena variabilitas harga, namun data konsumsi menunjukkan potensi pengurangan pembelian LPG).

2. Keterlibatan masyarakat: Tingkat partisipasi tinggi; warga mengumpulkan sekam daun, belajar menyiapkan bahan bakar, dan berbagi pengalaman operasional.
3. Peluang usaha: Adanya dorongan untuk layanan pengumpulan sekam daun, pembuatan pelet, dan jasa pemeliharaan unit gasifier.

4.4. Investasi dan Operasional

Perangkat gasifier memang memerlukan investasi awal dan keterampilan teknis untuk instalasi serta pemeliharaan, tetapi menyatakan itu saja tidak cukup — laporan pengabdian harus menyertakan analisis kuantitatif dan data eksperimen yang jelas agar rekomendasi pembiayaan dan replikasi dapat dipercaya. Oleh karena itu, selain menyebutkan opsi pembiayaan seperti kredit mikro atau hibah lokal, penulis wajib melampirkan perincian CAPEX (harga unit gasifier, instalasi, crusher/dryer/pelletizer jika ada, biaya pelatihan), OPEX tahunan (tenaga kerja pengumpulan sekam, listrik untuk pengolahan, suku cadang, kunjungan teknis), serta data operasional lapang yang mendasari asumsi-asumsi ekonomi.

Secara teknis dan eksperimental perlu disajikan data kuantitatif yang rinci: konsumsi sekam (kg) per sesi atau per jam, energi efektif per kg sekam (kWh/kg), durasi operasi per pengisian hopper, downtime, frekuensi dan jenis perawatan, moisture content sebelum dan sesudah pengeringan, distribusi ukuran partikel, kandungan abu, serta jika memungkinkan komposisi syngas (persentase CO, H₂, CH₄) dan pengukuran emisi (CO ppm, PM_{2.5}/PM₁₀). Data umur teknis komponen (lifetime liner reaktor, blower, valve), MTBF dan MTTR juga penting untuk memperkirakan biaya pemeliharaan jangka panjang. Di sisi sosial-ekonomi, lampirkan survei konsumsi LPG sebelum dan sesudah adopsi, biaya pengolahan sekam (jika ada), dan willingness-to-pay atau willingness-to-adopt pengguna. Untuk analisis harus dilakukan Techno-Economic Assessment (TEA) yang mencakup payback period, NPV, IRR, serta perhitungan cost per useful energy (Rp/kWh) dari sistem gasifier dibanding LPG. Sertakan sensitivity analysis terhadap variabel kritis (harga LPG, efisiensi gasifier, biaya tenaga kerja, ketersediaan sekam) dan scenario analysis (konservatif, realistis, optimis). Jelaskan juga asumsi-asumsi yang dipakai (tingkat diskonto, umur ekonomis, tarif listrik) dan tampilkan hasil dalam tabel dan grafik sehingga pemangku kepentingan bisa melihat risiko dan potensi pengembalian investasi secara transparan.

Dalam laporan lampirkan tabel CAPEX dan OPEX terperinci serta template perhitungan sederhana: misalnya Payback = CAPEX / Penghematan Tahunan, $NPV = \sum (Net\ Cash\ Flow_t / (1+r)^t) - CAPEX$, dan Cost per useful energy = (OPEX tahunan + depresiasi tahunan CAPEX) / Total kWh berguna tahunan. Juga cantumkan format tabel untuk log operasional (tanggal, konsumsi sekam, suhu zonal, laju aliran gas, temuan perawatan) dan checklist pemeliharaan sehingga data lapang terstandardisasi dan dapat dianalisis. Akhirnya, rekomendasikan protokol eksperimen praktis: uji ketahanan operasional (operasi 8 jam/hari selama ≥ 3 bulan) dengan replikasi di 2–3 lokasi bila mungkin; variasi bahan bakar (sekam kering 14–15% MC vs sekam basah vs pelet) untuk membandingkan efisiensi dan kestabilan; pemantauan emisi spot selama fase start-up, steady-state, dan shutdown; serta survei ekonomi rumah tangga 3 bulan sebelum dan 3 bulan setelah adopsi. Dengan menyajikan semua data dan analisis ini — lengkap dengan asumsi dan rentang ketidakpastian — rekomendasi pembiayaan, model bisnis, dan kebijakan akan menjadi kredibel dan dapat diimplementasikan.

Dengan model komunitas (1 unit gasifier + fasilitas pengolahan sekam) untuk 20 rumah tangga, menggunakan asumsi yang realistis dan dapat dipenuhi di lapangan (lihat bagian asumsi), proyek layak dan menguntungkan:

1. Payback period ≈ 1.4 tahun (investasi kembali dalam ~ 16 – 17 bulan).
2. Penghematan bersih tahunan $\approx$ Rp 21.9 juta untuk komunitas 20 rumah tangga.

Syarat utama: biaya pengolahan sekam $\leq$ Rp 800/kg (mungkin tercapai jika sekam dikumpulkan gratis/biaya tenaga rendah dan diproses secara komunitas), CAPEX dapat ditekan lewat fabrikasi lokal (sekitar Rp 30 juta), dan OPEX tahunan dijaga ringan ($\leq$ Rp 8–12 juta).

A. Skala Minimal

1. Unit pelayan komunitas: 20 rumah tangga.
2. Konsumsi LPG rata-rata rumah tangga: 12 kg/bulan = 144 kg/tahun.
3. Konversi lapang proyek: 1 kg LPG $\approx 3,81$ kg sekam; 1 kg sekam $\approx 0,77$ kWh (angka dari data proyek Anda).
4. CAPEX (investasi total komunitas, termasuk gasifier, crusher/dryer/pelletizer skala kecil, instalasi): Rp 30.000.000 (fabrikasi lokal + pemasangan).

5. OPEX tahunan (operasi & perawatan, tenaga kerja, suku cadang dll): Rp 8.000.000.
6. Energi listrik pemrosesan (dryer/crusher): $3.000 \text{ kWh/tahun} \times \text{Rp } 1.500/\text{kWh} = \text{Rp } 4.500.000$ (termasuk dalam OPEX di atas atau ditambahkan jika terpisah).
7. Biaya pengolahan sekam (biaya aktual yang dikeluarkan untuk menghasilkan sekam siap bakar/pellet): Rp 800/kg (target komunitas; bisa dicapai bila sekam dikumpulkan gratis/relatif murah dan tenaga kerja dipakai komunal).
8. Harga LPG rujukan: Rp 15.000/kg (silakan sesuaikan dengan harga lokal saat implementasi).
9. Periode analisis: 1 tahun (untuk cashflow tahunan), depreciation sederhana: CAPEX dibagi 10 tahun bila dihitung cost per kWh.

B. Perhitungan Operasional

1. Hitung kebutuhan total LPG & sekam untuk komunitas
 - a) Rumah tangga per tahun (per rumah): 144 kg LPG
 - b) Komunitas 20 rumah tangga, $\text{LPG_total} = 144 \times 20 = 2.880 \text{ kg LPG/tahun}$
 - c) Konversi: $\text{sekam_total} = \text{LPG_total} \times 3,81$
$$\rightarrow \text{sekam_total} = 2.880 \times 3,81 = 10.972,8 \text{ kg sekam/tahun } (\approx 10,97 \text{ ton/tahun})$$
2. Biaya tahunan: LPG vs sekam (operasional)
 - a) Biaya LPG tahunan = $\text{LPG_total} \times \text{harga_LPG} = 2.880 \text{ kg} \times \text{Rp } 15.000/\text{kg} = \text{Rp } 43.200.000 / \text{tahun}$
 - b) Biaya sekam tahunan = $\text{sekam_total} \times \text{harga_sekam} = 10.972,8 \text{ kg} \times \text{Rp } 800/\text{kg} = \text{Rp } 8.778.240 / \text{tahun}$
 - c) OPEX tambahan (pemrosesan listrik, tenaga, spare): Rp 8.000.000 / tahun (asumsi; bisa di-breakdown)
$$\text{Total biaya tahunan} = \text{biaya sekam} + \text{OPEX} = 8.778.240 + 8.000.000 = \text{Rp } 16.778.240 / \text{tahun}$$
3. Penghematan / net saving per tahun (komunitas)
$$\text{Penghematan tahunan (net)} = \text{biaya_LPG} - \text{total_biaya_sekam} = 43.200.000 - 16.778.240 = \text{Rp } 26.421.760 / \text{tahun}$$
4. Payback period (periode balik modal sederhana)
$$\text{Payback (tahun)} = \text{CAPEX} / \text{Penghematan tahunan} = 30.000.000 / 26.421.760 \approx 1.14 \text{ tahun}$$
5. Cost per useful energy (Rp/kWh berguna)
 - a) Total energi terbarukan tahunan dari sekam = $\text{sekam_total} \times 0.77 \text{ kWh/kg} = 10.972,8 \times 0.77 = 8.449,1 \text{ kWh/tahun}$
 - b) Cost per kWh = $(\text{Biaya sekam tahunan} + \text{OPEX} + \text{depresiasi tahunan CAPEX}) / \text{total_kWh}$
 - c) Depresiasi 10 tahun $\rightarrow \text{CAPEX}/10 = 3.000.000/\text{tahun}$
 - d) Cost per kWh $\approx (8.778.240 + 8.000.000 + 3.000.000) / 8.449,1 \approx \text{Rp } 2.873 / \text{kWh}$

Jika LPG menghasilkan ~2.93 kWh per kg dan harga LPG Rp 15.000/kg $\rightarrow$ cost per kWh LPG $\approx 15.000 / 2.93 \approx \text{Rp } 5.118 / \text{kWh}$. Jadi biaya energi terbarukan dari sekam jauh lebih murah dalam skenario ini.

4.5. Analisis Risiko Dan Kelemahan Operasional

Selain keberhasilan dan manfaat yang telah berdampak pada masyarakat tersebut, pelaksanaan pengabdian ini juga dianalisis terkait dengan risiko dan kelemahannya yaitu :

1. Kebutuhan pengolahan bahan bakar: Jika sekam daun tidak dikeringkan atau tidak tercacah seragam, proses tidak stabil $\rightarrow$ lebih banyak tar dan penurunan efisiensi. Dokumen proyek menekankan syarat kadar air 14 – 15% dan ukuran $\leq 3 \text{ mm}$ untuk operasi baik.
2. Aspek kesehatan & keselamatan: Syngas mengandung CO; ventilasi dan desain pembuangan/flare harus aman. Pelatihan safety menjadi komponen wajib.

4.5. Dampak Sosial, Lingkungan, dan Kesehatan

Dengan memanfaatkan sekam daun tebu sebagai bahan bakar terkelola, praktik pembakaran terbuka di ladang dapat menurun, sehingga menurunkan emisi partikulat dan polutan lokal. Gasifier dengan desain dan operasi baik menghasilkan syngas yang relatif bersih untuk pembakaran langsung di kompor; dokumentasi

proyek menegaskan bahwa gas yang dihasilkan tidak mengandung furan/dioksin berbahaya sebagaimana pada pembakaran sampah anorganik tertentu namun gas tetap mengandung CO sehingga manajemen ventilasi dan keselamatan penting. Abu dari sekam daun tebu dapat dimanfaatkan sebagai bahan pupuk atau pembenah tanah (setelah uji toksisitas dan pH), tergantung komposisi mineral. Pengolahan residu menjadi produk bernilai tambah menambah manfaat lingkungan-ekonomi.

V. KESIMPULAN

Kabupaten Malang punya potensi sekam padi besar (puluhan ribu ton/tahun) yang belum dimanfaatkan secara optimal sehingga menjadi peluang sekaligus masalah logistik dan lingkungan (pembakaran terbuka). Struktur petani lokal (banyak petani gurem, jumlah UTP besar, masalah regenerasi) membuat strategi individual tidak efektif; solusi berbasis komunitas, agregasi bahan baku, dan dukungan finansial/pelatihan adalah syarat mutlak agar gasifikasi sekam padi benar-benar menjadi alternatif LPG yang layak. Proyek/peka kebijakan harus memadukan teknologi (gasifier + pra-proses), organisasi (koperasi/UTP), dan pembiayaan (hibah/subsidi/kredit mikro) karena masalahnya bukan hanya teknis, melainkan struktural.

Secara teori, beberapa literatur menyebut potensi energi sekam padi pada LHV kering tertentu; namun energi efektif yang didapat pengguna rumah tangga bergantung pada: efisiensi gasifier, kehilangan panas, tar yang menahan energi, dan performa burner. Jika literatur menunjukkan gas yield dan LHV tertentu, nilai lapang sebesar $\sim 0,77$ kWh/kg sekam mencerminkan efisiensi sistem terintegrasi pada kondisi lokal (design sederhana, kualitas umpan, praktik operasi masyarakat). Dukungan data pelaksanaan dengan data operasional lapang dari program pengabdian menunjukkan angka ekuivalen operasional yang berguna untuk komunikasi ke masyarakat: 1 kg sekam $\approx 0,77$ kWh dan 1 kg LPG $\approx 3,81$ kg sekam (nilai ini berasal dari pengukuran lapang proyek dan mencerminkan energi efektif yang tersedia dalam kondisi sistem yang dipakai). Dari angka ini dapat disimpulkan bahwa—dalam kondisi unit demo dan dengan kualitas umpan yang memenuhi syarat (kadar air 14–15%, ukuran ≤ 3 mm)—sekam padi mampu memasok energi masak yang signifikan dan menurunkan kebutuhan LPG. Namun, kesimpulan ini harus dibaca sebagai temuan operasional untuk unit demo, bukan sebagai generalisasi teknologi tanpa syarat.

Berdasarkan perhitungan dan asumsi yang dipaparkan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa skema pengolahan sekam padi melalui unit gasifier komunitas untuk 20 rumah tangga layak dilakukan dan berpotensi menguntungkan secara ekonomi — dengan estimasi CAPEX sekitar Rp 30 juta, OPEX tahunan Rp 8 juta, biaya pengolahan sekam $\approx$ Rp 800/kg, serta kebutuhan sekam $\approx 10,97$ ton/tahun, proyek ini menghasilkan penghematan bersih sekitar Rp 26,4 juta per tahun dan perkiraan payback period singkat antara $\approx 1,1$ – $1,4$ tahun; secara energetik biaya energi berguna dari sekam tercatat $\approx$ Rp 2.873/kWh dibandingkan sekitar Rp 5.118/kWh untuk LPG pada asumsi harga Rp 15.000/kg. Namun, kesimpulan ini sensitif terhadap beberapa parameter kunci — terutama harga sekam, kualitas bahan bakar (kadar air 14–15% dan ukuran partikel ≤ 3 mm), CAPEX aktual, serta efisiensi operasi — sehingga keberhasilan nyata mengharuskan model komunitas yang mengamankan pasokan sekam murah, pengolahan efisien (penjemuran + pelletisasi/peneupangan bila perlu), pelatihan operator, dan monitoring biaya serta performa; tanpa pemenuhan kondisi-kondisi tersebut atau bila biaya sekam naik di atas kisaran yang diasumsikan, kelayakan ekonomi akan cepat menurun.

Pengolahan sekam padi melalui gasifikasi dapat menjadi alternatif praktis untuk mengurangi ketergantungan LPG pada skala komunitas di Kabupaten Malang, dengan syarat teknis dipenuhi (pengeringan, ukuran umpan, desain reaktor tepat). Proyek demo di Desa Watugede membuktikan bahwa unit gasifier downdraft dapat menyediakan gas yang memadai untuk memasak, dengan rasio praktis yang ditetapkan proyek: 1 kg LPG $\approx 3,81$ kg sekam padi (berdasarkan pengukuran operasional proyek) dan 1 kg sekam $\approx 0,77$ kWh. Keberhasilan adopsi bergantung pada konsistensi kualitas bahan bakar, ketersediaan dukungan teknis, dan model pembiayaan yang realistis. Rekomendasi teknis dan kebijakan yang dirangkum di bagian sebelumnya perlu diimplementasikan untuk replikasi yang aman dan efektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada PT. Bumi Bersih Berenergi atas peran serta dan komitmen luar biasa mereka sebagai inisiator sekaligus penyandang dana utama program pengabdian ini. Dukungan teknis maupun finansial dari PT. Bumi Bersih Berenergi terbukti sangat menentukan keberhasilan penerapan teknologi gasifikasi biomassa di Desa Bulu Lawang, Kecamatan Bulu Lawang, Kabupaten Malang.

DAFTAR PUSTAKA

- Cahyono, H. S., Saefudin, R., Carina, A., Kurniawan, E. Y., & Hidayat, W. N. (2025). EVALUASI KEPATUHAN LINGKUNGAN DAN STRATEGI PENGENDALIAN BERKELANJUTAN UNTUK BANGUNAN PABRIK SIGARET : STUDI KELAYAKAN BERBASIS REGULASI KKPR. *DEARSIP: Journal of Architecture and Civil*, 05(01), 1–13. <https://doi.org/2808-0947>
- Darsopuspito, L. N. dan S. (2012). Karakterisasi Proses Gasifikasi Biomassa Tempurung Kelapa Sistem Downdraft Kontinyu dengan Variasi Perbandingan Udara-Bahan Bakar (AFR) dan Ukuran Biomassa. *Karakterisasi Proses Gasifikasi Biomassa Tempurung Kelapa Sistem Downdraft Kontinyu Dengan Variasi Perbandingan Udara-Bahan Bakar (AFR) Dan Ukuran Biomassa*, 1(1), 12–15. <https://doi.org/ISSN: 2301-9271>
- Djafar, R., & Darise, F. (2018). Pengaruh Jumlah Aliran Udara Terhadap Nyala Api Efektif Dari Reaktor Gasifikasi Biomassa Tipe Fixed Bed Downdraft Menggunakan Bahan Bakar Tongkol Jagung. *Jurnal Technopreneur (JTech)*, 6(2), 94–100. <https://doi.org/10.30869/jtech.v6i2.211>
- Hafid Alwan. (2019). MODEL GASIFIKASI BIOMASSA MENGGUNAKAN PENDEKATAN KESETIMBANGAN TERMODINAMIKA STOIKIOMETRIS DALAM MEMPREDIKSI GAS PRODUSER. *Jurnal Integrasi Proses*, 8(1), 31–38.
- Icha Syahrotul Anam., Purwantana Bambang., & radi. (2022). KARAKTERISTIK PROSES GASIFIKASI TEMPURUNG KELAPA MENGGUNAKAN UPDRAFT GASIFIER TIPE HISAP. *Jurnal Teknologi Terapan*, 8(1), 34–42.
- Narega, S. O., Apriansyah Ysf, R., Aswan, A., Fatria, F., Erlinawati, E., & Hilwatullisan, H. (2022). Produksi Syngas Dari Proses Gasifikasi Biomassa Menggunakan Downdraft Gasifier Sebagai Gas Bakar Pada Motor Bakar Empat Tak. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 2(11), 469–474. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.245>
- Pujotomo, I. (2018). Potensi Pemanfaatan Biomassa Sekam Padi Untuk Pembangkit Listrik Melalui Teknologi Gasifikasi. *Energi & Kelistrikan*, 9(2), 126–135. <https://doi.org/10.33322/energi.v9i2.44>
- Pupung, P. La. (1987). Pemanfaatan Gas dari Gasifikasi Biomassa Sebagai Suatu Sumber Energi Alternatif. *LEMIGAS*, 2(1), 114–127.
- Ridwan, A., & Istana, B. (2018). ANALISIS PENGARUH VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA TERHADAP MAMPU NYALA DAN KANDUNGAN TAR PADA REAKTOR GASIFIKASI TIPE UPDRAFT. *Jurnal ENGINE*, 2(1), 7–17. <https://doi.org/e-ISSN 2579-7433 ANALISIS>
- Ridwan, M., Indradjaja, I., Nugraha, N., & Taufik, I. (2018). Pengujian Kinerja Dan Modifikasi Reaktor Downdraft Gasifikasi Biomassa 100 kW. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 2(2), 157–164. <https://doi.org/10.26760/jrh.v2i2.2394>
- Saputro, M. A., Syamsiro, M., Megaprastio, B., & Laksana, F. F. (2023). Kajian Teknologi Gasifikasi Biomassa/Sampah Untuk Produksi Syngas Dan Listrik Berkelanjutan. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 11(2), 122–129. <https://doi.org/10.47662/alulum.v11i2.461>
- Sukardin, M. S., Dahlan, M., Tondok, R. S., & Sulfikar, M. (2023). Studi Efisiensi Kerja Reaktor Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Dengan Variasi Udara Penggasifikasi. *Teknologi Industri*, 20(1), 374–379. <https://doi.org/e-ISSN 2964-1896>
- Zahro, F., Budiyanto, M., & Ilhami, F. B. (2023). Potensi Biomassa Gasifikasi:Alternatif Berkelanjutan Dalam Menghasilkan Energi Listrik Untuk Masa Depan. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, 25(2), 103–115. <https://doi.org/10.24912/tesla.v25i2.23804>
- Zainuddin, M., Fujiaman, M., Mariani, D., & Aswalatah, M. (2017). Analisis Efisiensi Gasifikasi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM) Tongkol Jagung Kapasitas 500 KW di Kabupaten Gorontalo Muammar. *Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri*, 14(2), 192–198. <http://ejournal.uin-suska.ac.id/index.php/sitekin/article/view/3924>