

**RENEWABLE ENERGY POTENTIAL FROM AGRICULTURAL BIOMASS IN
JOMBANG REGENCY****POTENSI ENERGI TERBARUKAN DARI BIOMASSA PERTANIAN DI
KABUPATEN JOMBANG****Frida Maslikhah*, Ida Bagus Wayan Gunam, I Gusti Ayu Lani Triani**Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Kampus
Bukit Jimbaran, Badung, Indonesia

Diterima 31 Mei 2026 / Disetujui 3 Juli 2026

ABSTRACT

The utilization of biomass for renewable energy production is one of solutions that increased the renewable energy mix and promoted sustainable agricultural production. Jombang regency produced main agricultural commodities, including: rice, corn, soybeans, coffee, sugarcane, and tobacco. Agricultural extensification efforts through the land optimization program (OPLAH) in this region are targeted to increase agricultural production by 2025. Increasing agricultural production will linearly increase the amount of biomass of commodities. Therefore, it is necessary to measure the energy potential of biomass by analyzing biomass availability calculated based on the amount of agricultural products and the availability of unutilized biomass with consideration of its use as animal feed. The potential energy is determined by the heating value of each type biomass. The objective of this study was to measure the potential of unutilized biomass from agricultural activities in Jombang Regency. The results in statistical analysis approach indicated that unutilized agricultural biomass was 861.123,75 tons annually, with the largest share compromised by corn stalks (40,21%) and rice straw (25,65%). The potential energy yield was 14.954.923,91 GJ/year. The potential developing biomass for energy production can contribute advancing the development of renewable energy and indirectly reduce greenhouse gas (GHG) emissions from fossil fuel combustion.

Keywords: bioenergy potential; renewable energy; agricultural biomass; waste-to-energy; total heating value.

ABSTRAK

Pemanfaatan biomassa untuk kebutuhan produksi energi terbarukan merupakan salah satu solusi dalam meningkatkan bauran energi baru terbarukan dan produksi pertanian yang berkelanjutan. Kabupaten Jombang menghasilkan komoditas unggulan seperti: padi, jagung, kedelai, kopi, tebu, dan tembakau. Upaya ekstensifikasi pertanian melalui program optimalisasi lahan (OPLAH) di daerah ini ditargetkan meningkatkan produksi pertanian pada tahun 2025. Peningkatan produksi pertanian secara linier akan meningkatkan jumlah biomassa komoditas tersebut. Oleh karena itu, perlu pengukuran potensi energi dari biomassa dengan analisis ketersediaan biomassa yang dihitung berdasarkan jumlah produk pertanian dan ketersediaan biomassa yang belum dimanfaatkan dengan pertimbangan penggunaannya sebagai pakan ternak. Potensi energi ditentukan berdasarkan nilai kalor setiap jenis biomassa. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengukur potensi biomassa yang belum dimanfaatkan dari kegiatan pertanian di Kabupaten Jombang. Hasil dari pendekatan analisis statistik menunjukkan bahwa biomassa pertanian yang belum dimanfaatkan sebesar 861.123,75 ton per tahun dengan ketersediaan paling besar pada batang jagung (40,21%) dan jerami padi (25,65%). Potensi energi yang

*Korespondensi Penulis :
Email: frida@unud.ac.id

dihasilkan sebesar 14.954.923,91 GJ/tahun. Potensi pengembangan biomassa untuk produksi energi turut berkontribusi dalam pengembangan energi terbarukan dan secara tidak langsung mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dari pembakaran energi fosil.

Kata kunci: potensi bioenergi; energi terbarukan; biomassa pertanian; *waste-to-energy*; *total heating value*.

PENDAHULUAN

Sebagai negara agraris besar dengan luasan lahan pertanian 62,3 juta Ha, aktivitas produksi tanaman pertanian di Indonesia menghasilkan limbah dengan jumlah sangat melimpah setiap tahun yang belum memanfaatkan secara optimal (Surono *at al.*, 2023). Disisi lain, terjadi peningkatan permintaan energi secara eksponensial karena pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi (Amertet *at al.*, 2021). Ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil, (batubara 38,5%; minyak bumi 32,8%; gas 17,4%) dan hanya 11,3% yang bersumber dari energi terbarukan (seperti: geotermal, air, angin, matahari, bioful, dan biogas), akan semakin mempercepat perubahan iklim akibat peningkatan emisi dari pembakaran bahan bakar fosil (Pambudi *at al.*, 2023). Pada saat yang sama, biomassa pertanian tersedia melimpah dan diperkirakan jumlahnya akan meningkat seiring penerapan kebijakan ekstensifikasi lahan pertanian dan pengurangan impor pangan pokok (beras, jagung, gula) dengan target swasembada pangan tahun 2029 (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2025). Komitmen Indonesia untuk mencapai penurunan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebesar 31,89% pada tahun 2030 perlu didukung dengan pengembangan energi terbarukan, salah satunya berbasis biomassa (Rhofita *at al.*, 2022a; Fatonah *at al.*, 2025).

Biomassa pertanian dapat dikategorikan menjadi dua kategori, yaitu: residu biomassa tanaman (dihasilkan selama panen) dan agroindustri (dihasilkan proses pasca panen) (Illankoon *at al.*, 2023; Surono *at al.*, 2023). Biomassa pertanian semakin menarik untuk dikembangkan melalui pemanfaatannya sebagai sumber energi terbarukan (Surono *at al.*, 2023). Namun, sebagian besar petani masih menerapkan metode konvensional dalam menangani residu tersebut, seperti pembakaran terbuka (*open burning*) secara langsung di lahan pertanian. Pengelolaan ini tidak hanya membuang potensi energi yang terkandung di dalam biomassa, namun juga memicu polusi udara lokal (Illankoon *at al.*, 2023). Lebih lanjut, konversi biomassa pertanian menjadi energi terbarukan mampu memberikan manfaat secara ekonomi dan lingkungan tanpa harus mengganggu kebutuhan pasokan pangan (Fitri *at al.*, 2023).

Pemanfaatan biomassa pertanian telah lama dikembangkan di berbagai negara diantaranya, untuk produksi listrik di pabrik gula menggunakan kombinasi bahan baku bagas tebu dan jerami padi (Alves *at al.*, 2015). Studi pemanfaatan biomassa pertanian untuk memproduksi biopellet sebagai bahan bakar guna menghasilkan energi listrik di wilayah Jawa dan Sumatera (Ahmudi *at al.*, 2024). Studi mengenai potensi energi telah dilakukan di tingkat ASEAN (*Association of Southeast Asian Nations*) dengan memanfaatkan biomassa tidak hanya dari pertanian namun juga biomassa hutan untuk menghitung potensi energi yang dapat dimanfaatkan pada masing-masing negara. Surono *at al.*, (2023) melakukan studi mengenai potensi energi berbahan baku biomassa tanaman pangan di Indonesia. Sementara, Papilo *at al.*, (2018) dan Fitri *at al.*, (2023) telah melakukan studi potensi energi biomassa pertanian secara berturut-turut di Provinsi Riau dan Nusa Tenggara Barat.

Provinsi Jawa Timur merupakan salah satu pusat lumbung pangan utama nasional, sehingga akumulasi biomassa pertanian terkonsentrasi di wilayah tersebut (Rhofita *at al.*, 2022b). Di tingkat regional, Kabupaten Jombang memiliki posisi geografis dan ekologis yang sangat penting karena didominasi oleh sektor pertanian multi-komoditas produktif, seperti: padi, jagung, kedelai, kopi, tebu, dan tembakau (Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang, 2025a). Wilayah ini masuk dalam 10 besar

daerah penghasil tanaman pangan, seperti padi dan jagung, di Jawa Timur. Upaya ekstensifikasi pertanian melalui program optimalisasi lahan (OPLAH) pada tahun 2025 di daerah ini ditargetkan mencapai 3.311 Ha. Namun, kurangnya pengelolaan biomassa pertanian yang terintegrasi di Jombang dapat memicu degradasi lingkungan, sehingga studi mengenai potensi energi terbarukan di Kabupaten Jombang penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung potensi energi biomassa pertanian di Kabupaten Jombang dengan mengadopsi pendekatan kuantitatif analitis berbasis data statistik. Perhitungan dilakukan untuk memperkirakan ketersediaan biomassa pertanian, selanjutnya dapat dihitung nilai potensi energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Kabupaten Jombang terdiri dari 21 Kecamatan dengan luas wilayah 11.159,50 km². Wilayah kabupaten Jombang secara geografis berada pada sisi selatan garis khatulistiwa 112° 03' 46" sampai 112° 27' 21" Bujur Timur dan 07° 20' 48" sampai dengan 07° 46' 41" Lintang Selatan (Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang, 2025b). Wilayah ini merupakan 10 besar penghasil tanaman pangan, seperti padi dan jagung, di Jawa Timur. Dinas Pertanian Kabupaten Jombang menargetkan program ekstensifikasi pertanian melalui optimalisasi lahan (OPLAH) untuk lahan kurang produktif pada tahun 2025 mencapai 3.311 Ha. Kurangnya pemanfaatan biomassa pertanian pada wilayah ini turut menyebabkan pencemaran lingkungan, sehingga Kabupaten Jombang dipilih sebagai lokasi penelitian. Penelitian ini dilaksanakan pada 23 Maret - 26 April 2026.

Alat dan Bahan

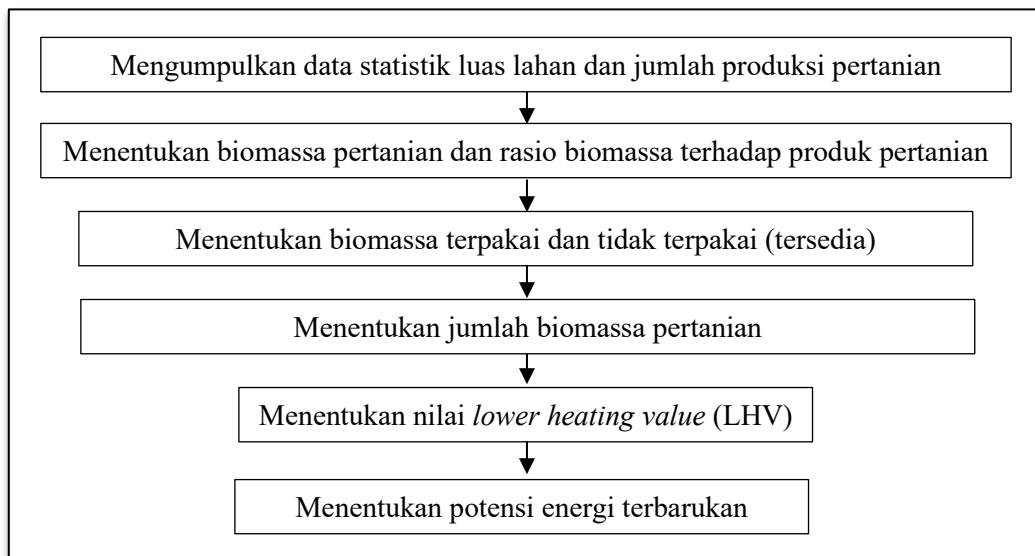
Penelitian ini menggunakan data statistik pertanian Kabupaten Jombang yang diperoleh melalui berbagai sumber otoritas resmi, meliputi: data produksi tanaman pertanian dan luas lahan pertanian (Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang, 2025a) dan data nilai parameter konversi biomassa yang diperoleh dari artikel ilmiah terkait. Perhitungan statistik berbasis persamaan matematika fungsional digunakan sebagai alat kalkulasi potensi biomassa pada 21 kecamatan di Kabupaten Jombang.

Metode Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif analitis berbasis data statistik. Penelitian dikerjakan dengan mengadopsi metode penelitian sebelumnya (Karaca *at al.*, 2017; Fitri *at al.*, 2023). Tahapan penelitian dimulai dengan mengumpulkan data luas lahan dan produksi pertanian. Kemudian menentukan jenis biomassa pertanian dan rasio biomassa terhadap produk pertanian dengan sumber penelitian terdahulu. Setelah itu, menentukan jumlah konsumsi biomassa yang belum termanfaatkan dengan menggunakan data penelitian sebelumnya dikarenakan keterbatasan data pemanfaatan biomassa regional di Kabupaten Jombang untuk pakan ternak, pupuk, dan lainnya (contoh: media tanam, bahan bakar, dsb.). Sehingga, dapat dihitung jumlah biomassa pertanian menggunakan persamaan (1). Terakhir, melakukan konversi jumlah biomassa tersedia menjadi nilai potensi energi terbarukan dengan menggunakan nilai *lower heating value* (LHV).

Penelitian ini menganalisis potensi energi terbarukan yang berasal dari biomassa pertanian berupa residu tanaman pertanian di Kabupaten Jombang (seperti: padi, jagung, kedelai) dan tanaman perkebunan (seperti: kopi, tebu dan tembakau). Pengumpulan data dalam penelitian dilakukan menggunakan data yang telah dipublikasikan oleh beberapa sumber terkait, diantaranya adalah Badan Pusat Statistik (BPS), Kementerian Pertanian, Pemerintah Daerah Provinsi Jawa Timur, dan artikel jurnal. Tahapan penelitian diadopsi dari penelitian Karaca *at al.*, (2017) dan Fitri *at al.*, (2023) seperti

ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Analisis Data

Ketersediaan Biomassa Pertanian

Potensi energi teoritis dihitung berdasarkan ketersediaan bahan baku biomassa dengan memanfaatkan data statistik, meliputi: luas lahan pertanian, jumlah produksi tanaman pertanian. Nilai tersebut kemudian dikonversi untuk menentukan potensi ketersediaan biomassa pertanian melalui data rasio biomassa terhadap produk dan presentase ketersediaan biomassa. Pertimbangan terkait penggunaan sebagian jerami padi sebagai pakan ternak dimasukkan karena diidentifikasi selama penelitian terdapat pemanfaatan tersebut. Potensi ketersediaan biomassa pertanian dihitung berdasarkan persamaan (1) menurut Karaca *at al.*, (2017) dengan data jumlah produk pertanian dan ketersediaan biomassa yang belum terserap pemanfaatannya. Sehingga, melalui data yang diperoleh dapat ditentukan nilai jumlah biomassa pertanian (AAR).

$$AAR_i = AAP_i \times RPR_i \times A_i \quad (1)$$

Dimana, AAR adalah jumlah biomassa pertanian contohnya: jerami padi, sekam padi, bagas tebu yang tersedia untuk tanaman tertentu i (ton). AAP adalah total jumlah produk pertanian (ton). RPR adalah rasio biomassa terhadap produk yang diperoleh dari total biomassa dibagi dengan total produk pertanian. A adalah presentase ketersediaan biomassa yang merupakan jumlah biomassa tidak terpakai (%).

Potensi Energi Terbarukan

Perhitungan potensi energi terbarukan dapat dilakukan setelah diperoleh nilai ketersediaan biomassa tanaman pertanian (Gambar 1). Potensi energi teoritis dalam biomassa dapat dihitung menurut Karaca *at al.*, (2017), dengan perkalian antara jumlah biomassa pertanian (ton) dan nilai *lower heating value* (LHV) dari masing-masing jenis biomassa, dimana konversi energi dinyatakan sebagai hasil pemanasan biomassa. Perhitungan nilai kalor total dilakukan melalui persamaan (2).

$$THV_i = AAR_i \times LHV_i \quad (2)$$

Dimana, *total heating value* (THV) adalah nilai kalor total biomassa pertanian (GJ). LHV merupakan nilai kalor bawah biomassa (MJ/kg). Menurut Fitri *at al.*, (2023), nilai kalor menjadi salah satu pertimbangan penting dalam perhitungan jumlah potensi energi yang dihasilkan oleh masing-masing jenis biomassa. Artinya, nilai LHV yang lebih tinggi berpotensi untuk menghasilkan alternatif sumber energi terbarukan yang lebih besar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketersediaan Biomassa Pertanian

Potensi biomassa pertanian di Kabupaten Jombang bersumber dari tanaman pertanian (padi, jagung, kedelai) dan tanaman perkebunan (kopi, tebu, tembakau) dengan sebaran ketersediaan untuk masing-masing Kecamatan ditunjukkan pada Tabel 1. Tingkat produksi setiap komoditas beragam untuk 21 Kecamatan karena perbedaan kondisi geografis. Sehingga, setiap wilayah Kecamatan memiliki komoditas pertanian unggulan yang berbeda. Produksi padi dan jagung tersebar merata pada seluruh wilayah Jombang. Produksi padi tertinggi dihasilkan di Mojowarno, sedangkan hasil panen jagung banyak terdapat di Mojowarno dan Bareng. Berbeda dengan padi dan jagung yang memiliki tingkat sebaran merata, produksi kedelai, kopi, dan tembakau hanya ada di beberapa wilayah. Wilayah Tembelang diikuti Sumobito dominan sebagai penghasil kedelai, sedangkan Wonosalam menghasilkan komoditas unggulan kopi dengan 96,46% total produksi berasal dari satu wilayah tersebut. Wilayah penghasil tebu paling tinggi adalah Bareng dengan total produksi mencapai 29,52%. Wilayah Kabuh (37,14%), Kudu (25,61%), dan Ploso (22,59%) memiliki tingkat produksi komoditas tembakau dominan dari lima wilayah penghasil yang ada di Kabupaten Jombang (Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang, 2025a).

Studi mengenai biomassa (Mofijur *at al.*, 2019; Gani *at al.*, 2023; Rathour *at al.*, 2023; Nacua dan Lacang, 2024) melaporkan bahwa petani di banyak wilayah ASEAN, termasuk Indonesia, memiliki kebiasaan membakar jerami padi di ladang. Kegiatan pengumpulan dan transportasi menjadi beban biaya tambahan sehingga sebagian besar petani membakar biomassa pertanian (Nacua and Lacang, 2024). Kondisi tersebut turut menyumbang pada peningkatan emisi GRK akibat pelepasan CO₂ ke lingkungan (Rathour *at al.*, 2023; Nacua dan Lacang, 2024) dan kehilangan potensi energi yang dapat dimanfaatkan (Mofijur *at al.*, 2019). Selain membiarkan biomassa jerami di lahan pertanian dan membakarnya, terdapat pemanfaatan lain seperti pakan ternak dan pupuk (Fitri *at al.*, 2023).

Biomassa adalah istilah yang digunakan untuk menyebut bahan organik yang berasal dari tumbuhan dan hewan, seperti limbah pertanian dan peternakan, yang memiliki sifat dapat diperbaharui (Gani *at al.*, 2023). Sifat biomassa sebagai sumber daya terbarukan dengan ketersediaan yang melimpah (Tabel 3) untuk biomassa jagung, padi, dan lainnya menjadikannya sebagai bahan baku potensial untuk menghasilkan energi terbarukan. Lebih jauh, Gani *at al.*, (2023) menyatakan bahwa jumlah biomassa dengan jumlah melimpah di Indonesia yang dimanfaatkan sebagai *biocoke* dapat memitigasi emisi GRK, menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil hingga mendukung pengembangan keberlanjutan pada bidang energi. Beberapa pembawa energi (seperti: *bio-oil*, *biodiesel*, *syngas*, *biochar*) dapat dihasilkan melalui pemanfaatan biomassa. Teknologi konversi biomassa menjadi energi dapat dikategorikan dalam konversi biokimia dan termokimia (terdiri atas: pirolisis, torefikasi, gasifikasi, pembakaran) (Bisen *at al.*, 2025). Pada teknologi biokimia melalui fermentasi *anaerobic digestion* (AD) untuk menghasilkan biogas dilaporkan pada beberapa studi (Sawyerr *at al.*, 2020; Lantasi *at al.*, 2020, 2021; Alengebawy *at al.*, 2024). Selain itu, pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku dalam menghasilkan energi listrik juga penting untuk

Tabel 1. Sebaran ketersediaan biomassa pertanian di Kabupaten Jombang

Kecamatan	Biomassa (Ton/Tahun)								
	Padi		Jagung		Batang Kedelai	Sekam Kopi	Tebu		Tangkai Tembakau
	Jerami	Sekam	Tongkol	Tangkai			Bagas	Pucuk dan daun	
Bandar Kedung Mulyo	13.471,51	1.173,32	2.254,51	12.328,72	-	-	59,25	270,58	-
Perak	12.374,60	1.077,79	974,42	5.328,57	-	-	174,15	795,29	-
Gudo	13.608,06	1.185,22	3.443,75	18.832,03	-	-	300,45	1.372,06	-
Diwek	12.433,98	1.082,96	3.857,76	21.096,02	-	-	631,80	2.885,22	-
Ngoro	15.629,11	1.361,24	4.982,99	27.249,33	-	-	576,75	2.633,83	-
Mojowarno	21.167,54	1.843,62	7.005,58	38.309,77	-	-	267,90	1.223,41	-
Bareng	10.581,76	921,64	7.234,56	39.561,96	-	12,70	1.829,40	8.354,26	-
Wonosalam	428,99	37,36	6.094,62	33.328,19	-	345,89	183,75	839,13	-
Mojoagung	8.498,61	740,20	4.012,07	21.939,87	8,02	-	578,70	2.642,73	-
Sumobito	14.357,81	1.250,52	4.063,75	22.222,49	1.088,04	-	385,65	1.761,14	-
Jogoroto	5.811,19	506,14	4.305,98	23.547,09	-	-	210,45	961,06	-
Peterongan	9.511,89	828,46	3.271,05	17.887,62	314,11	-	65,10	297,29	-
Jombang	9.321,63	811,88	1.862,95	10.187,45	-	-	38,10	173,99	-
Megaluh	11.607,24	1.010,95	60,69	331,90	-	-	-	-	-
Tembelang	13.477,66	1.173,86	1.272,00	6.955,91	1.536,54	-	12,30	56,17	-
Kesamben	14.167,15	1.233,91	2.302,33	12.590,22	733,71	-	386,10	1.763,19	-
Kudu	4.660,76	405,94	893,86	4.888,04	308,71	-	128,85	588,42	44.122,21
Ngusikan	4.542,07	395,60	2.704,20	14.787,83	351,44	-	309,45	1.413,16	4.810,84
Ploso	6.420,72	559,22	145,67	796,57	2,63	-	14,25	65,08	38.913,13
Kabuh	9.296,03	809,65	1.712,31	9.363,72	-	-	25,50	116,45	63.991,10
Plandaan	9.485,21	826,13	861,49	4.711,02	-	-	18,75	85,63	20.439,96

Sumber: Data olahan, 2026.

mempertimbangkan desain rantai pasok biomassa yang efektif dan efisien (Ahmudi *at al.*, 2025).

Pemanfaatan biomassa pertanian sebagai bahan baku energi terbarukan tidak mengganggu ketahanan pangan (*food security*) dan menekan deforestasi untuk kebutuhan budidaya tanaman bioenergi (Alengebawy *at al.*, 2024). Sehingga, kebutuhan untuk memahami potensi biomassa pertanian dan teknologi konversinya menjadi energi terbarukan penting untuk menjadi pertimbangan pemerintah setempat dalam upaya pemanfaatan optimal berdasarkan karakteristik regional. Selain nilai kalor, karakteristik proksimat, dan unsur biomassa penting untuk menjadi perhatian. Karakteristik proksimat energi digunakan untuk mengetahui kandungan kelembaban, zat mudah menguap, karbon tetap, dan kadar abu. Sedangkan karakteristik unsur berfungsi dalam penentuan komposisi unsur C (karbon), H (hidrogen), O (oksigen), N (nitrogen), dan S (sulfur) dalam bahan baku. Sehingga, dapat dilakukan penentuan pra-perlakuan untuk masing-masing bahan baku biomassa sebelum dimanfaatkan sebagai bioenergi (Surono *at al.*, 2023).

Padi

Biomassa tanaman padi berupa jerami dan sekam padi. Kandungan zat volatil atau mudah menguap pada biomassa yang tinggi penting karena menyatakan biomassa memiliki laju pembakaran relatif tinggi, sebagai contohnya pada jerami padi nilainya sebesar 53,56%. Sehingga, sangat baik untuk bahan baku produksi minyak melalui *pyrolysis* atau *syngas* dengan metode gasifikasi (Surono *at al.*, 2023). Jerami padi sebagian besar dibiarkan atau dibakar di lahan pertanian atau dimanfaatkan sebagai pakan ternak. Sekam padi telah diperdagangkan dan memiliki akses pasar yang lebih baik melalui pengumpulan di tempat penggilingan padi. Mayoritas sekam padi langsung terserap di lokasi penggilingan padi sebagai energi untuk menghasilkan panas dalam pembuatan genteng dan bata merah lokal serta dimanfaatkan juga sebagai media tanam oleh pelaku usaha tanaman hias. Mofijur *at al.*, (2019) menyatakan bahwa sekam padi tidak membutuhkan pra-perlakuan untuk dimanfaatkan dalam menghasilkan energi panas atau listrik karena memiliki kadar air rendah dan kadar abu tinggi. Jerami dan sekam padi secara berurutan tersusun atas: hemiselulosa (35,7% dan 28,6%); selulosa (32% dan 28,6%); dan lignin (22,3% dan 24,3%). Studi dari Lantasi *at al.*, (2021) menyatakan bahwa kandungan lignoselulosa pada biomassa dapat menjadi faktor pendukung serta penghambat dalam produksi energi, karena struktur kimia ikatan lignin yang mengelilingi hemiselulosa dan selulosa adalah ikatan kuat akibatnya membutuhkan proses pra-perlakuan guna memecah ikatan lignin sehingga dapat mempercepat proses kimia, misalnya dalam peningkatan produksi biogas dengan aplikasi pra-perlakuan NaOH.

Jagung

Jagung memiliki angka ketersediaan yang tinggi baik pada tongkol jagung maupun batang jagung karena minimnya pemanfaatan, beberapa diantaranya digunakan untuk pakan ternak (Tabel 2). Menurut Surono *at al.*, (2023), nilai kalor penting dalam penentuan potensi biomassa untuk produksi bioenergi, dimana paling banyak dipengaruhi oleh nilai karbon tetap biomassa dengan kolerasi positif. Biomassa jagung memiliki nilai karbon tetap lebih besar dibandingkan padi, akibatnya nilai kalor biomassa jagung menunjukkan angka yang lebih besar seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Total energi lebih besar dapat dihasilkan dari biomassa dengan nilai kalor rendah melalui peningkatan jumlah bahan baku biomassa yang digunakan. Namun, permasalahan penyimpanan yang tidak dapat terlalu lama karena proses dekomposisi biomassa dan transportasi kerap menjadi isu dalam pemanfaatannya. Teknologi *torrefaction* dan densifikasi dapat menjadi salah satu opsi, seperti pada studi Ahmudi *at al.*, (2025) yang mengubah biomassa menjadi biopelet dan studi Siregar *at al.*, (2020) yang mengubah sekam padi menjadi biobriket untuk kebutuhan pembangkit listrik.

Kedelai

Batang kedelai adalah biomassa komoditas kedelai yang biasanya dibuang dan dibakar. Komposisi unsur C, H, O, N, dan S pada biomassa sangat berpengaruh pada proses pembakaran dan emisi gas buang. Nilai nitrogen dan sulfur pada sebagian besar biomassa tanaman pangan adalah <1% sehingga relatif aman dimanfaatkan karena gas buang NO_x dan Sox yang rendah (Suroño *at al.*, 2023). Nilai kalor batang kedelai paling tinggi (19,40 MJ/kg) karena kandungan karbon (41,95%) dan hidrogen (48,43%) yang tinggi sehingga energi yang dihasilkan selama pembakaran biomassa akan tinggi (Suroño *at al.*, 2023).

Kopi

Sekam kopi belum secara optimal dimanfaatkan dan hanya ditumpuk di kebun (Murda *at al.*, 2026) atau digunakan sebagai pupuk (Fitri *at al.*, 2023). Potensi nilai kalor sekam kopi yang lebih tinggi dibandingkan biomassa padi terlalu berharga untuk dibuang tanpa adanya pemanfaatan. Studi pemanfaatan sekam kopi menjadi biopellet pakan ternak dan bioenergi telah dilakukan oleh Murda *at al.*, (2026). Kegiatan sosialisasi pemanfaatan sekam kopi meningkatkan kesadaran masyarakat akan potensi ekonomi biomassa kopi.

Tebu

Biomassa komoditas tebu berupa bagas tebu telah dimanfaatkan oleh banyak pabrik gula di Indonesia guna menghasilkan energi melalui pembakaran pada boiler, sedangkan pucuk dan daun hingga saat ini masih minim pemanfaatan dan hanya ditinggalkan di lahan pertanian. Namun, tingkat pemanfaatan bagas saat ini belum optimal, masih terdapat ruang untuk pengembangan melalui produksi listrik. Hal ini sejalan dengan studi dari Alves *at al.*, (2015) yang mengintegrasikan pemanfaatan bagas tebu dan jerami padi untuk menghasilkan energi listrik. Pemanfaatan lain dalam bentuk briobriket dilakukan pada studi Putri *at al.*, (2023) menggunakan bahan baku bagas tebu dan sekam padi yang menghasilkan nilai kalor >15 MJ/kg.

Tabel 2. Ketersediaan biomassa, rasio biomassa terhadap produk, dan nilai kalor bawah pada biomassa pertanian di Kabupaten Jombang

Tanaman	Biomassa	A (%)	RPR	LHV (MJ/kg)	Sumber
Padi	Jerami	62,00	0,80	16,70	(Fatkhurohman <i>at al.</i> , 2022; Fitri <i>at al.</i> , 2023)
	Sekam	16,00	0,27	13,00	(Karaca <i>at al.</i> , 2017)
Jagung	Tongkol jagung	88,25	0,30	18,40	(Papilo <i>at al.</i> , 2018; Fitri <i>at al.</i> , 2023)
	Batang	82,26	1,76	18,50	(Papilo <i>at al.</i> , 2018; Fitri <i>at al.</i> , 2023)
Kedelai	Batang kedelai	100,00	0,84	19,40	(Karaca <i>at al.</i> , 2017; Suroño <i>at al.</i> , 2023)
Kopi	Sekam	60,48	0,35	18,98	(Amertet <i>at al.</i> , 2021; Fitri <i>at al.</i> , 2023)
Tebu	Bagas tebu	50,00	0,30	14,40	(Gani <i>at al.</i> , 2023; Fatonah <i>at al.</i> , 2025)
	Pucuk dan daun	100,00	0,69	17,39	(Gani <i>at al.</i> , 2023)
Tembakau	Batang	85,00	2,21	16,10	(Fitri <i>at al.</i> , 2023)

Keterangan: Ketersediaan biomassa (A), Rasio biomassa terhadap produk (RPR), dan Nilai kalor bawah (LHV) .

Tembakau

Batang tembakau masih belum dimanfaatkan dengan baik di Indonesia. Studi oleh Fitri *at al.*, (2023) menyatakan dampak negatif terhadap lingkungan dapat dikurangi melalui pemanfaatan batang tembakau untuk produksi biogas. Studi lain di Thailand memanfaatkan batang tembakau untuk

produksi bioetanol (Nacua and Lacang, 2024).

Pemanfaatan biomassa dalam jangka panjang dilaporkan beberapa studi (Rhofita *at al.*, 2022b; Triani *at al.*, 2024) menjadi salah satu solusi dalam permasalahan lingkungan melalui pengurangan emisi GRK. Berdasarkan Tabel 3, jumlah biomassa pertanian yang tersedia dan belum dimanfaatkan di Kabupaten Jombang mencapai 861.123,75 ton per tahun. Distribusi ketersediaan didominasi oleh biomassa komoditas jagung (47,56%) dan padi (27,88%). Batang jagung mendominasi volume ketersediaan (40,21%) dengan nilai 346.244,35 ton per tahun. Tingginya angka ketersediaan batang jagung dipengaruhi oleh karakteristik morfologi tanaman jagung yang memiliki nilai RPR sangat besar yakni 1,76. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk setiap 1 ton produksi jagung yang dipanen, aktivitas pertanian secara simultan memproduksi 1,76 ton batang jagung di lahan pertanian. Selain itu, nilai ketersediaan biomassa (A) mencapai 82,26% mempertegas bahwa sebagian besar batang jagung pasca panen ditinggalkan begitu saja di lahan tanpa ada pemanfaatan lain disamping untuk pakan ternak ruminansia (seperti sapi dan kambing). Penemuan serupa pada studi sebelumnya (Fitri *at al.*, 2023) mengungkapkan bahwa selain nilai ketersediaan biomassa, nilai rasio biomassa terhadap produk menentukan jumlah biomassa belum dimanfaatkan yang berpotensi digunakan sebagai bahan baku produksi bioenergi.

Tabel 3. Jumlah biomassa pertanian di Kabupaten Jombang

Tanaman	Biomassa	AAR (ton)	AAR (%)
Padi	Jerami	220.853,52	25,65
	Sekam	19.235,63	2,23
Jagung	Tongkol jagung	63.316,56	7,35
	Batang	346.244,35	40,21
Kedelai	Batang kedelai	4.343,19	0,50
Kopi	Sekam	358,59	0,04
Tebu	Bagas tebu	6.196,65	0,72
	Pucuk dan daun	28.298,04	3,29
Tembakau	Batang	172.277,24	20,01
Total		861.123,75	

Sumber: Data olahan, 2026.

Keterangan: Jumlah biomassa pertanian (AAR).

Potensi Energi Terbarukan

Parameter penting dalam perhitungan potensi energi adalah nilai kalor (Rhofita *at al.*, 2022b; Fitri *at al.*, 2023). Studi ini mengungkapkan bahwa Kabupaten Jombang menyimpan total potensi energi terbarukan berbasis biomassa pertanian mencapai 14.954.923,91 GJ per tahun (Tabel 4) menunjukkan adanya peluang strategis bagi pemanfaatan limbah menjadi energi (*waste-to-energy*). Kepadatan potensi energi tersebut menjadi modal besar untuk pemenuhan kemandirian energi lokal dan substitusi bahan bakar fosil. Secara sektoral, limbah jagung merupakan kontributor energi paling dominan dengan menyumbang 7.570.545,04 GJ atau setara dengan 50,62% nilai kalor total diseluruh wilayah Jombang. Dominasi ini bersifat linier dengan jumlah biomassa (AAR) batang jagung yang melimpah (40,21%) dan nilai kalor bawah (LHV) yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan biomassa padi (Tabel 2) meskipun jumlah produksi padi lebih unggul (445.269,20 ton per tahun) (Tabel 4). Nilai

kalor batang jagung yang tinggi mengindikasikan kandungan selulosa dan lignin yang tinggi, menjadikannya bahan baku bermutu tinggi untuk dikonversi menjadi biopelet atau diaplikasikan pada teknologi pemanasan industri melalui metode *co-firing*.

Biomassa padi menempati urutan kedua dengan kontribusi energi sebesar 3.938.317,02 GJ (26,33%) (Tabel 4). Meski kuantitas jerami padi melimpah namun nilai kalor; jerami (16.70 MJ/kg) dan sekam padi (13,00 MJ/kg); yang dihasilkan lebih rendah jika dibandingkan biomassa jagung. Nilai kalor biomassa dipengaruhi oleh kadar abu dan kadar air (Kalak, 2023). Oleh karena itu, pemanfaatan limbah padi untuk energi terbarukan skala besar memerlukan perlakuan awal seperti densifikasi untuk meningkatkan efisiensi pembakaran. Nilai kalor penting menjadi pertimbangan dalam penentuan bahan baku yang berpotensi sebagai sumber energi terbarukan (Rhofita *at al.*, 2022b; Triani *at al.*, 2024). Berbagai upaya dapat dilakukan untuk meningkatkan nilai kalor biomassa tertentu, salah satunya melalui kombinasi beberapa jenis biomassa seperti pada studi Putri *at al.*, (2023) yang memanfaatkan campuran biomassa bagas tebu dan sekam padi dengan memanfaatkan bahan pengikat berupa tepung biji durian untuk meningkatkan nilai kalor briket yang dihasilkan (>15 MJ/kg). Biomassa pertanian memiliki tren pertumbuhan secara global sehingga menarik dan kompetitif sebagai penghasil energi panas dan listrik dengan tujuan penurunan emisi GRK. Energi terbarukan berbasis biomassa, dengan kandungan polisakarida yang kaya akan energi, memiliki potensi jumlah energi yang tinggi dan nilai kalor bersaing jika dibandingkan dengan bahan bakar komersil berbasis fosil seperti batubara (23-35 MJ/kg) (Kalak, 2023).

Tabel 4. Nilai kalor total dari biomassa pertanian

Tanaman	AAP (ton)	THV (GJ)	THV (%)
Padi	445.269,20	3.938.317,02	26,33
Jagung	239.156,02	7.570.545,04	50,62
Kedelai	5.152,06	84.257,82	0,56
Kopi	1.694,00	6.805,96	0,05
Tebu	41.311,00	581.334,59	3,89
Tembakau	91.710,00	2.773.663,48	18,55
Total		14.954.923,91	

Sumber: Data olahan, 2026.

Keterangan: AAP adalah total jumlah produk pertanian (ton). THV adalah nilai kalor total biomassa pertanian (GJ).

Pertumbuhan yang lambat dalam pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia salah satunya disebabkan oleh ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil. Konsumsi energi masyarakat Jombang saat ini terpusat pada energi listrik dengan total 1.308,1 juta kWh (Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang, 2025b) dimana seluruh rumah tangga telah mendapatkan akses energi listrik (Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang, 2025a). Berdasarkan Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah Provinsi Jawa Timur Tahun 2025-2045 menyatakan capaian kondisi *baseline* porsi energi baru terbarukan (EBT) dalam bauran energi primer di Provinsi Jawa Timur adalah sebesar 17,10% (Pemerintah Daerah Provinsi Jawa Timur, 2024). Namun, capaian di tingkat regional Kabupaten/Kota belum melaporkan. Jika merujuk pada data indeks kesiapan transisi energi (59,59-kategori sedang) dalam dimensi inisiasi energi bersih yang diukur berdasarkan 7 indikator, meliputi: penggunaan penerangan tenaga surya, penerangan dengan tenaga surya, penggunaan bahan bakar biogas dan listrik untuk memasak, dst. wilayah Jombang memiliki nilai sebesar 36,56 (kategori rendah) (Askar dan Imaduddin, 2024). Sehingga, upaya pemanfaatan energi terbarukan berbahan

baku biomassa pertanian yang tidak terpakai menjadi potensial untuk menghasilkan energi listrik melalui pembakaran maupun biogas. Hal ini sejalan dengan upaya Pemerintah Provinsi Jawa Timur untuk meningkatkan bauran EBT pada tahun 2045 sebesar 63,61%.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Kabupaten Jombang memiliki ketergantungan pada bahan bakar fosil untuk memproduksi listrik. Disisi lain, terdapat potensi sumber energi terbarukan dari biomassa pertanian yang belum dimanfaatkan sebesar 861.123,75 ton per tahun dengan ketersediaan paling besar pada biomassa batang jagung (40,21%) dan jerami padi (25,65%). Selain itu, beberapa biomassa dari komoditas unggulan seperti padi, jagung, kedelai, kopi, tebu, dan tembakau yang dihasilkan di wilayah Jombang memiliki potensi energi sebesar 14.954.923,91 GJ per tahun. Potensi pengembangan biomassa menjadi energi turut berkontribusi dalam pengembangan energi terbarukan dan secara tidak langsung mengurangi emisi GRK dari pembakaran energi fosil. Ketersediaan biomassa yang melimpah di Indonesia menjadikannya salah satu alternatif menjanjikan dalam peningkatan bauran EBT dan pertanian yang berkelanjutan.

Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah diperlukan studi lanjutan yang berfokus pada analisis kelayakan finansial (*techno-economic assessment*) dan pengujian laboratorium mengenai karakteristik dari formulasi pencampuran biomassa multi-komoditas di Kabupaten Jombang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmudi, A., Garniwa, I., Hudaya, C., Nur, S. M., and Sugiyono, A. 2024. Multi-regional Analysis of Biomass Agriculture Waste Potential and Bio-pellet Development for Electricity in Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 3080(1). <https://doi.org/10.1063/5.0203364>
- Ahmudi, A., Hudaya, C., Garniwa, I., Amraini, S. Z., Sugiyono, A., Semedi, J. M., and Yumnaristya, S. H. 2025. Optimizing Potential Supply Chain of Biomass Agricultural Waste for Co-firing of Coal Power Plant Using MCDA, GIS, and Linear Programming in the Java and Sumatra Islands, Indonesia. *Leuser Journal of Environmental Studies*, 3(1), 1–19. <https://doi.org/10.60084/ljes.v3i1.249>
- Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., and Ai, P. 2024. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(6), 2641–2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>
- Alves, M., Ponce, G. H. S. F., Silva, M. A., and Ensinas, A. V. 2015. Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel. *Energy*, 91, 751–757. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.101>
- Amertet, S., Mitiku, Y., and Belete, G. 2021. Analysis of a Coffee Husk Fired Cogeneration Plant in South Western Ethiopia Coffee Processing Industries. *Low Carbon Economy*, 12(01), 42–62. <https://doi.org/10.4236/lce.2021.121003>
- Askar, M. W., dan Imaduddin, A. H. 2024. *Indeks Kesiapan Transisi Energi Indonesia: Memetakan*

- Kondisi Terkini dan Menavigasikan Masa Depan Sektor Energi*. Jakarta.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang. 2025a. *Kabupaten Jombang dalam Angka 2025* (Vol. 45). Jombang: Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang. 2025b. *Statistik Daerah Kabupaten Jombang 2025*. Jombang: Badan Pusat Statistik Kabupaten Jombang.
- Bisen, D., Chouhan, A. P. S., Pant, M., and Chakma, S. 2025. Advancement of thermochemical conversion and the potential of biomasses for production of clean energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115016>
- Fatkhurohman, F., Mufti, M., dan Fatchurahman, M. R. 2022. Penyuluhan Pemanfaatan Limbah Pertanian Untuk Pakan Ternak Alternatif Menggunakan Mesin Pencacah Rumput Multifungsi Dengan Proses Amoniasi Pada Kelompok Ternak Makmur Desa Kebondalem, Jombang. *Sarwahita : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 19, 583–594. <https://doi.org/https://doi.org/10.21009/sarwahita.19k.7>
- Fatonah, R. D., Listiyani, A. T., Putri, S. D., and Insani, R. D. N. 2025. The Potential Utilization of Biomass as Substitute Renewable Energy in Supporting Energy Security in Central Java. *Journal of Clean Technology*, 2(1), 14–28. <https://doi.org/10.15294/joct.v2i1.27577>
- Fitri, H., Gürdil, G. A. K., Demirel, B., Cevher, E. Y., and Roubik, H. 2023. Biomass potential from agricultural residues for energy utilization in West Nusa Tenggara (WNT), Indonesia. *GCB Bioenergy*, 15(11), 1405–1414. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13100>
- Gani, A., Erdiwansyah, Munawar, E., Mahidin, Mamat, R., and Rosdi, S. M. 2023. Investigation of the potential biomass waste source for biocoke production in Indonesia: A review. *Energy Reports*, 10, 2417–2438. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.065>
- Illankoon, W. A. M. A. N., Milanese, C., Collivignarelli, M. C., and Sorlini, S. 2023. Value Chain Analysis of Rice Industry by Products in a Circular Economy Context: A Review. *Waste*, 1(2), 333–369. <https://doi.org/10.3390/waste1020022>
- Kalak, T. 2023. Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future. *Energies*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/en16041783>
- Karaca, C., Gurdil, G. A. K., and Ozturk, H. H. 2017. The Biomass Energy Potential from Agricultural Production in the Black Sea Region of Turkey. *ICOEST 3rd International Conference on Environmental Science and Technology*, 184–189.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. 2025. Rencana Strategis Kementerian Pertanian Tahun 2025-2029. Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 40 Tahun 2025. *Jakarta: Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2025 Nomor 1227*, 1–268.
- Lantasi, A. I.D., Syafrudin, and Budiyo. 2021. The potential and prospect of biomass as primary energy in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 896(1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012055>
- Lantasi, Ayudya Izzati Dyah, Syafrudin, and Budiyo. 2020. Rice husk as renewable energy for biogas production from biomass: Prospect and challenges. *E3S Web of Conferences*, 202(06024), 1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020206024>
- Mofijur, M., Logeswaran, J., Anwar, M., Silitonga, A. S., Rahman, S. M. A., and Shamsuddin, A. H. 2019. Potential of Rice Industry Biomass as a Renewable Energy Source. *Energies*, 12(4116), 1–21.
- Murda, R. A., Munawaroh, K., Alfajrin, A. C. A., Muhlisin, Butar-Butar, T. I., Arianasari, N., dan Fahira, N. I. 2026. Pengembangan Biopellet Berbasis Limbah Sekam Kopi sebagai Pendukung Sistem Agroforestri dan Usaha. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara (JPkMN)*, 7(1), 873–880. <https://doi.org/http://doi.org/10.55338/jpkmn.v7i1.7985>

- Nacua, Z., and Lacang, G. 2024. Valorization of Agricultural Wastes to Offset Greenhouse Gases (GHGs) Emissions: An Insight in Southeast Asia. *Journal of Environmental and Earth Sciences*, 6(2), 87–98. <https://doi.org/10.30564/jees.v6i2.6562>
- Pambudi, N. A., Firdaus, R. A., Rizkiana, R., Ulfa, D. K., Salsabila, M. S., Suharno, and Sukatiman. 2023. Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032342>
- Papilo, P., Kunaifi, Hambali, E., Nurmiati, dan Pari, R. F. 2018. Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Alternatif Energi Kelistrikan. *Jurnal PASTI*, IX(2), 164 – 176. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Pemerintah Daerah Provinsi Jawa Timur. 2024. *Rencana Pembangunan Jangka Panjang Daerah Provinsi Jawa Timur Tahun 2025-2045*. Surabaya: Pemerintah Daerah Provinsi Jawa Timur.
- Putri, R. W., Rahmatullah, Len, K. Y. T., Haryani, N., Susanti, S., Haryati, S., and Aliyah, S. T. 2023. Briquette of Rice Husk and Bagasse Mixture with Variation on Adhesives Type and Mass Ratio of Raw Materials. *Chemical Engineering Transactions*, 106(May 2023), 277–282. <https://doi.org/10.3303/CET23106047>
- Rathour, R. K., Devi, M., Dahiya, P., Sharma, N., Kaushik, N., Kumari, D., and Bhatia, R. K. 2023. Recent Trends, Opportunities and Challenges in Sustainable Management of Rice Straw Waste Biomass for Green Biorefinery. *Energies*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/en16031429>
- Rhofita, E. I., Rachmat, R., Meyer, M., and Montastruc, L. 2022a. An Energy Potential Estimation of Rice Residue in Indonesia: A Case Study in East Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1024(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1024/1/012029>
- Rhofita, E. I., Rachmat, R., Meyer, M., and Montastruc, L. 2022b. Mapping analysis of biomass residue valorization as the future green energy generation in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 354(131667), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131667>
- Sawyerr, N., Trois, C., Workneh, T. S., Oyebode, O., and Babatunde, O. M. 2020. Design of a household biogas digester using co-digested cassava, vegetable and fruit waste. *Energy Reports*, 6, 1476–1482. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.067>
- Siregar, Y., Alfian, and Suherman. 2020. Analysis of biobriquette from rice husk for biomass power plants: A review. *2020 4th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering, ELTICOM 2020 - Proceedings*, 224–228. <https://doi.org/10.1109/ELTICOM50775.2020.9230528>
- Surono, U. B., Subeni, Sanjaya, P. S., Pratama, B. R., and Alfarisaputra, J. 2023. The Renewable Energy Potential of Food Crop Wastes in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 13(2), 707–717. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i2.13617.g8745>
- Triani, M., Nurfanani, A., Aditya, I. A., Widayat, W., Susanty, A., Kristianingsih, I., and Silviana, S. 2024. Mapping analysis of biomass potential on Java Island for supporting power plant: A review. *E3S Web of Conferences*, 519. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451902012>