

KAJIAN ENERGI TERBARUKAN DAN PENINGKATAN EKONOMI DARI PEMANFAATAN LIMBAH SEKAM PADI MELALUI CO-FIRING BIOMASSA

STUDY OF RENEWABLE ENERGY AND ECONOMIC IMPROVEMENT FROM UTILIZING RICE HUSK WASTE THROUGH BIOMASS CO-FIRING

I Gede Bawa Susana*, I Gusti Agung Ketut Chatur Adhi Wirya Aryadi

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jalan Majapahit No. 62 Mataram, Nusa Tenggara Barat

*Corresponding author

E-mail addresses: gedebawa@unram.ac.id

<https://doi.org/10.29303/n0qbf184>

Received 18 September 2025; Received in revised form 23 October 2025; Accepted 29 October 2025

ABSTRACT

Utilizing rice husk waste as a renewable energy source has significant potential to support national energy security while providing added economic value to the community. Indonesia, with rice production reaching 53.14 million tons in 2024, has a potential rice husk waste of 10.63 million tons. With an average calorific value of 14 MJ/kg, the theoretical energy potential of rice husk reaches 148.8×10^9 MJ, equivalent to 41.33 GWh per year. The use of rice husks as a fuel mixture (co-firing) in coal-fired power plants significantly contributes to increasing the renewable energy mix and reducing greenhouse gas emissions. According to PLN data, the biomass co-firing program has been implemented in 46 PLTUs by 2023, with biomass usage reaching 1 million tons and emissions reductions of approximately 1.05 million tons of CO₂e. Rice husk co-firing trials at several coal-fired power plants, such as Jeranjang, Paiton, and Suralaya, demonstrated stable operation with high efficiency and a reduction in SO₂ emissions of up to 29.22%. Despite its lower calorific value than coal and high ash content (up to 20.67%), rice husk still has the potential to be used at a ratio of 20–30% of the energy mass. Its silica (SiO₂) content, which reaches 95.52%, poses challenges such as slagging and fouling, but the ash residue can be used as a cement mixture or silica powder. Utilizing rice husks through the direct co-firing method is considered most suitable for coal-fired power plants in Indonesia because it is inexpensive and easy to implement without significant modifications. Overall, rice husk co-firing can support the clean energy transition, reduce dependence on coal, improve the rural circular economy, and contribute to Indonesia's 2060 Net Zero Emission target.

Keywords: Rice husk, Renewable energy, Co-firing, Emission

1. Pendahuluan

Biomassa sebagai limbah yang berasal dari bahan organik seperti limbah hutan, kotoran hewan, kayu, sampah organik, dan sisa pertanian dapat dijadikan sebagai sumber energi terbarukan. Biomassa sebagai salah satu potensi besar yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia. Biomassa dijadikan sebagai sumber energi dapat diperoleh melalui proses pembakaran langsung maupun tidak langsung. Pemanfaatan biomassa dengan pembakaran langsung umum digunakan oleh masyarakat di pedesaan seperti untuk memasak. Biomassa dibakar untuk menghasilkan

panas yang kemudian bisa digunakan untuk memasak, mengeringkan bahan, atau menggerakkan turbin pembangkit listrik. Sedangkan pembakaran tidak langsung dapat dilakukan melalui proses konversi biomassa menjadi termal atau proses peruraian termal dalam kondisi sedikit atau tanpa oksigen. Pemanfaatan sumber daya biomassa secara tradisional karena volume produksi pertanian yang signifikan, potensi ekonomi, jumlah penduduk yang besar, serta melalui peningkatan faktor logistik dan properti biomassa dapat dijadikan sebagai energi terbarukan [1, 2]. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi melalui teknologi *co-firing* menjadi salah satu solusi inovatif dalam mendukung program transisi energi bersih.

Co-firing yaitu teknologi pembakaran dua jenis bahan bakar yang berbeda secara bersamaan dalam satu tungku. Aplikasi *co-firing* memiliki potensi ekonomi bagi masyarakat, terutama di wilayah pedesaan dan memberikan manfaat lingkungan. Dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), *co-firing* dilakukan melalui proses pembakaran bersama antara batubara dan biomassa. Skema *co-firing* biomassa yaitu mencampur biomassa dengan batu bara, sehingga penggunaan batu bara sebagai bahan baku pembangkit listrik dapat dikurangi secara berkelanjutan, serta dapat mengurangi gas rumah kaca seperti CO₂, SO₂, NO_x [3, 4]. Teknologi *co-firing* biomassa sebagai salah satu cara untuk mempercepat transisi menuju energi terbarukan di Indonesia [5]. Diantara berbagai jenis biomassa, sekam padi memiliki ketersediaan melimpah mengingat Indonesia merupakan negara agraris dengan produksi padi yang tinggi setiap tahunnya. Selama ini, sekam padi sering dianggap sebagai limbah yang kurang bernilai dan hanya digunakan sebagai bahan bakar tradisional atau bahkan dibuang begitu saja, sehingga menimbulkan permasalahan lingkungan. Produksi padi di Indonesia tahun 2024 sebesar 53.142.726 ton [6]. Sekam padi dihasilkan sekitar 20% dari berat biji-bijian curah hasil industri pengolahan beras, merupakan limbah biomassa yang potensial pada daerah yang mengandalkan beras sebagai sumber makanan utama [2, 7]. Sehingga produksi sekam padi di Indonesia untuk tahun 2024 mencapai sekitar 10.628.545 ton. Sekam padi merupakan bahan organik sebagai hasil sampingan penggilingan padi yang kaya karbon dan silika. Sekam padi memiliki potensi yang baik untuk menghasilkan energi yang bermanfaat berdasarkan analisis dasar yang menunjukkan persentase karbon 40,68% - 42,29% dan total lignin 31,55% - 33,21%, sebagian besar mengandung selulosa, lignin, dan silika sehingga sesuai untuk penggunaan energi panas [8, 9]. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kalor sekam padi setara dengan setengah nilai kalor batubara sebesar 11-15,3 MJ/kg [10], *net calorific value* 12-16 MJ/kg [11] dan 13-19 MJ/kg dengan rata-rata 18 MJ/kg [12], serta heat heating value 18.14 ± 0.04 MJ/kg [13]. Sedangkan dalam Saiful dkk. Disebutkan bahwa nilai kalor sekam padi sebesar 3350 kkal/kg [14], jika dikonversi ke Joule menjadi 14 MJ/kg. Sekam padi sebagai residu dari padi dimanfaatkan untuk menggantikan bahan bakar fosil, memiliki karakteristik termal yang baik, dan emisi gas yang rendah baik di atmosfer pengoksidasi maupun atmosfer inert, sehingga dapat dijadikan pilihan biomassa berkelanjutan untuk pertumbuhan ekonomi dan lingkungan [13, 15]. Sekam padi sebagai limbah dari luasnya hamparan sawah memiliki potensi sebagai bahan baku biomassa untuk mendukung energi terbarukan [16]. Dengan menggantikan sebagian batubara menggunakan biomassa seperti sekam padi, emisi karbon dapat dikurangi sekaligus meningkatkan efisiensi energi tanpa harus melakukan perubahan besar pada sistem pembangkit yang ada. Dalam sistem pembangkit listrik, sekam padi dapat dimanfaatkan penggunaannya secara bersama-sama antara batu bara dan sekam padi, sehingga memiliki potensi sebagai energi terbarukan.

Energi terbarukan merupakan energi dari sumber daya alam yang sumbernya selalu tersedia secara alami sehingga tidak akan habis meskipun digunakan berulang kali dan dapat diperbarui secara terus-menerus. Pemanfaatan biomassa yang efisien dan produktif memiliki potensi yang sangat besar sebagai sumber energi terbarukan, sehingga akan memberikan pengurangan emisi secara keseluruhan, menunjukkan kelayakan sebagai sumber energi yang kompetitif, pengurangan pembuangan limbah, dukungan bagi perekonomian pedesaan, dan peningkatan kualitas udara [17, 18, 19]. Sumber energi terbarukan Indonesia yang melimpah dapat dimanfaatkan sebagai alternatif energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dengan potensi mencapai 3.687 GW, namun pemanfaatannya baru 12.736,6 MW [20]. Penerapan *co-firing* biomassa juga memiliki potensi ekonomi bagi masyarakat, terutama di wilayah pedesaan. Sumber daya biomassa telah dimanfaatkan secara tradisional, dan pemanfaatannya menjadi semakin penting karena potensi ekonominya, mengingat terdapat volume produksi pertanian tahunan yang signifikan, yang produk sampingannya dapat digunakan sebagai sumber energi dan bahkan dipromosikan sebagai tanaman energi [1]. Limbah sekam padi yang

sebelumnya tidak bernilai dapat diolah menjadi bahan bakar biomassa seperti pelet atau briket, yang kemudian dapat dijual ke sektor energi. Hal ini dapat membuka peluang usaha baru, menciptakan lapangan kerja, dan meningkatkan kesejahteraan petani.

Dengan demikian, kajian pemanfaatan limbah sekam padi sebagai alternatif energi terbarukan dan peningkatan ekonomi melalui *co-firing* biomassa menjadi penting untuk dilakukan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi energi biomassa dari sekam padi, dampaknya terhadap pengurangan emisi, serta kontribusinya dalam meningkatkan perekonomian masyarakat dan mendukung kebijakan energi berkelanjutan di Indonesia.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini merupakan studi literatur (*literature review*) yang bersifat deskriptif-kualitatif. Deskriptif kualitatif bertujuan untuk menggambarkan, menjelaskan, dan mendeskripsikan fenomena secara mendalam menggunakan data non-numerik (seperti kata-kata, gambar, atau dokumen), bukan angka. Metode ini berfokus pada karakteristik, kualitas, dan makna dari suatu keadaan atau peristiwa apa adanya tanpa dimanipulasi atau diubah. Data yang digunakan berasal dari literatur sekunder berupa artikel jurnal ilmiah nasional dan internasional (Sinta, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar), laporan lembaga energi (IEA, PLN, ESDM, LIPI), dokumen kebijakan pemerintah terkait energi terbarukan dan *co-firing* biomassa, prosiding konferensi dan tesis yang relevan. Literatur yang digunakan memiliki kriteria yaitu diterbitkan antara tahun 2015–2025 untuk memastikan kebaruan data, memuat topik tentang *co-firing* biomassa, pemanfaatan sekam padi, energi terbarukan, atau analisis ekonomi lingkungan energi, dan memiliki metodologi dan data empiris yang dapat dipertanggungjawabkan. Tujuan utamanya adalah mengkaji, membandingkan, dan mensintesis berbagai hasil penelitian terkait pemanfaatan sekam padi sebagai biomassa dalam sistem *co-firing* untuk pembangkit listrik, serta menilai potensi ekonomi dan lingkungan dari penerapannya.

Pemanfaatan biomassa yang terbuat dari produk tumbuhan merupakan sumber energi terbarukan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil sehingga mencegah pelepasan karbon ke atmosfer dan energi biomassa berpotensi netral karbon [21]. Proses netral karbon yaitu jika tanaman baru terus tumbuh menggantikan tanaman yang digunakan sebagai bahan bakar. Misalnya CO₂ yang dilepaskan saat membakar kayu sama dengan jumlah yang diserap pohon saat ia tumbuh [22]. Data yang diperoleh dari beberapa penelitian dikumpulkan dan dianalisis secara deskriptif-komparatif melalui pendekatan analisis teknis yaitu membandingkan hasil penelitian tentang kinerja *co-firing*, analisis ekonomi dengan membandingkan *levelized cost of electricity (LCOE)*, penghematan bahan bakar, dan nilai tambah ekonomi lokal, serta analisis sosial dan kebijakan yaitu meninjau dampak terhadap masyarakat dan dukungan regulasi pemerintah. Untuk memastikan validitas, digunakan pendekatan triangulasi sumber yaitu hasil beberapa penelitian dibandingkan dan dicari kesamaan tren serta perbedaan yang signifikan. Triangulasi adalah pendekatan penelitian yang menggabungkan banyak sumber data, teori, atau metodologi penelitian untuk menjamin bahwa data, analisis, dan temuan studi penelitian seteliti dan setepat mungkin [23]. Sedangkan triangulasi sumber yaitu menguji kredibilitas data dengan cara membandingkan data yang diperoleh dari sumber-sumber yang berbeda [24]. Seperti dalam penelitian review ini, data diperoleh dari berbagai artikel jurnal, laporan lembaga (PLN, IEA, dll), dan dokumen pemerintah, lalu dibandingkan untuk memastikan konsistensi hasil. Tujuan utamanya bukan untuk mencari kebenaran tunggal, melainkan untuk meningkatkan pemahaman peneliti dan memastikan data yang diperoleh benar-benar kredibel melalui perbandingan dan kategorisasi informasi dari berbagai narasumber.

3. Hasil dan Pembahasan

Indonesia dengan jumlah produksi padi mencapai 53.142.726 ton di Indonesia tahun 2024 memiliki potensi limbah sekam padi 10.628.545 ton. Dengan nilai kalor sekam padi sebesar 3350 kkal/kg [14] dan hasil konversi ke Joule yaitu 14 MJ/kg, maka potensi energi secara teoritis adalah 148.799.630.000 MJ. Nilai ini menghasilkan energi listrik sebesar 41.333 GWh untuk satu tahun.

Potensi sekam padi yang besar jika dimanfaatkan melalui *co-firing* pada pembangkit listrik dapat menekan emisi gas rumah kaca, *co-firing* juga menurunkan potensi asidifikasi dan partikulat. Potensi asidifikasi adalah kondisi yang menunjukkan kemungkinan terjadinya pengasaman lingkungan, baik di tanah maupun perairan, akibat masuknya polutan asam ke atmosfer. Sementara itu, partikulat merujuk pada partikel padat atau cair yang sangat kecil dan melayang di udara. Keduanya merupakan masalah lingkungan yang saling terkait dan berbahaya. Disisilain, hasil pembakaran sekam padi menghasilkan abu 10-15%. Hal ini dibutuhkan skema lanjutan seperti pemanfaatan sebagai bahan campuran semen atau *silica powder*. Berdasarkan laporan PLN, *co-firing* biomassa yang dijalankan PLN berhasil menyumbang bauran energi terbarukan sebesar 1,86% di tahun 2024, dan jumlah ini meningkat jika dibanding tahun 2023 yang berada di kisaran 1,2% [25]. Pemanfaatan sekam padi dalam *co-firing* biomassa sudah diaplikasikan pada beberapa pembangkit listrik di Indonesia. Sebanyak 46 PLTU telah menjalankan program *co-firing* hingga tahun 2023, dengan total penggunaan biomassa mencapai 1 juta ton dan mampu memproduksi listrik sebesar 1,04 terrawatt hour (TWh). Diklaim program ini dinilai mampu menurunkan emisi sebesar 1,05 juta ton CO_{2e} sepanjang tahun 2023 [26]. Dalam berita Antara pada bulan Mei 2025 disebutkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Nagan Raya, Aceh menggunakan sekitar 500 ton sekam padi setiap bulan sebagai untuk dimanfaatkan sebagai *co-firing* atau bahan bakar pencampur batu bara [27]. Berdasarkan siaran pers PLN bulan Pebruari 2023, PLTU Jeranjang di Lombok Barat menerima pasokan sekam padi dari salah satu distributor mencapai 400 sampai 600 ton dalam satu bulan yang digunakan untuk *co-firing* [28]. Produksi limbah sekam padi pada tahun 2024 di pulau Lombok mencapai 785.918 ton gabah kering giling (ton GKG) dengan potensi sekam padi sebesar 157.184 ton dan potensi energi (teoritis) yang dapat dihasilkan sebesar 611,27 GWh dalam satu tahun khususnya tahun 2024 [29, 30]. Uji coba *co-firing* sekam padi di PLTU Jeranjang (NTB) menggunakan rasio sekam padi 15% dengan hasil utama stabil, abu sekam digunakan untuk bahan semen. Selain itu, PLTU Paiton (Jawa Timur) kapasitas 800 MW dengan rasio sekam padi 10 %, efisiensi 87% dan emisi CO₂ turun 15%. PLTU Suralaya (Banten) kapasitas 3.400 MW dengan rasio sekam padi 5–10% dan hasil utama adalah operasi normal tanpa modifikasi besar [31].

Sekam padi memiliki potensi besar digunakan sebagai *co-firing* pada suatu pembangkit listrik yang menggunakan batu bara. Dengan dukungan kebijakan dan tata kelola pasokan biomassa yang baik, sekam padi dapat berperan penting sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, memberikan nilai tambah bagi sektor pertanian, dan ekonomis. Hal ini sebagai dampak dari tingginya konsumsi beras masyarakat Indonesia, karena sebagai makanan pokok dan padi sebagai tanaman utama di lahan pertanian. Sekam padi yang awalnya hanya sebagai limbah dan dibakar untuk membersihkannya, maka dengan adanya metode *co-firing* dapat memanfaatkan limbah tersebut sebagai energi alternatif. Selain mengurangi limbah, sekam padi menjadi memiliki nilai tambah yang berdampak terhadap terbukanya lapangan kerja baru khususnya di pedesaan. Pemanfaatan sekam padi sebagai pencampur bahan bakar batu bara memberikan dampak terhadap penurunan emisi. *Co-firing* sekam padi pada pembangkit listrik batu bara dapat menurunkan emisi SO₂ karena kandungan sulfur pada biomassa sekam padi cenderung lebih rendah dibandingkan batubara, serta menurunkan ketergantungan pada batubara dan mengurangi emisi gas rumah kaca [32, 33]. Metode *Co-firing* di wilayah Lontar, dengan menerapkan rasio pencampuran biomassa sekam padi 2-5% dengan batubara menunjukkan bahwa rata-rata 0,608 kg bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kWh listrik dan dari segi ekonomi penghematan biaya bahan bakar sebesar Rp 9,24 miliar selama periode empat bulan, dengan biaya produksi rata-rata *co-firing* hanya Rp 346,77/kWh [34]. Hasil percobaan dan simulasi pengujian *co-firing* biomassa sekam padi dengan batu bara di PLTU Pangkalan Susu (beban 135 MW) diperoleh penurunan efisiensi boiler sebesar 0,8%, penurunan konsumsi bahan bakar spesifik sebesar 1,15%, penurunan emisi gas buang SO₂ dan CO masing-masing sebesar 29,22% dan 0,57%, serta emisi gas buang CO₂ mengalami peningkatan 1,99% [35]. Penelitian yang dilakukan pada kinerja operasional *co-firing* pelet sekam padi selama uji kebakaran di boiler dengan komposisi biomassa 1% dan 3% diperoleh suhu tungku pada pembakaran bersama batu bara menunjukkan tren yang tidak konsisten. Selain itu, dari simulasi CFD yang dilakukan, nilai emisi CO₂ pada pelet sekam jauh lebih tinggi daripada batu bara [36]. Hasil penelitian di Maharashtra, salah satu negara bagian terbesar di India bahwa penggunaan sekam padi sebagai pengganti batu bara untuk menghasilkan daya dalam jumlah yang setara menunjukkan emisi karbon berkurang sebesar 98,7% [37]. *Co-firing* biomassa sekam padi memberikan dampak terhadap pengurangan emisi dan melalui pemberdayaan masyarakat dapat membentuk

ekosistem energi kerakyatan. Hal ini memberikan pendapatan tambahan bagi petani dan mendukung ekonomi sirkular (limbah menjadi energi). *Co-firing* biomassa agroindustri bersama batubara dapat secara efektif mengurangi dampak lingkungan dan mendukung transisi menuju sistem energi sirkular rendah karbon, khususnya di wilayah dengan residu biomassa melimpah [38].

Co-firing biomassa sekam padi dicampur dengan batubara untuk menghasilkan energi Listrik melalui beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Pengumpulan dan pengeringan sekam padi dengan kadar air hingga <15% agar mudah terbakar dan efisien.
2. Pra-perlakuan (*Pretreatment*), yaitu bisa berupa peletisasi (*pelletizing*), *torrefaction*, atau pencucian (*washing*). *Pelletizing* meningkatkan densitas energi dan kemudahan transportasi. *torrefaction* meningkatkan stabilitas termal dan menurunkan kadar air, dan *washing* mengurangi unsur alkali (K, Na) penyebab korosi.
3. Pencampuran dengan batubara (*blending*). Sekam padi dicampur dengan batubara di *coal yard* atau langsung pada *feeding system*. Rasio umumnya 5–20% biomassa berbanding 80–95% batubara. Campuran diatur untuk menjaga nilai kalor total dan kestabilan nyala api.
4. Pengumpanan ke boiler (*Fuel Feeding*). Campuran bahan bakar dimasukkan ke sistem pembakaran PLTU. Hal ini dapat dilakukan dengan metode *direct co-firing*, *indirect co-firing*, *parallel co-firing*. Ketiga metode ini memiliki kelebihan dan kekurangan seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Metode *co-firing* sekam padi

Metode <i>co-firing</i>	Deskripsi	Kelebihan	Kekurangan
<i>Direct co-firing</i>	Sekam padi langsung dicampur dan dibakar bersama batubara di ruang bakar utama.	Sederhana, murah, tidak perlu modifikasi besar.	Risiko <i>slagging</i> dan <i>fouling</i> bila kadar abu tinggi.
<i>Indirect co-firing</i>	Sekam dibakar di reaktor terpisah untuk menghasilkan gas panas (<i>producer gas</i>), lalu gas tersebut dialirkan ke boiler utama.	Abu tidak masuk ke boiler utama, lebih bersih.	Perlu sistem tambahan (<i>gasifier</i>). Biaya awal tinggi.
<i>Parallel co-firing</i>	Sekam dibakar di boiler terpisah yang hasil uapnya digabung dengan uap dari PLTU utama.	Efisiensi tinggi, fleksibel, cocok untuk rasio biomassa >20%.	Perlu investasi besar dan ruang tambahan.

Metode *direct co-firing* paling banyak digunakan untuk kondisi Indonesia (PLTU eksisting) karena biaya rendah dan mudah diterapkan.

5. Pembakaran dan pembangkitan uap. Campuran batubara dan sekam padi dibakar di ruang bakar (*furnace*). Panas yang dihasilkan memanaskan air menjadi uap bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik.
6. Pengendalian abu dan emisi. Gas buang disaring dengan ESP (*Electrostatic Precipitator*), dan abu sekam padi (kaya silika) dikumpulkan dan bisa dimanfaatkan untuk bahan bangunan.

Co-firing biomassa sekam padi untuk energi terbarukan adalah salah satu strategi nyata untuk mendukung transisi energi bersih di Indonesia dan dunia. Pemanfaatan limbah pertanian seperti sekam padi digunakan untuk menggantikan sebagian batubara dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Sekam padi adalah bahan bakar terbarukan rendah emisi yang bisa digunakan untuk *co-firing* tanpa merusak sistem PLTU, asalkan pengelolaannya tepat. Selain memiliki kelebihan dan potensinya besar, tetapi *co-firing* biomassa sekam padi memiliki tantangan. Implementasi *co-firing* biomassa pada PLTU memiliki tantangan berat, salah satu kendalanya adalah munculnya berbagai masalah teknis pada boiler

pembangkit listrik dan *feeding equipment* yang disebabkan oleh perbedaan karakteristik batubara dan biomassa [39]. Pemanfaatan sekam padi sebagai *co-firing* memiliki kadar abu cukup tinggi (20,67%) dan kadar abu yang lebih tinggi dapat mempengaruhi kinerja tungku dan *superheater* pada boiler serta meningkatkan potensi terbentuknya deposit. Selain itu, komposisi abu sekam padi didominasi oleh silika (SiO_2) mencapai 95,52%, dengan kandungan silika yang tinggi dalam sekam padi berpotensi menyebabkan abu peleburan di perapian boiler [40]. Sekam padi memiliki kandungan volatil tinggi yang mendukung kemudahan penyalaan (*ignition*), namun nilai kalor lebih rendah dibanding batubara. Kandungan abu yang tinggi, terutama silika (SiO_2), berpotensi menimbulkan masalah *slagging* dan *fouling* pada ruang bakar. Oleh karena itu, penggunaan sekam padi dalam *co-firing* umumnya dibatasi hingga 20–30% massa energi agar tidak menurunkan efisiensi boiler. *Co-firing* sekam padi dapat menurunkan jejak karbon sesuai hasil analisis siklus hidup sederhana. Selain itu, pengurangan emisi sulfur dan partikulat mendukung pencapaian target Net Zero Emission 2060 yang dicanangkan pemerintah Indonesia. Tetapi perlu diwaspadai peningkatan residu abu (*fly ash* dan *bottom ash*) yang dapat mengandung silika tinggi. Abu ini sebaiknya dimanfaatkan kembali, misalnya untuk bahan campuran semen atau *silica ash* agar tidak menjadi limbah baru.

4. Kesimpulan

Kajian yang dilakukan terhadap biomassa sebagai energi terbarukan dapat disimpulkan bahwa Indonesia memiliki potensi yang signifikan dalam pemanfaatan limbah sekam padi sebagai sumber energi terbarukan melalui teknologi *co-firing* biomassa pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Dengan total produksi padi nasional tahun 2024 sebesar 53,14 juta ton, potensi limbah sekam padi yang dihasilkan mencapai 10,63 juta ton, dengan nilai kalor rata-rata sebesar 14 MJ/kg. Potensi energi teoritis dari sekam padi tersebut mencapai $148,8 \times 10^9$ MJ, yang setara dengan 41.333 GWh energi listrik per tahun. Penerapan *co-firing* sekam padi terbukti dapat menurunkan emisi gas rumah kaca (CO_2 , SO_2 , dan partikulat), meningkatkan bauran energi terbarukan nasional, serta mengurangi ketergantungan terhadap batubara. Hasil implementasi di beberapa PLTU di Indonesia, seperti PLTU Jeranjang, Paiton, Suralaya, dan Nagan Raya, menunjukkan kinerja operasi yang stabil dengan efisiensi pembakaran tinggi serta penurunan emisi yang signifikan. Abu hasil pembakaran sekam padi yang mencapai 10–15% dari total massa dapat dimanfaatkan lebih lanjut sebagai bahan campuran semen atau silica powder, sehingga mendukung konsep ekonomi sirkular. Meskipun demikian, penerapan *co-firing* sekam padi masih menghadapi tantangan teknis, antara lain tingginya kadar abu (20,67%) dan kandungan silika (SiO_2) mencapai 95,52% yang berpotensi menimbulkan *slagging* dan *fouling* pada sistem boiler. Oleh sebab itu, rasio pencampuran biomassa yang direkomendasikan berada pada kisaran 5–20% massa energi untuk menjaga stabilitas operasi dan efisiensi sistem pembangkit. Secara keseluruhan, pemanfaatan limbah sekam padi melalui teknologi *co-firing* dinilai efektif dan berkelanjutan dalam mendukung transisi energi bersih di Indonesia. Dengan dukungan kebijakan pemerintah, infrastruktur pasokan biomassa yang terintegrasi, serta pengembangan teknologi pembakaran yang adaptif, strategi ini berpotensi memberikan kontribusi nyata terhadap pencapaian target Net Zero Emission 2060, penguatan ketahanan energi nasional, serta peningkatan kesejahteraan ekonomi masyarakat pedesaan melalui pemberdayaan sektor pertanian. Diperlukan dukungan kebijakan pemerintah, penguatan rantai pasok biomassa, dan peningkatan teknologi pembakaran agar *co-firing* sekam padi berjalan optimal. Pemanfaatan abu sekam perlu dikembangkan sebagai bahan bangunan. Sinergi pemerintah, industri, dan masyarakat penting untuk memperluas penerapan energi terbarukan dan mendukung target Net Zero Emission 2060.

Daftar Pustaka

- [1] M.A. Perea-Moreno, E. Samerón-Manzano, A.J. Perea-Moreno, Biomass renewable energy: worldwide research trends, *Sustainability*, 11 (3) (2019) 863.

- [2] M. Mofijur, T.M.I. Mahlia, J. Logeswaran, M. Anwar, A.S. Silitonga, S.M. Ashrafur Rahman, A.H. Shamsuddin, Potential of rice industry biomass as a renewable energy source, *Energies*, 12 (21) (2019) 1-21.
- [3] PLN Nusantara Power, Co-firing teknologi pembangkit masa depan, Available online: <https://www.plnnusantarapower.co.id/co-firing-teknologi-pembangkit-masa-depan/> (accessed on 4 August 2025).
- [4] A.D. Pasek, M. Soleh, F.B. Juangsa, P.S. Darmanto, Progress on biomass coal co-firing for Indonesia power plant, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1395 (2024) 012009.
- [5] I. Aufi, J. Wintoko, N.A. Masruroh, Evaluasi pemilihan teknologi co-firing biomassa pada PLTU batu bara dengan metode analytical hierarchy process (Studi kasus: PLTU XYZ), *Angkasa Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 15 (1) (2023) 105-114.
- [6] Badan Pusat Statistik, Luas panen, produksi, dan produktivitas padi menurut provinsi, 2024, Available online: <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTQ5OCMy/luas-panen--produksi--dan-produktivitas-padi-menurut-provinsi.html> (accessed on 8 July 2025).
- [7] S.K.S. Hossain, L. Mathurand, P.K. Roy, Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6 (4) (2018) 299–313.
- [8] C.G.L. Grotto, C.J.G. Colares, D.R. Lima, D.H. Pereira, A.T. do Vale, Energy potential of biomass from two types of genetically improved rice husks in Brazil: A theoretical-experimental study, *Biomass and Bioenergy*, 142 (2020) 105816.
- [9] M. Thiedeitz, W. Schmidt, M. Härder, T. Kränkel, Performance of rice husk as has supplementary cementitious material after production in the field and in the lab, *Materials*, 13 (19) (2020) 1-17.
- [10] J.O. Awulu, P.A. Omale, J.A. Ameh, Comparative analysis of calorific values of selected agricultural wastes, *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*, 37 (4) (2018) 1141-1146.
- [11] International Finance Corporation, *Converting Biomass to Energy: A Guide for Developers and Investors*, Pennsylvania Avenue, N.W. Washington, D.C., June, 2017.
- [12] J. Smith, *Combined Heat and Power from Rice Husks*, GMB Energy Central, England, London, 2007.
- [13] J.I. Arranz, M.T. Miranda, I. Montero, F.J. Sepúlveda, Thermal study and emission characteristics of rice husk using TG-MS, *Materials*, 14 (20) (2021) 6203.
- [14] M. Saiful, R. Balaka, B. Sudia, Studi potensi sekam padi sebagai bahan bakar pemakaian rumah tangga sebagai alternatif pengganti LPG di Kabupaten Konawe Selatan, *ENTHALPY: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, 8 (3) (2023), 89-97.
- [15] S. Kaniapan, J. Pasupuleti, K.P. Nesan, H.N. Abubackar, H.A. Umar, T.L. Oladosu, S.R. Bello, E.R. Rene, A Review of the sustainable utilization of rice residues for bioenergy conversion using different valorization techniques, their challenges, and techno-economic assessment, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (6) (2022) 3427.
- [16] Samsurizal, R.F. Azlinando, A.N. Afandi, Techno-economic evaluation of rice husk co-firing as a sustainable biomass fuel alternative, *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, 10 (50) (2024) 28-33.
- [17] S. Yana, M. Nizar, Irhamni, D. Mulyati, Biomass waste as a renewable energy in developing bio-based economies in Indonesia: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160 (2022) 112268.
- [18] M. Saleem, Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source, *Heliyon*, 8 (2) (2022) e08905.
- [19] ARENA, Bioenergy / Energy from waste, Available online: <https://arena.gov.au/renewable-energy/bioenergy/> (accessed on 8 July 2025).
- [20] Erdiwansyah, A. Gani, R. Mamat, Bahagia, M. Nizar, S. Yana, M.H.M. Yasin, Muhibbuddin, S.M. Rosdi, Prospects for renewable energy sources from biomass waste in Indonesia, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10 (2024) 100880.
- [21] USDA, Biomass energy, Available online: <https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/international/topic/biomass-energy> (accessed on 10 July 2025).
- [22] J. Gibbs, Renewable energy generation biomass, Available online: <https://energysavingtrust.org.uk/advice/biomass/> (accessed on 10 July 2025).

- [23] M. Sciberras, A. Dingli, Research Analysis—Triangulation approach. In: investigating AI readiness in the maltese public administration, *Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer Cham, 568 (2023) 31-32.
- [24] Sugiyono, *Metode Penelitian Pendidikan: Kuantitatif, Kualitatif, Kombinasi, R&D dan Penelitian Tindakan*, Alfabeta, Bandung, 2019.
- [25] PLN, Co-Firing Biomassa di PLTU PLN hasilkan 1,67 juta MWh listrik hijau sepanjang 2024, Available online: <https://web.pln.co.id/media/siaran-pers/2025/02/co-firing-biomassa-di-pltu-pln-hasilkan-167-juta-mwh-listrik-hijau-sepanjang-2024> (accessed on 12 July 2025).
- [26] PLN, Like 2024: PLN bangun ekonomi kerakyatan lewat program co-firing biomassa, Available online: <https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2024/08/like-2024-pln-bangun-ekonomi-kerakyatan-lewat-program-co-firing-biomassa/> (accessed on 15 July 2025).
- [27] Antara, PLTU Nagan Raya gunakan sekam padi 500 ton/bln untuk cofiring biomassa, 2025, Available online: <https://www.antaranews.com/berita/4808577/pltu-nagan-raya-gunakan-sekam-padi-500-ton-bln-untuk-cofiring-biomassa> (accessed on 12 July 2025).
- [28] PLN, Co-firing PLTU Jeranjang gerakkan ekonomi rakyat di Lombok-NTB, serbuk kayu hingga sekam padi jadi sumber energi, Available online: <https://web.pln.co.id/media/siaran-pers/2023/02/co-firing-pltu-jeranjang-gerakkan-ekonomi-rakyat-di-lombok-ntb-serbuk-kayu-hingga-sekam-padi-jadi-sumber-energi> (accessed on 13 July 2025).
- [29] BPS., Berita Resmi Statistik, Luas panen dan produksi padi di Provinsi Nusa Tenggara Barat, 2024.
- [30] I G. Bawa-Susana, I K.P. Putra, I G.A.K.C.A.W. Aryadi, Analisis potensi biomassa sekam padi di pulau Lombok-Indonesia sebagai sumber energi terbarukan, *Energy, Materials and Product Design*, 4 (1) (2025) 260-265.
- [31] Ditjen EBTKE, Rencana co-firing pada PLTU, 2024.
- [32] N. Cahyo, M. Triani, Rasgianti, R. Sitanggang, E. Supriyanto, Paryanto, simulasi karakteristik co-firing sekam padi pada PLTU batubara pulverized coal kapasitas 400 Mwe, *ROTASI*, 24 (2) (2022) 43-53.
- [33] R.K. Nasution, S.R. Haq, Nurkhamim, T.A. Cahyadi, R. Ernawati, Metode komparasi co-firing menggunakan biomassa untuk mengurangi emisi pada PLTU—literature review, *Jurnal Geomine*, 12 (2) (2024) 173-183.
- [34] Samsurizal, R.F. Azlinando, A.N. Afandi, Techno-economic evaluation of rice husk co-firing as a sustainable biomass fuel alternative, *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, 10 (50) (2024) 28-33.
- [35] H.A. Purba, B.A. Dwiyanoro, Experimental and numerical study the effect of using rice husk in the co-firing process on thermal efficiency and exhaust gas emissions at coal fired power plant, *AIP Conf. Proc.*, 2891 (2024) 080018.
- [36] U. Susanto, A. Surjosatyo, Analysis of rice husk pellet combustion test for co-firing in pulverizer coal (PC) boilers, *International Journal of Engineering Business and Social Science*, 1 (5) (2023) 387-400.
- [37] G. Jyothsna, A. Bahurudeen, P.K. Sahu, Sustainable utilisation of rice husk for cleaner energy: A circular economy between agricultural, energy and construction sectors, *Materials Today Sustainability*, 25 (2024) 100667.
- [38] S.J. Sofán-Germán, M.E. Doria-Oviedo, J.D. Rhenals-Julio, J.M. Mendoza-Fandiño, Life cycle assessment of biomass waste and coal co-firing: advancing circular economy in energy production, *Recycling*, 10 (4) (2025) 151.
- [39] ESDM, Akselerasi transisi energi, co-firing biomassa di PLTU jadi teknologi pilihan, siaran pers nomor: 324.Pers/04/SJI/2022 tanggal: 29 Agustus 2022, Available online: <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/akselerasi-transisi-energi-co-firing-biomassa-di-pltu-jadi-teknologi-pilihan> (accessed on 12 July 2025).
- [40] Yunaidi, F. Surahmanto, S. Harnowo, The risk analysis of rice husk of co-firing fuel for boilers in sugar mills, *Journal of Physics: Conference Series*, 1446 (2019) 012041.