

# Pengelolaan Limbah Sekam Padi Berbasis Keberlanjutan dalam Rantai Pasok : Kajian Literatur

Nurhayati<sup>1\*</sup>, Alexandra Sidney Budiawan<sup>2</sup>, Cecillia Huang<sup>3</sup>, Christella Eunice Candra<sup>4</sup>, Hansel Sutioso<sup>5</sup>, Yunna Teodor<sup>6</sup>

<sup>123456</sup>Universitas Prasetiya Mulya

DOI:

<https://doi.org/10.47134/pssh.v3i4.633>

\*Correspondence: Nurhayati

Email: [nurhayati@prasetiyamulya.ac.id](mailto:nurhayati@prasetiyamulya.ac.id)

Received: 07-03-2026

Accepted: 28-04-2026

Published: 11-05-2026



**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstrak:** Peningkatan produksi beras menyebabkan meningkatnya jumlah limbah sekam padi dalam rantai pasok, terutama pada tahap penggilingan, sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji berbagai strategi pengelolaan limbah sekam padi berbasis keberlanjutan dalam rantai pasok beras serta menganalisis potensinya dalam mendukung konsep ekonomi sirkular. Metode yang digunakan adalah narrative literature review dengan menganalisis berbagai artikel ilmiah terindeks yang dipublikasikan pada periode 2016–2026. Kajian dilakukan terhadap pemanfaatan sekam padi pada sektor energi, pangan, pertanian, dan material fungsional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sekam padi memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi biogas, biofuel, karbon aktif, silika, pupuk organik, senyawa fenolik bioaktif, serta serat pangan yang bernilai tambah. Pemanfaatan tersebut mampu mendukung pengurangan limbah, efisiensi sumber daya, penyediaan energi terbarukan, dan pengurangan emisi akibat pembakaran terbuka. Selain itu, pengolahan sekam padi juga berpotensi meningkatkan nilai ekonomi residu agroindustri dan memperkuat keberlanjutan rantai pasok beras. Namun, sebagian besar penelitian masih

dilakukan pada skala laboratorium sehingga implementasi pada skala industri masih memerlukan pengujian lebih lanjut terkait aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Kesimpulannya, pengelolaan sekam padi berbasis keberlanjutan dapat menjadi strategi penting dalam mendukung penerapan ekonomi sirkular dan pengembangan agroindustri ramah lingkungan, khususnya di negara agraris seperti Indonesia.

**Kata Kunci:** Pemanfaatan Biomassa, Ekonomi Sirkular, Sekam Padi, Rantai Pasok Berkelanjutan, Valorisasi Limbah

**Abstract:** The increasing production of rice has led to a growing amount of rice husk waste within the rice supply chain, particularly during the milling process, creating environmental challenges if not managed sustainably. This study aims to examine sustainable rice husk waste management strategies within the rice supply chain and analyze their potential contribution to the circular economy concept. The study employed a narrative literature review method by analyzing indexed scientific articles published between 2016 and 2026. The review focused on the utilization of rice husk in the energy, food, agriculture, and functional material sectors. The findings indicate that rice husk has significant potential to be converted into biogas, biofuel, activated carbon, silica, organic fertilizer, bioactive phenolic compounds, and dietary fiber with added economic value. These utilization approaches contribute to waste reduction, resource efficiency, renewable energy production, and the reduction of emissions caused by open burning practices. In addition, rice husk processing can increase the economic value of agro-industrial residues and strengthen the sustainability of the rice supply chain. However, most existing studies are still conducted at the laboratory scale, indicating the need for further research regarding technical, economic, and environmental feasibility at the industrial level. In conclusion, sustainable rice husk management can become an important strategy in supporting the implementation of a circular economy and the development of environmentally friendly agro-industries, particularly in agricultural countries such as Indonesia.

**Keywords:** biomass utilization, circular economy, rice husk, sustainable supply chain, waste valorization

## Pendahuluan

Dominasi beras sebagai makanan pokok masyarakat Indonesia menjadikan peningkatan produksi padi sebagai pilar utama ketahanan pangan nasional. Akan tetapi, pertumbuhan produksi tersebut juga diiringi oleh meningkatnya dampak lingkungan dan akumulasi limbah, baik padat, cair, dan gas rumah kaca; yang terbentuk secara sistemik sepanjang rantai pasok, mulai dari proses budidaya hingga distribusi akhir.

Sebagai salah satu produsen beras utama di tingkat global, Indonesia terus mendorong peningkatan produktivitas padi untuk memenuhi kebutuhan domestik. Meski demikian, proses intensifikasi tersebut menghadirkan tantangan keberlanjutan yang melibatkan dimensi ekologi, sosial, ekonomi, dan tata kelola kelembagaan ([Rachman et al., 2022](#)). Skala lahan sawah yang luas, disertai tingginya penggunaan pupuk, irigasi, dan teknologi mekanisasi, menjadikan subsektor padi sebagai kontributor terbesar emisi pada sektor pertanian nasional, dengan estimasi mencapai sekitar 57% dari total emisi pertanian ([Adhi et al., 2024](#); [Susilawati & Setyanto, 2018](#)).

Secara global, lahan sawah merupakan salah satu sumber utama emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian, dengan kontribusi sekitar 48% terhadap total emisi dari lahan pertanian. Rata-rata emisi tahunan dari sistem persawahan diperkirakan mencapai sekitar 7.870 kg CO<sub>2</sub>e per hektar, yang sebagian besar didominasi oleh emisi metana akibat kondisi tanah yang tergenang dan bersifat anaerob ([Qian et al., 2023](#)). Dominasi metana ini sangat signifikan, karena lebih dari 90% total emisi gas rumah kaca dari sawah berasal dari proses metanogenesis ketika lahan terendam air membentuk gas metana ([Qian et al., 2023](#)). Pada skala negara, kontribusi emisi dari budidaya padi tidak merata dan sangat dipengaruhi oleh luas area tanam. Negara dengan luas areal persawahan terbesar seperti Tiongkok, India, dan Indonesia; menjadi penyumbang utama emisi metana dari sektor padi secara global, dengan Indonesia diperkirakan berkontribusi sekitar 7–9% dari total emisi metana sawah dunia ([Qian et al., 2023](#)).

Pada tahap penggilingan padi (*rice milling*), sekam padi (*rice husk*) merupakan fraksi limbah padat terbesar yang dihasilkan dan secara kuantitatif jauh melebihi limbah air maupun dedak (*bran*) ([Babaso & Sharanagouda, 2017](#); [Goodman, 2020](#); [Hossain et al., 2018](#); [Malik et al., 2024](#); [Suudi et al., 2019](#)). Secara komposisi alami gabah, sekam membentuk sekitar 20–30% dari berat gabah yang digiling, sedangkan dedak hanya berkisar 8–12%, dan beras giling sekitar 50–63% dari massa awal ([Bodie et al., 2019](#); [Suudi et al., 2019](#)). Limbah air pada tahap penggilingan kering relatif sangat kecil dan umumnya baru signifikan apabila terdapat proses lanjutan seperti pencucian atau *parboiling* ([Bodie et al., 2019](#)). Dominasi proporsi ini menjadikan sekam sebagai komponen residu utama dalam neraca massa proses *rice milling* serta fraksi limbah dengan volume terbesar pada tahap tersebut ([Babaso & Sharanagouda, 2017](#); [Malik et al., 2024](#); [Suudi et al., 2019](#)).

Besarnya timbulan sekam tidak hanya disebabkan oleh jumlahnya, tetapi juga oleh karakteristik fisik dan kimianya. Sekam memiliki struktur keras, bersisik, serta kandungan serat kasar dan silika yang tinggi (sekitar 15–20%) ([Hossain et al., 2018](#); [Malik et al., 2024](#)), dengan kandungan lignin yang tinggi sehingga sulit terurai secara biologis

dan tidak cocok sebagai pakan ternak maupun kompos cepat ([Allegretti et al., 2022](#); [Suudi et al., 2019](#)). Kandungan silika yang tinggi juga menyebabkan sekam kurang diminati dalam industri pangan maupun pakan (Ozturk et al., 2022). Sifat material ini menjelaskan mengapa sekam cenderung bertahan lama di lingkungan dan mudah menumpuk apabila tidak dikelola dengan baik (Satbaev et al., 2021).

Dalam praktik di lapangan, keterbatasan nilai guna langsung dan karakteristik fisik sekam menyebabkan sebagian besar residu ini masih ditangani melalui pembakaran terbuka atau penumpukan di lahan kosong (Ifeanyichu et al., 2019; Martin et al., 2023; Suudi et al., 2019). Praktik tersebut berpotensi menimbulkan dampak lingkungan berupa peningkatan partikulat udara, emisi gas hasil pembakaran tidak sempurna seperti SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan CO, serta risiko gangguan kesehatan pernapasan akibat debu sekam (Illankoon et al., 2023; Martin et al., 2023). Selain itu, penumpukan sekam dan abu hasil pembakaran dapat menurunkan kualitas tanah dan mengurangi ketersediaan lahan di sekitar lokasi penggilingan (Ifeanyichu et al., 2019). Dengan demikian, meskipun sekam merupakan limbah padat, dampak lingkungannya tidak hanya bersifat lokal tetapi juga terkait kualitas udara dan kesehatan masyarakat (Martin et al., 2023; Suudi et al., 2019).

Jika dibandingkan dengan fraksi residu lain pada tahap *milling*, dedak umumnya tidak menjadi masalah lingkungan jangka panjang karena memiliki nilai ekonomi yang lebih tinggi dan cepat dimanfaatkan oleh pasar pakan maupun pangan (Bodie et al., 2019; Suudi et al., 2019). Sementara itu, limbah air pada tahap penggilingan kering relatif minimal; volume air limbah baru meningkat pada proses pengolahan basah seperti *parboiling* yang memerlukan sekitar 1–1,5 L air per kilogram gabah, dengan sebagian air tersebut menjadi efluen yang memiliki potensi pencemar tinggi (BOD dan COD tinggi serta risiko eutrofikasi) (Kandagatla et al., 2023; A. Kumar et al., 2016, 2017; S. Kumar & Deswal, 2021). Meskipun demikian, volume air limbah dapat ditekan melalui praktik *reuse* dan daur ulang air proses (A. Kumar et al., 2017), serta secara teknis tersedia berbagai opsi pengolahan seperti fitoremediasi, bioreaktor, koagulasi, dan adsorpsi (Kandagatla et al., 2023; A. Kumar et al., 2016, 2017; S. Kumar & Deswal, 2021). Oleh karena itu, dari sisi neraca massa padat pada proses penggilingan utama, sekam tetap merupakan fraksi residu terbesar (Bodie et al., 2019; Suudi et al., 2019).

Sekam sebagai fraksi limbah terbesar dalam proses *rice milling* berasal dari komposisi alami gabah menjadi sekitar seperlima hingga sepertiga berat gabah harus dipisahkan sebagai sekam sebelum beras dapat dikonsumsi ([Babaso & Sharanagouda, 2017](#); [Malik et al., 2024](#); [Suudi et al., 2019](#)). Sifat fisik sekam yang keras dan kaya silika membatasi pemanfaatan langsung pada sektor pangan dan pakan, sehingga residu ini cenderung menumpuk jika tidak memiliki sistem pemanfaatan yang memadai (Hossain et al., 2018; Malik et al., 2024). Sebaliknya, dedak memiliki nilai ekonomi lebih tinggi karena kandungan nutrisinya sehingga jarang menjadi limbah yang tersisa dalam jangka panjang (Bodie et al., 2019; Suudi et al., 2019). Oleh karena itu, baik dari sisi kuantitas timbulan maupun keterbatasan pemanfaatannya, sekam padi tetap menjadi tantangan terbesar dalam manajemen limbah pada tahap penggilingan padi (Hossain et al., 2018; Suudi et al., 2019).

Dominasi sekam padi sebagai beban lingkungan terbesar pada tahap penggilingan padi dalam rantai pasok beras di Indonesia merupakan fokus utama yang diarahkan pada sisi timbulan dan karakteristik materialnya. Penelitian mengenai pengelolaan limbah sekam padi selama ini umumnya lebih berfokus pada pemanfaatannya sebagai bahan tambahan pangan, sumber serat, bioadsorben, maupun bahan pendukung proses fermentasi. Sebagian besar studi terdahulu menitikberatkan pada aspek teknis dan karakteristik fisikokimia sekam padi, seperti kandungan serat, kemampuan adsorpsi, keamanan produk, serta kualitas organoleptik. Namun, kajian yang membahas sekam padi dalam perspektif keberlanjutan rantai pasok masih relatif terbatas. Pengelolaan limbah sekam padi belum banyak dianalisis secara menyeluruh mulai dari proses produksi, distribusi, pemanfaatan kembali, hingga implikasinya terhadap efisiensi sumber daya, ekonomi sirkular, dan dampak lingkungan. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya masih dilakukan pada skala laboratorium dengan ruang lingkup yang spesifik, sehingga belum memberikan gambaran komprehensif mengenai penerapan pengelolaan sekam padi secara berkelanjutan dalam sistem agroindustri.

Berdasarkan kondisi tersebut, *research gap* dalam kajian ini terletak pada masih terbatasnya studi literatur yang secara khusus mengintegrasikan pengelolaan limbah sekam padi dengan pendekatan *sustainable supply chain*. Adapun *novelty* penelitian ini terletak pada pendekatan sintesis yang menghubungkan berbagai pemanfaatan sekam padi ke dalam kerangka rantai pasok berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya membahas sekam padi sebagai limbah yang dapat diolah menjadi produk bernilai tambah, tetapi juga menyoroti keterkaitannya dengan efisiensi sumber daya, ekonomi sirkular, keberlanjutan lingkungan, serta peluang pengembangan industri pangan dan nonpangan secara terpadu.

Kajian ini bertujuan untuk menganalisis sekam padi sebagai fraksi limbah padat yang paling dominan sekaligus sumber beban lingkungan utama pada tahap penggilingan padi dalam rantai pasok beras Indonesia. Pembahasan difokuskan pada identifikasi karakteristik sekam padi, praktik pengolahan, dan dampak lingkungan yang dilaporkan dari berbagai studi. Penelitian ini dilakukan dengan mensintesis dan mengevaluasi bukti ilmiah terkait berbagai strategi pengelolaan sekam padi yang berkelanjutan dalam rantai pasok beras, dengan menelaah metode pengolahan, parameter teknologi, serta implikasi keberlanjutannya. Selain itu, kajian ini juga bertujuan mengidentifikasi potensi valorisasi sekam padi sebagai sumber energi terbarukan, material bernilai tambah, dan produk fungsional.

## Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan *narrative literature review* untuk mengkaji pengelolaan limbah sekam padi yang dihasilkan dari berbagai proses dalam industri padi. Penelitian ini mengumpulkan jurnal hasil penelitian terdahulu dari berbagai database (Sinta, Scopus, Scindirect, dan lain-lain) untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis berbagai pendekatan pengelolaan limbah sekam padi

yang dihasilkan dari industri beras. Metode ini dipilih, karena memungkinkan integrasi hasil penelitian dari berbagai desain studi, baik eksperimental, studi kasus, maupun kajian teknis, sehingga memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai strategi pengelolaan dan pemanfaatan sekam padi sebagai limbah agroindustri.

Proses penelusuran literatur dilakukan secara sistematis melalui beberapa basis data ilmiah, seperti Sinta, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan lain-lain. Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi istilah seperti *“rice husk waste management”*, *“rice husk”*, *“rice husk energy conversion”*, *“rice husk utilization”*, dan lain-lain. Artikel yang dipilih adalah publikasi dalam jurnal terindeks dan sudah melewati *peer-review*, dengan rentang tahun publikasi dari 2016-2026 untuk memastikan relevansi dan kebaruan informasi. Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel yang secara spesifik membahas sekam padi, dan (2) penelitian yang menjelaskan metode pengolahan, konversi, atau pemanfaatan sekam padi. Sementara itu, artikel yang tidak berfokus pada sekam padi atau tidak menjelaskan metode pengelolaan secara jelas dikeluarkan dari proses analisis.

Tahapan analisis dilakukan melalui proses identifikasi, seleksi, evaluasi kualitas, dan sintesis data. Informasi penting dari setiap artikel, seperti jenis metode pengolahan, parameter proses, serta kelebihan dan keterbatasan masing-masing metode, diekstraksi dan dikategorikan.

## Hasil dan Pembahasan

Meningkatnya produksi beras di Indonesia, perhatian terhadap efisiensi dan keberlanjutan rantai pasok padi hingga beras menjadi semakin penting. Selain kuantitas produksi yang perlu diperhatikan, tetapi dampak lingkungan yang timbul dari setiap tahapan proses dalam rantai pasok tersebut juga perlu diperhatikan. Limbah yang dihasilkan pada umumnya tidak terdistribusi secara merata di seluruh rantai pasok, melainkan terkonsentrasi pada tahapan tertentu yang memiliki intensitas material dan energi paling tinggi. Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi titik kritis dalam rantai pasok padi hingga beras yang paling berkontribusi terhadap pembentukan limbah dan dampak lingkungan. Identifikasi ini menjadi dasar untuk memahami mengapa suatu proses menghasilkan limbah dalam jumlah besar, bagaimana karakteristik limbah yang dihasilkan dan apa implikasinya terhadap lingkungan.

**Tabel 1:** Ringkasan Temuan

No	Metode Pengolahan Limbah	Penulis dan Tahun	Jurnal (Vol, No)	Judul	Metode Penelitian	Database
1	Dikonversikan menjadi biogas	Matin et al. (2023)	Jurnal Kesehatan Masyarakat 18(3)	<i>Rice Husk Waste : Impact on Environmental Health and Potential as Biogas</i>	<i>Environmental observations and experimental laboratory-</i>	SINTA

No	Metode Pengolahan Limbah	Penulis dan Tahun	Jurnal (Vol, No)	Judul	Metode Penelitian	Database
					<i>based study</i>	
		Almeida-Naranjo et al. (2026)	Biomass and Bioenergy (Elsevier), 348	<i>From waste to energy : Rice husk's role in zinc removal from synthetic solutions and its valorization in biogas production</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Scopus
		Reddy et al. (2024)	Renewable Energy (Elsevier), 226	<i>Assessing the impact of alkali pretreatment of rice husk on its composition and product portfolio : Tradeoff between biogas and valuable materials recovery for sustainability</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Scopus
2	Bahan pembuatan batu bata	Munir et al. (2021)	Journal of Building Engineering, 42	<i>Synergistic effect of rice husk, glass and marble sludges on the engineering characteristics of eco-friendly bricks</i>	<i>Experimental industrial/field -based study</i>	Science Direct
		Kazmi et al. (2016)	Construction and Building Materials, 120	<i>Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes</i>	<i>Experimental industrial/field -based study</i>	Science Direct
		Raut et al. (2022)	Materials Today: Proceedings, 60	<i>Utilization of phosphogypsum and rice husk to develop sustainable bricks</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Science Direct
		Ketov et al. (2021)	Construction and Building Materials, 302	<i>Recycling of rice husks ash for the preparation of resistant, lightweight and environment-</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Science Direct

No	Metode Pengolahan Limbah	Penulis dan Tahun	Jurnal (Vol, No)	Judul	Metode Penelitian	Database
				<i>friendly fired bricks</i>		
3	Bahan dalam pembuatan Xylitol	Eraso et al. (2025)	Biomass Conversion and Biorefinery, 15	<i>Optimization of xylitol production through Candida tropicalis in xylose hydrolysate from rice husk</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Springer Nature Link
		Temiz & Akpınar (2017)	Waste and Biomass Valorization, 8	<i>The Effect of Severity Factor on the Release of Xylose and Phenolics from Rice Husk and Rice Straw</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Springer Nature Link
4	Bahan dalam pembuatan karbon aktif	Menya et al. (2018)	Waste Management, 81	<i>Characterization and alkaline pretreatment of rice husk varieties in Uganda for potential utilization as precursors in the production of activated carbon and other value-added products</i>	<i>Experimental laboratory based study</i>	Science Direct
		Cheng et al. (2024)	International Journal of Hydrogen Energy, 62	<i>Synthesis of rice husk activated carbon by fermentation osmotic activation method for hydrogen storage at room temperature</i>	<i>Experimental laboratory based study</i>	Science Direct
5	Substrat untuk membuat silika dan silikon	Rodriguez-Otero et al. (2024)	Processes, 12 (11)	<i>Towards Achieving Circular Economy in the Production of Silica from Rice Husk as a Sustainable Adsorbent</i>	<i>Experimental laboratory based study</i>	MDPI
		Junaidi et	Progress in	<i>Superhydrophobic</i>	<i>Experimental</i>	Science

No	Metode Pengolahan Limbah	Penulis dan Tahun	Jurnal (Vol, No)	Judul	Metode Penelitian	Database
		al. (2017)	Organic Coatings, 111	<i>coating of silica with photoluminescence properties synthesized from rice husk ash</i>	<i>laboratory based study</i>	- Direct
6	Bahan pembuatan pupuk dan substrat media tanam	Thiyagesh wari et al. (2018)	International Journal of Environmental Research and Public Health, 15 (2)	<i>Exploration of Rice Husk Compost as an Alternate Organic Manure to Enhance the Productivity of Blackgram in Typic Haplustalf and Typic Rhodustalf</i>	<i>Experimental research</i>	PubMed
		Dias et al. (2023)	Biology and Life Sciences Forum, 28(1)	<i>Biotransformation of Rice Husk into Phenolic Extracts by Combined Solid Fermentation and Enzymatic Treatment</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	MDPI
7	Sumber serat pangan	Chaikwan g et al. (2025)	Foods, 14(17)	<i>Effects of Growth Stage and Particle Size on the Physical, Chemical, Structural, and Bioactive Properties of Alkaline-Extracted Dietary Fiber from Rice Husk (Oryza sativa L.)</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	MDPI
		Alimardan ova & Bakiyeva (2022)	Eastern-European Journal of Enterprise Technologies , 118 (11)	<i>Effect of Enterosorbing Dietary Fibers on the Quality and Safety of Fermented Milk Products</i>	<i>Experimental laboratory-based study</i>	Google scholar

## Strategi pengelolaan limbah dan implikasinya terhadap *sustainability*

### Sekam padi dikonversikan menjadi biogas

Berdasarkan hasil sintesis literatur pada Tabel 1, konversi sekam padi menjadi biogas merupakan salah satu strategi pengelolaan limbah yang paling banyak diteliti karena mampu menjawab dua isu utama sekaligus, yaitu pengurangan limbah padat hasil penggilingan padi dan penyediaan energi terbarukan. Seluruh studi pada Tabel 1 menggunakan pendekatan eksperimental berbasis laboratorium, meskipun dengan fokus yang berbeda. Penelitian oleh Matin et al. (2023) menitikberatkan pada dampak lingkungan dan kesehatan dari limbah sekam padi serta potensinya sebagai biogas melalui observasi lingkungan yang dikombinasikan dengan pengujian laboratorium. Pendekatan ini memberikan gambaran kontekstual tentang risiko pembakaran terbuka sekam padi, terutama terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Sementara itu, studi oleh [Almeida-Naranjo et al. \(2026\)](#) dan [Reddy et al. \(2024\)](#) lebih menekankan pada optimalisasi proses konversi biokimia. Almeida-Naranjo et al. (2026) mengevaluasi peran sekam padi dalam sistem produksi biogas sekaligus sebagai media untuk removal logam berat (Zn), sehingga menunjukkan potensi integrasi pengolahan limbah dan remediasi lingkungan. Di sisi lain, [Reddy et al. \(2024\)](#) mengkaji *pretreatment* alkali sebagai tahap kunci untuk meningkatkan aksesibilitas substrat lignoselulosa sekam padi dalam proses *anaerobic digestion*, serta menilai *trade-off* antara produksi biogas dan pemulihan material bernilai seperti silika. Dari perspektif lingkungan, konversi sekam padi menjadi biogas efektif mengurangi praktik pembakaran terbuka yang menjadi sumber utama polusi udara, sekaligus menurunkan emisi dan jejak karbon dari sektor penggilingan padi. Studi terindeks Scopus menunjukkan bahwa pemanfaatan sekam padi melalui *anaerobic digestion* mampu menekan volume limbah secara signifikan ([Almeida-Naranjo et al., 2026](#); [Reddy et al., 2024](#)). Secara ekonomi, biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi internal untuk proses pengeringan dan operasional penggilingan, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, pendekatan *waste valorization* memungkinkan pemulihan material bernilai tambah seperti silika, yang berpotensi meningkatkan nilai ekonomi limbah ([Reddy et al., 2024](#)). Dari aspek sosial, berkurangnya pembakaran terbuka berdampak positif terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat di sekitar penggilingan padi. Namun, penerapan teknologi ini masih menghadapi tantangan, terutama tingginya kandungan silika dan lignin yang memerlukan *pretreatment*, sehingga meningkatkan biaya dan kompleksitas teknologi. Dominasi studi skala laboratorium juga menunjukkan adanya *research gap* terkait kelayakan teknis dan ekonomi pada skala industri kecil–menengah di negara berkembang seperti Indonesia.

Berdasarkan ketiga jurnal tersebut, sekam padi memiliki potensi besar sebagai bahan baku biogas, adsorben logam berat, dan sumber silika bernilai tambah. Namun, penelitian sebelumnya masih didominasi skala laboratorium dan belum banyak mengkaji implementasi pada skala industri maupun keberlanjutan jangka panjang. Jurnal pertama membahas dampak pembakaran sekam padi terhadap kesehatan

lingkungan dan potensi biogas, tetapi belum meninjau aspek ekonomi dan aplikasi nyata. Jurnal kedua meneliti pemanfaatan sekam padi sebagai adsorben Zn dan produksi biogas, namun hanya berfokus pada logam Zn serta belum mengkaji stabilitas mikroba dan kualitas *digestate* secara mendalam. Sementara itu, jurnal ketiga menunjukkan bahwa pretreatment NaOH mampu meningkatkan recovery silika dan produksi biogas, tetapi belum mengevaluasi dampak lingkungan penggunaan bahan kimia dan kelayakan skala besar. Maka karena itu, peluang penelitian selanjutnya terbuka pada pengembangan teknologi biogas sekam padi yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan aplikatif melalui optimasi *pretreatment*, analisis ekonomi, serta penerapan konsep *circular economy*.

### **Sekam Padi sebagai Bahan dalam Pembuatan Batu Bata**

Sebagai langkah mitigasi berkurangnya sumber daya alam dan dampak lingkungan dari limbah, sekam padi dijadikan salah satu jenis pengganti parsial untuk produksi batu bata (Kazmi et al., 2016; Raut et al., 2022). Menjadikan sekam padi sebagai bahan bangunan dapat mengkonversi limbah agrikultur menjadi unit pembangunan yang berpotensi untuk meningkatkan performa termal dan ketahanan bangunan selagi mengurangi biaya produksi bahannya (Kazmi et al., 2016; Raut et al., 2022). Penambahan abu sekam padi ke dalam batu bata ditemukan mempengaruhi sifat mekanis dan ketahanan dari bata. Walau menambahkan abu sekam padi dapat meningkatkan porositas dan mengurangi kekuatan bata akan tekanan, mengganti 5% dari bahan batu bata masih dapat memenuhi standar bahan bangunan minimum di Pakistan (Kazmi et al., 2016). Selebihnya, menambahkan porositas batu bata dengan penambahan sekam padi membuat bangunan menjadi lebih ringan dan ekonomis, serta meningkatkan daya tahan dengan meningkatkan ketahanan terhadap kristalisasi garam dan serangan sulfat (Kazmi et al., 2016). Untuk menanggulangi kurangnya daya tahan yang seringkali terdapat pada batu bata yang banyak pori dan ringan, abu sekam padi dapat diproses dari awal untuk menjadi granul silikat berbuisa (*foamed silicate granules*) yang berupa bahan reaktif. Hal tersebut memungkinkan untuk memperkuat bahan bangunan sebab ketika proses pembakaran, granul silikat meleleh dan membentuk lapisan yang kuat pada sel-sel bata. Melalui mekanisme tersebut, batu bata dengan densitas di bawah 1000 kg/m<sup>3</sup> dapat mempertahankan daya tahan sekaligus memiliki kemampuan insulasi termal yang sebanding dengan beton aerasi (Ketov et al., 2021).

Selain abu sekam padi sendirinya, sebuah riset juga mengembangkan batu bata yang menggabungkan abu sekam padi dengan limbah industrial seperti *phosphogypsum* yang berasal dari industri pupuk. Campuran *phosphogypsum*, abu sekam padi, dan 15% pengikat semen menghasilkan batu bata yang dapat memenuhi kriteria daya tahan dan penyerapan air. Selebihnya, ditemukan bahwa batu bata campuran tersebut menunjukkan ketahanan suhu yang lebih baik dibandingkan batu bata konvensional (Raut et al., 2022).

Sekam padi yang masih utuh (belum menjadi abu) ditemukan menghasilkan efek sinergis bila dicampur dengan limbah dari produksi kaca dan produksi marmer. Dalam campuran tersebut, sekam padi dapat mengurangi penyusutan akibat pembakaran dan mengurangi konduktivitas termal sebab bahan organik yang terbakar menghasilkan

pori-pori. Walau limbah marmer dan sekam padi menyebabkan unit batu bata menjadi berpori, penambahan limbah kaca dapat berperan sebagai agen fluks yang dapat mengisi pori-pori, sehingga berkurangnya daya tahan dari pori terminimalisir (Munir et al., 2021).

Berdasarkan keempat jurnal tersebut, penelitian mengenai pemanfaatan limbah sekam padi dan abu sekam padi sebagai bahan pembuatan batu bata ramah lingkungan menunjukkan bahwa material ini mampu meningkatkan aspek keberlanjutan, menghasilkan bata yang lebih ringan, memiliki isolasi termal yang baik, serta mengurangi limbah industri dan pertanian. Namun, penelitian terdahulu masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti dominasi studi pada skala laboratorium, keterbatasan variasi komposisi material, minimnya analisis kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan jangka panjang, serta masih ditemukannya penurunan kuat tekan ketika kadar abu sekam padi digunakan terlalu tinggi. Selain itu, pengujian performa jangka panjang di kondisi nyata dan implementasi pada skala industri masih sangat terbatas. Maka dari itu, peluang penelitian selanjutnya terbuka pada pengembangan teknologi produksi bata berbasis limbah sekam padi yang lebih efisien dan berkelanjutan, optimasi komposisi material agar tetap ringan namun memiliki kekuatan tinggi, pengkajian aspek ekonomi dan emisi karbon pada produksi massal, serta pengembangan material konstruksi ramah lingkungan dengan daya tahan dan performa termal yang lebih baik.

### **Sekam Padi sebagai Bahan dalam Pembuatan Xylitol**

Utilisasi sekam padi untuk membuat xylitol berdasar pada komposisinya yang terdiri dari sekitar 13-19% fraksi hemiselulosa (Eraso et al., 2025; Temiz & Akpinar, 2017). Kelompok polisakarida rantai bercabang tersebut menjadi sumber yang kaya akan xilosa yang menjadi prekursor untuk xylitol. Produksi xylitol menggunakan sekam padi berawal dari pemecahan hemiselulosa (yang terdiri dari polisakarida) menjadi molekul-molekul gula monomer, umumnya menggunakan asam sulfat; proses awal yang terjadi disebut sebagai *dilute acid hydrolysis* (Eraso et al., 2025; Temiz & Akpinar, 2017). Untuk memastikan bahwa hidrolisis hanya melepaskan monosakarida berupa xilosa, optimisasi pada suhu reaksi, waktu, dan konsentrasi saat hidrolisis dilakukan supaya fraksi hemiselulosa yang dapat melepaskan glukosa tidak berubah. Pada sebuah penelitian, optimisasi hidrolisis sekam padi pada suhu 127°C selama 60 menit menggunakan 2,6% asam sulfat menghasilkan xilosa sebanyak 87,7% dari sekam padi (Temiz & Akpinar, 2017). Pada studi lain, ditemukan bahwa hidrolisis pada sekam padi yang belum digiling dapat melepaskan konsentrasi xilosa yang lebih tinggi serta meminimalisir pelepasan glukosa dari hemiselulosa dibandingkan sekam padi tergilinding (Eraso et al., 2025). Pelepasan glukosa yang minim penting untuk produksi xylitol, sebab konsentrasi glukosa yang tinggi dapat menghambat xilosa reduktase, enzim yang memiliki kemampuan mengubah xilosa menjadi xylitol (Eraso et al., 2025; Temiz & Akpinar, 2017).

Selebihnya, terdapat komponen inhibitor seperti furfural dan *hydroxymethylfurfural* (HMF) yang terbentuk saat hidrolisis menggunakan asam, namun peneliti menggunakan adaptasi mikrobial ketimbang detoksifikasi kimia sebagai metode

yang lebih ekonomis, membuat mikroorganisme yang bekerja saat fermentasi lebih bertahan menghadapi inhibitor (Eraso et al., 2025). Proses fermentasi yang dilakukan pada tahap akhir pemrosesan xilosa menjadi xylitol seringkali menggunakan Response Surface Methodology (RSM) untuk optimisasi jumlah inokulum dengan konsentrasi xilosa yang terdapat pada bahan fermentasi; hal tersebut bertujuan untuk mendapat hasil xylitol yang optimum, sehingga mengurangi residu (Eraso et al., 2025).

Berdasarkan kedua jurnal tersebut, penelitian mengenai pemanfaatan sekam padi dan jerami padi masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama karena sebagian besar penelitian hanya berfokus pada skala laboratorium dan optimasi proses tertentu seperti hidrolisis asam untuk menghasilkan xilosa, tanpa mengkaji implementasi pada skala industri maupun dampak ekonomi dan lingkungan jangka panjang. Selain itu, penelitian terdahulu belum banyak membahas efisiensi proses secara menyeluruh, pengurangan senyawa penghambat hasil hidrolisis seperti furfural dan fenolik, serta kestabilan dan keberlanjutan pemanfaatan limbah pertanian tersebut dalam aplikasi nyata. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa peningkatan *severity factor* memang dapat meningkatkan hasil xilosa, tetapi di sisi lain menghasilkan lebih banyak senyawa inhibitor yang dapat menghambat proses fermentasi lanjutan. Maka dari itu, peluang penelitian selanjutnya terbuka pada pengembangan metode pengolahan yang lebih efisien dan ramah lingkungan, optimasi kondisi proses agar menghasilkan xilosa tinggi dengan senyawa inhibitor rendah, pengembangan teknologi skala industri yang ekonomis, serta pemanfaatan sekam padi dan jerami padi sebagai bahan baku berkelanjutan untuk bioenergi, biokimia, maupun material ramah lingkungan lainnya.

### **Sekam Padi sebagai Bahan dalam Pembuatan Karbon Aktif**

Karbon aktif merupakan bahan dengan komponen utama karbon yang telah diproses untuk memiliki tingkat porositas yang tinggi. Tingkat porositas tinggi tersebut membuat karbon aktif memiliki daya penyerapan yang besar, sehingga sering digunakan dalam pengolahan air, pengolahan udara, bahan penyimpan energi listrik atau gas, dan pendukung katalis (Sharma et al., 2022). Sekam padi memiliki kandungan karbon dan silika yang tinggi, maka setelah melewati proses karbonisasi sekam padi menunjukkan struktur karbon-silikat yang kompleks. Struktur tersebut merupakan struktur yang sangat cocok untuk pembuatan karbon aktif (Cheng et al., 2024; Menya et al., 2018). Studi eksperimental oleh Menya et al. (2018) melakukan *pretreatment* dengan larutan NaOH pada sekam padi, lalu melakukan karakterisasi dan mengevaluasi potensi kegunaan dari 13 variasi sekam padi. Sekam padi tersebut bersumber dari berbagai petani yang bertempat di 4 zona agro-ekologi berbeda di Uganda. Potensi kegunaan sekam padi yang telah diproses dievaluasi berdasarkan analisis ukuran partikel, *bulk density*, hasil analisis proksimat dan ultimat, area permukaan spesifik, volume pori-pori, serta komposisi anorganik dan lignoselulosik. Varian sekam padi tersebut dapat dibagi menjadi 2 kategori, yaitu sekam padi yang didapatkan dari padi yang bertumbuh di daerah dataran rendah atau dataran tinggi. Hasil penelitian tersebut menemukan bahwa sekam padi yang ditumbuhkan di dataran tinggi merupakan bahan yang lebih cocok digunakan untuk membuat karbon aktif, karena kadar abunya yang lebih rendah, luas permukaan

relatif yang lebih tinggi, kadar komponen volatil yang lebih tinggi, dan kadar karbon tertambat yang lebih tinggi. Hasil penelitian tersebut juga menemukan bahwa *pretreatment* sekam padi dengan larutan NaOH dapat mengurangi kadar abu, serta meningkatkan luas permukaan spesifik, kadar bahan volatil, dan karbon tertambat. Perubahan tersebut membuka peluang untuk sekam padi dengan karakteristik yang kurang cocok untuk dapat digunakan dalam pembuatan karbon aktif, sehingga pengolahan karbon aktif dari sekam padi tidak hanya terbatas pada varian sekam padi tertentu.

Penelitian oleh Cheng et al. (2024) mengembangkan metode inovatif dalam sintesis karbon aktif dari sekam padi melalui metode aktivasi osmotik dengan fermentasi untuk penyimpanan hidrogen. Dalam penelitian ini, sekam padi menjalani proses fermentasi untuk memecah struktur lignin yang kuat dan melepaskan SiO<sub>2</sub> amorf dari permukaan biomassa. Melalui pelepasan SiO<sub>2</sub> amorf, aktivasi osmotik akan meningkat, sehingga lebih banyak pori-pori dapat terbentuk pada permukaan arang. Proses fermentasi tersebut dilakukan dengan suhu dan jangka waktu fermentasi yang berbeda untuk mencari tahu parameter yang paling optimal. Setelah proses fermentasi, sekam padi diaktivasi secara termal menggunakan larutan KOH pada suhu tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi fermentasi dan aktivasi osmotik menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan spesifik yang sangat tinggi (sekitar 2270 m<sup>2</sup>/g) dan kapasitas penyimpanan hidrogen gravimetri sekitar 1,21 wt% pada suhu 25 °C dan tekanan 80 bar. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa parameter fermentasi yang terbaik untuk mengurangi kadar Si dalam sekam padi adalah pada suhu 40 °C selama 15 hari. Hasil penelitian menunjukkan kemampuan karbon yang diperoleh dari sekam padi lebih unggul dibandingkan banyak jenis karbon aktif lain yang digunakan untuk aplikasi penyimpanan hidrogen lainnya. Fermentasi terbukti dapat meningkatkan pembentukan pori secara efektif, sedangkan aktivasi KOH berkontribusi signifikan pada peningkatan struktur mikropori.

Berdasarkan kedua jurnal tersebut, masih terdapat beberapa aspek yang belum banyak dikaji dalam penelitian terkait pemanfaatan sekam padi sebagai bahan baku material bernilai tambah, khususnya mengenai penerapan teknologi pada skala industri, efisiensi biaya produksi, stabilitas material dalam penggunaan jangka panjang, serta analisis dampak lingkungan dan keberlanjutan proses secara menyeluruh. Penelitian terdahulu juga masih terbatas pada pengujian laboratorium dengan fokus utama pada optimasi proses tertentu, seperti peningkatan pembentukan pori, luas permukaan, atau hasil adsorpsi hidrogen, tanpa membahas integrasi proses dengan sistem energi berkelanjutan maupun performa material dalam kondisi operasional nyata. Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan aktivator kimia seperti KOH dalam jumlah tinggi memang mampu meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi, tetapi dapat merusak struktur mikropori dan menurunkan efisiensi material, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut. Oleh karena itu, peluang penelitian selanjutnya terbuka pada pengembangan metode produksi yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis, optimasi kondisi fermentasi dan aktivasi untuk menghasilkan material

dengan kinerja lebih stabil, pengurangan penggunaan bahan kimia berbahaya, serta pengembangan aplikasi sekam padi dalam bidang penyimpanan energi, bioenergi, superkapasitor, dan material berkelanjutan lainnya pada skala industri.

### **Sekam Padi sebagai Substrat untuk membuat Silika dan Silikon**

Penelitian oleh Rodriguez-Otero et al. (2024) dalam *Processes* bertujuan mengkaji pemanfaatan sekam padi sebagai bahan baku berkelanjutan untuk menghasilkan partikel silika berpori tinggi dan produk bernilai tambah lain melalui ekonomi sirkular, termasuk pemrosesan yang relevan dengan karbon aktif dari limbah sekam padi. Studi ini menekankan pentingnya strategi yang memaksimalkan efisiensi sumber daya dari limbah sekam padi untuk menunjang pengurangan limbah sekaligus menghasilkan material adsorben yang efektif untuk mengatasi pencemaran air dan mengurangi kebutuhan sumber daya baru. Penelitian melakukan pengekstrakan silika amorf dari sekam padi yang telah dicuci secara asam, diikuti oleh pirolisis dan kalsinasi pada suhu terkontrol untuk menghasilkan material yang berpotensi adsorben tinggi dan coproduct seperti bio-oil dan syngas sebagai bagian dari pendekatan holistik pengelolaan limbah. Temuan menunjukkan bahwa kombinasi pencucian asam, pirolisis pada 500 °C, dan kalsinasi pada 700 °C dengan laju pemanasan terkontrol (2 °C/menit) dapat menghasilkan silika amorf dari sekam padi dengan rendemen 15% serta struktur berpori yang memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 407 mg Cd/g SiO<sub>2</sub>. Walaupun fokus utama jurnal ini adalah pada produksi silika berpori, penelitian tersebut juga menyoroti bahwa produktivitas dan sifat pori dari produk turunannya seperti karbon atau material yang teraktivasi sangat dipengaruhi oleh tahapan awal pengolahan sekam padi, di mana pirolisis dan perlakuan kimia memainkan peran penting. Pendekatan ini relevan dengan produksi karbon aktif karena banyak tahapan yang sama seperti pemecahan struktur biomassa, penghilangan komponen tidak diinginkan (seperti lignin atau abu), serta peningkatan luas permukaan dan porositas melalui perlakuan termal dan kimia. Dalam konteks pengelolaan limbah sekam padi, studi ini memberikan gambaran bahwa pemrosesan limbah sekam padi tidak hanya terbatas pada produksi karbon aktif sederhana tetapi juga dapat diperluas untuk menghasilkan berbagai material fungsional melalui pendekatan ekonomi sirkular. Hal ini membuka peluang baru bahwa sekam padi sebagai limbah agroindustri dapat dimanfaatkan secara efisien untuk beberapa jalur nilai tambah sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari pembakaran atau pembuangan langsung.

Dalam penelitian oleh Junaidi et al. (2017), peneliti memanfaatkan abu sekam padi (*rice husk ash/RHA*) untuk membuat partikel silika yang dapat digunakan sebagai bahan baku dalam membuat lapisan superhidrofobik berpori tinggi dengan sifat fotoluminesen. Penelitian ini dimulai dengan kalsinasi sekam padi pada temperatur 550 °C (RHA 550) dan 650 °C (RHA 650) untuk menghasilkan abu yang kaya akan silika amorf. RHA 550 kemudian dimodifikasi lebih lanjut melalui penggilingan dengan agen hidrofobik *1H,1H,2H,2H-perfluorodecyltriethoxysilane* (HFDS) atau asam stearat. Pada penelitian ini hanya RHA 550 yang dimodifikasi lebih lanjut, karena sekam padi tersebut menunjukkan intensitas fotoluminesensi yang lebih tinggi. Karakterisasi dari hasil olahan sekam padi

tersebut menunjukkan bahwa RHA 550 memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi (7,39%) dari RHA 650 (5,18%), sehingga menghasilkan intensitas fotoluminesensi yang lebih kuat. Lapisan yang telah dibuat dari RHA juga diuji untuk sifat superhidrofobiknya, yaitu sebuah sifat dari permukaan yang sangat susah untuk menjadi basah, ditandakan dengan sudut kontak air yang lebih besar dari 150°. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan HFDS RHA 550 mempunyai sudut kontak air sebesar 157,7°, maka menunjukkan bahwa lapisan yang terbuat dari RHA 550 mempunyai sifat superhidrofobik. Penelitian ini menunjukkan bahwa sekam padi, salah satu limbah pertanian terbesar, dapat diubah menjadi lapisan fungsional yang melindungi beton dari masuknya air, yang dapat menyebabkan degradasi struktural. Sifat fotoluminesensi yang ditambahkan berfungsi sebagai indikator yang berguna untuk mengetahui keberadaan dan ketahanan lapisan tersebut pada suatu permukaan. Meskipun berhasil, para peneliti mencatat bahwa intensitas fotoluminesensi dari lapisan tersebut masih dapat ditingkatkan supaya lebih optimal untuk penggunaan praktis di industri konstruksi.

Berdasarkan kedua jurnal tersebut, masih terdapat beberapa aspek yang belum banyak dikaji dalam penelitian mengenai pemanfaatan abu sekam padi sebagai material fungsional, khususnya terkait ketahanan jangka panjang lapisan superhidrofobik, stabilitas sifat fotoluminesensi dalam kondisi lingkungan nyata, serta efektivitas aplikasinya pada skala industri dan konstruksi secara luas. Penelitian terdahulu juga memiliki keterbatasan karena sebagian besar masih berfokus pada skala laboratorium dengan pengujian sederhana, sehingga belum membahas secara mendalam aspek durabilitas, efisiensi biaya produksi, pengaruh cuaca ekstrem, maupun dampak lingkungan dari penggunaan bahan kimia hidrofobik seperti HFDS dan aktivator lainnya. Selain itu, intensitas *photoluminescence* (PL) pada coating yang dihasilkan masih relatif rendah sehingga dinilai belum optimal untuk aplikasi praktis di bidang konstruksi dan bangunan. Peluang riset selanjutnya terbuka pada pengembangan material coating yang lebih ramah lingkungan, peningkatan intensitas dan stabilitas sifat fotoluminesensi, optimasi metode aktivasi dan modifikasi permukaan, serta pengujian performa material dalam kondisi operasional nyata dan skala industri agar dapat diaplikasikan secara lebih efektif sebagai material pelindung beton dan material berkelanjutan berbasis limbah pertanian.

### **Sekam Padi sebagai Pupuk dan Substrat Media Tanam**

Pemanfaatan sekam padi sebagai pupuk dan substrat media tanam juga menjadi salah satu strategi pengelolaan limbah di industri beras. Beberapa penelitian telah menunjukkan berbagai pendekatan untuk meningkatkan nilai tambah sekam padi melalui proses biologis maupun fermentatif. Sekam padi diketahui sulit terdegradasi karena memiliki kandungan silika dan lignin yang tinggi serta rasio C:N sebesar 85:1. Dengan mengetahui teori bahwa mikroorganisme selulolitik mampu menghasilkan enzim untuk menguraikan biomassa kompleks, Thiyageshwari et al. (2018) melakukan percobaan pengomposan dengan menguji berbagai kombinasi bakteri *Enhydrobacter aerosaccus*, jamur *Aspergillus sp.*, dan cacing tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

inokulasi sekam padi mentah dengan 2% *Aspergillus sp.*, yang merupakan jamur lignoselulolitik, merupakan metode paling efisien karena mampu mengubah limbah menjadi kompos stabil dalam waktu 90 hari. Mekanisme utama percepatan degradasi terletak pada kemampuan jamur tersebut dalam sekresi enzim yang menguraikan selulosa, hemiselulosa, dan pektin. Analisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan hasil bahwa perlakuan mikroba ini secara efektif menghilangkan badan silika pada epidermis sekam, yang berfungsi sebagai lapisan pelindung. Penghilangan lapisan tersebut memungkinkan penetrasi mikroba yang lebih dalam serta mempercepat kerusakan struktur, sehingga rasio C:N berhasil diturunkan dari 85:1 menjadi 14:1. Pada tahap akhir penelitian, kompos sekam padi diaplikasikan dalam percobaan pot pada dua jenis tanah, yaitu *Typic Haplustalf* dan *Typic Rhodustalf*. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan kompos sekam padi yang dikombinasikan dengan hanya 50% dari dosis pupuk anorganik yang direkomendasi serta tambahan pupuk hayati mampu meningkatkan hasil panen biji *blackgram* sebesar 16-17% dibandingkan jika hanya menggunakan 100% pupuk anorganik saja. Dengan kata lain, penggunaan pupuk kimia dapat dikurangi hingga setengahnya, namun hasil panen justru menjadi lebih tinggi ketika dipadukan dengan kompos sekam padi dan pupuk hayati. Meskipun demikian, pendekatan pengomposan terutama memberikan nilai tambah pada aspek agronomis.

Dalam perspektif ekonomi sirkular, penelitian [Dias et al. \(2023\)](#) menawarkan pendekatan yang lebih berorientasi pada peningkatan nilai produk melalui transformasi bioteknologi sekam padi menjadi senyawa fenolik bioaktif. Dengan teori bahwa metabolisme jamur *Phanerochaete chrysosporium* dan *Gloeophyllum trabeum* yang mampu melakukan oksidasi lignin, penelitian ini mengkritisi metode fermentasi padat konvensional yang memerlukan waktu hingga 60 hari. Sebagai alternatif, dikembangkan metode dua tahap, yaitu fermentasi awal untuk menghasilkan enzim lignin peroksidase dan metoksil hidrolase, diikuti perlakuan enzimatis selama 2 jam yang mempercepat proses depolimerisasi dan demetoksilasi lignin. Proses ini melibatkan inokulasi sekam padi yang telah dipasteurisasi dengan pre-inokulum jamur, kemudian difermentasi selama 20 hari dalam kondisi terkendali, yaitu suhu 20-30°C, kelembaban 60-70%, dan pH 5-6. Percepatan proses dicapai melalui penggunaan konsorsium enzim spesifik yaitu 240 UE LigP dan 150 UE metH yang mempercepat depolimerisasi oksidatif dan hidrolisis gugus metoksi secara signifikan dibandingkan fermentasi tunggal. Ekstrak fenolik yang dihasilkan yaitu veratril alkohol dan veratril aldehida memiliki aktivitas antioksidan dan bakteriostatik terhadap berbagai bakteri Gram-negatif dan Gram-positif, termasuk MRSA, tanpa menunjukkan efek sitotoksik. Artinya, ada potensi pemanfaatan ekstrak tersebut dalam pengembangan material germisidal dan produk fungsional bernilai tambah.

Berdasarkan kedua jurnal tersebut, masih terdapat beberapa aspek yang belum banyak dikaji terkait pemanfaatan limbah sekam padi sebagai bahan bernilai tambah, baik pada bidang pertanian maupun bioteknologi. Penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada proses pengomposan, peningkatan produktivitas tanaman, serta

transformasi biologis sekam padi menjadi senyawa fenolik bioaktif, namun belum membahas secara mendalam efektivitas penerapan dalam skala industri, stabilitas hasil produk dalam jangka panjang, efisiensi ekonomi, dan dampak lingkungan dari proses pengolahan yang digunakan. Selain itu, keterbatasan penelitian terlihat pada penggunaan skala laboratorium, waktu pengujian yang relatif singkat, serta belum adanya evaluasi menyeluruh mengenai ketahanan produk, optimasi proses produksi, dan aplikasi nyata pada berbagai kondisi lapangan. Penelitian terkait senyawa bioaktif hasil biotransformasi juga masih terbatas pada pengujian aktivitas antioksidan dan antibakteri, sementara potensi antiinflamasi, toksisitas jangka panjang, dan efektivitas aplikasinya pada material fungsional belum dieksplorasi secara optimal. Oleh karena itu, peluang riset selanjutnya terbuka pada pengembangan teknologi pengolahan sekam padi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan ekonomis, pengujian pada skala industri dan lapangan, peningkatan kualitas serta stabilitas senyawa bioaktif yang dihasilkan, serta pengembangan aplikasi sekam padi sebagai material multifungsi di bidang pertanian, kesehatan, lingkungan, dan material biodegradable berkelanjutan.

### **Sekam Padi sebagai Sumber Serat Pangan**

[Chaikwang et al. \(2025\)](#) meneliti pemanfaatan sekam padi sebagai sumber pangan yang diekstraksi secara alkali. Penelitian ini secara khusus membandingkan dua tahap yaitu sekam padi muda (G-RH) dan sekam padi matang (R-RH), serta tiga ukuran partikel (kasar, sedang, dan halus) untuk melihat pengaruhnya terhadap sifat fisik, kimia, struktur, dan kandungan bioaktif serat yang dihasilkan. Secara komposisi, sekam padi mengandung 35–40% selulosa, 20–25% lignin, dan 15–20% hemiselulosa. Penelitian ini menggunakan metode analisis seperti FT-IR dan XRD untuk melihat struktur kristal, SEM untuk melihat struktur permukaan, serta GC-MS untuk menganalisis fitosterol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel merupakan faktor yang paling menentukan kualitas serat. Partikel yang lebih halus meningkatkan luas permukaan, sehingga kapasitas menahan air (WHC) dan kapasitas menahan minyak (OHC) meningkat secara signifikan. Nilai WHC terbaik diperoleh pada sekam padi matang dengan ukuran partikel halus, yaitu 5,52 g/g. Selain itu, partikel halus mampu meningkatkan WHC hingga lima kali lipat dan OHC hingga dua kali lipat dibandingkan partikel kasar. Namun, dari sisi kandungan bioaktif, sekam padi muda menunjukkan hasil yang lebih baik dengan kandungan  $\beta$ -glukan yang lebih tinggi yaitu hingga 92,85 mg/100 g, fenolik total lebih besar, serta profil fitosterol yang lebih beragam seperti campesterol dan stigmasterol, yang hampir tidak ditemukan pada tahap matang. Temuan ini menunjukkan bahwa tidak hanya ukuran partikel, tetapi juga tahap pertumbuhan bahan baku sangat memengaruhi kualitas serat pangan yang dihasilkan.

Sementara itu, penelitian oleh [Alimardanova & Bakiyeva \(2022\)](#) melihat sekam padi dari sisi aplikasi langsung dalam produk pangan, yaitu sebagai *enterosorbing dietary fiber* (ESDF) pada susu fermentasi. Penelitian ini didasarkan pada kebutuhan asupan serat harian sekitar 25 g dan fakta bahwa produksi beras menghasilkan sekam yang sering tidak dimanfaatkan. Berbeda dengan studi pertama yang fokus pada karakterisasi sifat serat, penelitian ini lebih menekankan pada pengaruh penambahan serat sekam

padi terhadap kualitas produk susu fermentasi. Pada tahap pertama, sekam direndam dalam asam nitrat 5% (rasio 1:3) selama 12 jam, lalu direbus pada 75–85 °C selama 3 jam untuk mengisolasi zat organik dan mineral, termasuk silikon amorf yang dapat mencapai sekitar 20%. Selanjutnya, sekam direbus dalam larutan NaOH 8% selama 40 menit hingga larutan menjadi jernih, yang menandakan proses pembersihan dan pemurnian serat telah berlangsung optimal. Setelah dicuci hingga netral dan dikeringkan pada 90 °C, bahan digiling menjadi bubuk berukuran  $30 \times 10^{-3}$  hingga  $10 \times 10^{-3}$  cm. Hasil akhirnya adalah serat pangan kaya selulosa, lignin, dan silikon. Kemudian ditambahkan ke dalam susu yang difermentasi dengan *L. diacetylactis*, *L. bulgaricus*, dan *Bacterium bifidum*. Untuk menentukan kombinasi ukuran partikel dan dosis terbaik, peneliti menggunakan analisis korelasi-regresi. Hasil menunjukkan bahwa penambahan 1-2% ESDF memberikan keseimbangan terbaik antara keamanan dan penerimaan konsumen. Pada dosis tersebut, kandungan protein meningkat 25% dan bahan kering meningkat 18%, serta bakteri tetap hidup hingga 28 hari penyimpanan.

Kedua penelitian ini menunjukkan pendekatan yang berbeda namun saling melengkapi dalam pemanfaatan sekam padi sebagai serat pangan. [Chaikwang et al. \(2025\)](#) menekankan pentingnya tahap pertumbuhan dan ukuran partikel untuk meningkatkan sifat fungsional dan bioaktif serat, sedangkan [Alimardanova & Bakiyeva \(2022\)](#) menunjukkan bahwa serat sekam padi dapat diaplikasikan secara langsung dalam produk pangan dengan hasil yang baik pada dosis tertentu. Meskipun demikian, kedua studi ini masih berfokus pada analisis sifat fisikokimia dan uji produk, sehingga peluang penelitian lanjutan masih terbuka untuk menilai manfaat kesehatannya secara mendalam.

Berdasarkan kedua jurnal tersebut, masih terdapat beberapa aspek yang belum banyak dikaji terkait pemanfaatan sekam padi sebagai bahan fungsional, khususnya dalam bidang pangan dan bioteknologi. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada pengolahan sekam padi sebagai sumber serat pangan, peningkatan nilai gizi, serta aktivitas biologis seperti antioksidan dan antibakteri, namun belum membahas secara mendalam efektivitas penggunaan sekam padi pada skala industri, stabilitas produk dalam jangka panjang, analisis ekonomi produksi, maupun dampak lingkungan dari proses pengolahannya. Selain itu, keterbatasan penelitian terdahulu terlihat pada penggunaan skala laboratorium, jumlah sampel yang terbatas, variasi bahan baku yang belum luas, serta pengujian yang masih terfokus pada parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi tanpa mengevaluasi efek kesehatan jangka panjang maupun tingkat penerimaan konsumen secara lebih luas. Penelitian juga belum banyak mengembangkan aplikasi sekam padi pada berbagai jenis produk pangan dan material fungsional lainnya. Oleh karena itu, peluang riset selanjutnya terbuka pada pengembangan teknologi pengolahan sekam padi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, pengujian dalam skala industri dan kondisi nyata, eksplorasi manfaat biologis lain seperti antiinflamasi dan detoksifikasi, pengembangan produk pangan fungsional berbasis sekam padi dengan daya simpan lebih baik, serta analisis keamanan dan efektivitas penggunaan sekam padi

dalam jangka panjang sehingga dapat mendukung pemanfaatan limbah pertanian menjadi produk bernilai tambah dan berkelanjutan.

Dalam membandingkan antara jurnal yang dikajikan, seluruh jurnal menunjukkan bahwa sekam padi memiliki potensi besar sebagai limbah pertanian bernilai tambah, tetapi arah pemanfaatannya berbeda-beda. Beberapa penelitian menempatkan sekam padi sebagai sumber energi dan material adsorben, seperti produksi biogas, karbon aktif, silika, dan adsorben logam berat; sementara penelitian lain mengarah pada aplikasi pangan, pertanian, dan material fungsional, seperti serat pangan, kompos, senyawa bioaktif, serta bahan tambahan produk fermentasi. Misalnya, sekam padi dapat diolah menjadi karbon aktif untuk penyimpanan hidrogen, tetapi prosesnya masih bergantung pada aktivasi kimia dan kondisi tekanan tertentu. Di sisi lain, pemanfaatan sekam padi sebagai kompos terbukti meningkatkan hasil blackgram, namun penelitian tersebut masih menekankan efektivitas agronomis dan belum menguji kelayakan skala besar di tingkat petani. Penelitian lain menunjukkan potensi sekam padi sebagai serat pangan dan bahan fungsional, tetapi pengujiannya masih bersifat *in vitro* sehingga belum dapat memastikan efek fisiologisnya secara langsung pada manusia.

Secara kritis, sebagian besar penelitian terdahulu masih bersifat sektoral, yaitu hanya melihat sekam padi dari satu sisi pemanfaatan, misalnya sebagai bahan pangan, adsorben, energi, pupuk, atau material konstruksi. Pendekatan tersebut penting, tetapi belum cukup untuk menjawab persoalan keberlanjutan secara menyeluruh karena belum menghubungkan aspek produksi, pengumpulan limbah, teknologi pengolahan, distribusi, nilai ekonomi, dampak lingkungan, dan penerimaan pengguna dalam satu kerangka rantai pasok. Selain itu, banyak studi masih berada pada skala laboratorium dan belum dilengkapi dengan analisis *techno-economic analysis*, *life cycle assessment*, maupun model *circular supply chain*. Dengan demikian, *research gap* yang terlihat adalah belum adanya kajian yang mengintegrasikan berbagai jalur valorisasi sekam padi ke dalam perspektif keberlanjutan rantai pasok. *Novelty* dari kajian literatur ini adalah menyatukan berbagai temuan tersebut ke dalam kerangka *sustainable supply chain*, sehingga sekam padi tidak hanya dipandang sebagai limbah yang dapat diolah menjadi produk bernilai tambah, tetapi juga sebagai sumber daya strategis dalam sistem ekonomi sirkular yang mencakup aspek lingkungan, ekonomi, sosial, dan operasional secara terpadu.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil sintesis literatur, sekam padi memiliki potensi besar untuk dikembangkan menjadi sumber energi terbarukan, material fungsional, produk pangan, dan pupuk organik yang mendukung prinsip ekonomi sirkular dalam rantai pasok beras. Pemanfaatan sekam padi tidak hanya mampu mengurangi limbah dan emisi lingkungan, tetapi juga meningkatkan nilai ekonomi residu agroindustri. Temuan ini menunjukkan bahwa sekam padi dapat menjadi sumber daya strategis dalam mendukung keberlanjutan sektor pertanian dan industri. Namun, sebagian besar penelitian masih terbatas pada skala laboratorium sehingga diperlukan penelitian lanjutan pada skala

pilot dan industri untuk menguji kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan secara lebih nyata. Selain itu, diperlukan pengembangan teknologi pengolahan yang lebih efisien dan ramah lingkungan serta kolaborasi antara pemerintah, industri, dan petani agar pengelolaan sekam padi berkelanjutan dapat diterapkan secara optimal di Indonesia.

## Referensi

- Adhi, A., Aryanto, G., & Kusumaningrum, N. (2024). Policy pathway to resilience: Shifting to high-yielding rice seeds to reduce emissions and strengthen rice production in Indonesia. *BIO Web of Conferences*, 119, 01002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411901002>
- Alimardanova, M., & Bakiyeva, V. (2022). Effect of enterosorbing dietary fibers on the quality and safety of fermented milk products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11 (118)), 79–87. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263032>
- Allegretti, C., Bellinetto, E., D'Arrigo, P., Ferro, M., Griffini, G., Rossato, L. A. M., Ruffini, E., Schiavi, L., Serra, S., Strini, A., & Turri, S. (2022). Fractionation of Raw and Parboiled Rice Husks with Deep Eutectic Solvents and Characterization of the Extracted Lignins towards a Circular Economy Perspective. *Molecules*, 27(24), 8879. <https://doi.org/10.3390/molecules27248879>
- Almeida-Naranjo, C. E., Aldás, M. B., Santana-Romo, F., Lopez-Villada, J., Mendieta, M., & Cusioli, L. F. (2026). From waste to energy: Rice husk's role in zinc removal from synthetic solutions and its valorization in biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 207, 108700. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108700>
- Babaso, P. N., & Sharanagouda, H. (2017). Rice Husk and Its Applications: Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(10), 1144–1156. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.138>
- Bodie, A. R., Micciche, A. C., Atungulu, G. G., Rothrock, M. J., & Ricke, S. C. (2019). Current Trends of Rice Milling Byproducts for Agricultural Applications and Alternative Food Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00047>
- Chaikwang, T., Bunyatratchata, A., Thammapat, P., Ratseewo, J., & Siriamornpun, S. (2025). Effects of Growth Stage and Particle Size on the Physical, Chemical, Structural, and Bioactive Properties of Alkaline-Extracted Dietary Fiber from Rice Husk (*Oryza sativa* L.). *Foods*, 14(17), 3094. <https://doi.org/10.3390/foods14173094>

- Cheng, S., Cheng, X., Tahir, M. H., Wang, Z., & Zhang, J. (2024). Synthesis of rice husk activated carbon by fermentation osmotic activation method for hydrogen storage at room temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.092>
- Dias, M. I., Pinela, J., Pires, T. C. S. P., Mandim, F., Barreiro, M.-F., Barros, L., Vega-Baudrit, J. R., Ferreira, I. C. F. R., & Lopretti, M. (2023). Biotransformation of Rice Husk into Phenolic Extracts by Combined Solid Fermentation and Enzymatic Treatment. *ENVABIO100*, 12. <https://doi.org/10.3390/blsf2023028012>
- Eraso, L. M., Cuaspud, O., & Arias, M. (2025). Optimization of xylitol production through *Candida tropicalis* in xylose hydrolysate from rice husk. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(19), 26085–26095. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05372-0>
- Goodman, B. A. (2020). Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143–162. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.001>
- Hossain, S. S., Mathur, L., & Roy, P. K. (2018). Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(4), 299–313. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1539210>
- Ifeanyichu, N. P., Sule, E., Adebisi, O. F., & Uchele, O. (2019). A Review on the Availability and Economics of Rice Milling Waste as Animal Feeding Stuff in Nigeria. *Journal of Applied Sciences*, 19(8), 747–755. <https://doi.org/10.3923/jas.2019.747.755>
- Illankoon, W. A. M. A. N., Milanese, C., Collivignarelli, M. C., & 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>
- Junaidi, M. U. M., Azaman, S. A. H., Ahmad, N. N. R., Leo, C. P., Lim, G. W., Chan, D. J. C., & Yee, H. M. (2017). Superhydrophobic coating of silica with photoluminescence properties synthesized from rice husk ash. *Progress in Organic Coatings*, 111, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.05.009>
- Kandagatla, N., Kunnoth, B., Sridhar, P., Tyagi, V., Rao, P. V., & Tyagi, R. D. (2023). Rice mill wastewater management in the era of circular economy. *Journal of Environmental Management*, 348, 119248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119248>
- Kazmi, S. M. S., Abbas, S., Saleem, M. A., Munir, M. J., & Khitab, A. (2016). Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk

- ashes. *Construction and Building Materials*, 120, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>
- Ketov, A., Rudakova, L., Vaisman, I., Ketov, I., Haritonovs, V., & Sahmenko, G. (2021). Recycling of rice husks ash for the preparation of resistant, lightweight and environment-friendly fired bricks. *Construction and Building Materials*, 302, 124385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124385>
- Kumar, A., Priyadarshinee, R., Roy, A., Dasgupta, D., & Mandal, T. (2016). Current techniques in rice mill effluent treatment: Emerging opportunities for waste reuse and waste-to-energy conversion. *Chemosphere*, 164, 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.118>
- Kumar, A., Roy, A., Priyadarshinee, R., Sengupta, B., Malaviya, A., Dasguptamandal, D., & Mandal, T. (2017). Economic and sustainable management of wastes from rice industry: combating the potential threats. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(34), 26279–26296. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0293-7>
- Kumar, S., & Deswal, S. (2021). A review on current techniques used in India for rice mill wastewater treatment and emerging techniques with valuable by-products. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 7652–7668. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11898-3>
- Malik, S., Omre, P. K., & Sivadas, S. (2024). Compositional Analysis of the Lignocellulosic Biomass from Agricultural Waste (Rice Husk). *Archives of Current Research International*, 24(6), 78–84. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i6766>
- Matin, H. H. A., Syafrudin, S., & Suherman, S. (2023). Rice Husk Waste: Impact on Environmental Health and Potential as Biogas. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 18(3), 431–436. <https://doi.org/10.15294/kemas.v18i3.42467>
- Menya, E., Olupot, P. W., Storz, H., Lubwama, M., & Kiros, Y. (2018). Characterization and alkaline pretreatment of rice husk varieties in Uganda for potential utilization as precursors in the production of activated carbon and other value-added products. *Waste Management*, 81, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.050>
- Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., Gencel, O., Ahmad, M. R., & Chen, B. (2021). Synergistic effect of rice husk, glass and marble sludges on the engineering characteristics of eco-friendly bricks. *Journal of Building Engineering*, 42, 102484. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102484>
- Ozturk, E., Ince, C., Derogar, S., & Ball, R. (2022). Factors affecting the CO<sub>2</sub> emissions, cost efficiency and eco-strength efficiency of concrete containing rice husk ash:

- A database study. *Construction and Building Materials*, 326, 126905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126905>
- Qian, H., Zhu, X., Huang, S., Linqvist, B., Kuzyakov, Y., Wassmann, R., Minamikawa, K., Martinez-Eixarch, M., Yan, X., Zhou, F., Sander, B. O., Zhang, W., Shang, Z., Zou, J., Zheng, X., Li, G., Liu, Z., Wang, S., Ding, Y., ... Jiang, Y. (2023). Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(10), 716–732. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00482-1>
- Rachman, B., Ariningsih, E., Sudaryanto, T., Ariani, M., Septanti, K. S., Adawiyah, C. R., Ashari, Agustian, A., Saliem, H. P., Tarigan, H., Syahyuti, & Yuniarti, E. (2022). Sustainability status, sensitive and key factors for increasing rice production: A case study in West Java, Indonesia. *PLOS ONE*, 17(12), e0274689. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274689>
- Raut, S. P., Patil, U. S., & Madurwar, M. V. (2022). Utilization of phosphogypsum and rice husk to develop sustainable bricks. *Materials Today: Proceedings*, 60, 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.122>
- Reddy, A., Begum, S., Juntupally, S., & Anupoju, G. R. (2024). Assessing the impact of alkali pretreatment of rice husk on its composition and product portfolio: Tradeoff between biogas and valuable materials recovery for sustainability. *Renewable Energy*, 226, 120393. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120393>
- Rodriguez-Otero, A., Galarneau, A., Drané, M., Vargas, V., Sebastian, V., Wilson, A., Grégoire, D., Radji, S., Marias, F., Christensen, J., & Bouyssiere, B. (2024). Towards Achieving Circular Economy in the Production of Silica from Rice Husk as a Sustainable Adsorbent. *Processes*, 12(11), 2420. <https://doi.org/10.3390/pr12112420>
- Satbaev, B., Yefremova, S., Zharmenov, A., Kablanbekov, A., Yermishin, S., Shalabaev, N., Satbaev, A., & Khen, V. (2021). Rice Husk Research: From Environmental Pollutant to a Promising Source of Organo-Mineral Raw Materials. *Materials*, 14(15), 4119. <https://doi.org/10.3390/ma14154119>
- Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Lai, C. W., Naushad, Mu., Shehnaz, Iqbal, J., & Stadler, F. J. (2022). Activated Carbon as Superadsorbent and Sustainable Material for Diverse Applications. *Adsorption Science & Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4184809>
- Susilawati, H. L., & Setyanto, P. (2018). Opportunities to mitigate greenhouse gas emission from paddy rice fields in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 200, 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012027>

- 
- Suudi, A., Tanti, N., Akmal, J., Hasymi, Z., & Budiyanto, P. (2019). Perancangan mesin penghancur sekam padi dengan poros penggerak horisontal. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 14(2), 37–41. <https://doi.org/10.36289/jtmi.v14i2.115>
- Temiz, E., & Akpınar, O. (2017). The Effect of Severity Factor on the Release of Xylose and Phenolics from Rice Husk and Rice Straw. *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), 505–516. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9608-z>
- Thiyageshwari, S., Gayathri, P., Krishnamoorthy, R., Anandham, R., & Paul, D. (2018). Exploration of Rice Husk Compost as an Alternate Organic Manure to Enhance the Productivity of Blackgram in Typic Haplustalf and Typic Rhodustalf. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 358. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020358>