

Analisis Eksergoekonomi Sistem Penggilingan Padi Terintegrasi dengan Gasifier

Exergoeconomic Analysis of Integrated Rice Mill Systems with Gasifiers

**Omil Charmyn Chatib^{1,2}, I Wayan Budiastira^{1,3*}, Mohamad Solahudin¹, Y. Aris Purwanto¹,
Leopold Oscar Nelwan¹**

¹Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Jalan Lingkar Akademik, Kampus IPB Dramaga, Babakan, Dramaga, Babakan, Kec. Dramaga, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16002, Indonesia

²Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Andalas, Limau Manis, Pauh, Padang, Indonesia

³Center for Research on Engineering Application in Tropical Agriculture (CREATA), IPB University, Babakan, Dramaga, Bogor Regency, West Java 16680

*Email korespondensi: wbudiastira@apps.ipb.ac.id

Info Artikel

Diajukan: 14 Maret 2023
Diterima: 11 Juli 2023

Keyword:
Husk; Rice Mill; Exergy.

Kata Kunci:
Sekam; Penggilingan Padi;
Eksergi.

Abstract

Applying the concept of utilizing rice mill waste as an energy source can support the increase in the productivity of renewable energy. The exergonomic concept can be used as one of the steps to see opportunities for husks to be used as an energy booster in a rice mill system that has been integrated with a gasifier. Specific Exergy Cost (SPECO) is used as the method, that combines exergy and economic analysis by applying the cost concept to the thermal system. Based on the analysis results, gas producers can replace diesel fuel in small-sized rice mill systems. Compared with these inputs, husks and energy products from the gasifier can produce nearly 6 and 4 times the exergy, respectively. In addition, gas utilization producers can also reduce fuel expenditure costs by up to 84.67%.

Abstrak

Penerapan konsep pemanfaatan limbah penggilingan padi sebagai sumber energi dapat mendukung peningkatan produktivitas energi terbarukan. Konsep eksergoekonomi dapat dijadikan sebagai salah satu langkah untuk melihat peluang sekam dapat dijadikan sebagai penambah energi dalam sistem penggilingan padi yang telah terintegrasi dengan gasifier. Specific Exergy Cost (SPECO) dijadikan sebagai metode yang menggabungkan analisis eksergi dan analisis ekonomi dengan menerapkan konsep biaya ke dalam sistem termal. Berdasarkan hasil analisisnya, gas produser mampu menjadi pengganti bahan bakar solar di sistem penggilingan padi berskala kecil. Jika dibandingkan dengan inputnya, sekam mampu menghasilkan eksergi hampir 6 kali lipat dan gas produser mampu menghasilkan eksergi hampir 4 kali lipat. Disamping itu, pemanfaatan gas produser juga dapat menekan biaya pengeluaran bahan bakar mencapai 84,67%.

Doi: <https://doi.org/10.19028/jtep.011.2.128-137>

1. Pendahuluan

Sekam merupakan salah satu limbah hasil pertanian yang memiliki nilai kalor tinggi, tetapi untuk memanfaatkannya diperlukan teknologi yang tepat untuk mengkonversinya menjadi energi yang lebih berguna. Salah satu teknologi tersebut adalah dengan melakukan integrasi unit gasifikasi ke dalam sistem penggilingan padi. Unit tersebut mampu mengubah bahan bakar (padat ataupun cair) yang mengandung karbon menjadi gas sintetis (*syngas*) melalui oksidasi parsial dengan udara, uap, ataupun campuran (Ma et al., 2012). Selanjutnya *syngas* tersebut dimurnikan agar diperoleh gas yang bersih dari partikulat yang dapat menyebabkan endapan, erosi dan korosi pada peralatan instalasi serta pada mesin (Joni et al., 2020).

Di dalam unit gasifikasi banyak sekali terjadi kehilangan energi, terutama akibat dari proses termal. Hilangnya energi tersebut disebabkan karena proses ketidakmampuan balik (ireversibilitas) suatu energi yang menyebabkan adanya sebagian energi tidak dapat dimanfaatkan (Tambunan, 2007). Akibatnya, besarnya ireversibilitas menyebabkan penurunan efisiensi eksergi di setiap komponen sistem maupun unit. Oleh karena itu pendekatan dengan hukum termodinamika II yang menitikberatkan kepada analisis eksergi dipandang mampu menjawab seberapa besar efisiensi eksergi seluruh unit gasifier agar proses dapat bekerja.

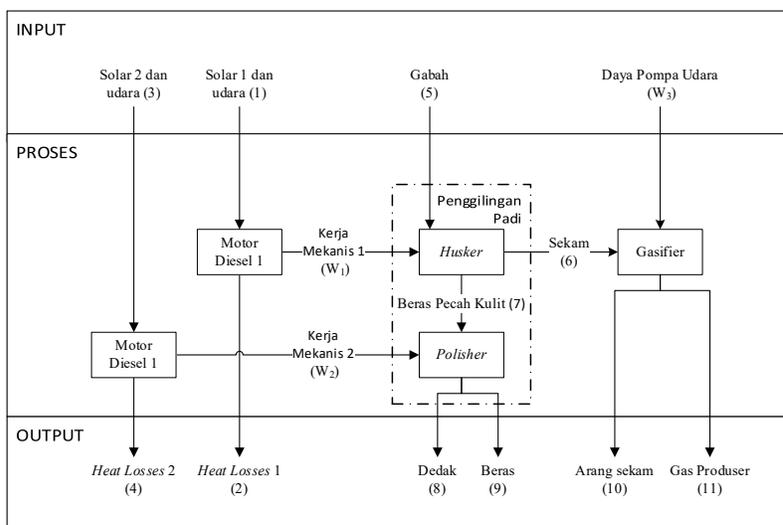
Analisis dari sisi eksergi saja dipandang belum cukup untuk menjawab permasalahan tersebut. Oleh karena itu, dengan menerapkan konsep biaya, maka informasi performansi sistem dapat diperoleh secara komprehensif terutama dari sudut pandang ekonomi. Konsep tersebut dikenal sebagai analisis eksergoekonomi yang dapat memberikan informasi tentang biaya eksergetik pada suatu sistem untuk setiap alirannya (Lozano & Valero, 1993). SPECO merupakan salah satu metode analisisnya dan beberapa peneliti telah mencoba mengaplikasikannya ke beberapa sistem termal, seperti penerapan analisa termoekonomi pada sistem kombinasi turbin gas-uap di PLTGU PJB Gresik (Shanti et al., 2012); penilaian eksergoekonomi pada *compact electriciy* dan *cooling cogeneration unit* (Marques et al., 2020). Sejauh ini penerapan metode SPECO terhadap sistem yang mengintegrasikan penggilingan padi dengan gasifier belum menjadi fokus penilaian eksergoekonomi oleh para peneliti. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis penggunaan sekam sebagai sumber energi di penggilingan padi dengan menggunakan metode SPECO, khususnya dalam menilai kelayakan penggunaan sekam sebagai sumber energi terbarukan dalam sistem penggilingan padi yang terintegrasi dengan *gasifier*.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan juni sampai dengan agustus 2021 yang bertempat di Penggilingan Padi Dinar Mas, kec. Baturaja, Kab. Karawang, Jawa Barat. Penelitian ini menggunakan metode simulasi berdasarkan perhitungan eksergoekonomi yang diawali dengan mengumpulkan data-data primer maupun sekunder sesuai dengan parameter pengukuran yang dibutuhkan. Data Primer diperoleh dengan cara melakukan survey langsung ke lokasi industri penggilingan padi yang dipilih, yang diantaranya adalah data kapasitas kerja penggilingan, spesifikasi alat, serta neraca massa dalam 1 kali proses. Di samping itu, data sekunder diperoleh melalui studi literatur yang terkait pada kandungan massa, energi, maupun eksergi dari setiap masing-masing aliran. Di dalam penelitian ini digunakan 1 unit komputer yang dilengkapi aplikasi microsoft excel untuk perhitungannya.

2.1 Deskripsi Komponen Sistem Penggilingan Padi

Pada **Gambar 1** ditampilkan unit-unit di sistem penggilingan padi yang telah terintegrasi dengan gasifier yang dilengkapi dengan skema aliran ekserginya. Simbol 1 sampai dengan 11 merupakan simbol untuk setiap aliran eksergi yang bekerja di sistem tersebut, sedangkan untuk simbol W merupakan nilai kerja mekanis untuk setiap motor diesel atau daya listrik untuk pompa udara di gasifier.



Gambar 1. Skema aliran eksergi di Sistem Penggilingan Padi

2.2 Analisis Termodinamika

Penyelesaian perhitungan analisis pada **Gambar 1** memerlukan perhitungan model-model termodinamika dengan menggunakan beberapa asumsi. Beberapa asumsi tersebut di antaranya adalah (Bejan et al., 1996) : 1) sistem dalam keadaan tunak, 2) efek kinetik dan potensial diabaikan, 3)

penurunan tekanan di dalam sistem gasifikasi diabaikan, 4) pembakaran udara dan gas hasil pembakarannya merupakan campuran gas ideal, serta 5) proses pembakaran di motor diesel merupakan pembakaran sempurna. Analisis pada penelitian ini juga dibagi menjadi beberapa tahapan, yang di antaranya adalah 1) analisis pada motor pembakaran internal, 2) penggilingan padi, serta 3) unit gasifier. Ketiga analisis tersebut ditentukan berdasarkan neraca massa, energi, dan eksergi.

2.3 Analisis Biaya

Analisis ini diperoleh dengan cara menghitung nilai biaya pokok untuk setiap unit yang berkerja berdasarkan biaya tetap dan biaya tidak tetap. Biaya tetap dihitung berdasarkan besarnya biaya penyusutan serta bunga modal untuk setiap masing-masing unit di sistem penggilingan padi, dan untuk biaya tidak tetap dihitung berdasarkan jumlah konsumsi bahan bakar, upah operator, serta biaya pemeliharaan.

2.4 Analisis Eksergoekonomi

SPECO memiliki tahapan-tahapan yang harus dilalui agar didapatkan nilai eksergonomi untuk setiap masing-masing alirannya (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006) yang di antaranya adalah (1) pengidentifikasian aliran eksergi seperti yang ditampilkan pada **Gambar 1**, (2) pendefinisian bahan bakar dan produk, serta (3) penentuan persamaan biaya. Persamaan biaya dilibatkan pada setiap komponen dengan diformulasikan secara terpisah. Persamaan biaya tersebut ditampilkan pada Persamaan 1,

$$\sum \dot{C}_{i\ out} = \sum \dot{C}_{i\ in} + \dot{Z}_i \quad (1)$$

di mana \dot{C} merupakan laju aliran biaya eksergi (Rp/jam) dan \dot{Z} berupa biaya pokok yang dihitung berdasarkan analisis biaya untuk setiap masing-masing unit (Rp/jam).

Salah satu bagian karakteristik yang penting dari eksergoekonomi berupa biaya spesifik dari eksergi (c , Rp/kWh), di mana biaya tersebut didapatkan dengan membandingkan antara laju aliran biaya eksergi (\dot{C} , Rp/jam) dengan laju eksergi (\dot{E}_x , kW), seperti yang ditampilkan pada Persamaan 2. Di samping itu, faktor f merupakan parameter relevan yang perlu dihitung ketika melakukan evaluasi biaya eksergi pada metode SPECO. Perhitungannya ditampilkan pada Persamaan 3.

$$c = \dot{C} / \dot{E}_x \quad (2)$$

$$f = \frac{\dot{Z}}{\dot{c}_f \cdot \dot{E}_D + \dot{Z}} \quad (3)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Penggilingan padi yang dianalisis merupakan industri penggilingan berskala kecil, karena di Indonesia mayoritas industri tersebut beroperasi di bawah 1,5 ton beras/jam (BPS, 2012). Penggilingan tersebut pada umumnya merupakan industri yang telah beroperasi lebih dari 20 tahun, sehingga secara ekonomis sudah tidak layak lagi. Oleh karena itu, pada analisis ini seluruh unit yang ada di sistem penggilingan padi (termasuk gasifier) diasumsikan berupa unit baru, dengan tujuan hasil yang diperoleh merupakan nilai optimal dari performa setiap unit.

Penggilingan padi yang dipilih berupa industri penggilingan yang beroperasi pada kapasitas 7 ton/hari, di mana setiap harinya beroperasi selama 8 jam, sehingga nilai kapasitas pengolahannya setara dengan 875 kg gabah/jam. Penggilingan ini mampu menghasilkan beras, dedak dan sekam masing-masing sebesar 512.5 kg/jam, 112.5 kg/jam, and 250 kg/jam. Di samping itu, untuk mengolah gabah menjadi beras dibutuhkan input bahan bakar pada motor diesel sesuai dengan daya motor yang digunakan. Motor penggerak husker dengan daya 23 hp membutuhkan input bahan bakar sebanyak 3,864 kg/jam, dan untuk motor penggerak polisher dengan daya 198 hp membutuhkan input bahan bakar sebanyak 11,66 kg/jam. Selain itu, pada unit gasifier juga membutuhkan input energi listrik sebesar 1,6 kW yang berguna untuk mengoperasikan pompa udara agas udara di lingkungan mampu di hisap ke dalam reaktor serta menghisap gas produser hasil pembakaran dari reaktor tersebut ke unit pembersih, sehingga dihasilkan gas produser yang bersih dari tar dan partikulat lainnya.

3.1 Analisis Eksergi

Nilai eksergi dari seluruh aliran yang terjadi di **Gambar 1** dapat diperoleh berdasarkan spesifikasi dan hasil analisisnya. Hasil perhitungan tersebut dijabarkan pada **Tabel 1** yang telah dihasilkan oleh Chatib *et al.*(2023).

Tabel 1. Nilai eksergi untuk setiap aliran di Sistem Penggilingan Padi (Chatib *et al.*, 2023)

Simbol Aliran Pada Gambar 1	Jenis Aliran Eksergi	Nilai Eksergi, \dot{E}_x (kW)	Simbol Aliran Pada Gambar 1	Jenis Aliran Eksergi	Nilai Eksergi, \dot{E}_x (kW)
1	Solar pada motor diesel 1	48,98	8	Dedak	503,99
2	Panas Buang pada motor Diesel 1	17,00	9	Beras	2.401,72
3	Solar pada motor diesel 2	147,83	10	Arang sekam	356,34
4	Panas Buang pada motor Diesel 2	45,67	11	Gas produser	401,53
5	Gabah	4.025,69	\dot{W}_1	Kerja mekanis motor diesel 1	17,15
6	Sekam	1.119,98	\dot{W}_2	Kerja mekanis motor diesel 2	57,40
7	Beras merah	2.905,71	\dot{W}_3	Listrik	1,60

Berdasarkan **Tabel 1**, gabah memiliki aliran eksergi tertinggi jika dibandingkan dengan aliran eksergi lainnya. Ini disebabkan karena input aliran gabah yang paling besar serta nilai eksergi spesifik kimianya yang masuk kategori tinggi (16.562,84 kJ/kg). Jika diperhatikan pada Tabel tersebut, sekam memiliki potensi yang cukup besar sebagai pemasok energi untuk sumber penggerak pada motor diesel di penggilingan padi. Rasio antara total eksergi solar diesel dengan eksergi sekam bernilai 1 : 5,69. Artinya, eksergi sekam berpotensi menggantikan eksergi solar hampir mencapai 6 kali lipat. Tetapi perlu diperhatikan bahwa biomassa tersebut belum diolah menjadi energi yang berguna, karena di dalam proses pengkonversiannya ada pengaruh kehilangan eksergi ke lingkungan yang terjadi akibat proses termal. Oleh karena itu, unit gasifier dengan efisiensi yang tinggi sangat dibutuhkan agar mampu mengubah limbah biomassa pada penggilingan padi menjadi gas produser yang selanjutnya dapat digunakan sebagai sumber tenaga pembakaran. Gasifier juga menghasilkan produk energi lainnya yang berupa arang sekam. Artinya dengan mengintegrasikan unit gasifier di penggilingan padi mampu menghasilkan produk energi sebanyak 757,86 kW, sehingga rasio antara total jumlah bahan bakar solar yang digunakan dengan total energi produk gasifier bernilai 1 : 3,85.

3.2 Analisis Biaya

Analisis biaya diperlukan untuk menentukan nilai biaya pokok di setiap masing-masing unit Sistem Penggilingan Padi. Nilai biaya pokok tersebut dihitung berdasarkan biaya tetap maupun biaya tidak tetap. Nilai bunga modal yang diterapkan pada perhitungan ini sebesar 2,5% dan kapasitas kerja pada industri ini sebesar 2400 jam/tahun, dengan rincian industri ini beroperasi 8 jam/hari dan 25 hari/bulan. Hasil dari perhitungannya menyatakan bahwa motor diesel 2 yang berguna untuk menggerakkan unit *polisher* menjadi bagian yang membutuhkan biaya pokok tertinggi untuk setiap jamnya. Hasil ini disebabkan karena besarnya jumlah bahan bakar yang diperlukan akibat dari tingginya daya yang dihasilkan oleh motor tersebut, sedangkan untuk unit pengolahan lainnya, seperti *husker* dan *polisher* tidak membutuhkan biaya bahan bakar, tetapi hanya membutuhkan biaya operator dan perbaikan yang relatif murah. Kedua unit tersebut hanya menerima biomassa (gabah dan beras merah) yang dikirimkan para petani untuk diolah menjadi beras. Besarnya biaya pokok untuk setiap unit pada Sistem Penggilingan Padi ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Analisis biaya pada setiap unit di Sistem Penggilingan Padi

No.	Unit	Biaya Pokok, \dot{Z}_k (Rp/jam)
1	Motor diesel 1	57.741,88
2	Motor diesel 2	175.601,07
3	Husker	12.424,96
4	Polisher	12.518,19
5	Gasifier	50.268,77

3.3 Analisis Eksergoekonomi

Di dalam eksergoekonomi, setiap aliran eksergi perlu dipertimbangkan karena akan mempengaruhi nilai biaya untuk semua aliran. Sesuai dengan tahapan awal dari SPECO, maka didapatkan 14 aliran eksergi yang bekerja di sistem penggilingan padi (**Tabel 1**), sehingga dihasilkan 5 persamaan neraca eksergoekonomi seperti yang ditampilkan pada **Tabel 3**.

Aliran eksergi tersebut perlu dibedakan menurut prinsip dari definisi bahan bakar dan produk sesuai dengan proses yang berlangsung di setiap unit-unitnya. Tetapi untuk memperoleh nilai biaya eksergi pada setiap aliran, maka SPECO memberikan solusi dengan cara menerapkan persamaan bantu yang berlandaskan terhadap prinsip F dan P agar mempermudah proses penentuan biaya ekserginya. Berdasarkan prinsip tersebut, maka diperoleh 2 buah persamaan bantu yang dapat digunakan seperti yang dituliskan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Neraca Eksergoekonomi untuk setiap unit pada Sistem Penggilingan Padi

No.	Unit	Aliran Produk	Aliran Bahan Bakar	Persamaan Bantu		Persamaan Neraca Eksergoekonomi
				Prinsip P	Prinsip F	
1	Motor diesel 1	$c_2 \cdot \dot{E}X_2$	$c_1 \cdot \dot{E}X_1 - c_{W1} \cdot \dot{W}_1$	-	$c_1 = c_{W1}$	$c_2 \cdot \dot{E}X_2 = c_{W1}(\dot{E}X_1 - \dot{W}_1) + \dot{Z}_{MD1}$
2	Motor diesel 2	$c_4 \cdot \dot{E}X_4$	$c_3 \cdot \dot{E}X_3 - c_{W2} \cdot \dot{W}_2$	-	$c_2 = c_{W2}$	$c_4 \cdot \dot{E}X_4 = c_{W2}(\dot{E}X_3 - \dot{W}_2) + \dot{Z}_{MD2}$
3	Husker	$c_6 \cdot \dot{E}X_6 + c_7 \cdot \dot{E}X_7$	$c_5 \cdot \dot{E}X_5 + c_{W1} \cdot \dot{W}_1$	-	-	$c_6 \cdot \dot{E}X_6 + c_7 \cdot \dot{E}X_7 = c_5 \cdot \dot{E}X_5 + c_{W1} \cdot \dot{W}_1 + \dot{Z}_H$
4	Polisher	$c_8 \cdot \dot{E}X_8 + c_9 \cdot \dot{E}X_9$	$c_7 \cdot \dot{E}X_7 + c_{W2} \cdot \dot{W}_2$	-	-	$c_8 \cdot \dot{E}X_8 + c_9 \cdot \dot{E}X_9 = c_7 \cdot \dot{E}X_7 + c_{W2} \cdot \dot{W}_2 + \dot{Z}_P$
5	Gasifier	$c_{10} \cdot \dot{E}X_{10} + c_{11} \cdot \dot{E}X_{11}$	$c_6 \cdot \dot{E}X_6 + c_{W3} \cdot \dot{W}_3$	-	-	$c_{10} \cdot \dot{E}X_{10} + c_{11} \cdot \dot{E}X_{11} = c_6 \cdot \dot{E}X_6 + c_{W3} \cdot \dot{W}_3 + \dot{Z}_G$

Berdasarkan hasil dari analisis setiap aliran eksergi yang terjadi, maka terdapat beberapa biaya eksergi yang perlu ditentukan diawal perhitungan sebagai acuan untuk menyederhanakan ker-5 persamaan biaya tersebut. Beberapa biaya tersebut diantaranya adalah biaya eksergi untuk bahan bakar solar, gabah, serta listrik. Biaya eksergi gabah ditentukan berdasarkan keadaan di lapangan. Dalam hal ini, pihak pengelola industri tidak melakukan pembelian gabah kepada para petani tetapi hanya menerima pemesanan untuk menggiling gabah agar dihasilkan beras yang bersih dari dedak dan sekam. Oleh karena itu, biaya eksergi untuk gabah bernilai nol. Biaya eksergi solar diperoleh melalui harga bahan bakar solar untuk setiap liternya, sehingga apabila dikalkulasikan berdasarkan nilai kalornya maka biaya eksergi solar bernilai Rp.1.113,09,- /kWh. Biaya eksergi listrik ditentukan berdasarkan literatur dari yang dihasilkan oleh Puji Lestari *et al.* (2013). Ketiga biaya eksergi tersebut dapat menyederhanakan persamaan biaya eksergoekonomi menjadi 3 buah, tetapi untuk menyelesaikan ketiga persamaan biaya tersebut masih dibutuhkan beberapa persamaan tambahan. Persamaan tambahan tersebut diambil dengan asumsi bahwa laju aliran biaya eksergi memiliki nilai yang sama, seperti yang ditampilkan pada **Tabel 4**, dan dengan menggunakan 3 persamaan biaya serta 3 persamaan tambahan maka nilai laju aliran biaya dari setiap aliran eksergi dapat dihasilkan dengan menggunakan matrik persegi yang selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan matrik identitas.

Tabel 5 menunjukkan hasil dari evaluasi eksergoekonomi melalui metode SPECO. Berdasarkan tabel tersebut terdapat biaya eksergi spesifik untuk setiap aliran yang terjadi di sistem penggilingan padi. biaya tersebut didefinisikan sebagai jumlah biaya yang perlu dikeluarkan ataupun yang dapat dihasilkan dalam setiap unit sesuai dengan jenis alirannya. Jumlah biaya eksergi spesifik yang perlu dikeluarkan termasuk kepada defenisi bahan bakar, dan sebaliknya biaya eksergi spesifik yang dihasilkan termasuk kepada defenisi produk. Sistem tersebut memiliki beberapa aliran produk yang pada dasarnya tidak digunakan sebagai produk pangan, tetapi dapat diartikan sebagai sumebr energi yang berpotensi untuk dimanfaatkan kembali. Sumber tersebut diantaranya adalah aliran eksergi panas buang dari kedua motor diesel, serta aliran eksergi arang sekam hasil proses

Tabel 4. Penyederhanaan Neraca Eksergoekonomi dan Persamaan Tambahan

No.	Penyederhanaan Persamaan	Persamaan Tambahan
1	$c_6 \cdot \dot{E}x_6 + c_7 \cdot \dot{E}x_7 = 4.526.543,73$	$c_6 \cdot \dot{E}x_6 - c_7 \cdot \dot{E}x_7 = 0$
2	$-c_7 \cdot \dot{E}x_7 + c_8 \cdot \dot{E}x_8 + c_9 \cdot \dot{E}x_9 = 76.409,30$	$c_8 \cdot \dot{E}x_8 - c_9 \cdot \dot{E}x_9 = 0$
3	$-c_6 \cdot \dot{E}x_6 + c_{10} \cdot \dot{E}x_{10} + c_{11} \cdot \dot{E}x_{11} = 49.097,38$	$c_{10} \cdot \dot{E}x_{10} - c_{11} \cdot \dot{E}x_{11} = 0$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_6 \cdot \dot{E}x_6 \\ c_7 \cdot \dot{E}x_7 \\ c_8 \cdot \dot{E}x_8 \\ c_9 \cdot \dot{E}x_9 \\ c_{10} \cdot \dot{E}x_{10} \\ c_{11} \cdot \dot{E}x_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 31.515,60 \\ 76.409,30 \\ 51.408,90 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_6 \cdot \dot{E}x_6 \\ c_7 \cdot \dot{E}x_7 \\ c_8 \cdot \dot{E}x_8 \\ c_9 \cdot \dot{E}x_9 \\ c_{10} \cdot \dot{E}x_{10} \\ c_{11} \cdot \dot{E}x_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15.757,80 \\ 15.757,80 \\ 46.083,55 \\ 46.083,55 \\ 33.583,35 \\ 33.583,35 \end{bmatrix}$$

pembakaran di dalam reaktor gasifier. Ketiga aliran tersebut memiliki total biaya eksergi spesifik sebesar Rp 169.673,46/jam dan berpeluang untuk dapat dijadikan sumber energi yang diantaranya adalah untuk pengeringan, maupun sebagai pembakaran biomassa. Satu hal yang perlu diperhatikan pada tabel tersebut adalah bagaimana potensi gas produser agar dapat dijadikan sebagai energi pengganti pada motor penggerak di sistem penggilingan padi. Berdasarkan perhitungannya, gas produser berpotensi untuk menjadi pengganti sumber energi hingga mencapai 2,04 kali lipat, di mana yang menjadi input energi sebelumnya adalah bahan bakar solar untuk motor penggerak husker dan polisher. Di sisi lain, terdapat keuntungan apabila gas produser tersebut dapat diaplikasikan, karena berdasarkan analisis biaya eksergi spesifiknya gas produser memiliki biaya produksi sebesar Rp 33.583,35/jam. Di sisi lain biaya yang dibutuhkan untuk mengolah gabah tersebut sebesar Rp 219.071,87/jam. Berdasarkan hasil tersebut, gas produser mampu menekan biaya pengeluaran untuk kebutuhan bahan bakar sebesar 84,67%. Keunggulan yang lain pada konsep ini adalah mampu

memberikan solusi untuk para pemilik industri penggilingan padi dalam hal penanganan limbah sekam yang semakin lama semakin menumpuk.

Tabel 5. Hasil biaya eksergi untuk setiap aliran di Sistem Penggilingan Padi

No. Aliran pada Gambar 1	Jenis Aliran Eksergi	Biaya Spesifik Eksergi, c (Rp/kWh)	Laju aliran Biaya Eksergi, \dot{C} (Rp/jam)
1	Solar pada motor diesel 1	1.113,09	54.523,52
2	Panas buang pada motor diesel 1	2.084,24	35.432,88
3	Solar pada Motor diesel 2	1.113,09	164.548,35
4	Panas Buang pada motor diesel 2	2.204,17	100.657,23
5	Gabah	-	-
6	Sekam	14,07	15.757,80
7	Beras merah	5,42	15.757,80
8	Dedak	91,44	46.083,55
9	Beras	19,19	46.083,55
10	Arang Sekam	94,25	33.583,35
11	Gas Produser	83,64	33.583,35
\dot{W}_1	Kerja mekanis motor diesel 1	1.113,09	19.090,64
\dot{W}_2	Kerja mekanis motor diesel 2	1.113,09	63.891,11
\dot{W}_3	Listrik	712,58 (*)	1.140,13

(*) (Puji Lestari et al., 2013)

Salah satu indikator performansi di analisis eksergoekonomi adalah faktor f . Faktor ini mengindikasikan seberapa besar pengaruh *exergy destruction* terhadap biaya pokok dari setiap masing-masing komponen. Rendahnya faktor f menyatakan bahwa biaya yang berkaitan dengan ireversibilitas memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap alat tersebut, jika dibandingkan dengan biaya modal. Kondisi ini dapat diminimalisir dengan mengurangi ireversibilitas pada alat. Berdasarkan **Tabel 6**, unit gasifier merupakan unit yang paling banyak memberikan kerugian biaya. Faktor ini tidak lepas dari efek nilai *exergy destruction* yang sangat tinggi, karena di dalam unit tersebut terjadi proses termal yang melibatkan suhu pembakaran yang sangat tinggi. Perhitungan nilai *exergy destruction* dapat dilihat pada Chatib et al (2023).

Tabel 6. Nilai *Exergy destruction* dan Faktor f untuk setiap masing-masing unit

No.	Equipment	<i>Exergy Destruction</i> , \dot{E}_{XD} (kW) (*)	Laju Aliran Biaya <i>Exergy Destruction</i> , \dot{C}_D (Rp/h)	Faktor f
1	Motor diesel 1	14,83	16.510,04	0,778
2	Motor diesel 2	44,76	49.826,20	0,779
3	Husker	17,15	19.090,64	0,394
4	Polisher	57,40	64.202,40	0,163
5	Gasifier	363,72	264.294,93	0,160

(*) (Chatib et al., 2023)

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisisnya, eksergi sekam memiliki potensi yang cukup besar sebagai pemasok energi di penggilingan padi hampir mencapai 6 kali lipat, dan produk eksergi dari Gasifier yang berupa gas produser dan arang sekam mampu menggantikan eksergi solar hampir mencapai 4 kali lipat, dengan rasio 1 : 3,85. Disamping itu, dari segi analisis eksergoekonomi, pemanfaatan gas produser tersebut juga dapat menekan biaya pengeluaran bahan bakar hingga mencapai 84,67%.

5. Daftar Pustaka

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. (1996). Thermal design and optimization. In *Energy* (Vol. 21, Issue 5). John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(96\)90000-6](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(96)90000-6)
- BPS. (2012). Hasil Pendataan Lengkap Industri Penggilingan Padi Tahun 2012.
- Chatib, O.C., Budiastara, I W., Solahudin, M. (2023). Exergy Analysis In Rice Milling System Integrated With Gasifier. *International Journal of Exergy*. In Production.
- Joni, Sebayang, R., Marpaung, J., Setiawan, R., Tambunan, A. H., Siregar, K. (2020). Kajian kinerja siklon pembersih dan pengaruhnya terhadap konsentrasi gas-gas hasil gasifikasi tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 21(3):211–218.
- Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G. (2006). SPECOC: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, 31(8–9), 1257–1289. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>
- Lozano, M. A., Valero, A. (1993). Theory of The Exergetic Cost. *Energy*, 18(9):939–960.
- Ma, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., Qu, Y., Zhou, J., Qin, H. (2012). Design and experimental investigation of a 190 kWe biomass fixed bed gasification and polygeneration pilot plant using a double air stage downdraft approach. *Energy*, 46(1):140–147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.008>
- Marques, A. da S., Carvalho, M., Ochoa, A. A. V., Ronelly Souza, dos Santos, C. A. C. (2020). Exergoeconomic Assessment of a Compact Electricity-Cooling Cogeneration Unit. *Energies*, 13:1–18.
- Puji Lestari, M., (2013). Penentuan Harga Pokok Energi Listrik Pada PT. PLN (Persero) Wilayah Suluttenggo Manado. *Jurnal EMBA*, 1(3):292–301.
- Shanti, I., Nugroho, G., Sarwono. (2012). Analisa Termoekonomi Pada Sistem Kombinasi Turbin Gas – Uap PLTGU PT PJB Unit Pembangkitan Gresik. *Jurnal Teknik Pomits*, 1(1):1–6.
- Tambunan, A. H. (2007). Penerapan Analisis Eksergi Dalam Bidang Pertanian. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 21(3):205–212. <https://doi.org/10.19028/jtep.21.3.205-212>