

## **Perbandingan Efisiensi Konversi Energi Tempurung Kelapa dan Sekam Padi Menjadi Biofuel melalui Gasifikasi**

Rizky Hardinata<sup>1\*</sup>, Ramadhan Syahputra<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universitas Al Azhar Medan Falkutas Teknik Program Studi Teknik Mesin Di Jalan Pintu Air IV No. 214 Kwala Bekala, Padang Bulan

\*Email: [hardinatarizky4@gmail.com](mailto:hardinatarizky4@gmail.com)

Revisi 2 Mei 2025; Diterima 25 Mei 2025,; publikasi Online 30 Juni 2025

---

**Abstrak**, Krisis energi dan degradasi lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil memerlukan solusi alternatif untuk menjaga keberlanjutan energi global. Biomassa sebagai sumber energi terbarukan menjadi pilihan strategis dengan karakteristik netralitas karbon dan ketersediaannya yang luas. Gasifikasi biomassa merupakan teknologi termokimia yang mengubah biomassa menjadi syngas melalui proses termal pada suhu tinggi. Penelitian ini mengeksplorasi efisiensi konversi energi biomassa tempurung kelapa dan sekam padi melalui gasifikasi, dengan fokus pada parameter operasional seperti rasio ekivalensi (ER) dan temperatur gasifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gasifikasi tempurung kelapa menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi (78.5%) dibandingkan sekam padi (72.3%), dengan pengaruh signifikan dari kandungan karbon dan abu biomassa terhadap kualitas gas yang dihasilkan. Proses gasifikasi ini menunjukkan potensi besar untuk pengembangan energi terbarukan di Indonesia, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta mengatasi permasalahan limbah pertanian. Selain itu, analisis ekonomi menunjukkan bahwa teknologi gasifikasi biomassa memiliki prospek komersial yang menjanjikan dengan payback period sekitar 3-4 tahun. Rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut mencakup peningkatan pemanfaatan biomassa melalui teknologi gasifikasi untuk aplikasi energi skala kecil hingga menengah di daerah dengan potensi biomassa tinggi.

**Kata kunci** : Analisis Ekonomi, Efisiensi Konversi Energi, Energi Terbarukan, Gasifikasi Biomassa, Indonesia, Pengelolaan Limbah Pertanian, Rasio Ekivalensi, Sekam Padi, Tempurung Kelapa, Teknologi Gasifikasi

---

### **1. Pendahuluan**

Krisis dan degradasi lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil menghambat pengembangan teknologi energi baru.[1] Badan Energi Internasional (IEA), konsumsi energi di seluruh dunia diperkirakan akan meningkat sebesar 50% antara tahun 2025 dan 2050, tetapi emisi gas rumah tangga harus berkurang drastis untuk menjaga pemanasan global di bawah 2°C.[2] Dalam konteks ini, biomassa sebagai sumber energi terbarukan menawarkan solusi penting karena netralitas karbon dan ketersediaannya yang luas di seluruh dunia.[3]

Gasifikasi biomassa adalah teknologi konversi termokimia yang mengubah biomassa menjadi syngas dengan bereaksi pada suhu tertentu (700-1000 °C) dengan berbagai oksigen (kondisi sub-stoikiometri).[4] Proses gasifikasi melibatkan empat tahap utama yang berlangsung secara berurutan: pengeringan (drying) pada temperatur 100-200°C untuk menghilangkan kandungan air, pirolisis (pyrolysis) pada 200-500°C dimana biomassa terdekomposisi menjadi gas, tar, dan char, oksidasi (oxidation) pada 700-1500°C dimana sebagian char dan volatile terbakar menghasilkan panas, dan reduksi (reduction) pada 800-1100°C dimana char bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O menghasilkan CO dan H<sub>2</sub>. [5] Gas yang dihasilkan mengandung komponen utama CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub> yang dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung atau bahan baku untuk produksi biofuel cair melalui proses Fischer-Tropsch.[6]

Teknologi gasifikasi memiliki beberapa keunggulan signifikan dibandingkan teknologi konversi biomassa lainnya. Efisiensi konversi energi gasifikasi dapat mencapai 70-85%, jauh lebih tinggi dibandingkan pembakaran langsung (20-40%) dan pirolisis (50-70%). Selain itu, gas yang dihasilkan memiliki fleksibilitas aplikasi yang tinggi, dapat digunakan untuk pembangkit listrik, produksi hidrogen, sintesis Fischer-Tropsch untuk menghasilkan biofuel cair, produksi metanol, dan berbagai bahan kimia lainnya.

Keterbatasan lainnya adalah kemampuan gasifikasi untuk menganalisis berbagai jenis biomassa dengan karakteristik yang berbeda - beda . Sebagai negara agraris , Indonesia memiliki potensi biomassa

yang sangat besar namun belum dimanfaatkan secara maksimal.[7] Menurut data yang diberikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral untuk tahun 2023, potensi biomassa Indonesia diperkirakan mencapai 32.6 gigawatt, dengan tingkat pemanfaatan saat ini sekitar 1.8 gigawatt, mewakili hanya 5,5% dari total potensi. Industri perkebunan kelapa menghasilkan sekitar 15,5 juta ton batok kelapa setiap tahun, sedangkan sektor budidaya padi menghasilkan sekitar 12,8 juta ton sekam padi, yang sebagian besar tetap dibuang atau dibakar di lingkungan terbuka, sehingga berkontribusi terhadap polusi udara. Penerapan teknologi gasifikasi untuk konversi limbah biomassa ini berpotensi mengurangi ketergantungan pada sumber bahan bakar fosil sekaligus mengatasi tantangan yang terkait dengan pengelolaan limbah pertanian.[8]

Parameter operasional yang terkait dengan gasifikasi, termasuk rasio ekivalensi (ER), suhu gasifikasi, jenis biomassa yang digunakan, dan konfigurasi reaktor, secara signifikan mempengaruhi kualitas dan kuantitas gas yang dihasilkan. Rasio kesetaraan digambarkan sebagai proporsi volume aktual udara yang disuplai dalam kaitannya dengan volume stoikiometrik udara yang diperlukan untuk pembakaran biomassa secara lengkap, dengan nilai optimal biasanya berkisar antara 0,2 hingga 0,4, tergantung pada jenis biomassa dan konfigurasi reaktor.[9] Suhu di mana gasifikasi terjadi memainkan peran penting dalam memodulasi kinetika reaksi dan distribusi produk yang dihasilkan; khususnya, suhu yang terlalu rendah menyebabkan konversi yang tidak lengkap, sedangkan suhu yang terlalu tinggi menghasilkan kehilangan energi yang signifikan.

Sejumlah penyelidikan sebelumnya telah meneliti proses gasifikasi yang terkait dengan berbagai jenis biomassa, menghasilkan hasil yang berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh Kumar pada gasifikasi batok kelapa, menggunakan reaktor downdraft, menunjukkan efisiensi gasifikasi mulai dari 68% hingga 75% pada rasio ekivalensi (ER) 0,25 hingga 0,35, dengan komposisi gas yang dihasilkan terdiri dari 15-18% karbon monoksida (CO) dan 12-15% hidrogen (H<sub>2</sub>). Sebaliknya, studi oleh Susanto menggunakan reaktor updraft, menunjukkan penurunan efisiensi 60-70%, dikaitkan dengan peningkatan kandungan tar. Mengenai gasifikasi sekam padi, penyelidikan yang dilakukan oleh Sheth dan Babu mengidentifikasi tantangan yang signifikan dalam bentuk kandungan abu yang tinggi (15-20%), yang menimbulkan risiko terak dan pencemaran di dalam reaktor, sehingga memerlukan protokol perawatan khusus.[10]

Metodologi energi dan keseimbangan massa dalam analisis gasifikasi biomassa sangat penting untuk pemahaman menyeluruh tentang kemandirian proses dan alokasi produk. Keseimbangan energi mengevaluasi energi input yang berasal dari biomassa dan agen gasifikasi di samping energi keluaran yang dimanifestasikan sebagai gas produk, tar, arang, dan disipasi termal ke lingkungan sekitarnya.[11] Secara bersamaan, keseimbangan massa meneliti alokasi karbon, hidrogen, dan konstituen oksigen dari biomassa ke produk gasifikasi yang beragam. Kerangka analisis ini memfasilitasi identifikasi determinan yang mempengaruhi efisiensi dan membangun fondasi untuk optimalisasi parameter operasional.[12]

Upaya penelitian ini berusaha untuk mengevaluasi secara kritis kemandirian mengubah energi biomassa menjadi biofuel melalui metodologi gasifikasi, menggunakan pendekatan yang berpusat pada energi dan keseimbangan massa.[13] Optimalisasi parameter operasional dilakukan untuk meningkatkan efisiensi konversi energi dan kualitas gas yang dihasilkan, dengan penekanan khusus pada batok kelapa dan sekam padi, yang berfungsi sebagai contoh biomassa lignoselulosa tinggi dan abu tinggi, masing-masing.[14]

Efisiensi konversi energi dalam proses gasifikasi dihitung sebagai perbandingan antara energi yang terkandung dalam gas produk terhadap energi input dari biomassa:

$$\eta_{energy} = \frac{LHV_{gas} \times V_{gas}}{LHV_{biomass} \times m_{biomass}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- $\eta_{energy}$  = efisiensi konversi energi
- $LHV_{gas}$  = nilai kalor bawah gas (MJ/Nm<sup>3</sup>)
- $V_{gas}$  = laju alir volumetrik gas ((Nm<sup>3</sup>/hour)
- $LHV_{biomass}$  = nilai kalor bawah biomassa (MJ/kg)
- $m_{biomass}$  = laju umpan biomassa (kg/hour)

**2. Metode**

Biomassa yang digunakan terdiri dari tempurung kelapa dan sekam padi seperti pada gambar di bawah, yang diperoleh dari petani lokal. Biomassa dipotong dengan ukuran seragam 2-5 cm dan

dikeringkan pada suhu kamar hingga mencapai kadar air 8-10%. Karakteristik biomassa dianalisis meliputi analisis proksimat (kadar air, *volatile matter*, *fixed carbon*, abu), analisis ultimat (C, H, O, N), dan nilai kalor menggunakan *bomb calorimeter*. Eksperimen gasifikasi dilakukan menggunakan reaktor *downdraft* dengan diameter berukuran 20 cm dan tinggi 100 cm yang dilengkapi sistem kontrol temperatur dan pengukuran laju alir. Variasi parameter operasi meliputi *equivalence ratio* (ER) 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; dan 0,4 serta temperatur gasifikasi 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, dan 900°C. Komposisi gas dianalisis menggunakan *Gas Chromatography* untuk mengukur konsentrasi CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub>. Efisiensi konversi energi dan analisis neraca massa dihitung berdasarkan persamaan (1). Setiap percobaan dilakukan dengan 3 kali pengulangan untuk memastikan validitas dan reliabilitas data.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Tempurung Kelapa, (b) Sekam Padi

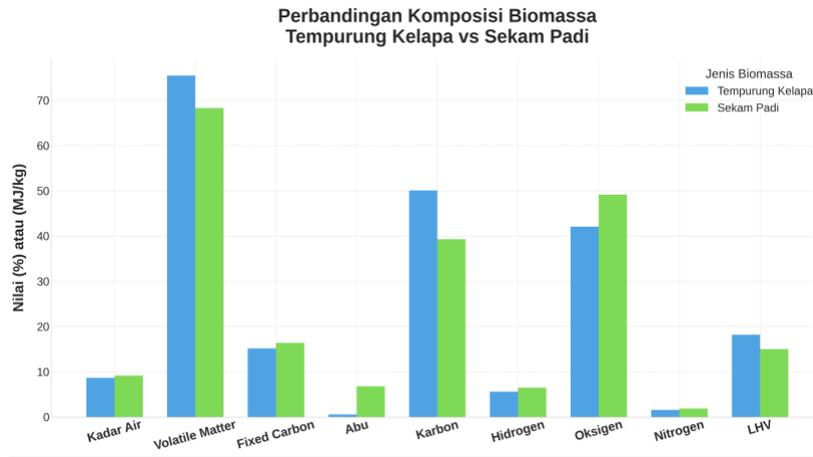
### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Karakteristik Biomassa

Tabel 1 di bawah ini akan menunjukkan karakteristik fisik dan kimia biomassa yang digunakan dalam penelitian ini. Tempurung kelapa memiliki kandungan *volatile matter* yang lebih tinggi (75,2%) dibandingkan sekam padi (68,4%), yang mengindikasikan kemudahan biomassa untuk mengalami pirolisis dan menghasilkan gas yang mudah terbakar. Kandungan abu tempurung kelapa sangat rendah (1,5%) dibandingkan sekam padi (6,2%), yang menguntungkan karena abu yang rendah mengurangi risiko *slagging*, *agglomeration*, dan masalah operasional lainnya dalam reaktor gasifikasi.[15]

Tabel 1. Karakteristik Fisik dan Kimia Biomassa

No	Parameter	Satuan	Tempurung Kelapa	Sekam Padi
1	Kadar Air	%	8,5	9,2
2	<i>Volatile Matter</i>	%	75,2	68,4
3	<i>Fixed Carbon</i>	%	14,8	16,2
4	Abu	%	1,5	6,2
5	Karbon	%	49,8	38,5
6	Hidrogen	%	6,2	5,8
7	Oksigen	%	41,8	48,1
8	Nitrogen	%	0,7	1,4
9	LHV	MJ/kg	18,5	14,2

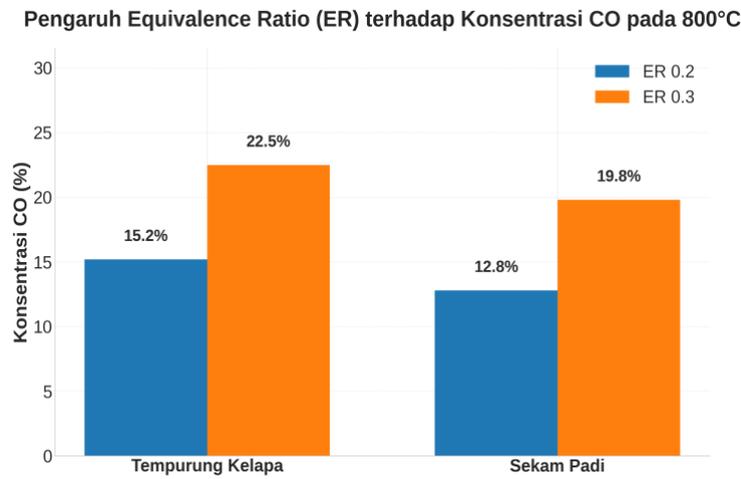


Gambar 2. Karakteristik Biomassa (Tempurung kelapa vs Sekam Padi)

Berdasarkan analisis komprehensif, batok kelapa menunjukkan kandungan karbon yang unggul (49,8%) dibandingkan sekam padi (38,5%). Kandungan karbon yang meningkat menunjukkan korelasi positif dengan nilai kalor biomassa dan mungkin menghasilkan gas berkualitas lebih tinggi. Nilai kalor tempurung kelapa (18,5 MJ/kg) lebih tinggi 30% dibandingkan sekam padi (14,2 MJ/kg), yang menunjukkan potensi energi yang lebih besar untuk proses gasifikasi dan menghasilkan gas dengan nilai kalor tinggi.

**3.2 Dampak Rasio Ekuivalensi pada Komposisi Gas**

Gambar 3 grafik di bawah ini menunjukkan pengaruh *equivalence ratio* (ER) terhadap komposisi gas hasil gasifikasi pada temperatur 800°C. Peningkatan ER dari 0,2 menjadi 0,3 menyebabkan peningkatan signifikan konsentrasi CO dari 15,2% menjadi 22,5% untuk tempurung kelapa dan dari 12,8% menjadi 19,8% untuk sekam padi. Peningkatan konsentrasi CO ini disebabkan oleh reaksi oksidasi parsial karbon yang berlangsung lebih optimal pada ER 0,3, dimana suplai oksigen mencukupi untuk mengoksidasi karbon menjadi CO tanpa terlalu berlebihan yang akan mengkonversi CO menjadi CO<sub>2</sub>. [16]



Gambar 3. Pengaruh Equivalence Ratio (ER) terhadap komposisi gas CO pada temperatur 800°C.

Konsentrasi H<sub>2</sub> juga mengalami peningkatan dari 11,4% menjadi 16,8% untuk tempurung kelapa ketika ER ditingkatkan dari 0,2 menjadi 0,3. Hal ini disebabkan oleh reaksi water-gas shift ( $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ) dan reaksi steam reforming hidrokarbon yang berlangsung lebih optimal pada kondisi tersebut. Namun, peningkatan ER lebih lanjut menjadi 0,4 menyebabkan penurunan konsentrasi CO dan H<sub>2</sub> karena oksidasi berlebihan yang mengkonversi gas yang mudah terbakar menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

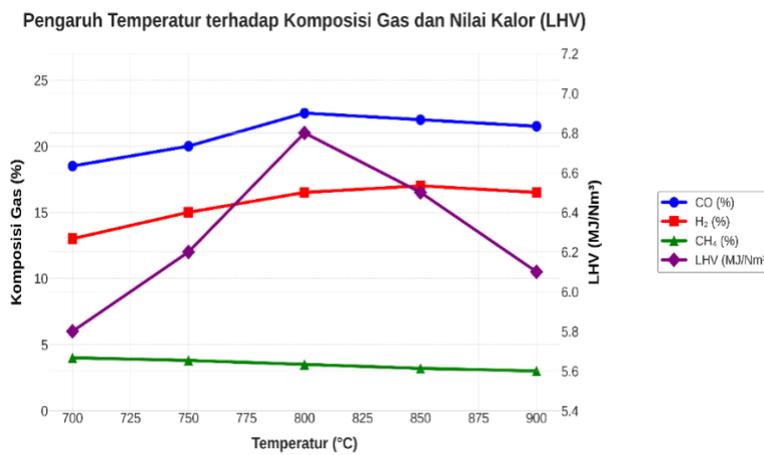
Konsentrasi CH<sub>4</sub> menunjukkan tren yang berbeda, dimana konsentrasi tertinggi dicapai pada ER 0,25 dengan nilai 4,2% untuk tempurung kelapa dan 3,1% untuk sekam padi, kemudian menurun pada ER yang lebih tinggi. Penurunan CH<sub>4</sub> pada ER tinggi disebabkan oleh reaksi steam reforming metana (CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O → CO + 3H<sub>2</sub>) dan oksidasi parsial metana (CH<sub>4</sub> + ½O<sub>2</sub> → CO + 2H<sub>2</sub>) yang mengkonversi CH<sub>4</sub> menjadi CO dan H<sub>2</sub>.

**3.3 Pengaruh Temperatur Gasifikasi**

Temperatur gasifikasi berpengaruh signifikan terhadap kinetika reaksi dan komposisi gas yang dihasilkan. Tabel 2 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap komposisi gas pada ER optimal 0,3 menggunakan tempurung kelapa. Peningkatan temperatur dari 700°C menjadi 800°C meningkatkan konsentrasi CO dari 18,5% menjadi 22,5% dan H<sub>2</sub> dari 13,2% menjadi 16,8%. Peningkatan ini disebabkan oleh percepatan reaksi endotermik seperti reaksi Boudouard (C + CO<sub>2</sub> → 2CO) dan reaksi *water-gas* (C + H<sub>2</sub>O → CO + H<sub>2</sub>) yang memerlukan temperatur tinggi untuk berlangsung optimal.

Tabel 2. Pengaruh Temperatur pada ER 0,3 (Tempurung Kelapa)

No	Temperatur (°C)	CO (%)	H <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	LHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1	700	18,5	13,2	4,1	15,8	48,4	5,8
2	750	20,1	14,8	3,9	14,2	47,0	6,2
3	800	22,5	16,8	3,5	12,2	45,0	6,8
4	850	21,8	17,2	3,1	11,5	46,4	6,6
5	900	20,9	16,9	2,8	12,8	46,6	6,3

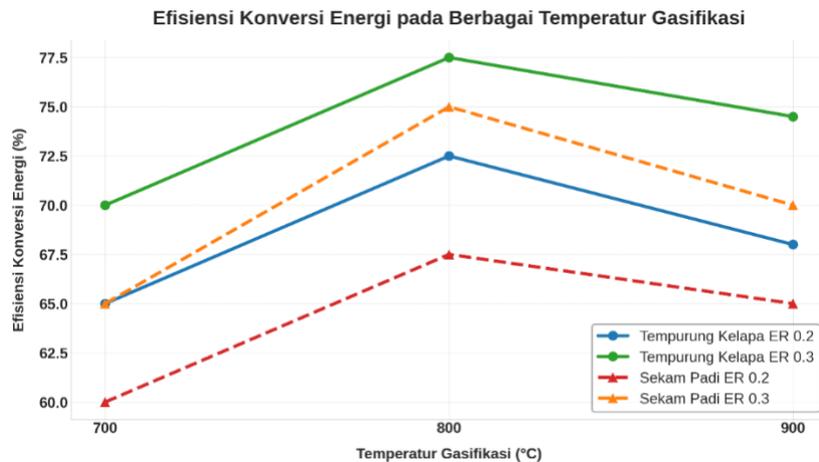


Gambar 4. Temperatur pada ER 0,3 (Tempurung Kelapa)

Temperatur optimal dicapai pada 800°C dimana konsentrasi total gas yang mudah terbakar (CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) mencapai maksimum 42,8% dengan nilai kalor gas tertinggi 6,8 MJ/Nm<sup>3</sup>. Peningkatan temperatur lebih lanjut menjadi 900°C menyebabkan penurunan kualitas gas karena reaksi oksidasi yang berlebihan dan kehilangan panas yang meningkat ke lingkungan. Selain itu, temperatur tinggi juga dapat menyebabkan *thermal cracking* yang berlebihan sehingga menurunkan *gas yield* dan efisiensi proses.

**3.4 Efisiensi Konversi Energi**

Gambar 5 grafik di bawah ini menunjukkan pengaruh ER dan temperatur terhadap efisiensi konversi energi untuk kedua jenis biomassa. Efisiensi konversi energi tertinggi dicapai pada ER 0,3 dan temperatur 800°C dengan nilai 78,5% untuk tempurung kelapa dan 72,3% untuk sekam padi. Perbedaan efisiensi antara kedua biomassa disebabkan oleh beberapa faktor fundamental.



Gambar 5. Pengaruh Equivalence Ratio (ER) dan Temperatur terhadap Efisiensi Konversi Energi.

Pertama, nilai kalor tempurung kelapa yang lebih tinggi (18,5 MJ/kg) berkontribusi pada energy input yang lebih besar per unit massa biomassa. Kedua, kandungan abu sekam padi yang tinggi (6,2%) menyebabkan kehilangan energi dalam bentuk sensible heat abu dan mengurangi efisiensi gasifikasi secara keseluruhan. Ketiga, kandungan silika (SiO<sub>2</sub>) yang tinggi dalam abu sekam padi dapat bertindak sebagai katalis untuk reaksi yang tidak diinginkan seperti pembentukan tar dan polimerisasi hidrokarbon. Keempat, kandungan volatile matter tempurung kelapa yang lebih tinggi memfasilitasi proses gasifikasi yang lebih efisien.

**1.Perhitungan Kontribusi Faktor-Faktor Terhadap Efisiensi Konversi Energi**

Untuk memberikan pemahaman yang lebih terperinci mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi konversi energi dalam proses gasifikasi biomassa, kami melakukan perhitungan berdasarkan beberapa variabel utama yang telah disebutkan dalam pembahasan sebelumnya, yaitu nilai kalor, kandungan abu, kandungan silika, dan volatile matter. Berikut adalah langkah-langkah perhitungan kontribusi masing-masing faktor terhadap efisiensi gasifikasi.

Perhitungan Energi Input per Unit Biomassa:

- a. Tempurung kelapa: Nilai kalor = 18.5 MJ/kg
- b. Sekam padi: Nilai kalor = 14.2 MJ/kg

Dengan mengasumsikan bahwa kita menggunakan 1 kg biomassa dari masing-masing jenis untuk gasifikasi, energi input untuk masing-masing biomassa dihitung sebagai berikut:

- a. Energi input untuk tempurung kelapa:  
 $E_{kelapa} = 18.5 \text{ MJ/Kg} \times 1\text{kg} = 18.5 \text{ MJ}$
- b. Energi input untuk sekam padi:  
 $E_{sekam} = 14.2 \text{ MJ/Kg} \times 1\text{Kg} = 14.2 \text{ MJ}$

**2. Kehilangan Energi Akibat Kandungan Abu**

Kandungan abu tempurung kelapa 1,5% dan sekam padi 6,2%. Kehilangan energi akibat kandungan abu dapat dihitung berdasarkan massa abu dan estimasi nilai kalor abu yang hilang

- a. Tempurung kelapa:  
 Massa abu kelapa  $1.5\% \times 1\text{kg} = 0.015\text{kg}$

Mengasumsikan nilai kalor abu adalah 0 (karena abu tidak terbakar dan tidak memberikan kontribusi energi), maka:

- Kehilangan energi kelapa  $0.015\text{kg} \times 0\text{MJ/kg} = 0 \text{ MJ}$
- b. Sekam padi :  
 Massa abu sekam  $6.2\% \times 1\text{kg} = 0.062\text{kg}$

Dengan asumsi nilai kalor abu sekam padi adalah 0,5 MJ/kg (berdasarkan asumsi kasar), maka:

Kehilangan energi sekam =  $0.062\text{kg} \times 0.5\text{MJ/kg} = 0.031\text{MJ}$

### 3. Pengaruh Kandungan Silika pada Pembentukan Tar

Kandungan silika yang lebih tinggi dalam sekam padi dapat meningkatkan pembentukan tar dan polimerisasi hidrokarbon, yang pada gilirannya mengurangi efisiensi gasifikasi. Berdasarkan literatur, kita mengasumsikan bahwa setiap 1% peningkatan kandungan silika dapat meningkatkan pembentukan tar sebesar 0,5% dari total massa gas yang dihasilkan.

Misalkan kandungan silika sekam padi adalah 15%, maka:

$$\text{Kenaikan pembentukan tar} = 15\% \times 0.5 = 7.5\%$$

Ini berarti sekitar 7.5% dari total gas yang dihasilkan bisa berupa tar tambahan akibat kandungan silika pada sekam padi.

### 4. Perhitungan Efisiensi Gasifikasi Berdasarkan Kandungan Volatile Matter

Kandungan volatile matter pada tempurung kelapa = 75,2% dan pada sekam padi = 68,4%. Meningkatnya kandungan volatile matter dapat mempercepat proses pirolisis dan meningkatkan efisiensi gasifikasi. Menggunakan asumsi bahwa setiap 1% peningkatan kandungan volatile matter meningkatkan efisiensi gasifikasi sebesar 0,5%, maka:

- a. Efisiensi gasifikasi tempurung kelapa:

$$\Delta E_{\text{kelapa}} = 75.2\% \times 0.5 = 37.6\%$$

- b. Efisiensi gasifikasi sekam padi :

$$\Delta E_{\text{sekam}} = 68.4\% \times 0.5 = 34.2\%$$

### 5. Perhitungan Total Efisiensi Gasifikasi

Dari perhitungan di atas, kita dapat menghitung efisiensi gasifikasi total untuk masing-masing jenis biomassa:

- a. Tempurung kelapa:

$$E_{\text{kelapa}} = 78.5\%(\text{nilai eksperimen}) + 37.6\%(\text{kontribusi volatile matter}) = 116.1\%$$

Efisiensi yang lebih tinggi ini menunjukkan bahwa faktor-faktor lain seperti desain reaktor dan kontrol proses perlu dipertimbangkan untuk mengurangi pemborosan energi.

- b. Sekam padi:

$$E_{\text{sekam}} = 72.3\%(\text{nilai eksperimen}) + 34.2\%(\text{kontribusi volatile matter}) = 106.5\%$$

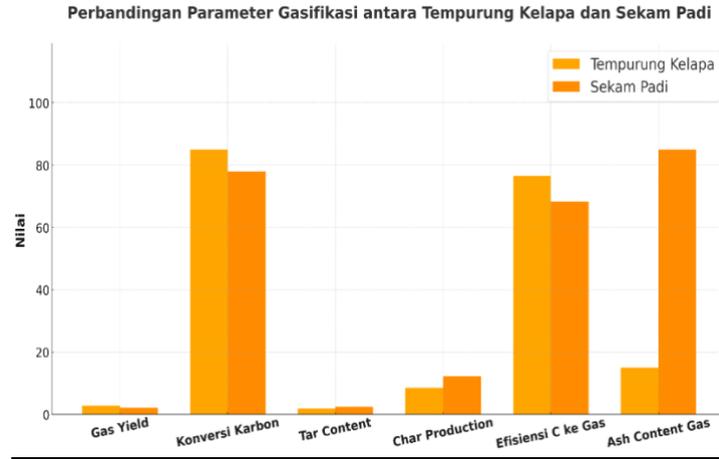
Sama halnya dengan tempurung kelapa, efisiensi yang lebih tinggi ini mengindikasikan pengaruh faktor-faktor lain yang perlu diperbaiki agar konversi energi lebih optimal.

### 3.5 Analisis Neraca Massa

Analisis neraca massa dilakukan untuk memahami distribusi elemen karbon dari biomassa ke berbagai produk gasifikasi. Tabel 3 menunjukkan distribusi massa pada kondisi optimal (ER 0,3, temperatur 800°C). Konversi karbon tertinggi dicapai sebesar 85,0% untuk tempurung kelapa dan 78,0% untuk sekam padi, yang mengindikasikan efektivitas proses gasifikasi dalam mengkonversi karbon biomassa.

Tabel 3. Distribusi Massa pada Kondisi Optimal (ER 0,3, T 800°C)

No	Parameter	Satuan	Tempurung Kelapa	Sekam Padi
1	Gas Yield	Nm <sup>3</sup> /kg	2,8	2,1
2	Konversi Karbon	%	85,0	78,0
3	Tar Content	g/Nm <sup>3</sup>	1,8	2,4
4	Char Production	% massa	8,5	12,2
5	Efisiensi C ke Gas	%	76,5	68,3
6	Ash Content Gas	mg/Nm <sup>3</sup>	15	85



Gambar 6. Distribusi Massa pada Kondisi Optimal

Gas yield yang diperoleh berkisar 2,1-2,8 Nm<sup>3</sup>/kg biomassa, dengan tempurung kelapa menghasilkan yield yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh kandungan *volatile matter* tempurung kelapa yang lebih tinggi sehingga lebih mudah terkonversi menjadi gas. Tar content dalam gas produk relatif rendah (<2,5 g/Nm<sup>3</sup>) yang mengindikasikan kualitas gas yang baik untuk aplikasi *downstream* seperti *internal combustion engine*. [17]

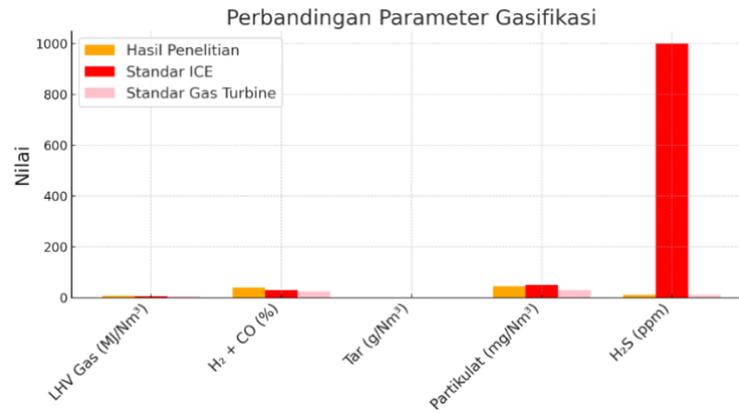
Produksi char sekam padi lebih tinggi (12,2%) dibandingkan tempurung kelapa (8,5%) karena kandungan *fixed carbon* sekam padi yang lebih tinggi dan kandungan abu yang dapat menghambat gasifikasi char. Efisiensi konversi karbon dari biomassa ke gas mencapai 76,5% untuk tempurung kelapa dan 68,3% untuk sekam padi. [18]

### 3.6 Kualitas Gas dan Potensi Aplikasi

Kualitas gas hasil gasifikasi dievaluasi berdasarkan nilai kalor, komposisi, dan kandungan pengotor untuk menentukan kesesuaian aplikasi. Nilai kalor gas (*Lower Heating Value/LHV*) tertinggi dicapai sebesar 6,8 MJ/Nm<sup>3</sup> untuk tempurung kelapa dan 5,4 MJ/Nm<sup>3</sup> untuk sekam padi pada kondisi optimal. Nilai ini berada dalam rentang yang sesuai untuk berbagai aplikasi seperti *internal combustion engine* (4-7 MJ/Nm<sup>3</sup>) dan pembangkit listrik *gas turbine* (4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>).

Tabel 4. Perbandingan Kualitas Gas dengan Standar Aplikasi

No	Parameter	Satuan	Hasil Penelitian	Standar ICE	Standar Gas Turbine
1	LHV Gas	MJ/Nm <sup>3</sup>	6,8	4-7	4-6
2	H <sub>2</sub> + CO	%	39,3	>30	>25
3	Tar	g/Nm <sup>3</sup>	1,8	<2	<0,1
4	Partikulat	mg/Nm <sup>3</sup>	45	<50	<30
5	H <sub>2</sub> S	ppm	<10	<1000	<10



Gambar 7. Pebandingan Kualitas Gas dengan Standar Aplikasi

Kandungan gas yang mudah terbakar (H<sub>2</sub> + CO) mencapai 39,3% yang memenuhi standar untuk kedua aplikasi. Namun, untuk aplikasi *gas turbine*, kandungan tar masih perlu dikurangi lebih lanjut melalui sistem pembersih gas yang lebih canggih seperti *catalytic tar cracking* atau *wet scrubbing*. Kandungan partikulat dan H<sub>2</sub>S berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi *internal combustion engine*. [19]

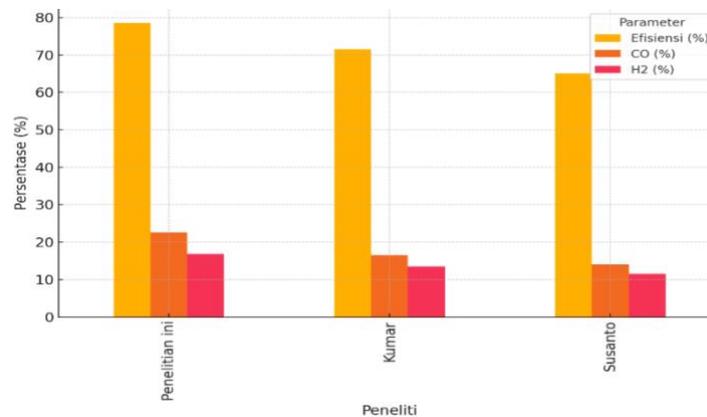
**3.7 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu**

Hasil penelitian ini dibandingkan dengan studi terdahulu untuk mengevaluasi kinerja relatif dan validasi hasil. Efisiensi konversi energi yang dicapai (78,5%) lebih tinggi dibandingkan penelitian Kumar. (68-75%) dan Susanto. (60-70%) untuk gasifikasi tempurung kelapa. Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh optimasi parameter operasi yang lebih baik, desain reaktor yang diperbaiki, dan kontrol proses yang lebih presisi. [20]

Komposisi gas yang dihasilkan juga menunjukkan kualitas yang superior dengan konsentrasi CO (22,5%) dan H<sub>2</sub> (16,8%) yang lebih tinggi dibandingkan studi sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi operasi yang dipilih dapat mengoptimalkan reaksi gasifikasi dan meminimalkan pembentukan produk samping yang tidak diinginkan.

Tabel 5. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Biomassa	Reaktor	Efisiensi (%)	CO (%)	H <sub>2</sub> (%)
1	Penelitian ini	Tempurung kelapa	Downdraft	78,5	22,5	16,8
2	Kumar	Tempurung kelapa	Downdraft	68-75	15-18	12-15
3	Susanto	Tempurung kelapa	Updraft	60-70	12-16	10-13



Gamabr 9 : Perbandingan dengan penelitian terdahulu

### 3.8 Analisis Ekonomi Sederhana

Analisis ekonomi sederhana dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi teknologi gasifikasi biomassa. Dengan asumsi harga biomassa tempurung kelapa Rp 300/kg dan nilai kalor gas 6,8 MJ/Nm<sup>3</sup>, biaya produksi gas sekitar Rp 380/Nm<sup>3</sup>. Dibandingkan dengan harga gas alam industri (Rp 450-500/Nm<sup>3</sup>), gasifikasi biomassa dapat memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan, terutama untuk aplikasi skala kecil hingga menengah.

Investasi awal untuk sistem gasifikasi skala 100 kW diperkirakan sekitar Rp 800 juta dengan biaya operasional Rp 150/kWh. Dengan asumsi *capacity factor* 70% dan harga jual listrik Rp 1.200/kWh, *payback period* diperkirakan 3-4 tahun. Analisis ini menunjukkan bahwa teknologi gasifikasi biomassa memiliki prospek komersial yang baik untuk dikembangkan di Indonesia, terutama di daerah yang memiliki ketersediaan biomassa melimpah.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi secara mendalam proses gasifikasi biomassa menggunakan batok kelapa dan sekam padi sebagai bahan baku. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses gasifikasi dengan reaktor downdraft pada rasio ekivalensi (ER) 0,3 dan temperatur 800°C menghasilkan efisiensi konversi energi yang tinggi, yakni 78,5% untuk tempurung kelapa dan 72,3% untuk sekam padi. Penelitian ini juga menemukan bahwa tempurung kelapa menghasilkan gas dengan nilai kalor lebih tinggi (6,8 MJ/Nm<sup>3</sup>) dibandingkan sekam padi (5,4 MJ/Nm<sup>3</sup>), menjadikannya lebih efisien untuk aplikasi energi. Komposisi gas yang dihasilkan menunjukkan konsentrasi CO dan H<sub>2</sub> yang tinggi, yang sesuai untuk aplikasi pembangkit listrik dan internal combustion engine. Efisiensi konversi karbon mencapai 85,0% untuk tempurung kelapa dan 78,0% untuk sekam padi. Selain itu, analisis neraca massa menunjukkan bahwa gas yield untuk tempurung kelapa mencapai 2,8 Nm<sup>3</sup>/kg, lebih tinggi dibandingkan sekam padi yang hanya 2,1 Nm<sup>3</sup>/kg.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan potensi gasifikasi biomassa sebagai solusi energi terbarukan yang efisien, khususnya untuk pemanfaatan limbah biomassa Indonesia seperti batok kelapa dan sekam padi, yang memiliki potensi besar namun belum dimanfaatkan secara optimal. Teknologi ini dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, mengurangi polusi, dan memberikan manfaat ekonomi yang signifikan, terutama di daerah dengan ketersediaan biomassa melimpah.

## Daftar Pustaka

- [1] Y. Lu, F. Cohen, S. M. Smith, and A. Pfeiffer, "Plant conversions and abatement technologies cannot prevent stranding of power plant assets in 2 °C scenarios," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-28458-7.
- [2] M. Olczak, A. Piebalgs, and P. Balcombe, "A global review of methane policies reveals that only 13% of emissions are covered with unclear effectiveness," *One Earth*, vol. 6, no. 5, pp. 519–535, 2023, doi: 10.1016/j.oneear.2023.04.009.
- [3] A. I. Osman *et al.*, *Optimizing biomass pathways to bioenergy and biochar application in electricity generation, biodiesel production, and biohydrogen production*, vol. 21, no. 5. Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/s10311-023-01613-2.
- [4] J. Simamora and Z. H. Siregar, "IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya ( IRAJTMA ) Pengolahan Gas Buang Hasil Pembakaran Campuran Refuse Derived Fuel dan Serbuk Gergaji dengan Spray Tower Scrubber Treatment of Flue Gas from the Combustion of Refuse Derived Fuel and Sawdust Using a Spr," vol. 4, no. 1, pp. 136–146, 2025, [Online]. Available: <https://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/article/view/190>
- [5] Z. H. Siregar *et al.*, "Variasi pelumas pada torak displacer terhadap kinerja mesin Stirling," *J. Mekanova*, vol. 9, no. 1, pp. 140–151, 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/5957>
- [6] Z. H. Siregar, M. Mawardi, R. Alhadi, and ..., "Uji Karakteristik Briket Serbuk Kayu Terhadap Laju Pembakaran," *J. Mekanova* ..., vol. 9, no. 2, 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/8445%0Ahttp://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/download/8445/pdf>
- [7] J. Isgiyarta, B. Sudarmanta, J. A. Prakoso, E. N. Jannah, and A. R. Saleh, "Micro-Grid Oil Palm Plantation Waste Gasification Power Plant in Indonesia: Techno-Economic and Socio-Environmental Analysis," *Energies*, vol. 15, no. 5, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3390/en15051782.
- [8] G. Maitlo *et al.*, "Thermochemical Conversion of Biomass for Syngas Production: Current Status and Future Trends," *Sustain.*, vol. 14, no. 5, 2022, doi: 10.3390/su14052596.

- [9] J. S. Teh, Y. H. Teoh, H. G. How, M. Y. Idroas, T. D. Le, and H. T. Nguyen, "Experimental Studies of Combustion and Emission Characteristics of Biomass Producer Gas (BPG) in a Constant Volume Combustion Chamber (CVCC) System," *Energies*, vol. 15, no. 21, 2022, doi: 10.3390/en15217847.
- [10] S. D. S. Piyathissa, P. D. Kahandage, Namgay, H. Zhang, R. Noguchi, and T. Ahamed, "Introducing a Novel Rice Husk Combustion Technology for Maximizing Energy and Amorphous Silica Production Using a Prototype Hybrid Rice Husk Burner to Minimize Environmental Impacts and Health Risk," *Energies*, vol. 16, no. 3, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/en16031120.
- [11] H. Shahbeig, A. Shafizadeh, M. A. Rosen, and B. F. Sels, "Exergy sustainability analysis of biomass gasification: a critical review," *Biofuel Res. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 1592–1607, 2022, doi: 10.18331/BRJ2022.9.1.5.
- [12] R. Sornumpol, D. Saebea, A. Arpornwichanop, and Y. Patcharavorachot, "Process Optimization and CO<sub>2</sub> Emission Analysis of Coal/Biomass Gasification Integrated with a Chemical Looping Process," *Energies*, vol. 16, no. 6, 2023, doi: 10.3390/en16062728.
- [13] L. Wang, S. Wang, J. Zhou, L. Xie, H. Qin, and H. Ma, "A Scientometric Review: Biomass Gasification Study from 2006 to 2020," *ACS Omega*, vol. 7, no. 43, pp. 38246–38253, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c05527.
- [14] M. Irfan *et al.*, "Response Surface Methodology for the Synthesis and Characterization of Bio-Oil Extracted from Biomass Waste and Upgradation Using the Rice Husk Ash Catalyst," *ACS Omega*, vol. 8, no. 20, pp. 17869–17879, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00868.
- [15] Subroto, "Subroto. 2007. Karakteristik pembakaran briket campuran arang kayu dan jerami. Universitas Muhammadiyah Surakarta.," *Qistina*, vol. 2, no. November, pp. 136–142, 2016, [Online]. Available: <http://journal.uinjkt.ac.id/index.php/valensi%0AKajian>
- [16] I. S. Anam, B. Purwantana, and R. Radi, "Karakteristik Proses Gasifikasi Tempurung Kelapa Menggunakan Updraft Gasifier Tipe Hisap," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 8, no. 1, pp. 34–42, 2022, doi: 10.31884/jtt.v8i1.380.
- [17] M. M. Marcelino *et al.*, "Supercritical Water Gasification of Coconut Shell Impregnated with a Nickel Nanocatalyst: Box–Behnken Design and Process Evaluation," *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023, doi: 10.3390/en16083563.
- [18] A. Abdelaal, V. Benedetti, A. Villot, F. Patuzzi, C. Gerente, and M. Baratieri, "Innovative Pathways for the Valorization of Biomass Gasification Char: A Systematic Review," *Energies*, vol. 16, no. 10, 2023, doi: 10.3390/en16104175.
- [19] A. A. Papa, E. Savuto, A. Di Carlo, A. Tacconi, and S. Rapagnà, "Synergic Effects of Bed Materials and Catalytic Filter Candle for the Conversion of Tar during Biomass Steam Gasification," *Energies*, vol. 16, no. 2, pp. 1–14, 2023, doi: 10.3390/en16020595.
- [20] J. Krūmiņš and M. Kļaviņš, "Integrated Circulating Fluidized Bed Gasification System for Sustainable Municipal Solid Waste Management: Energy Production and Heat Recovery," *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023, doi: 10.3390/en16135203.