

# Analisis Pengaruh Rasio Abu Sekam Padi dan CaO Sebagai Katalis Pada Proses Gasifikasi Dengan Bahan Baku Tempurung Kelapa Terhadap Kualitas Produk Syngas

Sella Sal Shabila<sup>a</sup>, Vivi Tridayanti<sup>a,\*</sup>, Zurohaina<sup>a</sup>, Ahmad Zikri<sup>a</sup>, Rima Daniar<sup>a</sup>, Ida Febriana<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, Jl. Srijaya Negara, Palembang, 30139, Indonesia

## INFO ARTIKEL

### Riwayat Artikel:

Diterima 29 Januari 2026

Diterima setelah direvisi 5 Juni 2026

Disetujui 6 Juni 2026

### Kata kunci:

gasifikasi  
tempurung kelapa  
abu sekam padi  
CaO  
syngas

**Abstract-** This study aims to analyze the effect of rice husk ash and calcium oxide (CaO) ratio as additives in the gasification process of coconut shell on syngas quality and the electrical energy generated by a generator. Gasification was carried out using an *updraft* reactor with six catalyst ratio variations, namely 0:0, 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100. The observed parameters included syngas composition (CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>) measured using a gas analyzer, as well as electrical energy output and generator operating time. The results indicate that the addition of rice husk ash and CaO significantly affects syngas composition and generator performance. Increasing CaO content enhances H<sub>2</sub> and CO production through the *water-gas shift* reaction and CO<sub>2</sub> absorption, while rice husk ash contributes to CH<sub>4</sub> stabilization by promoting tar cracking. The optimal catalyst ratio was achieved at rice husk ash:CaO of 25:75, producing the highest electrical energy output of 1272.92 joules and the longest generator operating time. These findings demonstrate that the combined use of agricultural waste-based catalysts has strong potential to improve biomass gasification performance for renewable energy applications.

**Intisari-** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio abu sekam padi dan kalsium oksida (CaO) sebagai bahan aditif pada proses gasifikasi tempurung kelapa terhadap kualitas syngas dan energi listrik yang dihasilkan generator. Gasifikasi dilakukan menggunakan reaktor tipe *updraft* dengan enam variasi rasio katalis, yaitu 0:0, 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100. Parameter yang diamati meliputi komposisi syngas (CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, dan CO<sub>2</sub>) yang diukur menggunakan *gas analyzer*, serta energi listrik dan lama waktu nyala generator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi dan CaO berpengaruh signifikan terhadap komposisi syngas dan performa generator. Peningkatan CaO cenderung meningkatkan kandungan H<sub>2</sub> dan CO melalui reaksi *water-gas shift* dan penyerapan CO<sub>2</sub>, sedangkan abu sekam padi berperan dalam menstabilkan CH<sub>4</sub> melalui pemecahan tar. Rasio optimal diperoleh pada komposisi abu sekam padi:CaO sebesar 25:75, yang menghasilkan energi listrik tertinggi sebesar 1272,92 joule dan waktu nyala generator terlama. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi katalis berbasis limbah pertanian berpotensi meningkatkan kinerja sistem gasifikasi biomassa sebagai sumber energi terbarukan.

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi global semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi, perkembangan industri, dan inovasi teknologi. Di sisi lain, ketersediaan sumber energi fosil seperti minyak, batu bara, dan gas alam semakin terbatas serta berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak pada perubahan iklim global [1], [2]. Kondisi tersebut mendorong pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan, ramah lingkungan, berkelanjutan, dan dapat dimanfaatkan secara lokal. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah biomassa, karena dapat dikonversi menjadi energi melalui proses termokimia seperti pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi [3]. Di Indonesia, potensi biomassa cukup besar karena didukung oleh sektor pertanian dan

perkebunan yang menghasilkan berbagai jenis limbah organik, termasuk tempurung kelapa dan sekam padi [4].

Tempurung kelapa merupakan salah satu limbah biomassa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar alternatif. Berdasarkan data perkebunan nasional, produksi kelapa di Indonesia menghasilkan limbah tempurung dalam jumlah yang cukup besar dan belum seluruhnya dimanfaatkan secara optimal [4]. Tempurung kelapa memiliki karakteristik yang baik sebagai bahan baku gasifikasi karena mengandung karbon tetap yang relatif tinggi, kadar abu rendah, serta nilai kalor yang cukup besar, yaitu berkisar antara 20–22 MJ/kg [5]. Karakteristik tersebut menjadikan tempurung kelapa sesuai untuk

\* Corresponding Author:

E-mail: [vtridayanti@gmail.com](mailto:vtridayanti@gmail.com) (Vivi Tridayanti)

dikonversi menjadi gas sintetis atau *syngas* melalui proses gasifikasi biomassa.

Gasifikasi merupakan proses konversi termokimia biomassa menjadi *syngas* melalui reaksi pembakaran parsial pada suhu tinggi dengan suplai oksidator terbatas [3], [6]. Proses ini umumnya berlangsung pada kisaran suhu 700–1000 °C dan menghasilkan gas utama berupa CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub> [3]. *Syngas* yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk berbagai aplikasi energi, termasuk mesin pembakaran dalam dan generator listrik. Namun, salah satu permasalahan utama pada proses gasifikasi biomassa adalah terbentuknya tar dan tingginya kandungan CO<sub>2</sub>. Tar dapat menyebabkan penyumbatan saluran, kontaminasi sistem, dan gangguan pada mesin pembakaran, sedangkan CO<sub>2</sub> dapat menurunkan nilai kalor dan kualitas *syngas* [7], [8]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan untuk meningkatkan kualitas *syngas*, salah satunya melalui penggunaan katalis.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan katalis dalam proses gasifikasi dapat meningkatkan kualitas *syngas* dengan cara mempercepat reaksi termokimia, menurunkan kandungan tar, meningkatkan fraksi gas mampu bakar, serta memperbaiki komposisi H<sub>2</sub>, CO, dan CH<sub>4</sub> [8], [9]. Kalsium oksida atau CaO merupakan salah satu katalis berbasis alkali tanah yang banyak dikaji karena memiliki kemampuan menyerap CO<sub>2</sub> melalui reaksi karbonasi membentuk CaCO<sub>3</sub>, sekaligus mendukung peningkatan produksi H<sub>2</sub> melalui pergeseran kesetimbangan reaksi *water-gas shift* [9], [10]. Wei et al. [11] melaporkan bahwa penggunaan CaO sebagai penyerap CO<sub>2</sub> dalam gasifikasi uap biomassa mampu meningkatkan kandungan hidrogen pada gas kering. Selain itu, Gomes et al. [12] menunjukkan bahwa pemanfaatan abu biomassa sebagai katalis dapat memperbaiki kualitas gas produser dari proses gasifikasi biomassa residu.

Selain CaO, abu sekam padi juga berpotensi dimanfaatkan sebagai katalis murah berbasis limbah pertanian. Abu sekam padi mengandung silika atau SiO<sub>2</sub> dalam jumlah tinggi, sehingga berpotensi berperan dalam mendukung reaksi perengkahan tar dan peningkatan stabilitas proses konversi termokimia [13], [14]. Wibowo et al. [13] menunjukkan bahwa abu sekam padi dapat digunakan sebagai katalis *in-situ* berbiaya rendah pada proses pirolisis katalitik biomassa berbentuk pelet. Kandungan mineral dalam abu sekam padi juga dapat berperan sebagai pusat aktif yang membantu proses dekomposisi senyawa volatil dan tar selama konversi termokimia biomassa [8], [13].

Penggabungan abu sekam padi dan CaO berpotensi menghasilkan efek sinergis dalam peningkatan kualitas *syngas*. Abu sekam padi berperan dalam mendukung perengkahan tar dan stabilisasi reaksi termokimia, sedangkan CaO berperan dalam penyerapan CO<sub>2</sub> serta peningkatan kandungan H<sub>2</sub> dan CO dalam *syngas* [9], [11], [13]. Namun, rasio optimal antara abu sekam padi dan CaO masih perlu dikaji lebih lanjut, khususnya pada proses gasifikasi dengan bahan baku tempurung kelapa. Kajian mengenai kombinasi kedua katalis tersebut pada sistem gasifikasi biomassa berbasis tempurung kelapa masih terbatas, terutama dalam hubungannya dengan komposisi *syngas* dan performa energi yang dihasilkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio abu sekam padi dan CaO sebagai katalis pada proses gasifikasi berbahan baku tempurung kelapa terhadap kualitas produk *syngas*. Permasalahan utama yang dikaji meliputi penentuan rasio katalis yang menghasilkan komposisi *syngas* terbaik serta identifikasi pengaruh variasi rasio katalis terhadap potensi energi yang dihasilkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi gasifikasi biomassa berbasis limbah pertanian yang ekonomis, ramah lingkungan, dan aplikatif untuk skala kecil hingga menengah, khususnya di wilayah pedesaan dan industri lokal.

## 2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan utama yang berperan dalam proses gasifikasi dan analisis.

**Tabel 1.** Bahan yang Digunakan

No	Bahan Baku
1	Tempurung Kelapa
2	Abu sekam padi
3	Kapur Tohor (CaO)
4	Glass Wool
5	Glass Wool
6	Air

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini berupa tempurung kelapa, abu sekam padi, dan kalsium oksida (CaO). Tempurung kelapa diperoleh dari limbah rumah tangga di Kota Palembang, Sumatera Selatan. Abu sekam padi diperoleh dari hasil pembakaran sekam padi yang berasal dari penggilingan padi lokal di wilayah Palembang. Kalsium oksida (CaO) yang digunakan merupakan kapur tohor komersial yang diperoleh dari toko bahan bangunan di Palembang. Tempurung kelapa dibersihkan, dikeringkan, kemudian dikarbonisasi sebelum digunakan sebagai bahan bakar gasifikasi. Abu sekam padi digunakan tanpa perlakuan awal, sedangkan CaO yang masih berbentuk bongkahan diperkecil ukurannya hingga diperoleh ukuran partikel yang lebih seragam sebelum dicampurkan dengan bahan bakar.

**Tabel 2.** Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

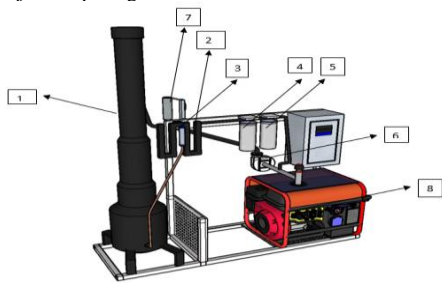
No	Alat	Spesifikasi
1	Torch Gas	Bahan stainless steel/brass, menggunakan bahan bakar LPG atau butana, suhu nyala ±1.000–1.300 °C, dilengkapi pengatur aliran gas dan pemantik otomatis. Digunakan untuk penyalaan awal reaktor gasifikasi.
2	Anemometer	Tipe digital, rentang pengukuran kecepatan udara 0,4–30 m/s, akurasi ±3%, satuan m/s, km/jam, ft/min, knot, dilengkapi layar LCD. Digunakan untuk mengukur laju aliran udara masuk ke reaktor gasifikasi.
3	Bor	Tipe bor listrik tangan (electric drill), daya 500–800 W, kecepatan putar 0–3.000 rpm, chuck 10–13 mm, tegangan kerja 220 V. Digunakan untuk pembuatan lubang pada reaktor atau komponen pendukung.
4	Sieving	Tipe ayakan laboratorium ASTM/E11, bahan stainless steel, ukuran mesh bervariasi (10, 20, 40, 60, dan 80 mesh), diameter 20 cm. Digunakan untuk memperoleh ukuran partikel biomassa yang seragam sebelum proses gasifikasi.

Metode pengujian yang dilakukan sebagai berikut:

- Analisis Proksimat  
Karakteristik bahan bakar arang tempurung kelapa dianalisis menggunakan metode proksimat untuk menentukan kadar air (moisture content), zat terbang (volatile matter), kadar abu (ash content), dan karbon tetap (fixed carbon). Analisis dilakukan menggunakan Thermogravimetric Analyzer (TGA 701) mengacu pada standar ASTM D7582-10. Sampel ditimbang sebanyak 1 ± 0,1 gram dan dianalisis sesuai prosedur pengujian TGA.
- Analisis Ultimat  
Analisis ultimat arang tempurung kelapa dilakukan untuk menentukan kandungan unsur karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), sulfur (S), dan oksigen (O). Pengujian dilakukan oleh Laboratorium PT Geoservices Palembang Coal Laboratory menggunakan metode analisis ultimat standar laboratorium.
- Pengujian Komposisi Syngas  
Komposisi syngas hasil gasifikasi dianalisis menggunakan gas analyzer untuk mengukur konsentrasi gas CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>. Sampel gas diambil dari saluran keluaran reaktor gasifikasi tipe updraft setelah melewati sistem pendinginan dan filtrasi. Hasil pengukuran digunakan untuk menentukan kualitas syngas yang dihasilkan pada setiap variasi rasio abu sekam padi dan CaO.
- Pengujian Kinerja Generator  
Kinerja generator dievaluasi berdasarkan tegangan, daya listrik, energi listrik yang dihasilkan, dan waktu nyala generator. Pengujian dilakukan menggunakan generator berkapasitas 1000 W yang dioperasikan menggunakan syngas hasil gasifikasi. Data hasil

pengujian digunakan untuk menghitung energi listrik dan efisiensi termal sistem.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 1 unit alat *gasifier*, seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Seperangkat Alat Gasifikasi

Tabel 3. Spesifikasi Alat

No	Alat	Spesifikasi
1	Reaktor	Tipe Updraft Fixed Bed, material baja karbon Tempat berlangsungnya proses gasifikasi tempurung kelapa
2	Cooler	Tipe heat exchanger atau pipa pendingin, bahan stainless steel, diameter pipa 1–2 inci, panjang 1–2 m, berfungsi menurunkan suhu syngas sebelum masuk ke sistem pemurnian.
3	Water Drip System	Tangki air dengan katup pengatur debit, selang tahan panas, kapasitas 1–5 L, laju tetesan dapat diatur sesuai kebutuhan untuk membantu proses gasifikasi dan mengurangi pembentukan tar.
4	Filter 1	Filter siklon atau media serat kasar, bahan baja/stainless steel, berfungsi menangkap abu dan partikel berukuran besar yang terbawa aliran syngas.
5	Filter 2	Filter media halus (arang aktif, zeolit, pasir silika, atau serbuk gergaji), tabung filter berbahan PVC atau stainless steel, berfungsi menyaring partikel halus, tar, dan kontaminan dalam syngas.
6	Blower	Blower sentrifugal, daya 100–300 W, tegangan 220 V, kapasitas aliran udara 1–5 m <sup>3</sup> /menit, dilengkapi pengatur kecepatan aliran udara.
7	Fire Test	Burner atau torch test berbahan logam tahan panas, diameter nozzle ±5–10 mm, digunakan untuk menguji kemampuan nyala syngas yang dihasilkan.
8	Generator	Generator bensin/gas, kapasitas 500–2.000 W, frekuensi 50 Hz, tegangan keluaran 220 V, digunakan untuk menguji pemanfaatan syngas sebagai bahan bakar pembangkit listrik.

Proses gasifikasi diawali dengan menyiapkan bahan baku tempurung kelapa yang telah melalui proses karbonisasi hingga kadar airnya rendah. Bahan baku kemudian ditimbang dengan perbandingan variable tetap untuk setiap percobaan yaitu Arang tempurung kelapa: Katalis (75:25). Katalis berupa abu sekam padi dan CaO ditimbang sesuai rasio yang telah ditentukan, yaitu 0:0, 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, dan 0:100, variasi rasio ditentukan dengan mengacu pada konsep catalyst-to-biomass ratio yang dijelaskan [7]. kemudian dicampur secara merata. Campuran katalis dimasukkan ke dalam reaktor pada bagian yang telah disediakan untuk memudahkan kontak dengan gas hasil pembakaran. Selanjutnya, bahan bakar biomassa dimasukkan ke dalam ruang bakar reaktor tipe *updraft*. Proses pembakaran awal dilakukan menggunakan

kertas dan kayu kecil sebagai pemicu api hingga arang tempurung kelapa menyala merata. Blower dioperasikan untuk memberikan suplai udara dengan laju yang sesuai, sehingga proses gasifikasi berlangsung stabil. Gas hasil gasifikasi dialirkan melalui dua tahap filtrasi, yaitu filter pertama berisi *glass wool* untuk menyaring partikel padat dan filter kedua berisi media mangan untuk mengurangi kandungan tar dan senyawa pengotor. Setelah itu, gas dialirkan ke generator yang telah dimodifikasi menggunakan konverter agar dapat beroperasi dengan bahan bakar *syngas*. Selama pengujian, dilakukan pengukuran komposisi gas menggunakan *gas analyzer* pada titik sampling yang telah ditentukan, serta pencatatan daya listrik dan waktu nyala generator hingga suplai gas habis

### 3. Hasil dan Pembahasan

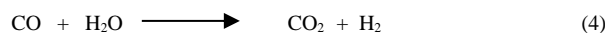
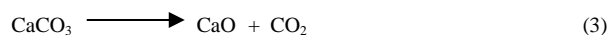
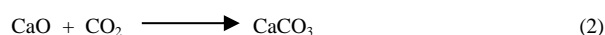
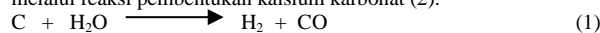
Penelitian ini memfokuskan pada pengaruh variasi rasio abu sekam padi dan CaO sebagai katalis dalam proses gasifikasi tempurung kelapa terhadap komposisi syngas, energi listrik yang dihasilkan generator, dan lama waktu nyala generator.

Hasil pengukuran komposisi syngas menunjukkan bahwa peningkatan proporsi CaO dalam katalis cenderung meningkatkan kadar H<sub>2</sub> dan CO, sedangkan abu sekam padi lebih berperan dalam menstabilkan CH<sub>4</sub>. Proses analisis syngas dilakukan menggunakan *Portable Gas Leak Detector* di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya. Pengambilan sampel syngas dilakukan ketika sistem telah mencapai kondisi stabil, dimana sampel ditampung menggunakan *tedlar bag* berkapasitas 2 L pada pipa output syngas. Data hasil pengamatan proses gasifikasi dapat dilihat pada tabel 1 hingga tabel 3.

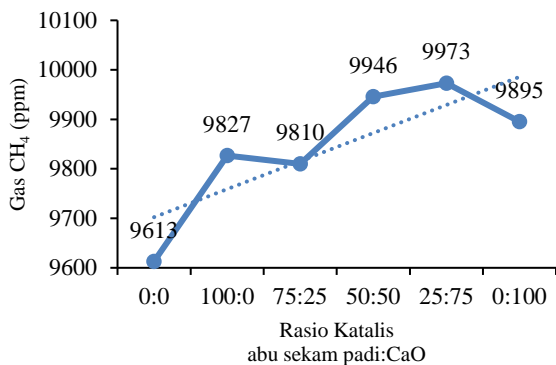
Tabel 4. Analisis Komposisi Senyawa Syngas

Rasio Abu Sekam Padi:CaO	CH <sub>4</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO(ppm)	H <sub>2</sub> (ppm)
0:0	9613	5377	903	358
100:0	9827	4972	896	438
75:25	9810	4459	912	452
50:50	9946	3872	895	460
25:75	9973	4102	947	563
0:100	9895	4020	987	595

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa peningkatan proporsi CaO cenderung meningkatkan kadar H<sub>2</sub> dan CO. Hal ini terjadi karena CaO berperan ganda, yaitu sebagai katalis reaksi *water-gas shift* (1) yang mengubah CO dan H<sub>2</sub>O menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>, serta sebagai penyerap CO<sub>2</sub> melalui reaksi pembentukan kalsium karbonat (2).



Sementara itu, abu sekam padi yang kaya akan silika berfungsi sebagai penstabil kandungan CH<sub>4</sub> melalui pemecahan senyawa tar menjadi senyawa hidrokarbon ringan. Mekanisme ini membantu menjaga kestabilan pembakaran pada mesin generator.



Gambar 2. Pengaruh Rasio Katalis Terhadap CH<sub>4</sub>

Berdasarkan data pada Gambar 2, proses gasifikasi tempurung kelapa menghasilkan konsentrasi gas CH<sub>4</sub> yang bervariasi tergantung pada perbandingan antara katalis abu sekam padi dan CaO. Pada kondisi tanpa adanya katalis (0:0), terdapat pencatatan CH<sub>4</sub> mencapai 9613 ppm, yang menunjukkan bahwa tempurung kelapa dapat secara alami menghasilkan gas tersebut melalui proses pirolisis dan hidrogenasi senyawa karbon dalam keadaan reduksi [2], yang mencatat bahwa biomassa masih bisa memproduksi CH<sub>4</sub> tanpa menggunakan katalis, meskipun jumlahnya lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi yang menggunakan katalis. Penambahan abu sekam padi dalam kondisi murni (100:0) meningkatkan konsentrasi CH<sub>4</sub> menjadi 9827 ppm, hal ini dipengaruhi oleh kandungan silika (SiO<sub>2</sub>) dan mineral alkali seperti kalium (K) yang mempercepat pemecahan senyawa organik kompleks menjadi hidrokarbon ringan dan menurunkan energi aktivasi dalam proses pirolisis.

Tabel 5. Data Pengamatan Generator

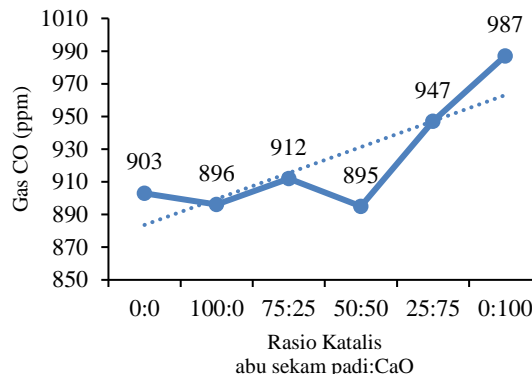
Rasio Abu Sekam Padi:CaO	Voltase (V)	P (Watt)	Waktu Hidup (Menit)
0:0	200	12	2,9
100:0	150	12	2,75
75:25	200	12	2,5
50:50	200	12	3,167
25:75	200	12	3,4167
0:100	180	12	2,833

Perubahan dalam komposisi CH<sub>4</sub> mulai terlihat ketika CaO ditambahkan dengan perbandingan 75:25, di mana konsentrasi CH<sub>4</sub> sedikit menurun menjadi 9810 ppm. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa CaO mulai berkontribusi mengarahkan reaksi untuk menghasilkan H<sub>2</sub> dan CO melalui reaksi water-gas shift ( $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ) serta penyerapan CO<sub>2</sub> ( $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$ ). Keadaan ini mengurangi jumlah karbon yang tersedia untuk pembentukan CH<sub>4</sub>. Walaupun begitu, karena proporsi abu sekam padi masih tergolong besar, aktivitas katalitiknya tetap berfungsi untuk mempertahankan kestabilan CH<sub>4</sub>.

Pada rasio 50:50, konsentrasi CH<sub>4</sub> kembali naik menjadi 9946 ppm. Kenaikan ini menunjukkan bahwa kombinasi abu sekam padi dan CaO menciptakan kondisi reaksi yang lebih seimbang, di mana silika dari abu sekam padi berkontribusi pada peningkatan CH<sub>4</sub>, sementara CaO membantu mengurangi pembentukan CO<sub>2</sub> dan memaksimalkan konversi karbon. [2], yang menyatakan bahwa kombinasi katalis kaya silika dan CaO dapat meningkatkan kualitas syngas dengan cara mengoptimalkan rasio H<sub>2</sub>/CO dan menekan pembentukan CO<sub>2</sub>, sehingga gas yang mudah terbakar seperti CH<sub>4</sub> dapat terbentuk dalam jumlah yang lebih banyak.

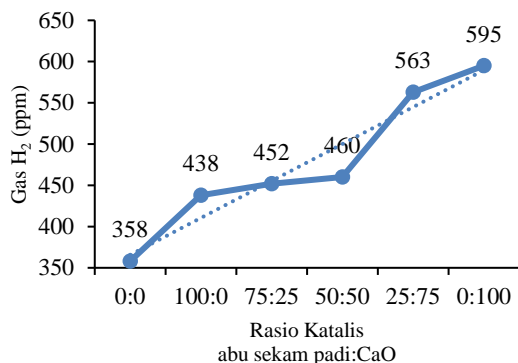
Peningkatan tertinggi pada penggandaan CH<sub>4</sub> tercatat pada rasio 25:75, mencapai 9973 ppm. Efek sinergis terlihat jelas pada kondisi ini: CaO bertindak untuk menyerap CO<sub>2</sub>, yang pada gilirannya mengurangi hambatan kepada pembentukan CH<sub>4</sub>, sementara abu sekam padi tetap mempertahankan aktivitas katalitiknya untuk memecah tar dan

menstabilkan radikal hidrokarbon. Di sisi lain, penggunaan murni CaO (0:100) menyebabkan penurunan pada CH<sub>4</sub> menjadi 9895 ppm akibat dominasi reaksi pembentukan H<sub>2</sub> yang mengurangi jumlah karbon yang tersedia untuk CH<sub>4</sub>. Dari hasil ini, rasio 25:75 dapat dianggap sebagai komposisi terbaik yang memaksimalkan pembentukan CH<sub>4</sub> serta meningkatkan kualitas syngas secara keseluruhan.

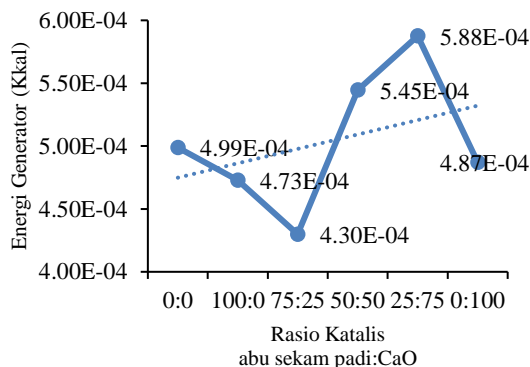


Gambar 3. Pengaruh Rasio Katalis Terhadap CO

Berdasarkan Tabel 4, Produksi karbon monoksida (CO) dalam proses gasifikasi tempurung kelapa menunjukkan variabilitas tergantung pada rasio katalis abu sekam padi dan CaO. Dalam kondisi tanpa menggunakan katalis (0:0), konsentrasi CO mencapai 903 ppm dan dihasilkan terutama melalui oksidasi parsial karbon ( $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ ) serta reaksi Boudouard ( $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ ). Saat abu sekam padi digunakan sendiri (100:0), konsentrasi CO mengalami penurunan menjadi 896 ppm. Penurunan ini terjadi karena sifat silika dalam abu sekam padi yang meningkatkan reaksi hidrogenasi CO menjadi metana (CH<sub>4</sub>), sehingga jumlah CO bebas dalam sistem berkurang. Pengaruh CaO mulai nampak pada rasio 75:25, di mana konsentrasi CO meningkat menjadi 912 ppm. Kenaikan ini merupakan hasil dari kemampuan CaO dalam menyerap CO<sub>2</sub> ( $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$ ), yang memindahkan kesetimbangan reaksi Boudouard untuk memproduksi CO. Hal ini sesuai dengan penemuan Gomes dan rekan-rekan (2025) yang menunjukkan bahwa penggunaan katalis CaO bisa secara signifikan meningkatkan konsentrasi CO melalui proses penyerapan CO<sub>2</sub>. Namun pada rasio 50:50, terjadi sedikit penurunan CO menjadi 895 ppm, kemungkinan disebabkan oleh interaksi antar komponen katalis yang memengaruhi kestabilan reaksi. Peningkatan yang lebih signifikan dalam produksi CO terlihat pada rasio 25:75, dengan konsentrasi mencapai 947 ppm. Keadaan ini mencerminkan bahwa dominasi CaO dalam komposisi katalis mengurangi hambatan yang disebabkan CO<sub>2</sub> yang dapat memperlambat reaksi pembentukan CO, sementara abu sekam padi tetap berfungsi menjaga aktivitas reaksi dalam jalur pembentukan hidrokarbon. Puncak produksi CO tercapai pada rasio 0:100, yaitu 987 ppm, yang menyoroti peran penting CaO sebagai katalis basa aktif dalam mengoptimalkan reaksi pergeseran air-gas dan reaksi Boudouard melalui penyerapan CO<sub>2</sub> secara terus-menerus. Secara keseluruhan, CaO memiliki kontribusi besar dalam meningkatkan produksi CO, sedangkan abu sekam padi cenderung mengarahkan reaksi ke pembentukan hidrokarbon seperti metana (CH<sub>4</sub>).



Gambar 4. Pengaruh Rasio Katalis Terhadap H<sub>2</sub>



Gambar 5. Pengaruh Rasio Katalis Terhadap Energi yang Dihasilkan Generator

Berdasarkan hasil pada Tabel 4, Produksi gas hidrogen (H<sub>2</sub>) pada proses gasifikasi tempurung kelapa menunjukkan peningkatan yang jelas seiring dengan perubahan perbandingan antara katalis abu sekam padi dan CaO. Pada kondisi tanpa penggunaan katalis (0:0), konsentrasi H<sub>2</sub> yang tercatat adalah 358 ppm, yang menunjukkan bahwa proses gasifikasi dasar menghadapi batasan dalam memproduksi H<sub>2</sub> karena reaksi oksidasi parsial dan pirolisis lebih cenderung menghasilkan gas CO dan CH<sub>4</sub>. Ketika abu sekam padi diaplikasikan sendiri (100:0), konsentrasi H<sub>2</sub> naik menjadi 438 ppm. Peningkatan ini terjadi karena komponen silika (SiO<sub>2</sub>) dan mineral alkali di dalam abu sekam padi berfungsi sebagai katalis alami, yang membantu reaksi pemecahan senyawa hidrokarbon dan uap air menjadi H<sub>2</sub>. [9]. yang menunjukkan bahwa penambahan bahan berbasis silika dalam proses pirolisis biomassa dapat meningkatkan pelepasan senyawa volatil dan peningkatan pembentukan H<sub>2</sub> dalam kisaran 12–18% dibandingkan kondisi tanpa katalis.

Pada perbandingan 75:25, konsentrasi H<sub>2</sub> meningkat lebih jauh menjadi 452 ppm, yang menunjukkan bahwa CaO mulai berperan signifikan. Fungsi utama CaO pada fase ini adalah mengkatalisis reaksi water-gas shift ( $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ) dengan memanfaatkan sifat basa yang mempercepat reaksi tersebut. Mekanisme ini tidak hanya meningkatkan produksi H<sub>2</sub>, tetapi juga mengurangi kadar CO<sub>2</sub> melalui proses penyerapan ( $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$ ). Pada rasio 50:50, konsentrasi H<sub>2</sub> sedikit meningkat ke 460 ppm. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa peran CaO semakin kuat dalam mendorong reaksi menuju pembentukan H<sub>2</sub>, sementara abu sekam padi tetap berkontribusi atas pembentukan senyawa-senyawa antara yang reaktif.

Peningkatan yang paling besar terlihat pada rasio 25:75, di mana konsentrasi H<sub>2</sub> mencapai 563 ppm. Kombinasi ini menunjukkan adanya pengaruh sinergis antara abu sekam padi dan CaO. Abu sekam padi membantu dalam memecah senyawa tar dan kompleks organik menjadi senyawa-senyawa antara yang lebih reaktif, sementara CaO mengoptimalkan reaksi water-gas shift dan efektif menghilangkan CO<sub>2</sub> sebagai produk sampingan. Efek ini konsisten dengan hasil penelitian oleh Gomes et al. (2025), yang melaporkan bahwa penggunaan katalis CaO termal dalam gasifikasi biomassa dapat meningkatkan kadar H<sub>2</sub> secara signifikan akibat dominasi reaksi water-gas shift dan penyerapan CO<sub>2</sub>.

Puncak produksi H<sub>2</sub> dicapai pada rasio 0:100, di mana konsentrasinya mencapai 595 ppm. Ini menandakan bahwa CaO murni adalah katalis paling efektif dalam menghasilkan H<sub>2</sub>, terutama melalui kombinasi mekanisme water-gas shift dan steam reforming. Dari segi kinetika reaksi, penambahan CaO secara bertahap berhasil menurunkan energi aktivasi untuk pembentukan H<sub>2</sub>, sehingga mempercepat laju reaksi. Secara keseluruhan, CaO terbukti menjadi katalis utama untuk memaksimalkan produksi H<sub>2</sub>, sedangkan abu sekam padi berperan lebih dalam meningkatkan produksi hidrokarbon seperti CH<sub>4</sub>.

Rasio 25:75 menghasilkan jumlah energi tertinggi, mencapai 1272,92 joule. Temuan ini sejalan dengan tingginya proporsi H<sub>2</sub> dan CO pada rasio tersebut, yang memberikan nilai kalor syngas yang lebih tinggi. Kadar CH<sub>4</sub> yang cukup konsisten juga mendukung pembakaran yang efisien di mesin pembakaran dalam generator. Selain dari energi, durasi nyala generator juga diukur untuk menilai kestabilan pasokan bahan bakar dari syngas. Ukuran menunjukkan bahwa rasio 25:75 menghasilkan durasi nyala terlama (3,42 menit), diikuti oleh rasio 50:50 dan 0:100. Terdapat hubungan positif antara jumlah energi listrik yang dihasilkan dengan durasi nyala generator. Syngas dengan nilai kalor yang lebih tinggi dapat mempertahankan pembakaran lebih lama sebelum pasokan bahan bakar habis atau tekanannya menurun. Pengaruh sinergis dari campuran abu sekam padi dan CaO tampak jelas dalam penelitian ini. Abu sekam padi berperan dalam mengurangi pembentukan tar dan menjaga kadar CH<sub>4</sub> tetap stabil, sedangkan CaO meningkatkan produksi H<sub>2</sub> dan CO serta menurunkan CO<sub>2</sub>. Kombinasi yang paling efektif terjadi pada rasio 25:75, di mana efek katalitik dari kedua bahan tersebut saling mendukung.

#### 4. Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa variasi perbandingan antara abu sekam padi dan CaO dalam proses gasifikasi tempurung kelapa memiliki dampak signifikan terhadap komposisi gas sintesis serta performa generator. Penambahan CaO meningkatkan kadar H<sub>2</sub> dan CO melalui reaksi pergeseran gas air serta penyerapan CO<sub>2</sub>, sementara abu sekam padi berperan dalam menjaga kestabilan CH<sub>4</sub> dengan cara memecah tar. Perbandingan 25:75 (abu sekam padi:CaO) menghasilkan jumlah energi listrik tertinggi dari generator (1272,92 joule) dan memiliki waktu nyala terpanjang (3,42 menit), sehingga bisa dianggap sebagai kombinasi katalis yang paling optimal. Pengujian pada skala lebih besar dengan variasi desain reaktor yang dapat mengurangi tar secara maksimal mungkin akan memberikan hasil yang lebih baik. Penggunaan teknologi gasifikasi yang berbasis pada limbah pertanian ini memiliki potensi besar untuk diterapkan secara luas sebagai sumber energi terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan.

#### Referensi

- [1] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2021. Paris, France: IEA, 2021.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2021.
- [3] P. Basu, Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2010.

- 
- [4] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Statistik Perkebunan Indonesia 2020. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2020.
- [5] I. Prasetyo et al., "Potential of Coconut Shell as Biomass for Gasification in Indonesia," *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 201–208, 2018.
- [6] L. Zhang, H. Wu, and K. Zhang, "Optimization of biomass gasification process parameters for syngas production," *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 1234–1245, 2020.
- [7] T. A. Milne, R. J. Evans, and N. Abatzoglou, Biomass Gasifier "Tars": Their Nature, Formation, and Conversion. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [8] D. Devi, K. J. Ptasinski, and F. J. J. G. Janssen, "A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes," *Biomass and Bioenergy*, vol. 24, no. 2, pp. 125–140, 2003.
- [9] H. Li, Y. Wang, N. Zhou, L. Dai, W. Deng, C. Liu, Y. Cheng, Y. Liu, K. Cobb, P. Chen, and R. Ruan, "Applications of calcium oxide-based catalysts in biomass pyrolysis/gasification: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 291, p. 125826, 2021.
- [10] A. A. Laghari, I. A. Jamro, A. Kumar, G. Chen, S. Sajjani, Z. Guo, Y. Shen, J. Zhang, S. Khoso, Q. Guo, and W. Ma, "Catalytic gasification of municipal solid waste using eggshell-derived CaO catalyst: An investigation of optimum H<sub>2</sub> production, production distribution, and tar compounds," *Next Sustainability*, vol. 4, p. 100038, 2024.
- [11] L. Wei, S. Xu, L. Zhang, H. Liu, C. Zhu, and S. Liu, "Hydrogen production in steam gasification of biomass with CaO as a CO<sub>2</sub> absorbent," *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 3, pp. 1997–2004, 2008.
- [12] J. P. Gomes, R. Buitrago-Sierra, N. E. Ramirez-Contreras, L. M. Silva, R. Kramreiter, and A. Hornung, "Biomass fly ash granules as a promising catalyst to promote producer gas quality from residual forest biomass steam gasification," *Energy*, vol. 293, p. 130902, 2025.
- [13] W. A. Wibowo, R. B. Cahyono, R. Rochmadi, and A. Budiman, "Thermogravimetric analysis and kinetic study on catalytic pyrolysis of rice husk pellet using its ash as a low-cost in-situ catalyst," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 1, pp. 207–219, 2022.
- [14] I. Hamidu et al., "Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review," *Journal of Materials Research and Technology*, 2025.
- [15] Y. Shen and K. Yoshikawa, "Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 371–392, 2013.