



## Pengaruh Variasi Laju Aliran Udara terhadap CO pada Gasifikasi Limbah Daun dan Ranting Bambu Menggunakan Katalis Karbon Aktif dan Zeolit

Danatama Abet Nigo<sup>1,\*</sup>, Purbo Suwandono<sup>1</sup>, Gatot Soebiyakto<sup>1</sup>, dan Dadang Hermawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Widyagama Malang, Malang, Jawa Timur, Indonesia

### Kata kunci

Co-gasifikasi; limbah bambu; laju aliran udara; gas sintesis; karbon aktif dan zeolit.

### ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi laju aliran udara terhadap karakteristik co-gasifikasi limbah daun dan ranting bambu menggunakan reaktor tipe updraft dengan katalis karbon aktif dan zeolit. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan massa biomassa 1 kg untuk setiap percobaan pada lima rasio daun-ranting, yaitu 700 g:300 g, 600 g:400 g, 500 g:500 g, 400 g:600 g, dan 300 g:700 g. Laju aliran udara ditetapkan sebesar 2 m/s, 3,5 m/s, dan 5 m/s, sedangkan karbon aktif dan zeolit masing-masing 200 g. Parameter penelitian meliputi distribusi temperatur, konsentrasi H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, dan CO<sub>2</sub>, serta karakteristik nyala api. Laju aliran udara 2 m/s menghasilkan temperatur lokal tertinggi, sekitar 850–870 °C, tetapi pola panas dan pembentukan gas lebih berfluktuasi. Laju aliran udara 3,5 m/s memberikan proses yang relatif stabil dan menghasilkan nyala terkuat pada rasio 600 g daun:400 g ranting. Laju aliran udara 5 m/s mempercepat pemanasan dan menghasilkan komposisi rata-rata gas mampu bakar terbaik pada rasio 700 g daun:300 g ranting, dengan H<sub>2</sub> 2.108,75 ppm, CH<sub>4</sub> 51.996,51 ppm, dan CO 1.700,85 ppm. Hasil menunjukkan bahwa kondisi optimum bergantung pada sasaran proses: kestabilan lebih baik pada 3,5 m/s, sedangkan produksi gas mampu bakar lebih didukung pada 5 m/s.

\* Danatama Abet Nigo (email: [purbo@widyagama.ac.id](mailto:purbo@widyagama.ac.id))

Diterima: 10 Agustus 2026

Disetujui: 9 September 2026

Dipublikasikan: 12 September 2026

## 1 Pendahuluan

Pemanfaatan energi berbasis biomassa menjadi salah satu jalur konversi energi terbarukan karena bahan bakunya berasal dari material organik yang dapat diperbarui. Limbah pertanian dan kehutanan, termasuk limbah bambu, tersedia dalam jumlah besar dan belum seluruhnya dimanfaatkan secara optimal. Bambu memiliki karakter termal yang kompetitif dan telah digunakan sebagai bahan bakar pada berbagai teknologi konversi energi [1], [2]. Potensi tersebut semakin relevan karena daun dan ranting bambu merupakan residu yang mudah diperoleh dari kegiatan budidaya, pemeliharaan, industri kerajinan, dan pengolahan kayu bambu [3].

Gasifikasi mengubah bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar melalui pasokan udara terbatas, umumnya sekitar 20–40% kebutuhan udara stoikiometri. Produk utamanya berupa karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), uap air, nitrogen, dan sejumlah kecil hidrokarbon [4], [5]. Dibandingkan pembakaran langsung, gasifikasi memungkinkan energi kimia biomassa dikonversi menjadi gas sintesis yang dapat dimanfaatkan untuk pembakar, proses pemanasan, pengeringan, ketel uap, atau pembangkitan listrik setelah pembersihan gas yang memadai. Dalam reaktor tipe updraft, udara masuk dari bagian bawah reaktor, sedangkan gas bergerak ke atas melewati zona reduksi, pirolisis, dan pengeringan. Konfigurasi ini sederhana dan sesuai untuk skala laboratorium, tetapi cenderung menghasilkan tar yang relatif tinggi [6].

Kualitas gas sintesis tidak hanya dipengaruhi oleh jenis dan komposisi biomassa, tetapi juga oleh laju aliran udara, distribusi temperatur, waktu tinggal gas, dan kondisi zona reaksi. Peningkatan pasokan udara dapat mempercepat pembakaran dan pemanasan reaktor, tetapi udara yang terlalu besar juga dapat meningkatkan oksidasi gas mampu bakar menjadi CO<sub>2</sub>. Penelitian gasifikasi tempurung kelapa menunjukkan bahwa perubahan

laju aliran udara memengaruhi temperatur, komposisi gas, laju produksi gas, dan karakteristik pembakaran [5]. Studi lain pada sekam padi juga memperlihatkan bahwa pengaturan aliran udara dan beban bahan bakar berpengaruh terhadap keluaran gasifikasi [7], [3], [8]. Pengaruh kecepatan udara terhadap proses konversi panas berbahan bakar biomassa juga dilaporkan pada penelitian mesin pengering [9]. Dengan demikian, laju aliran udara tidak dapat dinilai hanya dari temperatur maksimum, melainkan harus ditinjau bersama kestabilan proses dan komposisi gas sintesis.

Karbon aktif dan zeolit digunakan sebagai material pengondisi gas karena memiliki luas permukaan, struktur pori, dan karakter adsorptif-katalitik. Karbon aktif berpotensi menangkap tar, kondensat hidrokarbon, abu, dan partikulat, sedangkan zeolit dapat berfungsi sebagai adsorben selektif sekaligus membantu perengkahan senyawa hidrokarbon berat [10], [11], [12]. Penelitian di Jurnal Flywheel menunjukkan bahwa penambahan zeolit memengaruhi profil temperatur serta dinamika CO, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub> selama gasifikasi sekam padi [7]. Kajian penghilangan tar menunjukkan bahwa efektivitas material katalitik dipengaruhi oleh temperatur, waktu kontak, ukuran partikel, dan deaktivasi pori akibat endapan karbon [13]. Penambahan katalis mineral pada penelitian terdahulu juga dilaporkan dapat meningkatkan laju pemanasan, volume gas, serta kandungan CH<sub>4</sub> atau H<sub>2</sub>, walaupun hasilnya bergantung pada bahan bakar dan kondisi operasi [14].

Daun dan ranting bambu memiliki komposisi lignoselulosa yang berbeda. Daun bambu pada data penelitian mengandung sekitar 27% selulosa, 39% hemiselulosa, dan 29% lignin, sedangkan ranting bambu mengandung sekitar 43,48% selulosa, 19,66% hemiselulosa, dan 24,51% lignin. Hemiselulosa yang lebih tinggi pada daun cenderung terurai lebih awal dan mempercepat pelepasan volatil, sedangkan selulosa pada ranting mendukung pembentukan arang dan reaksi reduksi pada temperatur lebih tinggi. Perbedaan perilaku termokimia tersebut sejalan dengan kajian pemanfaatan biomassa lignoselulosa dan karakter bahan bambu [15], [16].

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh gabungan variasi laju aliran udara dan rasio limbah daun dan ranting bambu terhadap distribusi temperatur, pembentukan gas sintesis H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, dan CO<sub>2</sub>, serta karakteristik nyala api pada reaktor tipe updraft yang menggunakan karbon aktif dan zeolit. Fokus analisis diarahkan pada tiga pertanyaan operasional: kondisi yang menghasilkan temperatur tertinggi, kondisi yang memberikan proses relatif stabil, dan kondisi yang menghasilkan gas mampu bakar terbaik. Karena seluruh pengujian menggunakan katalis dan tidak disertai kontrol tanpa katalis, pengaruh katalis dibahas secara kualitatif berdasarkan perubahan kondisi permukaan dan kecenderungan proses, bukan sebagai peningkatan kuantitatif yang berdiri sendiri.

## 2 Metode Penelitian

Kegiatan penelitian meliputi persiapan alat dan bahan, pengujian co-gasifikasi pada variasi laju aliran udara dan komposisi biomassa, pengukuran temperatur serta gas sintesis, pengamatan nyala api, dan analisis data.

### 2.1 Variabel Penelitian

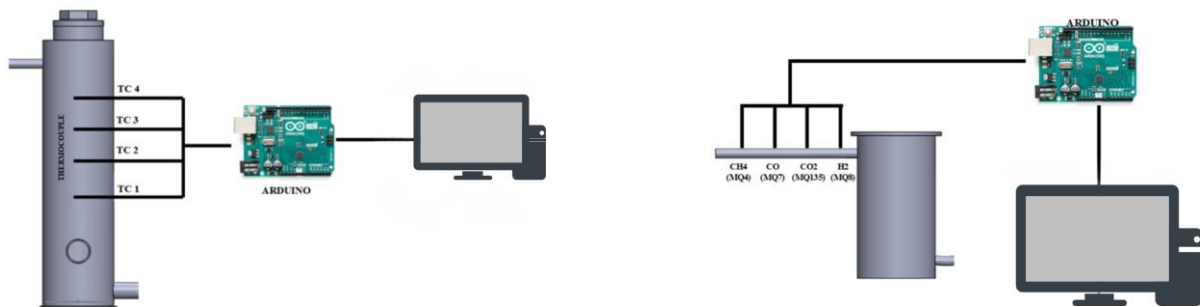
Penentuan variabel penelitian dilakukan melalui studi literatur dan disesuaikan dengan tujuan pengujian. Variabel bebas meliputi variasi laju aliran udara sebesar 2 m/s, 3,5 m/s, dan 5 m/s serta komposisi daun bambu dan ranting bambu, yaitu 700:300, 600:400, 500:500, 400:600, dan 300:700. Variabel terikat mencakup distribusi temperatur, komposisi gas sintesis H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub>, serta karakteristik nyala api, sedangkan variabel terkontrol berupa massa biomassa 1 kg, massa karbon aktif dan zeolit masing-masing 200 g, penggunaan reaktor tipe updraft, dan kondisi bahan bakar kering. Kombinasi tiga laju aliran udara dan lima komposisi biomassa menghasilkan 15 pengujian yang selanjutnya dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk menentukan kondisi gasifikasi paling stabil dan komposisi gas mampu bakar terbaik.

Tabel 1. Rencana Pengambilan Data

| Kode | Daun bambu (g) | Ranting bambu (g) | Total biomassa (g) | Karbon aktif (g) | Zeolit (g) |
|------|----------------|-------------------|--------------------|------------------|------------|
| V1   | 700            | 300               | 1.000              | 200              | 200        |

| Kode | Daun bambu (g) | Ranting bambu (g) | Total biomassa (g) | Karbon aktif (g) | Zeolit (g) |
|------|----------------|-------------------|--------------------|------------------|------------|
| V2   | 600            | 400               | 1.000              | 200              | 200        |
| V3   | 500            | 500               | 1.000              | 200              | 200        |
| V4   | 400            | 600               | 1.000              | 200              | 200        |
| V5   | 300            | 700               | 1.000              | 200              | 200        |

## 2.2 Penyiapan Sensor dan Alat



Gambar 1. Penyiapan Sensor



Gambar 2. Penyiapan Alat

## 2.3 Prosedur Pengambilan Data

Prosedur pengambilan data diawali dengan menyiapkan dan menimbang campuran daun serta ranting bambu sesuai dengan komposisi pengujian hingga total 1 kg, serta menimbang karbon aktif dan zeolit masing-masing 200 g. Selanjutnya, dilakukan pengecekan reaktor, pengembus, siklon, saluran gas, katup, pemasangan empat sensor temperatur, dan sensor gas sintesis. Laju aliran udara kemudian diatur pada 2 m/s, 3,5 m/s, atau 5 m/s. Bahan bakar dimasukkan ke dalam reaktor dan dinyalakan menggunakan obor. Setelah pembakaran stabil, pengembus diaktifkan dan data temperatur serta konsentrasi  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ , dan  $CO_2$  direkam secara otomatis melalui sistem Arduino. Gas sintesis kemudian dialirkan melalui siklon untuk memisahkan tar dan dinyalakan pada saluran keluar guna mengamati karakteristik nyala api. Prosedur tersebut diulang pada seluruh variasi komposisi biomassa dan laju aliran udara.

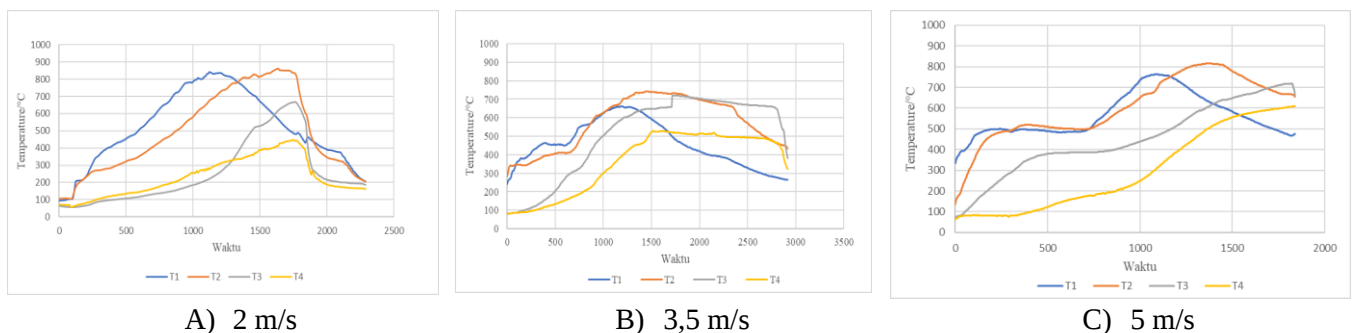


Gambar 3. Dokumentasi Daun Bambu dan Ranting Bambu

### 3 Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menguraikan hasil pengujian yang meliputi distribusi temperatur, karakteristik nyala api, penyerapan zat oleh katalis, serta produksi gas sintesis berupa  $H_2$  (hidrogen),  $CH_4$  (metana),  $CO$  (karbon monoksida), dan  $CO_2$  (karbon dioksida). Data diambil menggunakan sensor berbasis Arduino Uno sebagai alat bantu pengukuran.

#### 3.1 Distribusi Temperatur pada Variasi Laju Aliran Udara 2 m/s, 3,5 m/s, dan 5 m/s



Gambar 4. Grafik Temperatur

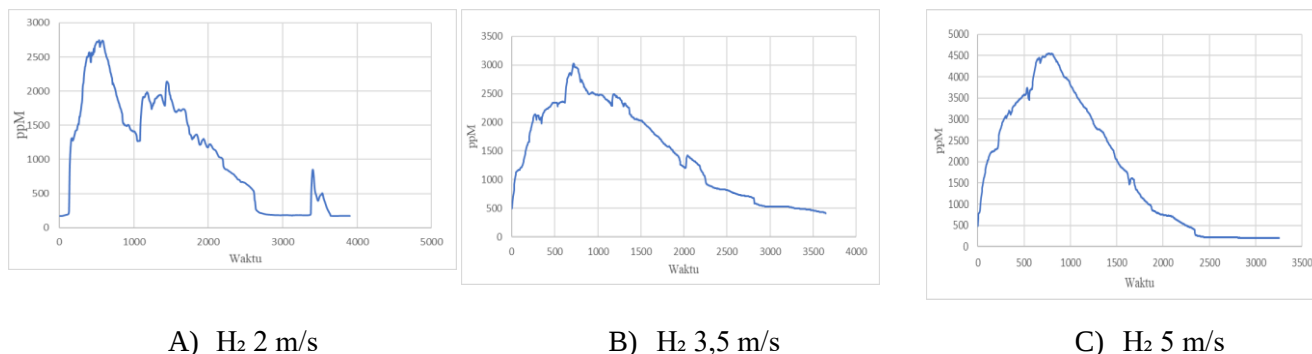
Pada laju aliran udara 2 m/s, temperatur awal seluruh sensor berada pada kisaran 60–110 °C. T1 meningkat paling cepat dan mencapai sekitar 830–850 °C pada waktu 1.150–1.250 detik, sedangkan T2 mencapai puncak lokal tertinggi sekitar 850–870 °C pada 1.650–1.750 detik. T3 hanya mencapai sekitar 650–670 °C dan T4 sekitar 430–450 °C. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pasokan udara rendah menghasilkan pusat pembakaran yang kuat, tetapi distribusi panas belum merata. Setelah sekitar 1.800 detik, seluruh temperatur turun cepat karena bahan bakar reaktif berkurang dan zona pembakaran melemah.

Laju aliran udara 3,5 m/s menghasilkan pola yang lebih bertahap. T1 mencapai sekitar 650–670 °C, T2 sekitar 730–750 °C, dan T3 sekitar 700–720 °C. Walaupun temperatur maksimum lebih rendah daripada laju aliran udara 2 m/s, T3 mempertahankan temperatur tinggi hingga sekitar 2.700–2.800 detik. Pola ini menunjukkan perpindahan panas dari pusat pembakaran menuju zona reduksi yang lebih teratur. T4 berada pada kisaran maksimum 510–530 °C dan menurun pada fase akhir. Durasi temperatur menengah hingga tinggi yang lebih panjang menjadi dasar penilaian bahwa proses pada 3,5 m/s relatif lebih stabil.

Pada laju aliran udara 5 m/s, kenaikan temperatur terjadi lebih cepat sejak awal. T1 mencapai 750–770 °C dan T2 800–820 °C, sedangkan T3 terus meningkat hingga sekitar 700–720 °C dan T4 mencapai 600–610 °C. Pasokan udara yang lebih besar memperpendek tahap pengeringan, memperkuat oksidasi pada T1–T2, serta mempercepat perambatan panas ke T3–T4. Namun, zona reaksi menjadi lebih dinamis karena posisi pembakaran bergeser mengikuti ketersediaan bahan bakar dan arah aliran udara. Hasil ini menegaskan bahwa temperatur

puncak tertinggi tidak serta-merta menunjukkan kondisi paling stabil: 2 m/s unggul pada puncak lokal, 3,5 m/s pada kestabilan, dan 5 m/s pada kecepatan pemanasan serta distribusi panas menuju bagian reaktor lainnya.

### 3.2 Rata-rata Gas Sintesis $H_2$ (Hidrogen)



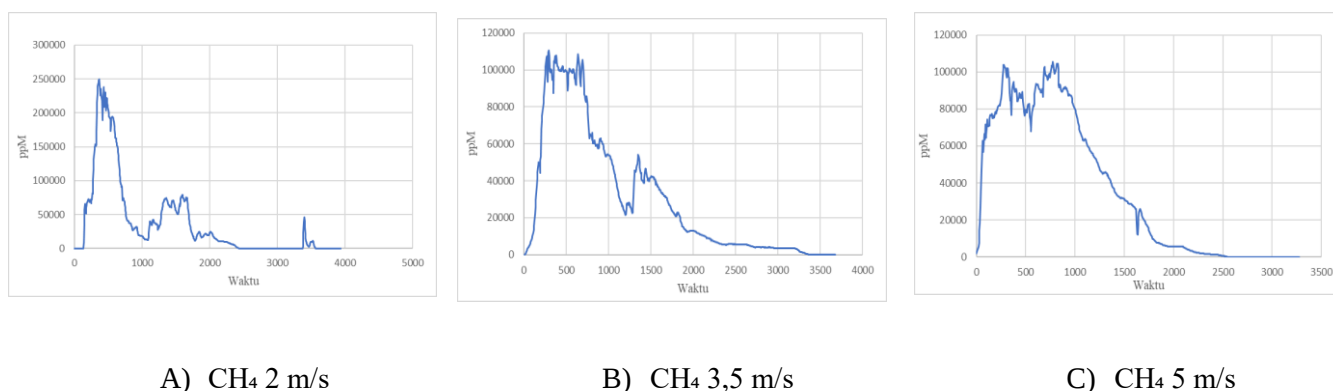
Gambar 5. Grafik Rata-rata Gas Sintesis  $H_2$

Pada 2 m/s, rata-rata  $H_2$  meningkat dari sekitar 150–200 ppm dan mencapai puncak 2.700–2.750 ppm pada 500–600 detik. Setelah puncak awal, konsentrasi menurun, kembali berfluktuasi pada 1.150–1.500 detik, lalu turun mendekati 150 ppm pada fase akhir. Pola ini sesuai dengan distribusi temperatur yang tidak merata dan perpindahan zona reaksi yang tajam. Pelepasan volatil pada fase awal dan pembentukan arang pada fase berikutnya menghasilkan beberapa gelombang pembentukan  $H_2$ .

Laju aliran udara 3,5 m/s menghasilkan kenaikan  $H_2$  yang lebih bertahap, dari sekitar 500 ppm menjadi 2.000–2.300 ppm pada 200–500 detik, kemudian mencapai sekitar 3.000 ppm pada 700–750 detik. Penurunannya berlangsung lebih panjang hingga 3.400–3.600 detik. Durasi tersebut menunjukkan bahwa reaksi reduksi dan pelepasan gas masih berlangsung dalam rentang waktu yang lebih lama, konsisten dengan kestabilan T3 pada grafik temperatur.

Laju aliran udara 5 m/s menghasilkan puncak  $H_2$  tertinggi pada grafik rata-rata, yaitu sekitar 4.400–4.500 ppm pada 700–850 detik. Kenaikan yang cepat menunjukkan pemanasan intensif dan pembentukan arang reaktif yang didukung oleh pasokan udara lebih besar. Setelah puncak,  $H_2$  turun menuju sekitar 2.000 ppm, kemudian mendekati 200 ppm setelah 2.400 detik. Dengan demikian, 5 m/s meningkatkan intensitas pembentukan  $H_2$ , tetapi durasi produksinya lebih pendek daripada pola stabil pada 3,5 m/s.

### 3.3 Rata-rata Gas Sintesis $CH_4$ (Metana)



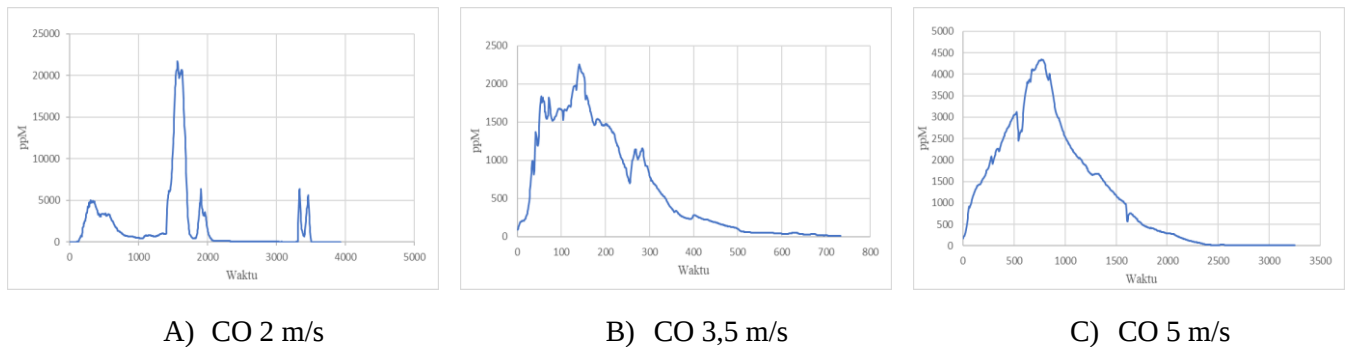
Gambar 6. Grafik Rata-rata Gas Sintesis  $CH_4$

$CH_4$  terutama terbentuk pada fase devolatilisasi dan pirolisis. Pada 2 m/s, konsentrasi awal mendekati nol, kemudian meningkat sangat tajam hingga sekitar 240.000–250.000 ppm pada 350–450 detik. Puncak yang jauh lebih tinggi daripada dua laju aliran udara lainnya mengindikasikan pelepasan volatil yang terkonsentrasi dalam waktu singkat. Setelah itu,  $CH_4$  turun ke sekitar 20.000–40.000 ppm dan muncul beberapa kenaikan sekunder akibat sisa volatil yang terlepas dari bagian biomassa yang belum terdekomposisi sempurna.

Pada 3,5 m/s,  $\text{CH}_4$  mencapai sekitar 105.000–110.000 ppm pada 300–400 detik. Penurunannya berlangsung lebih bertahap, dari sekitar 60.000 ppm pada 800–1.000 detik menuju 20.000–30.000 ppm pada 1.200–1.300 detik. Pada 5 m/s, puncak berada sekitar 100.000–105.000 ppm pada 300–350 detik dan kembali membentuk puncak tinggi pada 750–850 detik. Dua puncak pada 5 m/s mengindikasikan pelepasan volatil awal yang diikuti dekomposisi lanjutan ketika zona panas bergerak ke lapisan bahan bakar berikutnya.

Nilai puncak  $\text{CH}_4$  terbesar pada 2 m/s tidak berarti kualitas gas rata-rata terbaik selama seluruh durasi. Puncak tersebut bersifat singkat dan diikuti penurunan tajam. Pada 3,5 m/s dan 5 m/s, tingkat  $\text{CH}_4$  lebih rendah, tetapi pelepasannya lebih terkendali. Daun bambu yang kaya hemiselulosa berperan besar pada pembentukan volatil dan  $\text{CH}_4$  fase awal, sedangkan peningkatan ranting memperbesar fraksi arang dan menggeser kontribusi menuju pembentukan  $\text{H}_2$  dan CO pada zona reduksi.

### 3.4 Rata-rata Gas Sintesis CO (Karbon Monoksida)



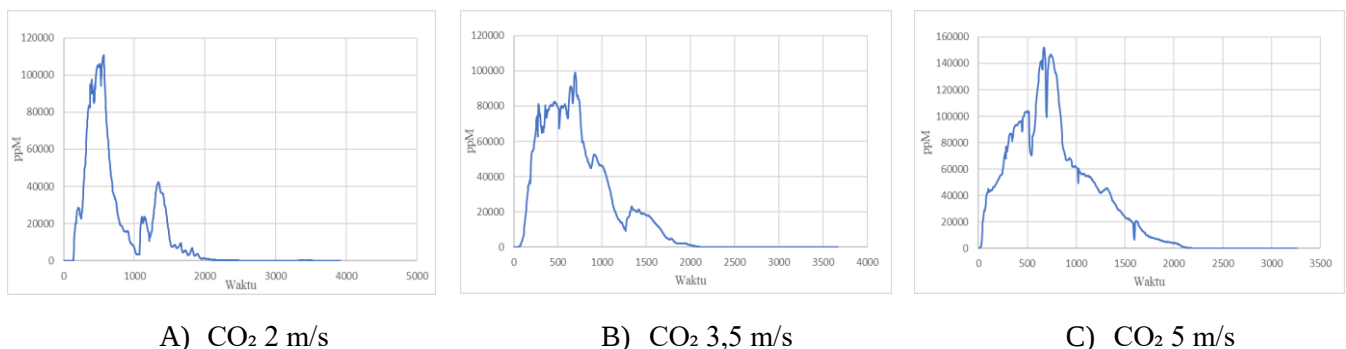
Gambar 7. Grafik Rata-rata Gas Sintesis CO

Pada 2 m/s, CO mulai meningkat setelah 150–200 detik, membentuk puncak awal 4.500–5.000 ppm, kemudian mencapai puncak utama sekitar 20.000–21.500 ppm pada 1.550–1.650 detik. Puncak utama terjadi berdekatan dengan temperatur tertinggi T2. Kondisi tersebut menunjukkan kombinasi pembakaran tidak sempurna di zona oksidasi dan reaksi reduksi  $\text{CO}_2$  dengan karbon panas. Setelah puncak, konsentrasi turun tajam dan hanya menyisakan lonjakan-lonjakan kecil akibat reaksi arang yang tersisa.

Laju aliran udara 3,5 m/s menghasilkan puncak CO jauh lebih rendah, sekitar 2.200–2.300 ppm pada 130–150 detik, kemudian turun secara bertahap dan mendekati nol setelah sekitar 700 detik pada grafik rata-rata. Meskipun demikian, nilai CO pada rasio tertentu tetap dapat mencapai angka tinggi; grafik ini merupakan rata-rata lima komposisi sehingga lonjakan individual tereduksi. Pada 5 m/s, CO mencapai sekitar 4.200–4.400 ppm pada 700–800 detik dan menurun hingga mendekati nol setelah sekitar 2.400 detik.

Perbedaan skala CO memperlihatkan bahwa laju aliran udara rendah dapat menciptakan kondisi lokal kaya karbon yang kuat, tetapi tidak stabil. Laju aliran udara 5 m/s meningkatkan perpindahan panas dan menyediakan kondisi reduksi yang lebih konsisten dibandingkan dengan 2 m/s, walaupun sebagian CO juga berpotensi teroksidasi menjadi  $\text{CO}_2$  akibat pasokan udara yang besar. Oleh karena itu, evaluasi CO perlu dilakukan bersama  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , temperatur, dan kestabilan nyala, bukan sebagai indikator tunggal.

### 3.5 Rata-rata Gas Sintesis $\text{CO}_2$ (Karbon Dioksida)



Gambar 8. Grafik Rata-rata Gas Sintesis  $\text{CO}_2$

CO<sub>2</sub> merupakan produk utama oksidasi dan sekaligus reaktan pada reaksi reduksi dengan arang. Pada 2 m/s, rata-rata CO<sub>2</sub> mencapai sekitar 105.000–110.000 ppm pada 500–600 detik, kemudian turun dan sempat meningkat kembali pada 1.300–1.400 detik. Pada 3,5 m/s, puncak sekitar 95.000–100.000 ppm terjadi pada 650–700 detik dan diikuti penurunan yang lebih teratur. Pada 5 m/s, puncak CO<sub>2</sub> paling tinggi, sekitar 145.000–150.000 ppm pada 650–750 detik, mencerminkan oksidasi yang lebih intensif akibat pasokan udara besar.

Kenaikan CO<sub>2</sub> pada 5 m/s menunjukkan dua konsekuensi yang berlawanan. Di satu sisi, reaksi oksidasi menghasilkan panas yang mempercepat pirolisis dan reduksi. Di sisi lain, CO<sub>2</sub> merupakan gas yang tidak mudah terbakar, yang mengencerkan gas sintesis dan dapat menurunkan temperatur nyala. Sebagian CO<sub>2</sub> kemudian dikonsumsi oleh reaksi Boudouard untuk membentuk CO, tetapi keberhasilan konversi bergantung pada temperatur arang dan waktu tinggal gas. Pola 3,5 m/s yang lebih rendah dan stabil menunjukkan keseimbangan oksidasi-reduksi yang lebih terkendali.

### 3.6 Hasil Nyala Api Terbaik



Gambar 9. Nyala api terbaik secara visual pada laju aliran udara 3,5 m/s dan rasio 600 DA–400 RA.

Pada laju aliran udara 3,5 m/s, variasi 600 DA–400 RA menghasilkan nyala paling besar, lebar, dan terang dengan warna oranye kemerahan dominan serta pangkal kebiruan. Pada kondisi ini, rata-rata CH<sub>4</sub> sekitar 36.872 ppm dan nilai rata-rata H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, serta CO merupakan yang tertinggi di antara lima rasio pada laju aliran udara 3,5 m/s. Kombinasi gas mampu bakar yang relatif seimbang mendukung intensitas nyala dan kontinuitas pembakaran. Warna biru pada pangkal menunjukkan pencampuran gas sintesis dan udara yang lebih homogen, sedangkan warna oranye dapat berasal dari pembakaran CH<sub>4</sub>, hidrokarbon berat, tar, atau partikel karbon yang belum teroksidasi sempurna.

Pemilihan nyala pada Gambar 9 didasarkan pada kualitas visual dan kekuatan nyala, bukan pada komposisi gas sintesis rata-rata terbaik secara keseluruhan. Berdasarkan data komposisi per rasio, kondisi 5 m/s dengan 700 DA–300 RA menghasilkan rata-rata gas mampu bakar tertinggi, yaitu H<sub>2</sub> 2.108,75 ppm, CH<sub>4</sub> 51.996,51 ppm, dan CO 1.700,85 ppm. Dokumentasi nyalanya tampak lebih tipis dan berwarna putih kebiruan sampai oranye pucat. Perbedaan antara tampilan foto dan data dapat disebabkan oleh waktu pengambilan gambar yang tidak bertepatan dengan puncak gas, rasio pencampuran gas sintesis dan udara, kondisi obor, pencahayaan, serta pengaturan kamera.

Secara operasional, laju aliran udara 3,5 m/s merupakan kompromi terbaik untuk kestabilan temperatur dan nyala, sedangkan laju aliran udara 5 m/s lebih sesuai ketika sasaran utama adalah mempercepat pemanasan dan meningkatkan rata-rata gas mampu bakar pada komposisi tertentu. Laju aliran udara 2 m/s mampu menghasilkan temperatur lokal, CH<sub>4</sub>, dan CO puncak yang sangat tinggi, tetapi fluktuasinya besar dan distribusi panasnya tidak seragam. Oleh karena itu, penggunaan nilai puncak tanpa mempertimbangkan durasi dan kestabilan dapat menghasilkan kesimpulan yang menyesatkan.

Karbon aktif dan zeolit menunjukkan perubahan warna, lapisan mengilap, endapan hitam atau abu-abu, bercak kecokelatan, dan penggumpalan setelah pengujian. Ciri tersebut konsisten dengan terperangkapnya tar,

kondensat hidrokarbon, abu, dan partikulat pada permukaan berpori [13]. Zeolit berpotensi membantu perengkahan tar, sedangkan karbon aktif mendukung adsorpsi. Namun, tanpa kontrol berupa pengujian tanpa katalis, peningkatan  $H_2$ ,  $CH_4$ , atau CO tidak dapat dipisahkan dari pengaruh laju aliran udara, rasio bahan bakar, temperatur, dan waktu tinggal gas. Pernyataan yang paling kuat dari data ini adalah bahwa sistem katalis berinteraksi dengan gas hasil co-gasifikasi dan membantu pengondisian gas, bukan bahwa katalis meningkatkan konsentrasi gas sintesis dengan persentase tertentu.

Hasil penelitian juga memperlihatkan pengaruh komposisi biomassa. Rasio dengan daun lebih tinggi cenderung mempercepat pelepasan volatil dan mendukung  $CH_4$  pada fase awal, sedangkan peningkatan fraksi ranting memperbesar pembentukan arang yang mendukung  $H_2$  dan CO melalui reaksi reduksi. Dengan demikian, komposisi optimum bergantung pada tujuan proses. Untuk nyala yang kuat dan stabil pada 3,5 m/s, rasio 600 DA–400 RA lebih sesuai; untuk rata-rata gas mampu bakar tertinggi pada 5 m/s, rasio 700 DA–300 RA lebih unggul.

#### 4 Kesimpulan

Variasi laju aliran udara menghasilkan karakter termal dan gas sintesis yang berbeda. Laju aliran udara 2 m/s memberikan temperatur lokal tertinggi, sekitar 850–870 °C, dan menghasilkan puncak  $CH_4$  serta CO yang besar, tetapi distribusi panas dan pembentukan gas lebih berfluktuasi. Laju aliran udara 3,5 m/s menghasilkan pola temperatur yang lebih bertahap dan stabil, terutama karena temperatur T3 bertahan dalam durasi lebih panjang. Kondisi ini juga menghasilkan nyala api terbaik secara visual pada rasio 600 DA–400 RA. Laju aliran udara 5 m/s mempercepat pemanasan, memperluas distribusi panas, dan menghasilkan puncak rata-rata  $H_2$  tertinggi, tetapi juga meningkatkan  $CO_2$  karena oksidasi lebih intensif.

Komposisi bahan bakar memengaruhi jalur pembentukan gas. Daun bambu yang kaya hemiselulosa mempercepat pelepasan volatil dan pembentukan  $CH_4$  pada fase awal, sedangkan ranting bambu yang kaya selulosa mendukung pembentukan arang,  $H_2$ , dan CO pada zona reduksi. Berdasarkan nilai rata-rata per rasio, laju aliran udara 5 m/s dengan 700 DA–300 RA menghasilkan komposisi gas mampu bakar terbaik, yaitu  $H_2$  2.108,75 ppm,  $CH_4$  51.996,51 ppm, dan CO 1.700,85 ppm. Namun, ketika sasaran proses adalah kestabilan temperatur dan nyala, laju aliran udara 3,5 m/s lebih sesuai.

Karbon aktif dan zeolit berinteraksi dengan tar, kondensat, abu, dan partikulat, sebagaimana ditunjukkan oleh perubahan kondisi permukaan setelah pengujian. Karena penelitian tidak menggunakan kontrol berupa pengujian tanpa katalis, kontribusi katalis terhadap peningkatan konsentrasi gas sintesis tidak dapat dikuantifikasi secara terpisah. Penelitian lanjutan perlu menambahkan kontrol tanpa katalis, mengukur massa tar dan perubahan massa katalis, menguji variasi ukuran dan susunan lapisan katalis, serta menggunakan alat analisis gas yang terkalibrasi.

#### 5 Referensi

- [1] W. Widyawidura, R. P. Liestiono, M. S. Cahyono, A. Prasetya, and M. Syamsiro, “PENGARUH JENIS BAHAN TERHADAP PROSES GASIFIKASI SAMPAH ORGANIK MENGGUNAKAN UPDRAFT FIXED BED REACTOR,” vol. 1, no. 2, 2017.
- [2] I. N. S. Winaya, P. H. Yuliarthana, R. Sari, H. Ida, and B. Alit, “Gasifikasi sirkulasi fluidized bed berbahan bakar batubara dan limbah bambu,” no. Snttm Xv, pp. 5–6, 2016.
- [3] E. Muhammad Fachry Naufal, Slamet Wiyono, “Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha Rice Husk Combined From Gasification Process With Load Variation,” vol. 10, no. 2, pp. 125–138, 2022.
- [4] M. S. C. Ucik Ika Fenti Styana, Rosiana Indrawati, “KARAKTERISASI PROSES GASIFIKASI SAMPAH ORGANIK DENGAN VARIASI JENIS BAHAN,” 2019.
- [5] T. Pertanian, F. T. Pertanian, U. G. Mada, and J. F. No, “KARAKTERISTIK PROSES GASIFIKASI TEMPURUNG KELAPA MENGGUNAKAN,” vol. 8, pp. 34–42, 2022.
- [6] M. J. Khan and K. A. Al-attab, “Steam Gasification of Biomass for Hydrogen Production – A Review and Outlook,” vol. 2, no. 2, pp. 175–204, 2022.
- [7] P. S. Agung Kusmuryadi, “Jurnal Flywheel,” vol. 17, no. 1, pp. 33–41, 2026.
- [8] F. Dionisius, B. Sudarmanta, P. Studi, and T. Mesin, “PENGARUH KECEPATAN ALIRAN UDARA DENGAN PENGATURAN DIMMER PADA TEKANAN UDARA MASUK PADA PROSES GASIFIKASI SEKAM PADI,” vol. 6, 2020.
- [9] R. A. Kusuma and A. , Mietra Anggara, Fadhli Dzil Ikram, “Jurnal Flywheel,” vol. 16, no. 1, pp. 24–29, 2025.
- [10] I. M. Wisnu and A. Putra, “Pembuatan dan Karakterisasi Katalis CaO / Zeolit Alam,” vol. 1, no. 1, pp. 12–18, 2017.
- [11] A. Masdania Zurairah Siregar, “PENGUNAAN KATALIS Fe TERHADAP KARBON AKTIF,” vol. 01, no. 01, 2020.

- [12] J. Dongoran, P. Sulistiawati, S. Y. Simangunsong, P. Gizta, R. Paksi, and M. H. Pasaribu, “Perkembangan Zeolit Sebagai Katalis Alam Potensial,” vol. 3, no. 2, pp. 28–39, 2021.
- [13] A. Jayanarasimhan, R. M. Pathak, A. M. Shivapuji, and L. Rao, “Tar Formation in Gasification Systems : A Holistic Review of Remediation Approaches and Removal Methods,” 2024, doi: 10.1021/acsomega.3c04425.
- [14] N. T. Ariwibowo, “*Pengaruh variasi penambahan katalis bentonit terhadap gasifikasi updraft tandan kosong kelapa sawit – batu bara dengan suhu 700,*” 2018.
- [15] T. B. P. Veni Aprilia Lestari, “CANGKANG KULIT KOPI UNTUK PROSES,” pp. 1–8, 2020.
- [16] C. Liu *et al.*, “Deep eutectic solvent (DES) pretreatment and lignin regeneration for the development of a bamboo leaf-based bioplastic,” no. October, pp. 1–12, 2024, doi: 10.3389/fbioe.2024.1484585.