



Pengaruh Penambahan Katalis Zeolit terhadap Kinerja Gasifikasi Sekam Padi dan Karakteristik Syngas

Agung Kusmuryadi¹, Purbo Suwandono^{1,*}

¹ Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Widyagama Malang, Jawa Timur, Indonesia

Kata kunci

Gasifikasi
Sekam padi
Zeolite
Syngas
Komposisi Gas

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan katalis zeolit terhadap kinerja proses gasifikasi sekam padi dan karakteristik gas hasil (CO, H₂, dan CH₄). Metode penelitian menggunakan eksperimen pada reaktor gasifikasi skala laboratorium dengan suplai udara dari blower pada kondisi operasi yang dijaga konstan. Bahan bakar yang digunakan adalah sekam padi sebanyak 500 g untuk setiap pengujian, dengan variasi massa zeolit 0 g, 100 g, 200 g, dan 300 g yang dicampurkan langsung ke bahan bakar. Parameter yang diamati meliputi profil temperatur reaktor dan perubahan konsentrasi CO, H₂, dan CH₄ terhadap waktu menggunakan sensor gas. Hasil menunjukkan bahwa penambahan zeolit memengaruhi dinamika pembentukan gas, ditandai oleh perubahan nilai puncak, kestabilan plateau, dan durasi produksi gas. Secara umum, zeolit pada level menengah menunjukkan kinerja paling baik dalam meningkatkan dan mempertahankan gas mudah terbakar selama operasi, sementara zeolit pada level tinggi cenderung memperpanjang durasi produksi namun menunjukkan fluktuasi pada fase akhir. Temuan ini mengindikasikan adanya kondisi optimum penambahan zeolit untuk meningkatkan kualitas syngas dari sekam padi serta mendukung pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber energi alternatif.

* *Corresponding author:*

Nama corresponding author (email: purbo@widyagama.ac.id)

Diterima: 6 Februari 2026

Disetujui: 24 Februari 2026

Dipublikasikan: 26 Februari 2026

1 Pendahuluan

Kebutuhan energi nasional terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, dan aktivitas industri. Pada saat yang sama, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil masih tinggi, padahal sumber energi ini bersifat tidak terbarukan dan ketersediaannya semakin terbatas. Kondisi tersebut menimbulkan dua persoalan utama, yaitu meningkatnya risiko krisis energi dan bertambahnya dampak lingkungan akibat penggunaan energi konvensional. Di Indonesia, pemenuhan kebutuhan bahan bakar gas juga masih menghadapi tantangan karena produksi domestik belum sepenuhnya mampu mengimbangi permintaan masyarakat, sehingga impor menjadi salah satu pilihan untuk menutupi kekurangan pasokan [1].

Dalam konteks tersebut, pengembangan energi alternatif berbasis sumber daya lokal menjadi penting. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial untuk dikembangkan di Indonesia adalah biomassa, mengingat ketersediaannya melimpah dan dapat diproduksi secara berulang. Biomassa dari limbah pertanian seperti sekam padi, bonggol jagung, ampas tebu, dan sabut kelapa banyak tersedia, namun pemanfaatannya masih terbatas. Akibatnya, residu biomassa seringkali menumpuk, dibakar terbuka, atau dibuang tanpa pengelolaan, sehingga berpotensi menimbulkan polusi udara dan masalah lingkungan.

Sekam padi merupakan salah satu limbah pertanian yang jumlahnya signifikan karena Indonesia termasuk negara agraris dengan produksi padi tinggi. Pada proses penggilingan padi, sekam sering dianggap residu bernilai rendah sehingga pemanfaatannya masih minim, misalnya hanya sebagai campuran pakan ternak atau bahkan dibakar begitu saja di sekitar area penggilingan. Jika dibiarkan menumpuk, sekam padi dapat menimbulkan gangguan lingkungan berupa bau, asap pembakaran terbuka, serta penurunan kualitas udara. Oleh karena itu, konversi sekam padi menjadi energi bernilai guna merupakan strategi yang tidak hanya berkontribusi pada diversifikasi energi, tetapi juga menjadi solusi pengelolaan limbah biomassa [2][3].

Salah satu teknologi konversi biomassa yang relatif sederhana dan berpotensi diterapkan di berbagai wilayah adalah gasifikasi. Gasifikasi merupakan reaksi termokimia yang mengubah bahan bakar padat menjadi

gas yang mudah terbakar (syngas), yang umumnya mengandung CO, H₂, dan CH₄ [4][5]. Syngas ini berpeluang dimanfaatkan sebagai substitusi bahan bakar gas untuk kebutuhan rumah tangga maupun aplikasi energi skala kecil. Meski demikian, penerapan gasifikasi biomassa masih memerlukan pengembangan karena kinerja sistem sering menghadapi kendala, seperti rendahnya efisiensi termal dan tingginya emisi gas berbahaya (misalnya CO) pada sebagian desain kompor/reaktor biomassa. Selain itu, biomassa padat cenderung memiliki kandungan karbon dan senyawa volatil yang dapat memicu pembentukan tar, yang pada akhirnya menurunkan kualitas gas dan mengganggu kestabilan operasi.

Untuk meningkatkan kinerja gasifikasi, salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah penggunaan katalis. Katalis dapat mempercepat laju reaksi dan mengarahkan jalur reaksi sehingga konversi biomassa menjadi gas ringan berlangsung lebih efektif. Di antara berbagai material katalitik/adsorben, zeolit menarik untuk digunakan karena relatif mudah diperoleh, berbiaya rendah, serta memiliki karakteristik porositas yang dapat mendukung proses adsorpsi dan peningkatan kualitas gas [6]. Zeolit juga dapat diaktivasi secara fisik (perlakuan panas) maupun kimia (perlakuan asam/basa) untuk meningkatkan luas permukaan dan kemampuan adsorpsinya, sehingga diharapkan mampu memperkuat perannya selama proses reaksi [7].

Berbagai penelitian sebelumnya telah melaporkan penggunaan katalis berbasis zeolit maupun material sejenis untuk meningkatkan kualitas syngas melalui mekanisme cracking tar, reforming hidrokarbon, serta dukungan terhadap reaksi water-gas shift. Namun, sebagian besar studi tersebut berfokus pada aktivasi kimia zeolit, modifikasi logam, atau perbandingan jenis katalis, serta banyak dilakukan pada konfigurasi reaktor downdraft atau sistem co-gasification. Selain itu, kajian yang secara sistematis mengevaluasi variasi massa zeolit terhadap dinamika temporal pembentukan CO, H₂, dan CH₄ pada gasifikasi sekam padi tipe updraft skala laboratorium masih terbatas.

Dengan demikian, penelitian ini memposisikan diri untuk mengisi celah tersebut dengan menganalisis secara eksperimental pengaruh variasi massa zeolit (0–300 g) terhadap profil temperatur dan evolusi waktu konsentrasi CO, H₂, dan CH₄, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kondisi optimum penambahan zeolit pada sistem updraft skala kecil.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan katalis zeolit terhadap karakteristik komposisi gas hasil gasifikasi sekam padi (CO, H₂, dan CH₄) serta dinamika temperatur reaktor. Dalam penelitian ini, parameter kinerja difokuskan pada perubahan konsentrasi gas mudah terbakar dan kestabilan produksinya terhadap waktu, sedangkan parameter performa energi seperti nilai kalor rendah (LHV), cold gas efficiency (CGE), konversi karbon, dan kuantifikasi tar tidak dianalisis dan menjadi batasan penelitian.

2 Metode Penelitian



Gambar 1. Setup Penelitian Gasifikasi Updraft

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi pengaruh penambahan katalis zeolit terhadap kinerja proses gasifikasi sekam padi serta karakteristik gas yang dihasilkan. Pengujian dilakukan menggunakan reaktor gasifikasi skala laboratorium dengan suplai udara dari blower yang dipasang pada bagian

bawah reaktor. Fokus penelitian adalah menilai perubahan profil temperatur reaktor dan konsentrasi gas hasil gasifikasi (CO, CH₄, dan H₂) akibat variasi jumlah zeolit yang dicampurkan pada bahan bakar.

Bahan dan Variasi Perlakuan

Bahan bakar yang digunakan adalah sekam padi dengan massa tetap 500 g untuk setiap percobaan. Katalis yang digunakan adalah zeolit, yang dicampurkan langsung dengan sekam padi (in-situ) dengan variasi massa 100 g, 200 g, dan 300 g, serta satu kondisi pembanding tanpa zeolit (0 g). Dengan demikian, terdapat empat variasi perlakuan utama, yaitu 0 g, 100 g, 200 g, dan 300 g zeolit pada massa bahan bakar yang sama.

Variabel Penelitian

Variabel bebas pada penelitian ini adalah massa zeolit yang dicampurkan ke dalam sekam padi (0, 100, 200, 300 g). Variabel terikat meliputi kandungan gas hasil gasifikasi (CO, CH₄, dan H₂) serta temperatur di dalam reaktor selama proses berlangsung. Variabel terkontrol adalah kondisi suplai udara, yang dijaga sama pada setiap percobaan dengan mengatur kecepatan udara dari blower pada nilai tetap.

Peralatan dan Instrumentasi

Peralatan utama penelitian meliputi reaktor gasifikasi, blower 2 inci sebagai pemasok udara, timbangan analog untuk penimbangan bahan, sensor temperatur (sensor suhu) untuk pemantauan kondisi termal reaktor, sensor gas untuk pengukuran konsentrasi CO, CH₄, dan H₂, serta komputer sebagai media perekaman/penyimpanan data. Seluruh rangkaian peralatan (tungku, blower, saluran udara, serta sensor) disusun menjadi satu sistem uji yang dapat beroperasi pada kondisi yang sama untuk setiap variasi zeolit.

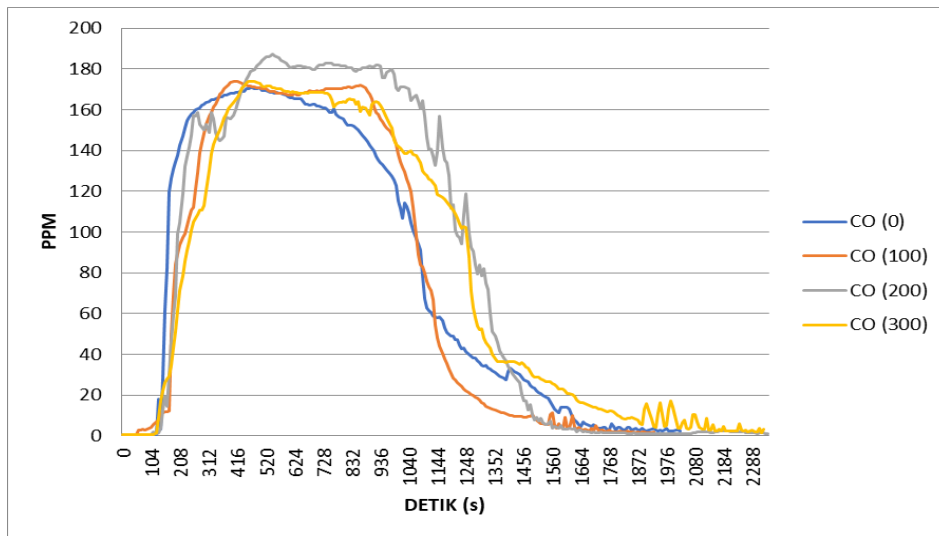
Prosedur Eksperimen

Sebelum pengujian, dilakukan studi literatur terkait desain gasifier skala kecil, kemudian dilakukan perancangan dan perakitan sistem gasifikasi yang mencakup reaktor, blower, saluran udara, dan instrumen ukur. Pada setiap percobaan, sekam padi yang telah ditimbang (500 g) dicampurkan homogen dengan zeolit sesuai variasi perlakuan, kemudian dimasukkan ke dalam reaktor dan ditutup rapat.

Suplai udara dari blower diatur sehingga kecepatan udara masuk ke reaktor dijaga konstan sebesar 10 m/s. Proses dimulai dengan penyalaan awal (ignition) untuk memicu reaksi pembakaran/gasifikasi, kemudian blower dinyalakan sebagai pemasok udara utama. Selanjutnya, sistem dibiarkan beroperasi hingga gas hasil gasifikasi keluar dari reaktor. Selama proses berlangsung dilakukan pencatatan temperatur reaktor dan pencatatan konsentrasi gas CO, CH₄, dan H₂ berdasarkan pembacaan sensor gas pada interval waktu pengamatan yang sama untuk setiap perlakuan. Prosedur ini diulang untuk seluruh variasi massa zeolit, dengan tahapan pengisian ulang bahan bakar serta pengujian dilakukan dengan prosedur yang identik.

Hasil dan Pembahasan

Kandungan CO pada gasifikasi



Gambar 2. Grafik hubungan antara waktu dan kandungan gas CO pada gasifikasi dengan Perbedaan Jumlah Katalis

Gambar menunjukkan profil konsentrasi CO (ppm) sebagai fungsi waktu (detik) pada proses gasifikasi dengan variasi massa/level katalis zeolit, yaitu CO(0) (tanpa zeolit), CO(100), CO(200), dan CO(300). Secara umum seluruh kurva memperlihatkan tiga tahapan utama, yaitu fase start-up (awal), fase puncak/plateau (stabil), dan fase penurunan (depletion).

Pada fase awal ($\pm 0-200$ s), seluruh perlakuan menunjukkan kadar CO yang masih sangat rendah mendekati nol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses masih berada pada tahap pemanasan dan pembentukan zona reaksi, sehingga reaksi pembentukan gas hasil gasifikasi (termasuk CO) belum dominan. Setelah memasuki sekitar $\pm 200-400$ s, terjadi kenaikan tajam kadar CO pada semua perlakuan hingga mencapai kisaran $\pm 150-170$ ppm, menandakan bahwa zona pirolisis-reduksi mulai aktif dan pembentukan gas mampu berlangsung secara signifikan.

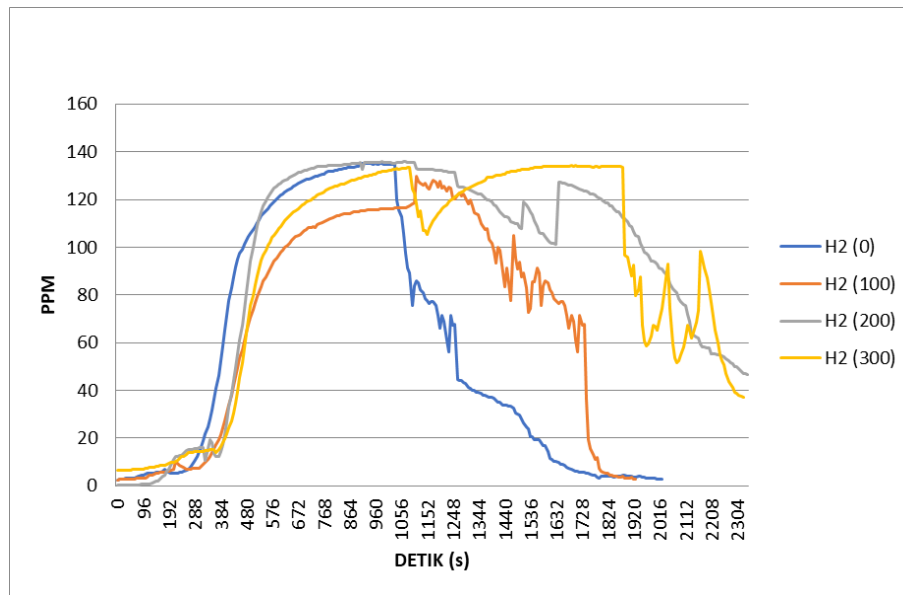
Perbedaan performa antar variasi zeolit terlihat jelas pada fase puncak/plateau ($\pm 400-950$ s). Perlakuan zeolit 200 (CO(200)) menghasilkan konsentrasi CO tertinggi dan paling stabil, dengan puncak mencapai sekitar $\pm 185-190$ ppm serta mempertahankan kadar tinggi lebih lama dibanding perlakuan lain. Sementara itu, CO(100) dan CO(300) menunjukkan puncak yang sedikit lebih rendah (sekitar $\pm 170-178$ ppm), dan CO(0) cenderung memiliki puncak paling rendah (sekitar $\pm 165-170$ ppm). Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan zeolit hingga tingkat tertentu mampu meningkatkan pembentukan CO atau mempertahankan kondisi reaksi reduksi lebih efektif, namun peningkatan zeolit yang terlalu tinggi tidak selalu memberikan kenaikan puncak CO yang lebih besar.

Secara mekanistik, peningkatan CO pada keberadaan zeolit dapat dikaitkan dengan peran zeolit sebagai katalis yang mempercepat cracking/reforming tar dan hidrokarbon ringan, sehingga senyawa volatil lebih banyak terkonversi menjadi gas sederhana seperti CO dan H_2 . Selain itu, CO juga dapat terbentuk melalui reaksi reduksi seperti Boudouard ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$) dan reduksi uap/karbon ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) yang cenderung dominan pada zona reduksi. Ketika tar terurai dan gas volatil lebih “bersih”, jalur pembentukan CO menjadi lebih intensif dan plateau CO menjadi lebih stabil. Pada kondisi ini, zeolit 200 tampak sebagai kondisi optimum yang memberikan keseimbangan antara aktivitas katalitik dan kelancaran aliran gas/reaksi.

Memasuki fase penurunan ($\pm 950-1600$ s), semua kurva mengalami penurunan CO menuju nol. Penurunan ini mengindikasikan bahwa sumber reaktan (char/volatile) berkurang, temperatur/zonasi reaksi mulai melemah, atau laju pembentukan CO kalah oleh laju konsumsi/konversinya. Perlakuan CO(100) menunjukkan penurunan paling cepat, diikuti CO(0). Sebaliknya, CO(200) menurun lebih lambat dan “habisnya” terjadi lebih belakangan, menunjukkan bahwa kestabilan reaksi penghasil CO masih terjaga lebih lama. Menariknya, CO(300) memiliki “ekor” (tail) paling panjang hingga di atas ± 2000 s disertai fluktuasi kecil pada konsentrasi rendah. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa pada zeolit tinggi, proses reaksi berlangsung lebih lama namun tidak lagi menghasilkan puncak CO lebih tinggi—kemungkinan akibat adanya keterbatasan perpindahan massa, perubahan distribusi temperatur, atau kecenderungan reaksi lanjutan yang mengonversi sebagian CO menjadi produk lain (misalnya melalui water-gas shift menghasilkan CO_2 dan H_2) sehingga puncak tidak meningkat, tetapi sisa reaksi berlangsung lebih panjang.

Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa variasi zeolit berpengaruh nyata terhadap profil CO. Kondisi zeolit 200 merupakan perlakuan terbaik pada grafik ini karena menghasilkan CO tertinggi dan plateau paling stabil, yang mengindikasikan proses reduksi serta konversi volatil/tar menuju gas sederhana berjalan

paling efektif. Sementara itu, peningkatan zeolit menjadi 300 cenderung memperpanjang durasi reaksi pada konsentrasi rendah, namun tidak meningkatkan puncak CO, sehingga secara praktis dapat dipertimbangkan sebagai kondisi yang lebih “panjang tetapi tidak paling kuat” dalam menghasilkan CO.



Gambar 3. Grafik hubungan antara waktu dan kandungan H₂ pada gasifikasi dengan Perbedaan Jumlah Katalis

Gambar menunjukkan profil konsentrasi hidrogen (H₂) dalam satuan ppm sebagai fungsi waktu (detik) pada proses gasifikasi dengan variasi jumlah katalis zeolit, yaitu H₂(0) (tanpa zeolit), H₂(100), H₂(200), dan H₂(300). Secara umum, seluruh perlakuan menampilkan pola yang serupa, yaitu fase awal (start-up) dengan H₂ rendah, diikuti kenaikan cepat menuju plateau (puncak stabil), kemudian penurunan ketika reaksi mulai melemah. Namun demikian, perbedaan level zeolit memengaruhi tinggi plateau, kestabilan, serta lama bertahannya H₂.

Pada fase awal (±0–350 s), konsentrasi H₂ pada semua perlakuan masih rendah (mendekati 0 hingga sekitar 10–15 ppm). Kondisi ini mengindikasikan bahwa reaktor masih berada pada tahap pemanasan dan pembentukan zona reaksi. Ketika proses memasuki sekitar ±350–600 s, seluruh kurva menunjukkan kenaikan tajam hingga kisaran ±100–130 ppm, yang menandakan bahwa reaksi pembentukan H₂ mulai dominan seiring terbentuknya zona pirolisis dan reduksi serta meningkatnya pembentukan volatil dan gas reaktif.

Perbedaan paling jelas terlihat pada fase puncak/plateau (±600–1100 s). Pada fase ini, perlakuan H₂(200) dan H₂(300) umumnya menghasilkan nilai H₂ yang lebih tinggi, mendekati ±135–140 ppm, dan menunjukkan plateau yang relatif stabil. Sementara itu, H₂(100) cenderung memiliki plateau lebih rendah (sekitar ±115–125 ppm), sedangkan H₂(0) dapat mencapai nilai tinggi pada awal plateau namun kemudian mengalami penurunan lebih cepat. Hasil ini mengindikasikan bahwa keberadaan zeolit pada jumlah tertentu mampu meningkatkan pembentukan H₂ atau menjaga kestabilan reaksi pembentuk H₂ selama fase operasi utama.

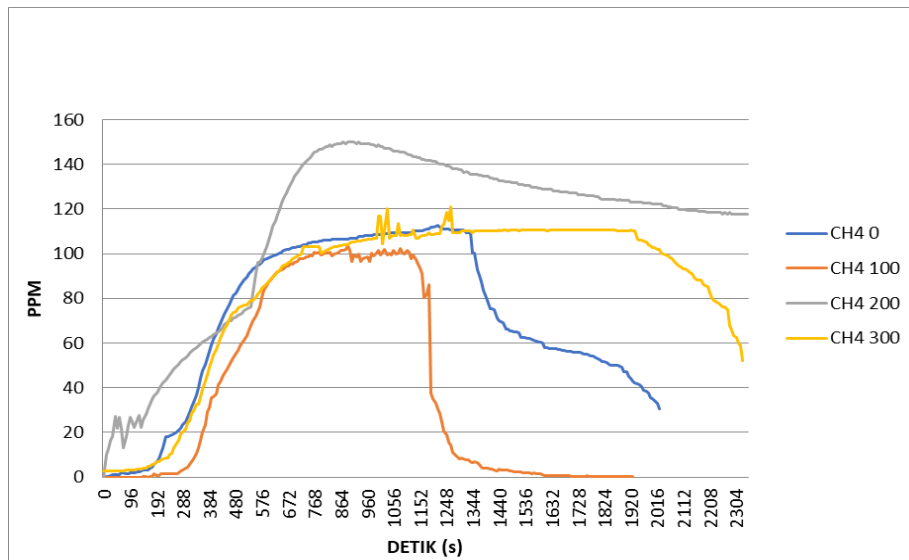
Secara mekanistik, peningkatan H₂ pada variasi zeolit dapat dikaitkan dengan peran zeolit sebagai katalis untuk mempercepat konversi senyawa volatil, tar, dan hidrokarbon menjadi gas ringan. Pada proses gasifikasi, H₂ terutama terbentuk melalui reaksi-reaksi reduksi dan reforming, seperti reaksi water-gas ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) serta steam reforming dari hidrokarbon/tar (secara umum: $C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + m/2)H_2$). Selain itu, pergeseran kesetimbangan reaksi juga dapat melibatkan water-gas shift ($CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$), yang dapat meningkatkan H₂ pada kondisi tertentu apabila tersedia uap air yang cukup. Dengan demikian, zeolit berpotensi meningkatkan fraksi H₂ melalui (i) perbaikan cracking tar sehingga pembentukan gas lebih “bersih”, dan (ii) memperkaya jalur reaksi yang menghasilkan H₂ [8].

Memasuki fase penurunan (setelah ±1050 s), seluruh kurva menunjukkan penurunan H₂, tetapi dengan laju dan waktu yang berbeda. H₂(0) mengalami penurunan paling awal dan paling cepat, terlihat turun signifikan segera setelah sekitar ±1050 s hingga mendekati nol pada akhir pengamatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanpa zeolit, produksi H₂ tidak bertahan lama karena reaksi pembentuk H₂ melemah lebih cepat, yang kemungkinan dipengaruhi oleh berkurangnya volatil/char reaktif dan menurunnya intensitas reaksi reduksi. Perlakuan H₂(100) juga menunjukkan penurunan yang jelas dan akhirnya mendekati nol sekitar ±1750–1850 s,

mengindikasikan adanya peningkatan performa dibanding tanpa katalis, tetapi belum cukup kuat mempertahankan reaksi dalam durasi panjang[9].

Sebaliknya, $H_2(200)$ menunjukkan penurunan yang lebih lambat dan bertahap, serta masih mempertahankan H_2 hingga akhir waktu pengamatan (sekitar puluhan ppm). Hal ini menandakan bahwa pada zeolit 200, reaksi-reaksi pembentukan H_2 masih berlangsung lebih lama, baik karena konversi tar/volatile yang lebih efektif maupun karena kondisi zona reduksi yang lebih stabil. Sementara itu, $H_2(300)$ memperlihatkan plateau yang panjang dengan nilai tinggi, namun pada fase akhir terjadi penurunan tajam disertai fluktuasi. Fluktuasi pada konsentrasi rendah ini umumnya mengindikasikan ketidakstabilan proses pada tahap akhir, misalnya akibat sisa bara yang terbakar/berreaksi secara tidak seragam, perubahan distribusi temperatur, atau dinamika aliran gas yang tidak konstan ketika reaktan mulai habis. Dengan kata lain, zeolit 300 dapat memberikan fase produksi H_2 yang kuat, tetapi cenderung lebih “tidak stabil” di akhir operasi dibanding zeolit 200[10].

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa variasi zeolit berpengaruh nyata terhadap kinerja pembentukan H_2 . Berdasarkan grafik, zeolit 200 merupakan kondisi yang paling menguntungkan dari sisi kestabilan dan ketahanan produksi H_2 (tail panjang dan penurunan bertahap), sedangkan zeolit 300 memberikan H_2 tinggi dalam plateau namun menunjukkan gejala ketidakstabilan pada fase akhir. Dengan demikian, terdapat indikasi adanya kondisi optimum zeolit (pada data ini sekitar level 200) yang mampu menyeimbangkan aktivitas katalitik dan kestabilan proses, sehingga produksi H_2 lebih terjaga selama durasi operasi.



Gambar 3. Grafik hubungan antara waktu dan kandungan CH_4 pada gasifikasi dengan Perbedaan Jumlah Katalis

Gambar menunjukkan profil konsentrasi metana (CH_4) (ppm) sebagai fungsi waktu (detik) pada proses gasifikasi dengan variasi jumlah katalis zeolit, yaitu $CH_4(0)$ (tanpa zeolit), $CH_4(100)$, $CH_4(200)$, dan $CH_4(300)$. Secara umum, seluruh perlakuan memperlihatkan pola bertahap: fase start-up (CH_4 rendah), dilanjutkan kenaikan cepat menuju plateau, kemudian fase penurunan ketika reaksi gasifikasi melemah. Namun, level zeolit memberikan pengaruh yang jelas terhadap besarnya puncak, kestabilan plateau, dan durasi bertahannya CH_4 .

Pada fase awal ($\pm 0-250$ s), CH_4 pada semua perlakuan masih rendah (mendekati 0 ppm). Pada zeolit 200, terlihat CH_4 mulai meningkat lebih dini dan lebih bertahap sejak awal waktu pengamatan, menandakan bahwa pembentukan gas volatil dan produk pirolisis yang mengandung hidrokarbon terjadi lebih cepat/lebih aktif pada kondisi tersebut. Setelah memasuki sekitar $\pm 250-700$ s, semua kurva meningkat tajam hingga kisaran $\pm 80-110$ ppm, menunjukkan terbentuknya CH_4 secara intensif seiring meningkatnya reaksi pirolisis dan konversi volatil pada temperatur yang semakin stabil[11].

Perbedaan utama terlihat pada fase puncak/plateau ($\pm 700-1200$ s). Perlakuan $CH_4(200)$ (hijau) menghasilkan puncak tertinggi, mencapai sekitar $\pm 145-150$ ppm, kemudian menurun perlahan namun tetap berada pada tingkat tinggi (sekitar $\pm 120-130$ ppm) hingga akhir pengamatan. Sementara itu, $CH_4(0)$ dan $CH_4(300)$ menunjukkan plateau yang relatif mirip di kisaran $\pm 105-112$ ppm dalam rentang waktu tertentu. $CH_4(100)$ mencapai plateau sekitar $\pm 95-105$ ppm, namun hanya bertahan singkat sebelum turun drastis. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan zeolit sampai level tertentu (pada data ini tampak 200) mampu meningkatkan pembentukan CH_4 dan mempertahankan konsentrasinya lebih lama, sedangkan peningkatan zeolit

ke 300 tidak menaikkan puncak setinggi 200, tetapi cenderung memperpanjang durasi plateau pada tingkat menengah [9].

Secara mekanistik, CH₄ dalam gasifikasi umumnya terbentuk dominan pada fase pirolisis dan reaksi sekunder gas-padat, serta dapat dipengaruhi oleh keseimbangan reaksi reforming dan cracking. Dalam sistem gasifikasi, CH₄ dapat meningkat ketika volatil/hidrokarbon terbentuk lebih banyak dan belum sepenuhnya terkonversi menjadi CO dan H₂. Sebaliknya, pada temperatur tinggi dan kondisi katalitik yang kuat, CH₄ cenderung berkurang karena terdorong ke reaksi steam reforming/dry reforming yang mengonversi CH₄ menjadi CO dan H₂ (secara umum: CH₄ + H₂O → CO + 3H₂; CH₄ + CO₂ → 2CO + 2H₂). Oleh karena itu, profil CH₄ yang tinggi dan stabil dapat mengindikasikan dua hal yang beriringan: (i) pembentukan volatil/hidrokarbon yang tinggi dan stabil, serta (ii) laju reforming CH₄ yang tidak “menghabiskan” CH₄ terlalu cepat. Pada data ini, zeolit 200 tampak menghasilkan CH₄ yang paling tinggi sekaligus bertahan lama, yang mengarah pada kondisi proses yang stabil dan produksi volatil yang konsisten [10].

Memasuki fase penurunan, perbedaan antar perlakuan semakin jelas. CH₄(100) mengalami penurunan paling tajam sekitar ±1150–1300 s hingga mendekati nol, mengindikasikan bahwa pembentukan CH₄ berhenti lebih cepat atau CH₄ lebih cepat terkonversi/terkonsumsi ketika reaktan mulai berkurang. CH₄(0) mengalami penurunan lebih bertahap setelah sekitar ±1300 s, turun dari sekitar 110 ppm menuju puluhan ppm dan terus menurun hingga akhir. Pada CH₄(300), plateau bertahan panjang pada sekitar ±110 ppm hingga sekitar ±1850–1900 s, kemudian menurun secara gradual sampai akhir pengamatan. Perilaku ini menunjukkan bahwa zeolit 300 mampu menjaga CH₄ pada level menengah dalam durasi lebih panjang, meskipun tidak memberikan puncak tertinggi. Sementara itu, CH₄(200) menurun sangat perlahan dari puncaknya dan tetap tinggi hingga akhir, menunjukkan kestabilan produksi CH₄ paling baik pada rentang pengamatan.

Secara keseluruhan, variasi zeolit berpengaruh nyata terhadap karakteristik CH₄. Berdasarkan grafik, zeolit 200 memberikan performa paling dominan dalam hal puncak CH₄ tertinggi dan kestabilan jangka panjang, sedangkan zeolit 300 menonjol pada durasi plateau yang panjang pada level menengah. Kondisi tanpa zeolit (0) menunjukkan tren penurunan bertahap yang lebih cepat dibanding zeolit 200/300, dan zeolit 100 merupakan kondisi yang paling cepat kehilangan CH₄. Temuan ini menguatkan adanya indikasi kondisi optimum jumlah zeolit pada data ini, di mana level 200 mampu memberikan pembentukan dan kestabilan CH₄ yang paling tinggi selama operasi [12].

Dari serangkaian hasil penelitian diatas. Telah didapatkan hasil bahwa ada beberapa hal yang berpengaruh dalam waktu, suhu dan kandungan gas yang dihasilkan dalam proses gasifikasi. Bahan bakar yang digunakan yaitu sekam padi sangat mudah terbakar habis yang menyebabkan reaksi pembentukan gas dalam ruang bakar juga cepat menyusut. Ditambah pula dengan udara yang ditiupkan dari blower juga cukup kencang menyebabkan gasu yang keluar melewati sensor cepat menyusut habis.

Zeolit yang dicampurkan juga cukup memberikan pengaruh yang signifikan terhadap proses gasifikasi. Dapat dilihat dalam percobaan tanpa menggunakan campuran zeolit kandungan gas yang dihasilkan tidak dapat maksimal. Hal ini dapat disebabkan oleh cepatnya sekam padi terbakar habis di dalam ruang bakar yang menyebabkan turunnya suhu dan berpengaruh pada reaksi pembentukan gas CH₄, CO dan H₂. Pada percobaan dengan 100 gram zeolit tidak terlalu memberikan dampak yang signifikan karena dapat dilihat pada hasilnya tidak terlalu berbeda dengan percobaan tanpa zeolit. Karena jumlah zeolit yang ditambahkan juga berpengaruh dalam hasil gasifikasi. Namun pada percobaan ini mampu menghasilkan H₂ yang cukup tinggi dan stabil. Peningkatan pembentukan gas pada variasi zeolit dapat dijelaskan melalui peran katalitik zeolit dalam mempercepat reaksi cracking tar dan reforming hidrokarbon volatil menjadi gas ringan seperti CO dan H₂, serta kemungkinan mendukung reaksi *water-gas shift* pada kondisi tertentu. Struktur pori dan luas permukaan zeolit meningkatkan kontak antara gas reaktif dan permukaan katalitik, sehingga konversi senyawa kompleks menjadi gas sederhana berlangsung lebih efektif. Dengan demikian, peningkatan konsentrasi CH₄, CO, dan H₂ lebih terkait dengan aktivitas katalitik dan adsorptif zeolit terhadap senyawa antara, bukan karena mekanisme penyerapan panas secara langsung.[13].

Pada percobaan dengan 200 gram zeolit mampu mencapai suhu maksimal dan kandungan gas yang paling baik dibandingkan 3 percobaan yang lainnya. Pada percobaan ini dapat dikatakan merupakan campuran yang paling pas antara bahan bakar dan zeolitnya karena tidak terlalu sedikit dan terlalu banyak juga. Tingginya suhu pada ruang bakar dan tingginya kandungan gas yang dihasilkan pada proses gasifikasi tidak terlepas dari pengaruh sifat zeolit yang mampu menyerap panas dan uap air dari pembakaran sehingga menyebabkan reaksi pembentukan gas CH₄, CO dan H₂ menjadi lebih maksimal [14].

Pada percobaan dengan 300 gram zeolit juga dapat dikatakan menghasilkan kandungan gas yang cukup baik dan stabil meskipun tidak mampu mencapai suhu maksimal sepadan dengan percobaan dengan 200 gram zeolit. Hal ini dapat disebabkan karena jumlah zeolit yang ditambahkan berpengaruh terhadap reaksi

pembentukan gas. Karena makin banyak zeolit yang ditambahkan makin banyak juga panas dan uap air yang diserap. Sehingga pada proses pembakaran menyebabkan terlalu banyaknya panas dan uap air yang diserap yang menyebabkan kenaikan suhu dalam ruang bakar tertahan namun mampu menghasilkan kandungan gas yang cukup baik dan stabil.

3 Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan katalis zeolit pada gasifikasi sekam padi berpengaruh nyata terhadap karakteristik gas hasil gasifikasi (CO, H₂, dan CH₄) serta kestabilan proses selama operasi. Dibandingkan kondisi tanpa zeolit, penggunaan zeolit cenderung meningkatkan performa reaktor yang ditunjukkan oleh perubahan profil gas terhadap waktu, terutama pada fase pembentukan gas (kenaikan cepat) dan fase operasi stabil (plateau).

Secara umum, variasi massa zeolit menunjukkan adanya kondisi optimum, di mana penambahan zeolit pada level menengah memberikan respon terbaik dalam menghasilkan gas mudah terbakar dan mempertahankan kestabilannya. Berdasarkan tren grafik, zeolit 200 g memberikan kinerja paling dominan karena mampu menghasilkan kadar CO dan CH₄ tertinggi serta stabil, dan juga menunjukkan produksi H₂ yang lebih bertahan lama hingga fase akhir pengamatan dibanding perlakuan lainnya. Sementara itu, penambahan zeolit yang lebih tinggi (300 g) cenderung mempertahankan gas pada durasi yang lebih panjang, tetapi menunjukkan gejala fluktuasi/ketidastabilan pada fase akhir, sedangkan zeolit 100 g dan tanpa zeolit cenderung mengalami penurunan gas lebih cepat.

Pada kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini (500 g sekam padi, suplai udara 10 m/s, reaktor updraft skala laboratorium), penambahan zeolit sebesar 200 g menunjukkan performa paling optimal dalam menghasilkan dan mempertahankan konsentrasi CO, H₂, dan CH₄. Oleh karena itu, rekomendasi ini bersifat kontekstual terhadap parameter operasi tersebut dan memerlukan verifikasi lebih lanjut untuk skala reaktor, variasi *equivalence ratio*, serta karakteristik bahan bakar yang berbeda. Ke depan, penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi pengaruh aktivasi zeolit, variasi *equivalence ratio*/debit udara, serta pengukuran parameter tambahan.

4 Referensi

- [1] E. I. R. Rhofita, "Optimalisasi sumber daya pertanian Indonesia untuk mendukung program ketahanan pangan dan energi nasional," *J. Ketahanan Nas.*, vol. 28, no. 1, p. 82, 2022.
- [2] I. Hamidu, B. Afotey, B. Kwakye-Awuah, and D. A. Anang, "Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review," *Heliyon*, vol. 11, no. 4, 2025.
- [3] X. Zeng, "Hydrogen-rich gas production by catalytic steam gasification of rice husk using CeO₂-modified Ni-CaO sorption bifunctional catalysts," *Chem. Eng. J.*, vol. 441, 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.136023.
- [4] R. Hidayat, P. Suwandono, W. S. C. Pambudi, and H. D. Saputra, "Peningkatan Peforma Design Gasifier Tipe Downdraft Dengan Variasi Jumlah Aliran Udara," *AL JAZARI J. Ilm. Tek. MESIN*, vol. 10, no. 1, 2025.
- [5] P. Suwandono, Y. I. Prakoso, G. Soebiyakto, and N. Finahari, "Pengaruh Variasi Filter Bertingkat dan Buka-an Katup Terhadap Kinerja Gasifikasi Tipe Updraft Berbahan Pelet Kayu," *ARMATUR Artik. Tek. Mesin Manufaktur*, vol. 5, no. 2, pp. 86–94, 2024.
- [6] N. Cerone, F. Zimbardi, L. Contuzzi, J. Baleta, and D. Cerinski, "Experimental investigation of syngas composition variation along updraft fixed bed gasifier," *Energy Convers. Manag.*, vol. 221, no. July, p. 113116, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113116.
- [7] I. Hambali, M. Izzuddin, A. Hakim, R. Ferdinando, and P. Suwandono, "Pengaruh Peforma Variasi Filter Gasifier Tipe Updraft dengan Bahan RDF," vol. 12, no. 02, pp. 322–331, 2023.
- [8] M. Ajorloo, M. Ghodrat, J. Scott, and V. Strezov, "Experimental analysis of the effects of feedstock composition on the plastic and biomass Co-gasification process," *Renew. Energy*, vol. 231, p. 120960, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120960>.
- [9] K. Shi *et al.*, "Production of H₂-Rich Syngas From Lignocellulosic Biomass Using Microwave-Assisted Pyrolysis Coupled With Activated Carbon Enabled Reforming," *Front. Chem.*, vol. Volume 8-2020, 2020, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2020.00003>
- [10] F. Micheli, E. Mattucci, C. Courson, and K. Gallucci, "Bi-Functional Catalyst/Sorbent for a H₂-Rich Gas from Biomass Gasification," 2021. doi: 10.3390/pr9071249.
- [11] K. Yamamoto and K. Sakaguchi, "Hydrogen reactivity factor and effects of oxygen on methane conversion rate by chemical equilibrium calculation," *Int. J. Thermofluids*, vol. 15, p. 100186, 2022.
- [12] J. Wang *et al.*, "Mechanism on catalytic cracking tar with CaO-based catalysts for hydrogen-rich gas by DFT and experiments," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 9, pp. 6522–6531, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.171>.
- [13] W.-H. Chen *et al.*, "Optimization and analysis of syngas production from methane and CO₂ via Taguchi approach, response surface methodology (RSM) and analysis of variance (ANOVA)," *Fuel*, vol. 296, p. 120642, 2021, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120642>.
- [14] S. Mishra and R. K. Upadhyay, "Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 4, pp. 329–340, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.08.009>.