

Konversi Batubara Menjadi Syngas Menggunakan Metode Gasifikasi Dengan Variasi *Air Fuel Ratio*

Mutia Amyranti¹, *Ismi Nurlatifah², dan Siti Maftukhah³

^{1,2,3}Teknik Kimia, Universitas Islam Syekh Yusuf, Tangerang, Indonesia)

¹mutiaamyрати@unis.ac.id, ²isminurlatifah@unis.ac.id, ³sitimaftukhah@unis.ac.id

Abstrak

Salah satu hasil dari pertambangan Indonesia adalah batubara yang merupakan penyedia sumber energi. Di daerah Bayah Banten Selatan banyak ditemukan batubara tepatnya di daerah Bayah. Batubara dapat dikonversi menjadi campuran gas melalui proses gasifikasi yang melibatkan reaksi water gas, boundouard dan water gas-shift. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh Air Fuel Ratio (AFR) pada proses gasifikasi batubara yang mengandung gas-gas sintesis dengan rasio H₂/CO ≈ 2. Komposisi gas H₂ dan CO diukur dengan menggunakan Gas Chromatography (GC). Pada proses gasifikasi digunakan reaktor fixed bed tipe updraft dengan menggunakan medium steam. Ukuran batubara yang digunakan adalah 14 mesh sebanyak 300 gram dengan variasi AFR 1, 5, 2, dan 2,5 pada suhu 800oC. Energi aktivasi reaksi gasifikasi dapat diturunkan dengan menggunakan katalis Ca(OH)₂ sebanyak 3% dari massa batubara. Hasil penelitian menunjukkan komposisi gas syngas rasio H₂/CO terbaik pada nilai AFR 1,5 temperatur 800oC menggunakan katalis Ca(OH)₂ yaitu 1,98 dengan komposisi gas H₂ 33,8% dan gas CO 17,1%.

Article History:

Received 20 Jun 2022

Revised 18 Jul 2022

Accepted 26 Jul 2022

Available online 16 Sep 2022

Kata Kunci : air fuel ratio, batubara, gas sintesis

Abstract

Coal is one of the natural resource commodities produced from mining activities in Indonesia and is a strategic mining material in the supply of energy sources. Especially for Banten , coal were found in South Banten Bayah. Gasification is a solution for the use of coal. Coal gasification is the process of converting solid coal into a gas mixture. The main reactions that occur are the water gas, boundouard and water gas-shift reactions. This study aims to determine the effect of Air Fuel Ratio (AFR) gasifications in the Banten Bayah Natural coal gasification process which produces synthesis gas with an H₂/Co Ratio 2. The measured parameters are the composition of H₂ and CO gases using Gas Chromatography. The gasification process is carried out with an updraft fixed bed reactor using steam medium on a 14 mesh coal size of 300 grams with AFR variations of 1.5, 2 and 2.5 with temperature 800°C. The activation energy of the gasification reaction can be reduced by using Ca(OH)₂ catalysts as much as 3% of the mass of coal. From the research results obtained the best H₂/CO ratio syngas gas composition at AFR 1.5 temperature 800°C using Ca(OH)₂ catalyst which is 1.98 with H₂ gas composition 33.8% and CO gas 17.1%.

Keywords : air fuel ratio, coal, synthesis gas

1. Pendahuluan

Salah satu bahan bakar fosil adalah batubara. Batubara ini merupakan batuan sedimen yang terbentuk dari endapan organik dan sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi dan mengalami pembatubaraan selama jutaan tahun (Sulistyono, 2019). Konsumsi energi di Indonesia semakin hari semakin meningkat karena berbagai faktor yang diantaranya pertambahan jumlah penduduk, kemajuan teknologi dan juga peningkatan perekonomian masyarakat. Kenaikan harga serta menipisnya cadangan minyak bumi dan gas alam baik di dunia maupun di Indonesia merupakan dua faktor yang

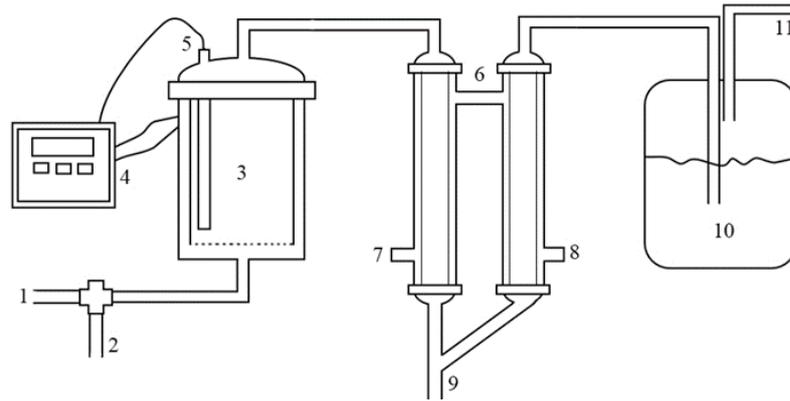
menyebabkan perlunya mencari sumber energi alternatif yang memiliki nilai ekonomis (Amyranti & Maftukhah, 2021). Indonesia dikenal sebagai negara dengan potensi kekayaan alam yang melimpah diharapkan dapat menjadi salah satu solusi dalam mengatasi krisis energi saat ini. Sumber energi utama di Indonesia setelah minyak bumi dan gas alam adalah batubara (BAPPENAS, 2019). Batubara secara perlahan mulai menggantikan peranan minyak bumi dan gas alam sebagai sumber energi utama di sektor industri (Handayani, 2017). Peningkatan harga minyak bumi membuat pelaku industri beralih ke batubara yang harganya lebih murah. Cadangan batubara Indonesia saat ini mencapai 38,84 miliar ton (ESDM, 2021). Dengan rata-rata produksi batubara sebesar 600 juta ton per tahun, maka umur cadangan batubara masih 65 tahun apabila diasumsikan tidak ada temuan cadangan baru. Selain cadangan batubara, masih ada juga sumber daya batubara yang tercatat sebesar 143,7 miliar ton (ESDM, 2021). Untuk wilayah Banten batubara banyak ditemukan di daerah Banten Selatan tepatnya di daerah Bayah. Batubara merupakan bahan baku pembuatan gas sintesis (H_2 , CO , CO_2 , CH_4) (Aswati, 2020). Hidrogen merupakan salah satu bahan yang dibutuhkan dalam industri. Hidrogen juga digunakan sebagai bahan bakar nonfossil (Nurlatifah & Arlianti, 2021). Hidrogen berfungsi sebagai bahan baku pembuatan ammonia, metanol, bahan bakar alternatif, *starup cracking*, perengkahan fraksi-fraksi minyak bumi (*hydrocracking*), *hidrogenasi*, dan bahan baku pembuatan zat kimia lainnya (Ismail et al., 2017).

Teknologi yang sekarang sedang banyak digunakan dalam memproduksi gas sintesis adalah teknologi gasifikasi (Umar, 2020). Teknologi ini merupakan teknologi yang hemat biaya dan lebih bersih dari teknologi lainnya karena proses konversi batubara menjadi gas dapat dilakukan menggunakan alat *gasifier*, dimana dapat disesuaikan dengan kebutuhan yang diinginkan (Sukandarumidi, 2017). Gasifikasi batubara merupakan salah satu peningkatan nilai guna batubara yang selama ini hanya langsung diekspor dalam kondisi mentah menjadi bahan bernilai ekonomis tinggi khususnya di daerah selatan Banten.

Penelitian tentang gasifikasi batubara sudah banyak dilakukan, diantaranya meneliti tentang gasifikasi arang batubara dengan CO_2 dan steam (Sudaryanto, 2018), pengaruh *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap kualitas syngas gasifikasi (Diaz, 2015). Gasifikasi batubara juga dapat dilakukan dengan mengurangi efek samping industri amoniak dengan penambahan katalis $Ca(OH)_2$ (Saripah, 2019). Penggunaan *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap kualitas syngas gasifikasi masih dalam proses penelitian mendapatkan hasil yang terbaik. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan *Air Fuel Ratio* (AFR) dan batubara Alam Bayah Banten sebagai bahan baku pembuatan *syngas* sebagai alternatif energi terbarukan dengan memanfaatkan potensi lokal daerah sebagai upaya peningkatan nilai guna batubara.

2. Bahan dan Metode

Tahapan dalam penelitian ini terdiri dari preparasi bahan dan proses sintesis gas. Preparasi bahan dengan cara sample batubara dihaluskan dengan *crusher* jenis *ball mill* sampai ukuran yang diinginkan yaitu 14 - 18 mesh (Yolanda, 2015). Sampel batubara yang telah dihaluskan kemudian diayak menggunakan *screener* ukuran 14 mesh. Proses sintesis gas merupakan proses utama dari penelitian ini yaitu mencampur 300 gram sampel batubara hasil preparasi dan 9 gram katalis $Ca(OH)_2$ kedalam reaktor lalu memasukan sampel batubara yang sudah dicampur dengan katalis kedalam reaktor kemudian menginjektikan udara dari kompresor dengan variasi AFR (1,5;2 dan 2,5) dan menginjektikan uap ke reaktor dengan rasio volume 1:1 dengan udara. Setelah itu melakukan proses sintesis gas selama 45 menit pada temperature $800^{\circ}C$ dan tahap terakhir yaitu menampung gas sintesis pada botol sempel dan melakukan analisa komposisi gas hasil penelitian tersebut. Produk gas yang dihasilkan dianalisa berdasarkan komposisi gas yang terkandung didalamnya, dianalisa menggunakan *Gas Chromatography* (GC). Data yang diperoleh dari analisa GC adalah nilai % volume gas (H_2 , CO , CH_4 , CO , dan udara) per volume total.



Gambar 1. Rangkaian alat proses gasifikasi batubara

Keterangan :

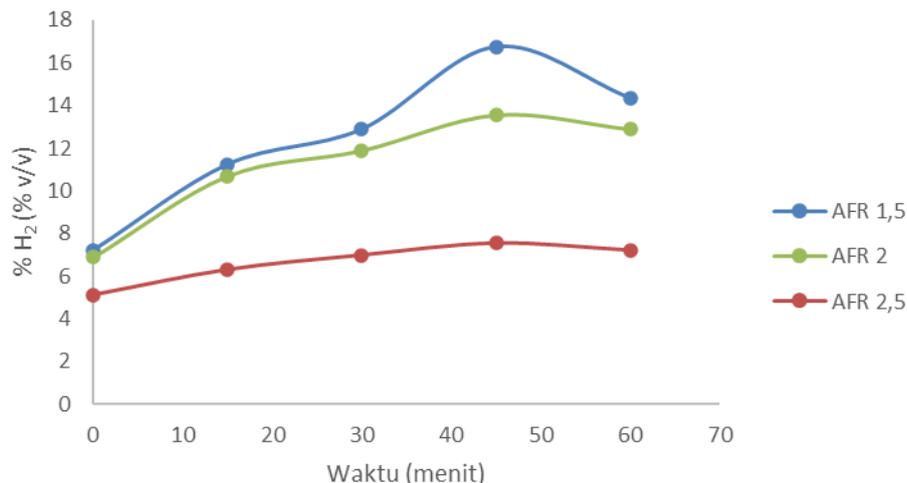
- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1. Udara masuk reaktor | 7. Air pendingin masuk |
| 2. Uap masuk reaktor | 8. Air pendingin keluar |
| 3. Reaktor gasifikasi
(Updraft) | 9. Keluaran cairan kondensat |
| 4. Thermocontrol | 10. Galon penampung |
| 5. Termokopel | 11. Keluaran gas sintesis |
| 6. Kondensor | |

3. Hasil dan Pembahasan

Gasifikasi batubara telah dilakukan di dalam reaktor fixed bed dengan jenis updraft gasifier skala laboratorium dengan reaktor gasifikasi berdiameter 11 cm dan tinggi 25 cm. Penggunaan jenis reaktor sesuai dengan kaidah peningkatan gas sintesis (Anis et al., 2019). Batubara yang digunakan adalah jenis subbituminus dari Alam Bayah Banten dengan ukuran partikel 14 - 18 mesh sebanyak 300 gram. Proses gasifikasi dilakukan pada temperatur 800°C dengan variasi AFR (*Air Fuel Ratio*) 1,5, 2 dan 2,5 serta penambahan katalis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebanyak 3% dari massa batubara.

Pengaruh AFR (*Air Fuel Ratio*) Terhadap Produk H_2 dan CO

Pengaruh AFR terhadap produk H_2 selama proses gasifikasi berlangsung dapat dilihat pada Gambar 2.

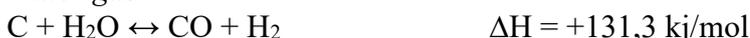


Gambar 2. Perbandingan antara produk H_2 terhadap waktu selama gasifikasi berlangsung untuk beragam AFR

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa pengaruh AFR selama gasifikasi berlangsung menunjukkan perbedaan *trend* yang signifikan terhadap produk H_2 yang dihasilkan. Semakin meningkatnya nilai AFR maka hasil produk H_2 yang dihasilkan akan semakin menurun. Proses konversi energi yang

memerlukan kecepatan udara masuk secara terbatas dan juga optimal dinamakan Gasifikasi. Pada proses gasifikasi ini, rasio perbandingan udara dan bahan bakar yang optimal adalah tidak melebihi 1,5 (Highman et al., 2017). Pada penelitian ini menghasilkan produk H₂ tertinggi pada AFR optimal sebesar 1,5. Angka yang diperoleh ini tidak melebihi batas nilai gasifikasi. Sedangkan pada AFR dengan nilai 2 dan 2,5 menghasilkan produk H₂ yang lebih dengan nilai 1,5 dikarenakan melebihi batas nilai AFR proses gasifikasi. Dengan nilai AFR 2,5 menghasilkan produk gas H₂ terendah. Nilai AFR pada variasi percobaan menjelaskan perbandingan bahan baku (batubara) dengan udara atau bahan bakar dalam proses ini menggunakan oksigen sebagai bahan bakar, rumus mencari nilai AFR menggunakan rumus yang dijelaskan pada persamaan (1). Selain memasukan udara kedalam reaktor, untuk menambah kandungan H₂ pada gas hasil produksi maka ditambahkan uap air kedalam reaktor. Jumlah uap air yang dimasukan kedalam reaktor adalah 1:1 dengan jumlah udara yang dimasukan, penambahan uap air (H₂O) akan bereaksi dengan karbon dan juga karbonmonoksida menghasilkan produk gas sintesis terutama H₂ yang lebih besar.

Water gas

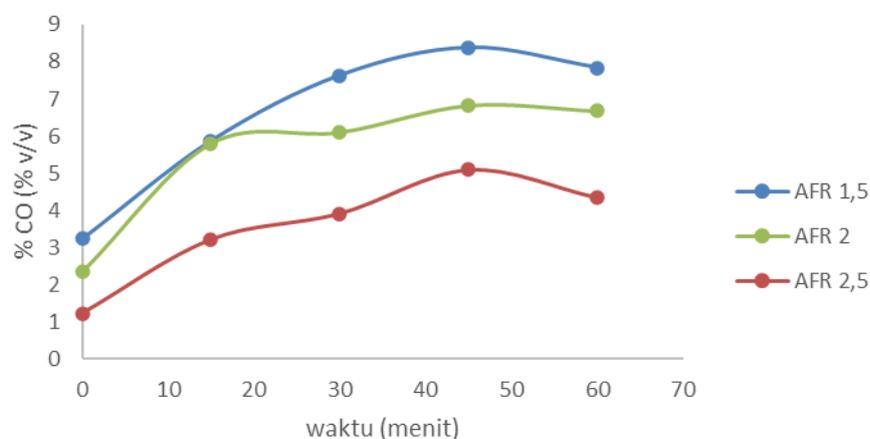


Water gas shift



Penambahan uap air pada reaksi akan menambah kandungan H₂O dalam gas sintesis, pada reaksi *water gas* terjadi reaksi antara karbon dalam batubara dengan uap air yang menghasilkan karbon monoksida dan hidrogen, sedangkan pada reaksi *water gas shift* terjadi reaksi antara senyawa karbon monoksida hasil reaksi dari *water gas* dengan uap air menghasilkan karbon dioksida dan hydrogen, rasio H₂/CO yang di harapkan pada gas produk adalah 2.

Nilai perbandingan uap air dan udara masuk reaktor dibuat 1:1 karena kelebihan uap air dalam reaksi gasifikasi pada suatu reaktor mengakibatkan suhu menurun dalam reaktor yang berakibat pada berkurangnya laju dekomposisi uap air (Yan et al., 2020). Saat nilai AFR semakin besar maka jumlah uap air ke reaktor juga besar, berdasarkan persamaan Bernoulli, kecepatan aliran uap air semakin besar, maka tekanan uap air akan menurun. Penurunan tekanan uap air dalam reaktor akan menggeser reaksi *water gas* dan *water gas shift* cenderung ke arah reaktan yang menyebabkan kandungan H₂ dan CO kecil (Tristantini & Kristanda, 2019). Hal ini akan mempengaruhi pergeseran reaksi gasifikasi yang melibatkan uap air serta menyebabkan nilai AFR 1,5 menghasilkan kandungan H₂ dan CO lebih besar dari AFR 2 dan 2,5. Kenaikan nilai AFR yang melebihi batas nilai AFR gasifikasi juga dapat menurunkan produk CO yang dihasilkan. Produk CO₂ akan meningkat ketika kenaikan nilai AFR yang melebihi batas nilai AFR gasifikasi. Hal ini disebabkan dengan semakin tinggi nilai AFR melebihi batas nilai AFR gasifikasi, maka akan mendekati AFR proses pembakaran. Pengaruh AFR terhadap produk CO selama proses gasifikasi berlangsung dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan antara produk CO terhadap waktu selama gasifikasi berlangsung untuk beragam AFR

Gambar 3 menunjukkan pengaruh AFR selama gasifikasi berlangsung menunjukkan perbedaan trend yang signifikan terhadap produk CO yang dihasilkan. Semakin meningkatnya AFR maka hasil produk CO yang dihasilkan akan semakin menurun. Pengaruh waktu juga mempengaruhi terhadap banyaknya jumlah CO yang dihasilkan pada proses gasifikasi batubara. Pada waktu 45 menit dari total waktu selama proses gasifikasi adalah waktu yang optimum dikarenakan produk CO yang tertinggi. Pada waktu 60 menit produk CO yang dihasilkan menurun disebabkan karena pada waktu 60 menit batubara sudah tidak optimal untuk terkonversi menjadi *syngas*. Jumlah maksimum batubara menghasilkan *syngas* adalah 70% dari jumlah total massa batubara yang digunakan (Hantoko, 2018). Pada penelitian ini menggunakan massa batubara sebanyak 300 gram, konversi karbon pada penelitian ini berkisar antara 63%-70%, data ini didapat dari massa batubara sisa proses gasifikasi (berkisar antara 190 - 210 gram) dikalikan dengan kandungan karbon pada batubara setelah proses dibagi kandungan karbon batubara pada massa batubara sebelum proses.

Dengan demikian perbandingan AFR yang beragam semakin tinggi nilai AFR, maka semakin menurun produk H₂ dan CO. Pada proses gasifikasi ini diperoleh nilai tertinggi hasil produk gas H₂ dan CO dengan AFR 1,5 pada waktu 45 menit.

Pengaruh Katalis Ca(OH)₂ Terhadap Produk H₂ dan CO

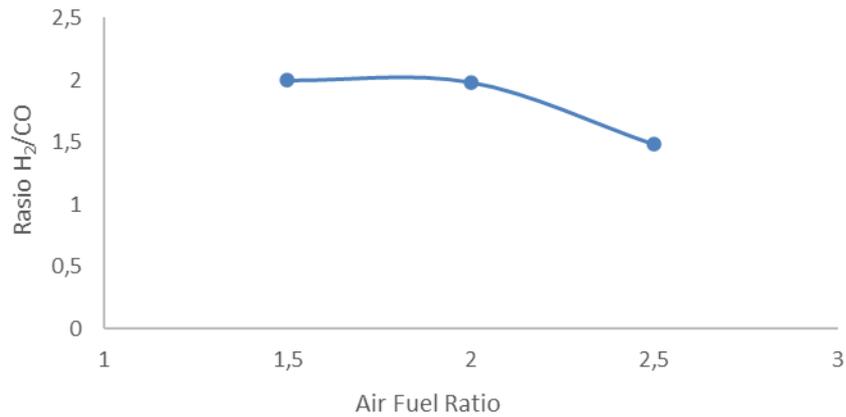
Kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) merupakan satu senyawa yang dapat digunakan sebagai katalisator reaksi gasifikasi batubara dengan menggunakan medium uap. Ca(OH)₂ digunakan sebagai katalisator dalam proses gasifikasi batubara (Wang et al., 2020). Pada batubara mengandung senyawa karbon sebagai penyusun utama. Penambahan katalisator Ca(OH)₂ pada gasifikasi batubara akan meningkatkan konversi H₂ pada reaksi *water gas* dan *water gas-shift* serta meningkatkan konversi CO pada reaksi *boundouard*. Adapun reaksinya sebagai berikut :



Pada penelitian ini digunakan katalis Ca(OH)₂ sebanyak 3% dari massa batubara yang digunakan. Dari reaksi tersebut dapat dilihat bahwa penambahan katalis Ca(OH)₂ meningkatkan konversi H₂. CaO₂ yang dihasilkan pada bentuk solid menyatu dengan batubara sisa proses gasifikasi. Penambahan Ca(OH)₂ berpengaruh terhadap komposisi gas yang dihasilkan pada temperatur 800°C menyebabkan meningkatnya kadar gas H₂. Kadar gas H₂ yang meningkat dikarenakan peran dari Ca(OH)₂ yang dapat meningkatkan konversi dengan beberapa mekanisme yaitu menonaktifkan mineral asam dalam batubara yang dapat mengganggu proses gasifikasi. Pengaruh penambahan Ca(OH)₂ terhadap komposisi gas yang dihasilkan pada temperatur 800°C menyebabkan meningkatnya kadar gas CO dan menurunkan kadar CO₂. Peranan Ca(OH)₂ juga dapat meningkatkan aktifitas mineral-mineral pada proses perengkahan, dekarbonisasi gugus fenol dan meningkatkan jumlah CO₂ (Tsai et al., 2016). Peningkatan kadar gas CO₂ dari batubara selama proses gasifikasi karena ada sebagian gas CO yang bereaksi dengan oksigen sehingga membentuk gas CO₂.

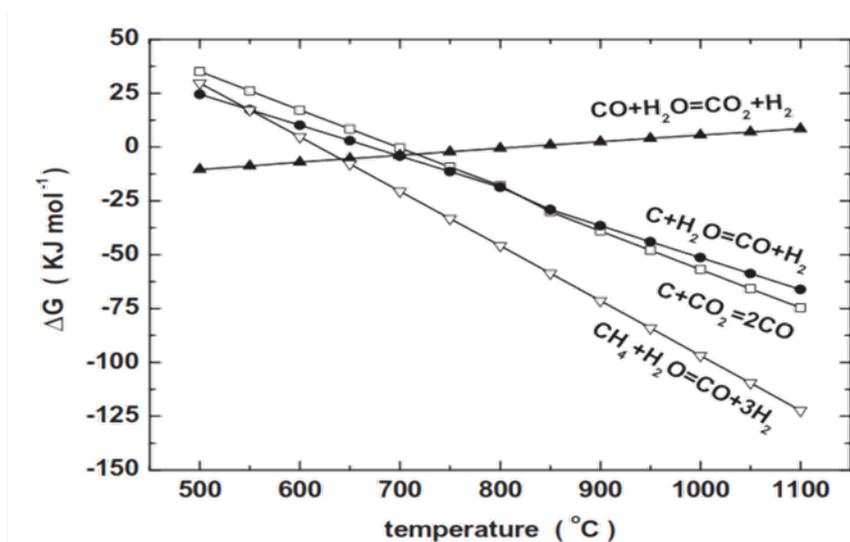
Perbandingan Rasio H₂/CO Gas Sintesis Terhadap Nilai AFR Gasifikasi

Nilai AFR yang dipilih pada penelitian gasifikasi ini adalah 1,5 ; 2 ; dan 2,5 berdasarkan pembahasan pada perbandingan komposisi gas sintesis terhadap waktu pada beragam nilai AFR didapat bahwa nilai AFR paling baik adalah pada AFR 1,5 dan waktu pengambilan sampel pada menit ke-45. Kebanyakan penelitian gasifikasi mengharapkan komposisi gas sintesisnya mengandung H₂ lebih banyak karena kebanyakan penggunaan *syngas* dari gasifikasi batubara membutuhkan kadar H₂ yang tinggi, rasio antara H₂/CO diharapkan bisa mencapai 2, dari hasil penelitian yang dilakukan didapat data perbandingan antara nilai H₂/CO dengan nilai AFR seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan antara rasio H₂/CO terhadap nilai AFR gasifikasi

Berdasarkan grafik pada Gambar 4 yang didapat dari hasil penelitian bahwa rasio H₂/CO yang paling tinggi adalah pada AFR terkecil yaitu 1,5 sedangkan untuk kandungan H₂/CO terkecil terjadi pada AFR 2,5. Hal ini dikarenakan AFR yang besar maka uap air yang masuk kedalam reaktor juga besar yang mengakibatkan suhu menurun dalam reaktor yang berakibat pada berkurangnya laju dekomposisi uap air dan menyebabkan penurunan tekanan uap air dalam reaktor akan menggeser reaksi *water gas* dan *water gas shift* cenderung ke arah reaktan yang menyebabkan kandungan serta rasio H₂ dan CO kecil (Najib & Darsopuspito, 2012). Berdasarkan hasil data rasio gas H₂/CO yang diperoleh pada penelitian ini menggunakan katalis Ca(OH)₂ dapat meningkatkan gas H₂ dan gas CO pada tahapan reaksi gasifikasi batubara.



Gambar 5. Hubungan rasio ΔG dengan Temperatur

Sumber : (Shen, 2017)

Peningkatan rasio H₂/CO gas sintesis yang dihasilkan pada variasi temperatur dapat ditinjau dari nilai ΔG pada reaksi yang berlangsung yaitu *water gas*, *boundouard*, dan *water gas-shift* (Nugraha et al., 2017). Hubungan Rasio H₂/CO gas sintesis terhadap waktu selama gasifikasi dengan energi *gibbs* dapat dilihat pada gambar 4. Dari hasil penelitian didapat rasio H₂/CO paling besar pada variasi temperatur 800 °C dan AFR 1,5 dengan penggunaan katalis Ca(OH)₂ yaitu dengan nilai 1,98.

4. Kesimpulan

Metode gasifikasi dengan variasi AFR pada konversi batubara menjadi *syngas* menggunakan katalis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ layak digunakan dengan memiliki kondisi terbaik yaitu pada nilai AFR 1,5 dengan temperatur 800°C dan komposisi gas *syngas* rasio H_2/CO yaitu 1,98 dengan hasil gas H_2 sebesar 33,8% dan gas CO sebesar 17,1%. Penambahan katalis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada gasifikasi batubara dapat meningkatkan konversi H_2 pada reaksi *water gas* dan *water gas-shift* serta meningkatkan konversi CO pada reaksi *boundouard*. Penelitian gasifikasi batubara yang telah dilakukan dengan menggunakan variasi AFR dan penambahan katalis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dapat meningkatkan nilai guna batubara khususnya Batubara Alam Bayan Banten.

Daftar Pustaka

- Amyranti, M., & Maftukhah, S. (2021). Alternatif Penggunaan Sulfit Dalam Pembuatan Chips Umbi Porang (*Amorphophallus oncophyllus*) Sebagai Peningkatan Nilai Derajat Putih. *UNISTEK*, 8(2), 82–86.
- Anis, S., Karnowo, Wahyudi, & Respati, S. M. (2019). *Studi Eksperimen Gasifikasi Sekam Padi Pada Updraft Circulating Fluidized Bed Gasifier*. Universitas Negeri Semarang.
- Aswati, N. (2020). *Peningkatan Mutu Batubara Peringkat Rendah Indonesia Melalui Teknik Slurry Dewatering*. Universitas Indonesia.
- BAPPENAS. (2019). *Laporan Akhir Kajian Ketercapaian Target DMO Batubara Sebesar 60 % Produksi Nasional pada Tahun 2019*.
- Diaz, M. (2015). Studi Numerik Pengaruh Variasi Temperatur Air Heater dan Air Fuel Ratio terhadap Karakteristik Pengeringan Batubara pada Fluidized Bed Coal Dryer dengan Tube Heater Tersusun Aligned. *Jurnal Teknik ITS*.
- ESDM. (2021). *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2020-2035*.
- Handayani, S. (2017). *Analisa Desain Sistem Pengeringan Batubara Menggunakan Gas Nitrogen Di Kapal Dengan Memodifikasi Ruang Palkah*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hantoko, D. (2018). Simulasi Termodinamika Perengkahan Tar pada Keluaran Fixed Bed Gasifier. In *UPN Veteran*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Highman, Christoper, & Burgt. (2017). *Gasification, Second Edition*. Gulf Personal Publishing.
- Ismail, Nashaf, R., Novi, C., & Wahyudi. (2017). *Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Alat Pemurni Biogas Dari Pengotor Karbondioksida Dengan Metode Water-Washing*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Najib, L., & Darsopuspito, S. (2012). *Karakterisasi Proses Gasifikasi Biomassa Tempurung Kelapa Sistem Downdraft Kontinyu dengan Variasi Perbandingan Udara-Bahan Bakar (AFR) dan Ukuran Biomassa*. Institut Sepuluh November.
- Nugraha, Kurnia, Erwin, Wiyono, S., & Najib, A. (2017). Unjuk Kerja Tungku Gasifikasi Tg 30- 1 Dengan Bahan Bakar Sekam Padi Dengan Variasi Kandungan Kadar Air Dan Kecepatan Udara Pembakaran. *Jurnal Teknik Mesin UNTIRTA*, 3(2).
- Nurlatifah, I., & Arlianti, L. (2021). Artikel Review: Produksi Gas Hidrogen dari Reaksi Elektrolisis Sebagai Bahan Bakar Non-Fosil. *UNISTEK*, 8(1), 30–35.
- Saripah. (2019). *Gasifikasi Arang Batubara Bituminus dengan Gas CO_2 menggunakan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada Proses Pirolisis*. Universitas Gadjah Mada.
- Shen. (2017). *Rice Husk Gas Stove Handbook*. Iloilo.
- Sudaryanto. (2018). *Gasifikasi-uap Biomassa untuk Menghasilkan Hidrogen, Simulasi dengan Model Keseimbangan*. Universitas Andalas.
- Sukandarumidi. (2017). *Batubara dan Pemanfaatannya*. Fakultas Teknik UGM.
- Sulistiyono, D. (2019). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Batubara di Kabupaten Sintang. *Jurnal ELKHA*, 4(2), 38.
- Tristantini, D., & Kristanda. (2019). *Suhu dan Rasio Kukus Optimum pada Proses Gasifikasi Kukus Berkatalis K_2CO_3 Terhadap Arang Batubara Lignit Hasil Pirolisi dengan Laju Pemanasan Terkontrol*. Universitas Indonesia.
- Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, Y. M. (2016). Fast Pyrolysis of Rice Straw, Sugarcane Bagasse and Coconut Shell in A Induction Heating Reactor. *J.Anal.Appl.Pyrolysis*, 76, 230–237.
- Umar, D. F. (2020). Pengaruh Proses Upgrading terhadap Kualitas Batubara Bunyu, Kalimantan Timur. *Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses*.

- Wang, Gou, J., & Lua, A. C. (2020). Kinetic Study on Pyrolysis of Extracted Oil Palm Fiber. *Journal Of Thermal Analysis and Calorimeter*.
- Yan, F., Luo, S., Hu, Z., Xiao, B., & Cheng, G. (2020). Hydrogenrich Gas Production by Steam Gasification of Char from Biomass Fast Pyrolysis in a Fixed-Bed Reactor: Influence of Temperature and Steam on Hydrogen yield and syngas composition. *Bioresource Technology*, 101, 5633–5637.
- Yolanda, S. D. (2015). *Gasifikasi Biomassa (Serbuk Kayu Laban) Sistem Updraft Single Gas Outlet dengan Sistem Pembersih Filter Jerami (Tinjauan Kinerja Filter Jerami Terhadap Produksi Syngas)*. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang.