

SUHU DAN RASIO KUKUS OPTIMUM PADA PROSES GASIFIKASI KUKUS BERKATALIS K_2CO_3 TERHADAP ARANG BATUBARA LIGNIT HASIL PIROLISIS DENGAN LAJU PEMANASAN TERKONTROL

Dewi Tristantini^{1*}, Ricky Kristanda Suwignjo¹

¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

*Email: detris@che.ui.ac.id

Abstrak

Untuk memenuhi persyaratan bahan baku pembuatan bahan bakar cair sintetis (*synfuel*) melalui proses Fischer Tropsch, diperlukan proses gasifikasi batubara lignit yang menghasilkan gas sintesis dengan rasio $H_2/CO \approx 2,0$ dan *yield* gas yang tinggi. Metode gasifikasi kukus dapat meningkatkan komposisi H_2 dalam gas sintesis. Energi aktivasi reaksi gasifikasi dapat diturunkan dengan menggunakan katalis K_2CO_3 . Laju pemanasan terkontrol pada tahap pirolisis menentukan ukuran pori-arang yang berpengaruh pada komposisi dan *yield* gas sintesis. Penelitian ini dilakukan dengan mengumpalkan arang batubara lignit hasil pirolisis dengan laju pemanasan terkontrol yang memiliki luas permukaan pori $172,5 \text{ m}^2/\text{g}$ bersama dengan katalis K_2CO_3 ke dalam reaktor unggun tetap. Rasio massa kukus/arang yang ditambahkan bervariasi 2,0; 3,0; 4,0 dan suhu gasifikasi 675, 750, 825 $^{\circ}\text{C}$. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi reaksi gasifikasi yang sesuai untuk produksi gas sintesis bahan baku proses Fischer Tropsch adalah reaksi gasifikasi berkatalis K_2CO_3 pada suhu 675 $^{\circ}\text{C}$ dan rasio massa kukus/arang 2,0. Kondisi ini menghasilkan gas sintesis dengan rasio H_2/CO 2,07 dengan *yield* gas 1,128 mol/mol C (45% konversi karbon).

Kata Kunci: Gasifikasi Kukus Berkatalis, Lignit, Pirolisis Terkontrol, Reaktor Unggun Tetap

Abstract

In order to fulfill the raw material needs of Fischer Tropsch process for producing synthetic fuel (synfuel), high yield of synthesis gas (syngas) with H_2/CO ratio ≈ 2.0 should be obtained from lignite coal gasification. Steam gasification can enhance H_2 composition in syngas. Lower activation energy of gasification reaction can be obtained using K_2CO_3 catalyst during the process. Pyrolysis step with controlled heating rate will affect pore surface area of char which will influence the composition and yield of syngas. In this study, lignite char from controlled heating rate pyrolysis which had $172.5 \text{ m}^2/\text{g}$ surface area and K_2CO_3 catalyst was fed in fixed bed steam gasification reactor. Steam to char mass ratio (2.0; 3.0; 4.0) and gasification temperature (675; 750; 825 $^{\circ}\text{C}$) was varied. Optimum condition for syngas production obtained in this study was steam gasification at 675 $^{\circ}\text{C}$ with steam/char mass ratio 2.0. This condition will produce syngas with H_2/CO ratio 2.07 and gas yield 1.128 mole/mole C (45% carbon conversion).

Keywords: Catalytic Steam Gasification, Lignite, Controlled Pyrolysis, Fixed Bed Reactor

1. PENDAHULUAN

Dalam rangka upaya diversifikasi pemanfaatan energi di dalam negeri, pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Pemerintah No. 7 Tahun 2012 yang melarang ekspor bahan tambang mentah ke luar negeri (ESDM, 2012). Salah satu kebutuhan energi terbesar dalam negeri di Indonesia adalah

kebutuhan bahan bakar cair untuk sektor transportasi. Dibandingkan sumber energi alternatif lainnya, penggunaan bahan bakar cair sintetis lebih mudah pengaplikasiannya di masyarakat. Proses produksi bahan bakar cair sintetis dapat dilakukan melalui dua tahap proses, yaitu gasifikasi batubara lignit menjadi gas sintesis dan reaksi Fischer Tropsch

untuk mengubah gas sintesis menjadi bahan bakar cair sintetis. Selain itu, dibandingkan dengan pembakaran langsung, pemanfaatan batubara melalui teknologi gasifikasi lebih ramah lingkungan (DOE, 2011).

Penelitian mengenai pemanfaatan gas sintesis dalam proses Fischer Tropsch dengan katalis $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Co-Re}/\text{Al}_2\text{O}_3$, dan $\text{Co-Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3$ menunjukkan bahwa gas sintesis dengan rasio mol H_2/CO 2-2,1 menghasilkan campuran hidrokarbon bahan bakar cair sintetis dengan konversi paling tinggi (Tristantini, 2009a; Tristantini, 2009b). Penelitian gasifikasi batubara lignit dengan metode gasifikasi kukus berkatalis tanpa pengontrolan proses pirolisis yang dilakukan Handayani dkk. (2013) menghasilkan gas sintesis dengan rasio $\text{H}_2/\text{CO} < 2$ dan prosen konversi karbon 28 % pada suhu 800 °C (Handayani dkk., 2013).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kondisi operasi yang sesuai untuk proses gasifikasi arang batubara lignit Indonesia agar dihasilkan gas sintesis dengan rasio mol H_2/CO mendekati 2 dan *yield* gas serta prosen konversi karbon yang tinggi. Proses pirolisis batubara lignit menjadi arang yang dilakukan pada reaktor yang terpisah dari proses gasifikasinya akan menghilangkan kandungan mineral *ash content* batubara sehingga konversi arang menjadi gas sintesis akan semakin besar (Li dkk., 2002). Pirolisis dengan laju pemanasan terkontrol 3 °C/menit dan suhu akhir pirolisis 850 °C menghasilkan luas permukaan arang sebesar 172,5 m²/gram. Dengan luas permukaan arang yang besar, maka *yield* reaksi yang dihasilkan akan semakin besar. Metode gasifikasi kukus mampu meningkatkan produksi H_2 melalui reaksi lanjut antara CO dengan H_2O (Bell dkk., 2011). Penambahan katalis K_2CO_3 bertujuan untuk menurunkan energi aktivasi reaksi gasifikasi serta mengarahkan reaksi pembentukan H_2 sehingga suhu operasi gasifikasi menurun dan produksi H_2 meningkat dalam produk gas sintesis yang dihasilkan (Satrio dkk., 2007). Proses gasifikasi dilakukan pada variasi suhu 675, 750, dan 825 °C karena pada rentang suhu tersebut diperoleh *yield* gas dan produksi H_2 maksimum (Wang dkk., 2009). Rasio massa kukus terhadap arang yang digunakan adalah 2,0; 3,0 dan 4,0 karena rentang optimum rasio massa kukus/arang dari gasifikasi biomassa yang memiliki karakteristik hampir sama dengan batubara lignit adalah 2,0 sampai 4,0 (Mohamad dkk., 2011).

2. METODA PENELITIAN

Sampel batubara lignit yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Kalimantan, Indonesia. Tabel 1 menunjukkan karakteristik sampel batubara lignit yang digunakan. Batubara dikeringkan selama 10 jam di bawah sinar matahari lalu ditumbuk menjadi berukuran 0,4 mm sebelum diumpankan ke dalam reaktor pirolisis.

Tabel 1. Analisis Proksimat Sampel Batubara Lignit PT Multi Guna Kalimantan [PT Geoservices Balikpapan, 2013]

Parameter	Kandungan (%adb)
<i>Moisture in Analysis Sample</i>	14,67
Senyawa Volatil	40,03
<i>Fixed Carbon</i>	34,50
<i>Ash Content</i>	10,80
<i>Total Sulfur</i>	1,76

Keterangan: adb adalah air dried basis

Batubara yang telah ditumbuk kemudian diumpankan ke dalam reaktor pirolisis unggun tetap. Proses pirolisis dilakukan dengan laju pemanasan 3 °C/menit dan suhu akhir pirolisis 850 °C. Kandungan tar, sulfur, uap lembab, dan senyawa volatil dalam batubara telah dipisahkan. Hasil proses pirolisis berupa arang kemudian dikeluarkan dari reaktor pirolisis.

Dua gram arang dicampur dengan 10 %-massa katalis K_2CO_3 ke dalam reaktor unggun tetap gasifikasi berbahan *stainless steel* dengan ditopang oleh *quartz wool*. Sebelum gasifikasi dilakukan, rangkaian peralatan gasifikasi (Gambar 1) di-*purging* dengan mengalirkan nitrogen dengan laju alir rendah. Setelah itu, reaktor mulai dipanaskan hingga suhu reaksi gasifikasi. Bersamaan dengan pemanasan reaktor, kawat pemanas juga dipanaskan hingga suhu 150 °C (suhu pembentukan kukus). Setelah kawat pemanas dan reaktor gasifikasi telah mencapai suhu yang diinginkan, maka nitrogen mulai dialirkan dan motor penggerak mulai difungsikan untuk memulai injeksi *steam* (kukus). Masuknya aliran kukus yang terbawa oleh nitrogen ke dalam reaktor dianggap sebagai awal terjadinya reaksi gasifikasi. Satu *batch* reaksi gasifikasi dilakukan selama 180 menit (3 jam). Variasi suhu reaksi gasifikasi yang dilakukan adalah 675, 750, dan 825 °C. Rasio massa kukus/arang yang digunakan adalah 2,0; 3,0; dan 4,0.

Produk gas sintesis yang dihasilkan dari reaktor kemudian dialirkan melalui *solid trap* dan *water trap* menuju *sampling port*. Sampel gas sintesis yang akan diambil dari *sampling port* setiap 10 menit dengan menggunakan *gas-tight syringe* untuk dianalisis dengan menggunakan kromatografi gas detektor konduktivitas termal (GC-TCD) sehingga diketahui komposisi H_2 , CO, CO_2 , dan CH_4 dalam gas sintesis. Berdasarkan data analisis kromatografi gas, maka diperoleh rasio mol H_2/CO , *yield* gas sintesis, dan prosen konversi karbon (Wu dkk., 2010).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Variasi Suhu Reaksi Gasifikasi terhadap Rasio H_2/CO

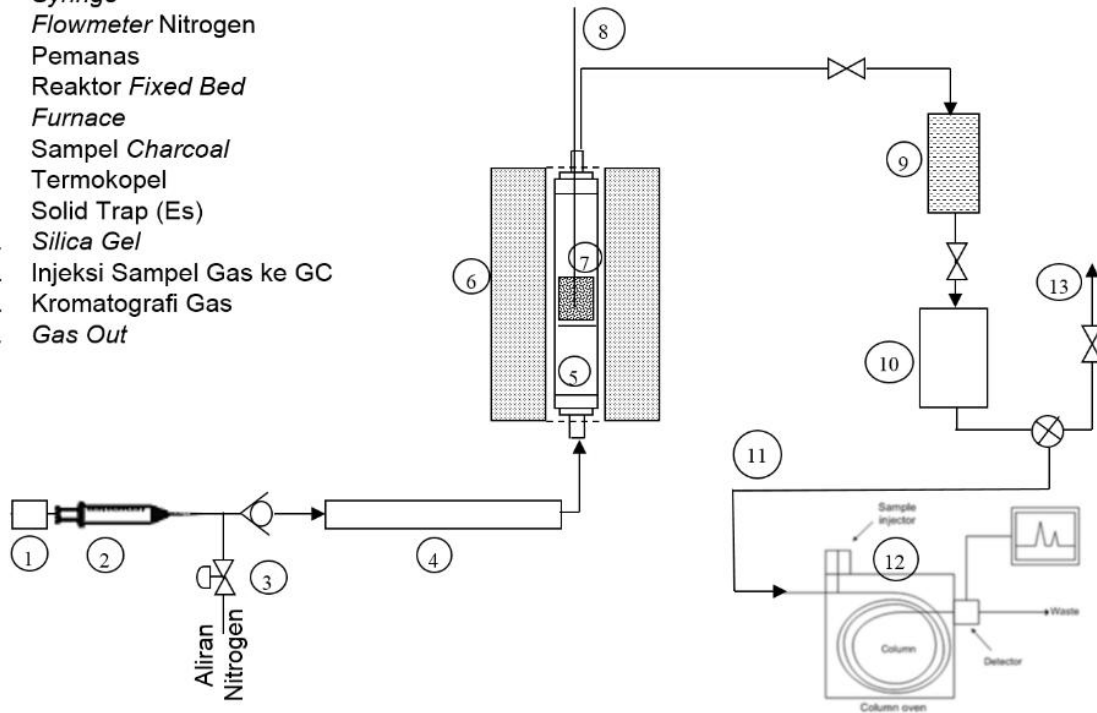
Pengaruh suhu reaksi gasifikasi terhadap rasio H_2/CO dalam gas sintesis yang dihasilkan dalam penelitian ini terdapat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa kenaikan suhu mengakibatkan penurunan rasio H_2/CO pada gas sintesis yang dihasilkan dari reaksi gasifikasi kukus berkatalis K_2CO_3 .

Penurunan rasio H₂/CO gas sintesis yang dihasilkan pada suhu gasifikasi yang lebih tinggi (rentang 600 – 800 °C) juga terjadi pada penelitian gasifikasi batu bara lignit oleh Handayani dkk (2013) menggunakan reaktor unggun terfluidisasi tanpa

pengontrolan proses pirolisis. Pada suhu 600 °C, rasio H₂/CO gas sintesis yang dihasilkan adalah 1,96. Sementara, rasio H₂/CO gas sintesis yang dihasilkan pada suhu 800 °C adalah 1,92 (Handayani dkk., 2013).

Keterangan Gambar:

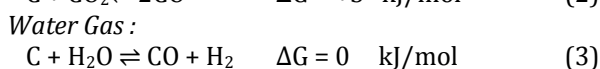
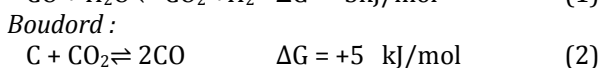
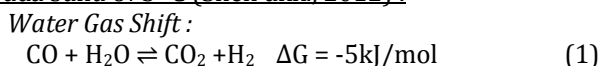
1. Motor Penggerak Syringe
2. Syringe
3. Flowmeter Nitrogen
4. Pemanas
5. Reaktor Fixed Bed
6. Furnace
7. Sampel Charcoal
8. Termokopel
9. Solid Trap (Es)
10. Silica Gel
11. Injeksi Sampel Gas ke GC
12. Kromatografi Gas
13. Gas Out



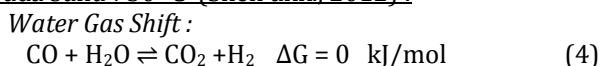
Gambar 1. Skema Peralatan Gasifikasi Kukus Berkatalis

Fenomena penurunan rasio H₂/CO gas sintesis yang dihasilkan pada suhu gasifikasi yang lebih tinggi terjadi karena kenaikan suhu reaksi gasifikasi berpengaruh terhadap produk dominan yang terbentuk. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan energi Gibbs reaksi gasifikasi. Reaksi dengan nilai energi bebas Gibbs terkecil menunjukkan nilai konstanta kesetimbangan yang lebih besar. Dengan demikian, nilai energi Gibbs terendah akan menunjukkan konstanta kesetimbangan reaksi yang lebih tinggi sehingga reaksi tersebut akan menghasilkan produk lebih besar daripada reaksi lainnya ketika jumlah reaktannya tercukupi (Balas dkk., 2012).

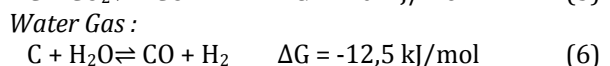
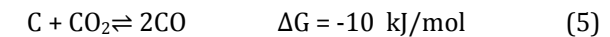
Pada suhu 675 °C (Shen dkk., 2012) :



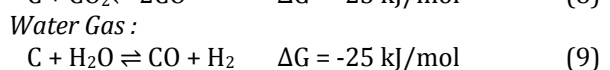
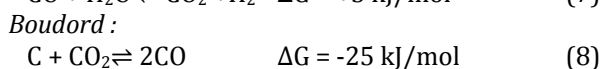
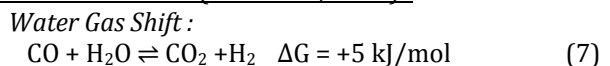
Pada suhu 750 °C (Shen dkk., 2012) :



Boudord :



Pada suhu 825 °C (Shen dkk., 2012) :



Kespontanan reaksi *water gas shift* pada suhu 675 °C lebih tinggi daripada suhu reaksi 750 °C. Hal ini mengakibatkan komponen CO yang dihasilkan akan lebih spontan bereaksi dengan H₂O membentuk CO₂ dan H₂ sehingga konsentrasi CO akan menurun dan konsentrasi H₂ meningkat pada suhu 675 °C. Selain itu, pada suhu 675 °C, reaksi *Boudord* tidak terjadi secara spontan ($\Delta G > 0$) sehingga diduga tidak ada penambahan jumlah CO dari hasil reaksi tersebut. Hal ini menyebabkan pada suhu reaksi 675 °C, rasio H₂/CO lebih tinggi daripada suhu reaksi 750 °C.

Pada suhu 750 °C, reaksi *water gas* lebih spontan terjadi daripada reaksi *Boudord*. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi cenderung menghasilkan H₂ daripada

CO. Sementara pada suhu 825 °C, reaksi *water gas* dan reaksi *Boudord* memiliki energi Gibbs yang sama. Diduga pada kondisi kesetimbangan, kedua reaksi ini berkompetisi untuk membentuk produk gas CO dan H₂. Di sisi lain, reaksi *water gas shift* semakin tidak spontan terjadi pada suhu 825 °C. Akibatnya, jumlah CO dan H₂ yang dihasilkan dalam produk gas sintesis hampir sama. Hal ini yang menyebabkan rasio H₂/CO dalam gas sintesis yang dihasilkan akan semakin menurun pada suhu 825 °C dibandingkan 675 dan 750 °C.

3.2 Pengaruh Variasi Suhu Reaksi Gasifikasi terhadap Yield Gas Sintesis dan Konversi Karbon

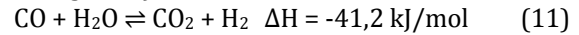
Secara umum *yield* gas sintesis dan konversi karbon meningkat pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini terjadi karena laju reaksi kukus-karbon dalam

menghasilkan produk gas sintesis akan meningkat dengan kenaikan suhu sesuai persamaan Arrhenius (Lee dkk., 2002). Secara termodinamika, pengaruh suhu terhadap peningkatan *yield* gas sintesis dan konversi karbon karena sifat endotermik reaksi utama gasifikasi (*water gas*, *Boudord*, dan *methane reforming*). Hal ini menyebabkan jumlah produk yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan peningkatan suhu reaksi gasifikasi (Yan dkk., 2010).

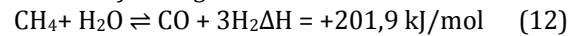
Water gas :



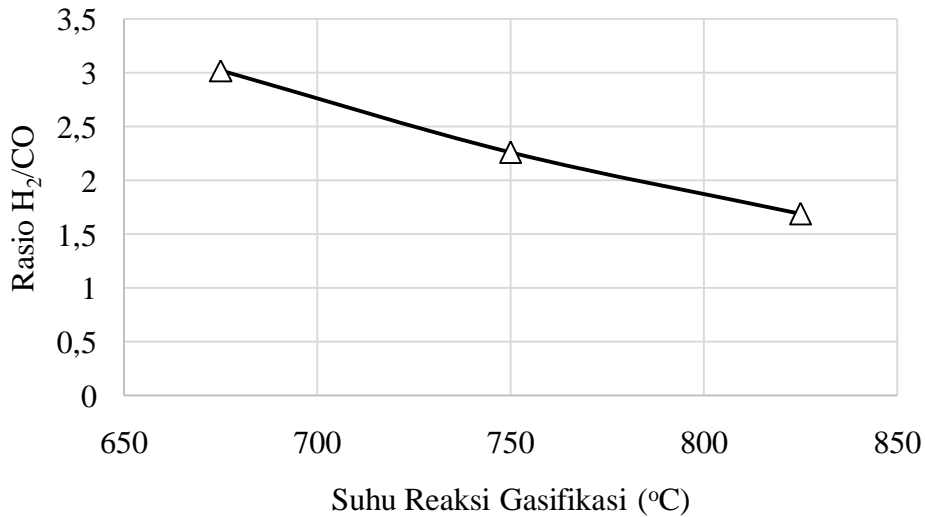
Water gas shift :



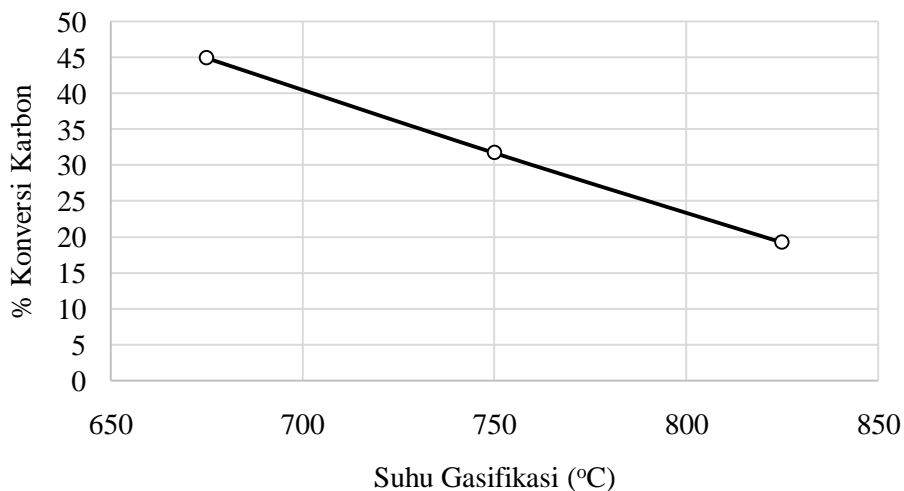
Methane reforming :



Boudord :



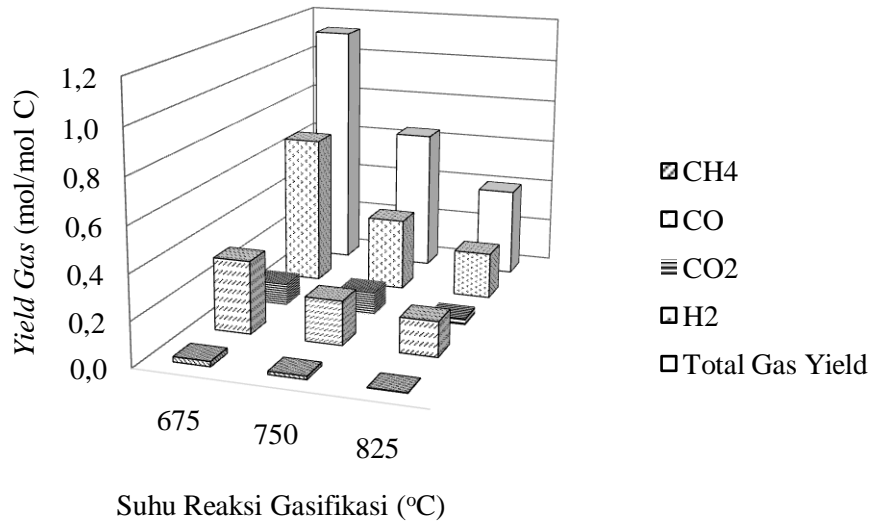
Gambar 2. Pengaruh Suhu terhadap Rasio H₂/CO Gas Sintesis pada Rasio Massa Kukus/ Arang 2,0 dengan Katalis



Gambar 3. Pengaruh Suhu terhadap Prosen Konversi Karbon pada Rasio Massa Kukus/Arang 2,0 dengan Katalis

Pengaruh suhu reaksi gasifikasi terhadap *yield* gas sintesis dan konversi karbon yang ditunjukkan dalam hasil penelitian ini terdapat pada Gambar 3 dan 4. Berdasarkan grafik Gambar 3 dan 4, tidak terlihat pengaruh suhu reaksi gasifikasi terhadap konversi karbon dan *yield* gas total yang dihasilkan. Hal ini disebabkan pada kondisi suhu 750 dan 825 °C, reaksi sudah selesai bereaksi sebelum kesetimbangan reaksi tercapai karena jumlah unggun arang yang tidak mencukupi. Kekurangan jumlah unggun arang yang digunakan tidak memberikan pengaruh terhadap rasio

komposisi gas sintesis. Namun, hal ini mempengaruhi jumlah *yield* gas total yang terhitung pada penelitian ini. Jika dibandingkan dengan penelitian Handayani dkk. (2013), maka gasifikasi kukus dengan umpan arang batubara lignit hasil pirolisis dengan laju pemanasan terkontrol pada suhu 675 °C menghasilkan konversi karbon (45%) lebih tinggi dibandingkan gasifikasi kukus dengan umpan batubara lignit tanpa pengontrolan proses pirolisis (28%) (Handayani dkk., 2013).



Gambar 4. Pengaruh Suhu terhadap *Yield* Gas Total pada Rasio Massa Kukus/Arang 2,0 dengan Katalis

3.3 Pengaruh Variasi Rasio Kukus/Arang terhadap Rasio H₂/CO Gas Sintesis

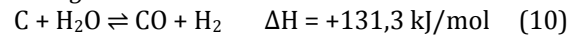
Pengaruh rasio kukus/arang terhadap rasio H₂/CO dalam gas sintesis yang ditunjukkan dalam hasil penelitian ini terdapat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 diketahui bahwa kenaikan rasio massa kukus/arang menurunkan rasio H₂/CO gas sintesis. Penambahan rasio kukus/arang akan meningkatkan rasio H₂/CO hingga jumlah rasio kukus/arang tertentu (Luodkk., 2012). Hal ini menunjukkan bahwa rasio massa kukus/arang yang digunakan pada penelitian ini terlalu banyak (*excess steam*).

Kelebihan kukus dalam reaksi gasifikasi pada reaktor unggun tetap menyebabkan penurunan suhu dalam reaktor yang menyebabkan pengurangan laju dekomposisi kukus. Jumlah arang yang tersedia tidak cukup untuk bereaksi dengan semua arang yang ditambahkan ke dalam reaktor (Yan dkk., 2010).

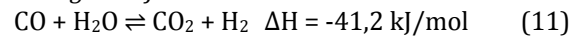
Semakin tinggi rasio kukus/arang maka kecepatan kukus yang mengalir dalam unggun akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan kontinuitas (Belfiore, 2003). Berdasarkan persamaan Bernoulli, semakin besar kecepatan aliran kukus,

maka tekanan kukus akan mengalami penurunan. Hal ini akan mempengaruhi pergeseran reaksi gasifikasi yang melibatkan kukus.

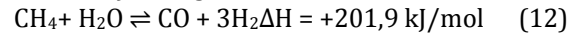
Water gas :



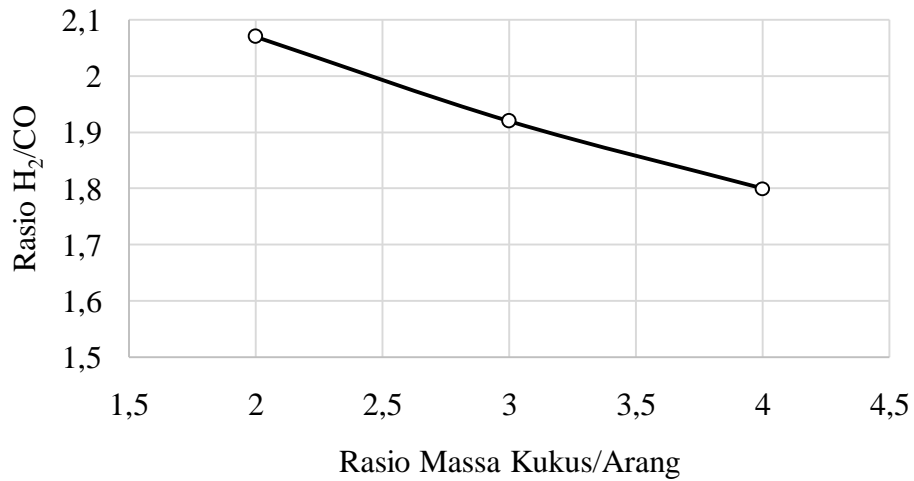
Water gas shift :



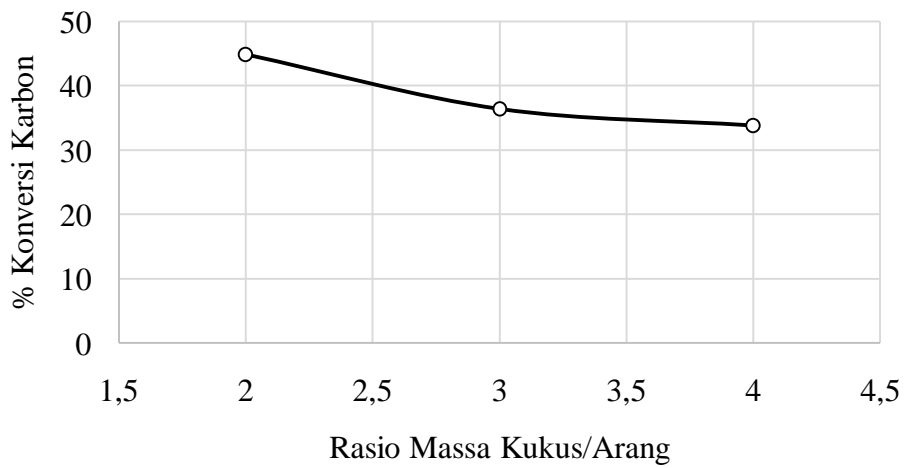
Methane reforming :



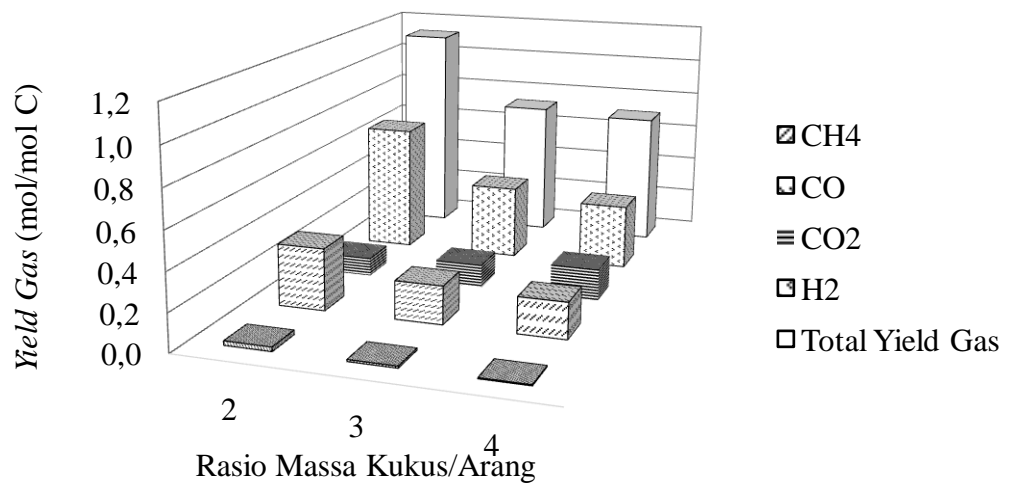
Penurunan tekanan kukus dalam unggun reaktor akan menggeser reaksi *water gas*, *water gas shift*, dan *methane reforming* cenderung menuju ke sisi reaktan (ke arah kiri). Hal ini menyebabkan penurunan jumlah H₂ dan CO yang dihasilkan. Selain itu, penurunan suhu reaktor juga akan menggeser reaksi *water gas* dan *methane reforming* menuju ke sisi reaktan (ke arah kiri) (Mohamad dkk., 2011). Hal ini menyebabkan kontribusi reaksi *methane reforming* dalam meningkatkan rasio H₂/CO menjadi berkurang sehingga rasio H₂/CO akan berkurang dengan peningkatan rasio kukus/arang.



Gambar 5. Pengaruh Rasio Kukus/Arang terhadap Rasio H₂/CO Gas Sintesis pada Suhu 675 °C dengan Katalis



Gambar 6. Pengaruh Rasio Kukus/Arang terhadap Prosen Konversi Karbon pada Suhu 675 °C dengan Katalis



Gambar 7. Pengaruh Rasio Kukus/Arang terhadap Yield Gas Total pada Suhu 675 °C dengan Katalis

3.4 Pengaruh Variasi Rasio Kukus/Arang terhadap Yield Gas Sintesis dan Konversi Karbon

Pengaruh rasio kukus/arang terhadap *yield* gas sintesis dan konversi karbon yang ditunjukkan dalam hasil penelitian ini terdapat pada Gambar 6 dan 7. Berdasarkan Gambar 6 dan 7 terlihat bahwa konversi karbon arang dan *yield* gas sintesis yang dihasilkan semakin rendah dengan meningkatnya rasio kukus/arang yang dimasukkan ke dalam reaktor unggun tetap. Berdasarkan penjelasan pada bagian sebelumnya, telah dinyatakan bahwa jumlah kukus yang digunakan dalam penelitian ini terlalu banyak (*excess steam*). Hal ini mengakibatkan pengaruh penurunan tekanan kukus dalam reaktor terhadap pergeseran reaksi semakin besar pada rasio kukus yang lebih tinggi. Pada rasio kukus/arang yang lebih tinggi, reaksi *water gas* dan *Boudord* ($\Delta H > 0$) akan cenderung bergeser ke arah reaktan akibat penurunan suhu reaksi gasifikasi karena jumlah kukus yang berlebih. Diduga akibat hambatan pembentukan produk pada reaksi-reaksi gasifikasi, maka konversi karbon dan *yield* gas sintesis yang dihasilkan pada reaksi gasifikasi dalam penelitian ini akan menurun akibat peningkatan rasio kukus/arang.

4. KESIMPULAN

Kondisi reaksi gasifikasi kukus berkatalis K_2CO_3 dari arang hasil pirolisis dengan laju pemanasan terkontrol (luas permukaan pori = $172,5 \text{ m}^2/\text{g}$) pada suhu operasi gasifikasi $675 \text{ }^\circ\text{C}$ dan rasio massa kukus/arang 2,0 menghasilkan rasio H_2/CO 2,07 dengan *yield* gas 1,128 mol/mol C (45 % konversi karbon). Peningkatan suhu reaksi gasifikasi dari $675\text{-}825^\circ\text{C}$ akan meningkatkan laju reaksi gasifikasi namun menyebabkan perubahan dominansi reaksi gasifikasi yang terjadi sehingga menyebabkan menurunnya rasio H_2/CO gas sintesis yang dihasilkan. Peningkatan rasio massa kukus/arang 2,0-4,0 dalam reaksi gasifikasi akan menyebabkan pergeseran reaksi gasifikasi yang melibatkan kukus menuju ke arah reaktan sehingga pembentukan produk gas sintesis akan terhambat. Hal ini menyebabkan menurunnya rasio H_2/CO , *yield* gas sintesis, dan konversi karbon yang dihasilkan.

5. ACKNOWLEDGMENT/UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilakukan dalam rangka proyek pengembangan teknologi gasifikasi kukus berkatalis batu bara lignit Indonesia untuk mendukung produksi bahan bakar cair sintetis (*synfuel*). Penulis mengucapkan terima kasih terhadap Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Universitas Indonesia atas bantuan dana untuk pelaksanaan penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

Belfiore, L.A., Transport phenomena for chemical reactor design, John Wiley & Sons, USA, 2003, hal.5-23.

- Bell, D. A.; Towler, B. F.; Fan, M., Coal Gasification and its Applications, 1st Ed., Elsevier, London, UK, 2011, hal. 17-18.
- DOE, Fossil Energy: DOE's Coal Gasification Technology R&D [online]. Department of Energy. Available from :www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/gasification (akses 14 September 2013).
- ESDM, Peningkatan Nilai Tambah Mineral Melalui Pengolahan dan Pemurnian Mineral. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2012 BAB VII Pasal 20, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2012, hal. 11.
- Handayani, I.; Triantoro, A.; Diniyati, D.; Effect of K_2CO_3 as a catalyst in Indonesian low-rank coal gasification on product composition, Journal of Novel Carbon Resource Sciences, 2013, 7(1), 68-73.
- Lee, I.G.; Kim, M.S.; Ihm, S.K., Gasification of glucose in supercritical water, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 41 1182-1188.
- Li, C.; Wu, H.; Qyun, D.M., Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part I. Volatilisation of Na and Cl from a set of NaCl-loaded samples, Fuel, 2002, 81, 143-149.
- Luo, S.; Zhou, Y.; Yi, C., Syngas Production by Catalytic Steam Gasification of Municipal Solid Waste in Fixed-Bed Reactor, Energy, 2012, 44, 391-395.
- Mohamad, M.F.; Ramli, A.; Misi, S.E.E.; Yusup, S., Steam Gasification of Palm Kernel Shell (PKS) : Effect of Fe/BEA and Ni/BEA Catalysts and Steam to Biomass Ratio on Composition of Gaseous Products, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 60(1), 232-237.
- PT Geoservices Balikpapan, Analisis Sampel Batubara PT Multi Guna Kalimantan. Laporan Analisis. Divisi Laboratorium Batubara Balikpapan PT Geoservices, Balikpapan, 2013, hal. 6.
- Satrio, J.A.; Shanks, B.H.; Wheelock, T.D., A combined catalyst and sorbent for enhanced hydrogen production from coal and biomass, Energy Fuel, 2007, 21(1), 322-326.
- Shen, L.; Xiao, J.; Wu, J.; Song, T., Experimental Investigation on Hydrogen Production for Biomass Gasification in Interconnected Fluidized Bed, Biomass and Bioenergy, 2012, 36, 258-267.
- Tristantini, D., Production Of Synthesis Gas Through Oxidation Of Methane By Ca-Oxide Coal-Char To Achieve Lower Oxidation Cost, Proceedings of International Symposium on Sustainable Energy and Environmental Protection (ISSEEP) 2009. Yogyakarta, Indonesia, 23-26 September 2009, hal. 6.
- Tristantini, D., H_2 -Poor Bio-Syngas in Fischer-Tropsch Synthesis Over Un-promoted and

Rhenium Promoted-Alumina Supported Cobalt Catalysts: Effect Of Water Addition, Asean Journal of Chemical Engineering, 2009b, 9(1), 1-10.

Wang J.; Jiang, M.; Yao, Y.; Zhang, Y.; Cao, J., Steam Gasification of Coal Char Catalyzed by K_2CO_3 for Enhanced Production of Hydrogen without Formation of Methane, Fuel, 2009, 88, 1572-1579.

Wu, Y.; Wang, J.; Wu, S.; Huang, S.; Gao, J., Potassium Catalyzed Steam Gasification of Petroleum Coke for H_2 Production: Reactivity, Selectivity, and Gas Release, Fuel Processing Technology, 2010, 92, 523-530.

Yan, F; Luo, S.; Hu, Z.; Xiao, B.; Cheng, G., Hydrogen-rich 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, 2010, 101, 5633-5637.