

Suhu dan Rasio Kukus Optimum pada Proses Gasifikasi Kukus Berkatalis K_2CO_3 terhadap Arang Batu bara Lignit Hasil Pirolisis dengan Laju Pemanasan Terkontrol

Dewi Tristantini*, Ricky Kristanda Suwignjo
Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

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 pyrolysis with controlled heating rate with $172.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 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°C) was varied. Optimum condition for *syngas* production obtained in this study was steam gasification at 675°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: lignite, controlled pyrolysis, catalytic steam gasification, fixed bed reactor

Abstrak

Untuk memenuhi persyaratan bahan baku pembuatan bahan bakar cair sintetis (*synfuel*) melalui proses *Fischer Tropsch*, diperlukan proses gasifikasi batu bara 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 batu bara 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°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°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: lignit, pirolisis terkontrol, gasifikasi kukus berkatalis, reaktor unggun tetap

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 Batu bara lignit menjadi gas sintesis dan reaksi *Fischer Tropsch* untuk mengubah gas sintesis menjadi bahan bakar cair sintetis. Selain itu, dibandingkan dengan pembakaran langsung, pemanfaatan batu bara melalui teknologi gasifikasi lebih ramah lingkungan (DOE, 2011).

Penelitian mengenai pemanfaatan gas sintesis dalam proses *Fischer Tropsch* dengan katalis Co/Al_2O_3 , $Co-Re/Al_2O_3$, dan $Co-Fe/Al_2O_3$ 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;

* Alamat korespondensi: detris@che.ui.ac.id

Tristantini, 2009b). Penelitian gasifikasi batu bara lignit dengan metode gasifikasi kukus berkatalis tanpa pengontrolan proses pirolisis menghasilkan gas sintesis dengan rasio $H_2/CO < 2$ dan prosen konversi karbon 28 % pada suhu 800°C (Handayani dkk., 2012).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kondisi operasi yang sesuai untuk proses gasifikasi arang batu bara lignit Indonesia agar dihasilkan gas sintesis dengan rasio mol H_2/CO mendekati 2 dan yield gas serta prosentase konversi karbon yang tinggi. Proses pirolisis batu bara lignit menjadi arang yang dilakukan pada reaktor yang terpisah dari proses gasifikasinya akan menghilangkan kandungan mineral *ash content* batu bara 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 H₂ melalui reaksi lanjut antara CO dengan H₂O (Bell dkk., 2011). Penambahan katalis K₂CO₃ bertujuan untuk menurunkan energi aktivasi reaksi gasifikasi serta mengarahkan reaksi pembentukan H₂ sehingga suhu operasi gasifikasi menurun dan produksi H₂ 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 H₂ 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 batu bara lignit adalah 2,0 sampai 4,0 (Mohamad dkk., 2011).

Metode Penelitian

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

Batu bara yang telah ditumbuk kemudian diumpankan ke dalam reaktor pirolisis unggun tetap. Proses pirolisis dilakukan dengan laju pemanasan 3°C/menit dan suhu akhir pirolisis

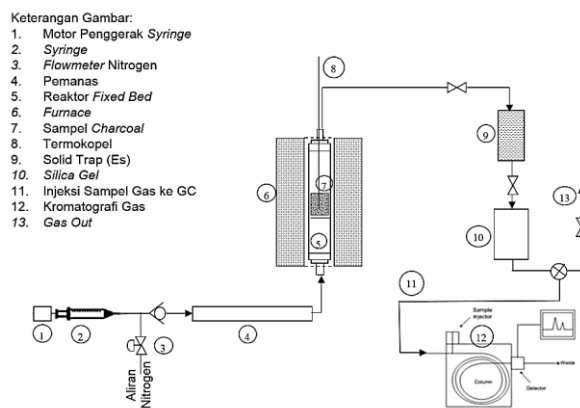
850°C. Kandungan tar, sulfur, uap lembab, dan senyawa volatil dalam batu bara telah dipisahkan. Hasil proses pirolisis berupa arang kemudian dikeluarkan dari reaktor pirolisis.

Tabel 1. Analisis Proksimat Sampel batu bara 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

*adb : *air dried basis*

Dua gram arang dicampur dengan 10%-massa katalis K₂CO₃ 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 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*. 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.



Gambar 1. Skema Peralatan Gasifikasi Kukus Berkatalis

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 H₂, CO, CO₂, dan CH₄ dalam gas sintesis. Berdasarkan data analisis kromatografi gas, maka diperoleh rasio mol H₂/CO, *yield* gas sintesis, dan prosen konversi karbon (Wu dkk., 2010).

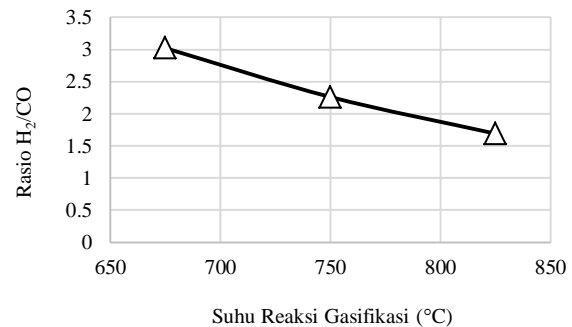
Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Variasi Suhu Reaksi Gasifikasi terhadap Rasio H₂/CO

Pengaruh suhu reaksi gasifikasi terhadap rasio H₂/CO dalam gas sintesis yang dihasilkan dalam penelitian ini terdapat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, diketahui bahwa kenaikan suhu mengakibatkan penurunan rasio H₂/CO pada gas sintesis yang dihasilkan dari reaksi gasifikasi kukus berkatalis K₂CO₃. Hal ini 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.

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

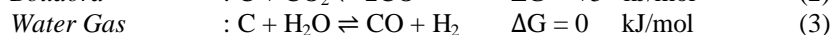
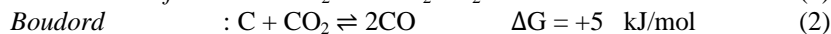
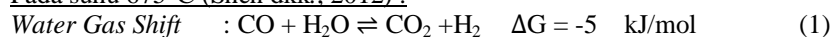
meningkat pada suhu 675°C. Selain itu, pada suhu 675°C, reaksi *Boudord* tidak terjadi secara spontan ($\Delta G > 0$) sehingga diduga tidak ada penambahan jumlah CO dari hasil reaksi tersebut. Hal ini menyebabkan pada suhu reaksi 675°C, rasio H₂/CO lebih tinggi daripada suhu reaksi 750°C.



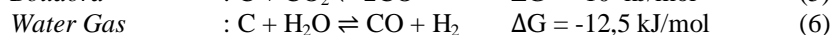
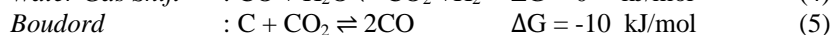
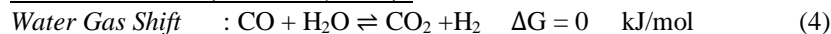
Gambar 2. Pengaruh Suhu terhadap Rasio H₂/CO Gas Sintesis pada Rasio Massa Kukus/Arang 2,0 Dengan Katalis

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°C dan 750°C.

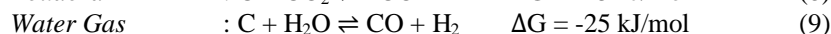
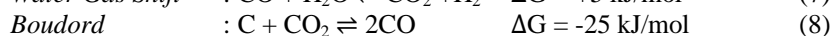
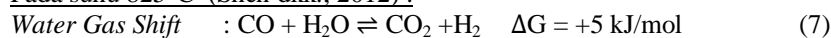
Pada suhu 675°C (Shen dkk., 2012) :



Pada suhu 750°C (Shen dkk., 2012) :



Pada suhu 825°C (Shen dkk., 2012) :



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*, *Boudourd*, dan *methane reforming*). Hal ini menyebabkan jumlah produk yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan peningkatan suhu reaksi gasifikasi (Yan dkk., 2010).

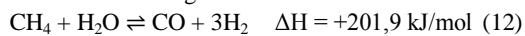
Water gas:



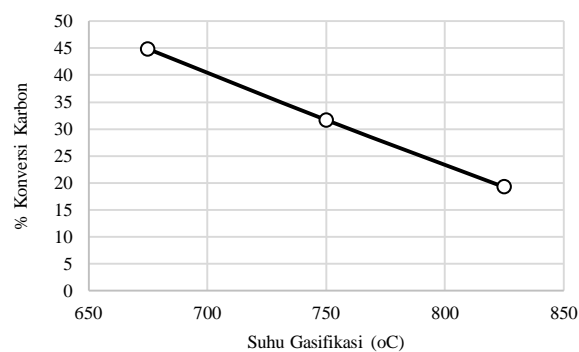
Water gas shift :



Methane reforming :



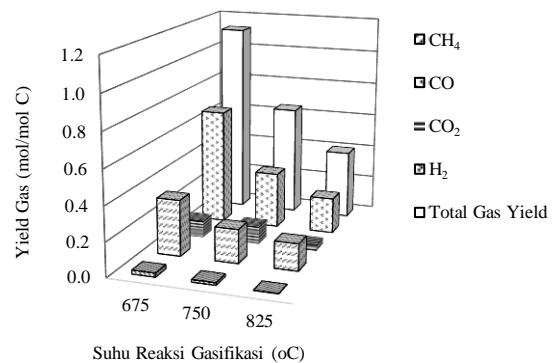
Boudourd :



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 mem-

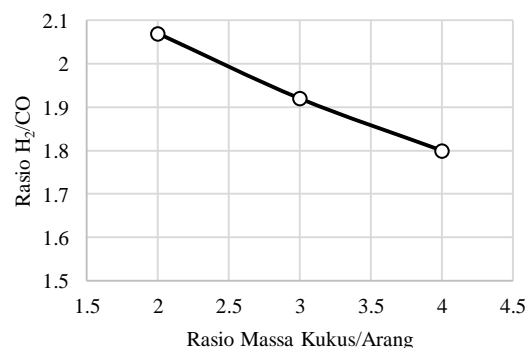
pengaruhi jumlah *yield* gas total yang terhitung pada penelitian ini. Jika dibandingkan dengan penelitian Handayani dkk. (2012), maka gasifikasi kukus dengan umpan arang Batu bara lignit hasil pirolisis dengan laju pemanasan terkontrol pada suhu 675°C menghasilkan konversi karbon (45%) lebih tinggi dibandingkan gasifikasi kukus dengan umpan Batu bara lignit tanpa pengontrolan proses pirolisis (28%) (Handayani dkk., 2012).



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

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 (Luo dkk., 2012). Hal ini menunjukkan bahwa rasio massa kukus/arang yang digunakan pada penelitian ini terlalu banyak (*excess steam*).

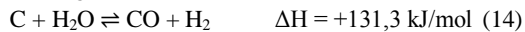


Gambar 5. Pengaruh Rasio Kukus/Arang terhadap Rasio H₂/CO Gas Sintesis pada Suhu 675°C Dengan Katalis

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 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.

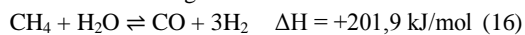
Water gas:



Water gas shift :



Methane reforming :

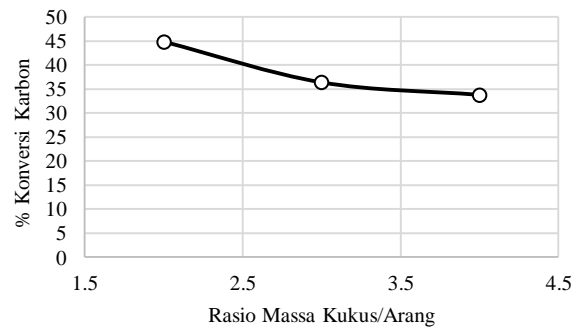


Penurunan tekanan kukus dalam unggun reaktor akan menggeser reaksi *water gas*, *water gas shift*, dan *methane reforming* cenderung menuju ke sisi reaktan (ke arah kiri). Hal ini menyebabkan penurunan jumlah H_2 dan CO yang dihasilkan. Selain itu, penurunan suhu reaktor juga akan menggeser reaksi *water gas* dan *methane reforming* menuju ke sisi reaktan (ke arah kiri) (Mohamad dkk., 2011). Hal ini menyebabkan kontribusi reaksi *methane reforming* dalam meningkatkan rasio H_2/CO menjadi berkurang sehingga rasio H_2/CO akan berkurang dengan peningkatan rasio kukus/arang.

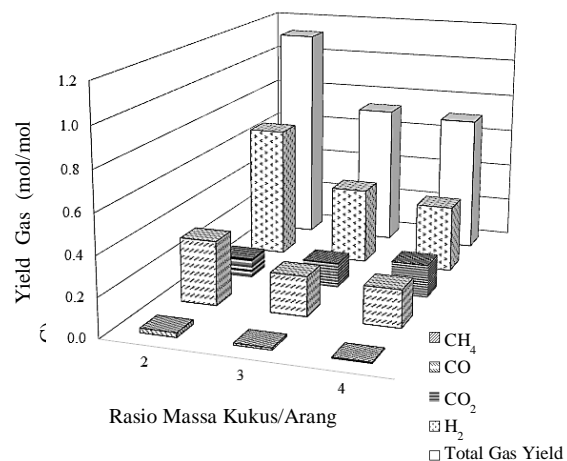
Pengaruh Variasi Rasio Kukus/Arang terhadap Yield Gas Sintesis dan Konversi Karbon

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 berlebihan. 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.



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

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°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 675-825°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.

Daftar Pustaka

- Belfiore, L.A., 2003. Transport phenomena for chemical reactor design. USA, John Wiley & Sons, pp. 5-23.
- Bell, D. A., Towler, B. F., Fan, M., 2011. Coal Gasification and its Applications, 1st Ed. Elsevier, London, UK, pp. 17-18.
- DOE, 2011. *Fossil Energy: DOE's Coal Gasification Technology R&D* [online]. Department of Energy. Available from : www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/gasification [Accessed 14:09:13].
- ESDM, 2012. *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*. Jakarta, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, pp. 11.
- Handayani, I., Triantoro, A., Diniyati, D., 2013. Effect of K_2CO_3 as a catalyst in Indonesian low-rank coal gasification on product composition, *Journal of Novel Carbon Resource Sciences* 7, 68-73.
- Lee, I.G., Kim, M.S., Ihm, S.K., 2002. Gasification of glucose in supercritical water, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 41, 1182-1188.
- Li, C., Wu, H., Qyun, D.M., 2002. 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* 81, 143-149.
- Luo, S., Zhou, Y., Yi, C., 2012. Syngas Production by Catalytic Steam Gasification of Municipal Solid Waste in Fixed-Bed Reactor, *Energy* 44, 391-395.
- Mohamad, M.F., Ramli, A., Misi, S.E.E., Yusup, S., 2011. 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* 60, 232-237.
- PT Geoservices Balikpapan, 2013. *Analisis Sampel Batu bara PT Multi Guna Kalimantan*. Laporan Analisis. Divisi Laboratorium Batu bara Balikpapan PT Geoservices, Balikpapan, pp. 6.
- Satrio, J.A., Shanks, B.H., Wheelock, T.D., 2007. A combined catalyst and sorbent for enhanced hydrogen production from coal and biomass. *Energy Fuel* 21, 322-326.
- Shen, L., Xiao, J., Wu, J., Song, T., 2012. Experimental Investigation on Hydrogen Production for Biomass Gasification in Interconnected Fluidized Bed. *Biomass and Bioenergy* 36, 258-267.
- Tristantini, D., 2009a. 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, pp. 6.
- Tristantini, D., 2009b. 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* 9(1), 1-10.
- Wang J., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, Y., Cao, J., 2009. Steam Gasification of Coal Char Catalyzed by K_2CO_3 for Enhanced Production of Hydrogen without Formation of Methane, *Fuel* 88, 1572-1579.
- Wu, Y., Wang, J., Wu, S., Huang, S., Gao, J., 2010. Potassium Catalyzed Steam Gasification of Petroleum Coke for H_2 Production: Reactivity, Selectivity, and Gas Release, *Fuel Processing Technology* 92, 523-530.
- Yan, F. Luo, S., Hu, Z., Xiao, B., Cheng, G., 2010. 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* 101, 5633-5637.