

## PENGARUH KADAR KARBON PADA PROSES GASIFIKASI

Abrar Riza<sup>1</sup>, Yazid Bindar<sup>2</sup>, Herri Susanto<sup>2</sup> dan Dwiwahdju Sasongko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara  
Jl. Let. Jend. S. Parman No.1 Blok L lantai V, Jakarta 11440

<sup>2</sup>Department Teknik Kimia LABTEK X, Institut Teknologi Bandung  
Jl Ganesha No 10, Bandung 40132  
e-mail : abrarr@ft.untar.ac.id

**Abstrak** -- Kuantifikasi unjuk kerja proses gasifikasi dinyatakan dengan kadar  $H_2$  dan kadar CO dalam gas produser, temperatur dan efisiensi termal. Investigasi pengaruh kadar karbon terhadap unjuk kerja proses gasifikasi dilakukan dengan simulasi menggunakan batubara: lignit, bituminus dan antrasit. Ketiga jenis batubara diharapkan mewakili tingkatan kadar karbon. Pada makalah ini, kajian termodinamika disempurnakan dengan melibatkan pemodelan dekomposisi batubara yang sangat tergantung pada jenis batubara yang dalam hal ini mewakili kadar karbon. Harapannya, penggabungan model dekomposisi batubara yang diusulkan dan model kesetimbangan reaksi konvensional menghasilkan kajian termodinamika yang lebih rasional. Hasil dari kajian termodinamika digunakan sebagai piranti prediksi kinerja gasifikasi dengan mempertimbangkan kadar karbon batubara. Fraksi mol gas hidrogen maksimum yang dihasilkan lignit lebih tinggi daripada antrasit dan bituminus, berturut-turut 0,43 dan 0,25. Fraksi mol maksimum gas hidrogen dari lignit berada pada laju udara/batubara sekitar 1,2 kg/kg sedangkan antrasit dan bituminus berada pada sekitar 3 kg/kg. Temperatur proses gasifikasi sangat dipengaruhi oleh jenis batubara. Sesuai dengan kadar  $H_2$ , temperatur gasifikasi dijaga sekitar 1000 °C ( $R_u = 2,4$  dan 4 berturut-turut untuk batubara lignit, antrasit dan bituminus). Keuntungan pada temperatur sekitar 1000 °C, tar secara praktis sudah terdekomposisi lebih lanjut, sehingga gas produser hanya sedikit mengandung tar.

**Kata kunci:** Kadar karbon, Batubara, Gasifikasi,

**Abstract** -- Quantification of the performance of the gasification process is expressed with levels of  $H_2$  and CO concentration in the gas producer, the temperature and thermal efficiency. Investigation of carbon content effect on the performance of the gasification process is done by simulating on coal using: lignite, bituminous and anthracite. The three types of coal are expected to represent the level of carbon content. In this paper, the study of thermodynamic modeling enhanced by involving decomposition of coal depends on the type of coal which in this case represents the carbon content. Merging the proposed coal decomposition model and model of the conventional reaction equilibrium thermodynamics is hoping to produce a more rational assessment. The results of the study of thermodynamics are used as instruments of gasification performance prediction by considering the carbon content of coal. The maximum mole fraction of hydrogen gas produced lignite is higher than anthracite and bituminous, respectively 0.43 and 0.25. The maximum mole fraction of hydrogen gas from lignite is at the rate of air / coal about 1.2 kg/kg while the anthracite and bituminous stands at about 3 kg/kg. The temperature of the gasification process is influenced by the type of coal. In accordance with the content of  $H_2$ , the gasification temperature maintained at about 1000 °C ( $R_u = 2.4$  and 4 respectively for lignite coal, anthracite and bituminous). Advantages at a temperature of about 1000 °C, practically tar is decomposed further, so that the producer gas contains little tar.

**Keywords:** Carbon Content, Coals, Gasification

### PENDAHULUAN

Batubara merupakan material padat yang rumus dan struktur kimianya sangat kompleks. Berdasarkan komponen yang dikandungnya, batubara sebagian besar dibentuk oleh komponen organik yaitu karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Disamping komponen organik, batubara juga mengandung komponen anorganik berupa abu

yang terdiri dari oksida-oksida mineral (Feng et al., 2016).

Sifat batubara tidak seragam, disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain dekomposisi awal asal batubara, melalui proses diagenetik dan *coalification* (Smolinski and Howaniec, 2016) (Purnama dan Ariosuko, 2014) (Mill, 2000). Heterogenitas sifat batubara diperkirakan dalam berbagai hubungan komponen penyusunnya,

misalnya hubungan antara kandungan hidrogen dengan kandungan karbon, antara kandungan oksigen dengan kandungan karbon, dan kandungan volatil dengan nilai kalor. Hubungan itu bervariasi dari satu ke yang lain dalam bentuk rentang yang disebut *coal band* (Smolinski and Howaniec, 2016) (Berkowitz, 1985) (Schlosberg, 1985).

Beberapa batubara berada di luar *coal band* atau sifat-sifatnya tidak membentuk hubungan yang kontinu. Batubara ini umumnya mengandung element H yang sangat tinggi yaitu sekitar 11 - 12%. Penyimpangan dari sifat kontinuitas terhadap *coal band* disebabkan dari material asal, yang umumnya dari alga dan plancton. Klasifikasi batubara ini tergolong batubara *humic*. Sedangkan batubara yang bersifat kontinu dalam *coal band* terkait dari batubara yang memiliki material asal yang sama tetapi mengalami metamorfik dari *peat*, lignit, sub-bituminus, bituminus dan antrasit. Perubahan yang terjadi adalah peningkatan kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) atau penurunan kandungan volatil (*volatile matter*) dari *peat* ke antrasit (Wei *et. al.*, 2016) (Berkowitz, 1985).

## METODOLOGI

### Batubara

Pengelompokan batubara secara umum didasarkan pada usia dan kandungan karbonnya. Pengelompokan batubara menurut kandungan karbon tetap dan volatil disajikan di Tabel 1. Batubara peringkat rendah memiliki panas pembakaran kurang dari 5000 kcal/kg. Karena kualitasnya rendah, berakibat pada rendahnya nilai jual, karena itu perlu diolah dahulu, misalnya dengan *upgrading* atau karbonisasi untuk dijadikan batubara yang lebih baik, atau diolah dalam proses pencairan (produk cair) atau gasifikasi (produk gas).

Batubara tersusun dari berbagai polimer berdasar senyawa aromatik dan hidro-aromatik yang pada ujung-ujungnya terdapat gugus fungsional seperti asam karboksilat, fenol, karboksil atau eter. Polimer aromatik tersebut berisi banyak atom karbon yang berikatan dengan atom oksigen, nitrogen dan sulfur. Polimer-polimer tersebut dihubungkan dengan rantai silang gugus alifatik, atom oksigen atau sulfur. Batubara dengan kualitas tinggi memiliki ukuran dan kesejajaran polimer tinggi, tetapi jumlah rantai silang sedikit (Wei *et. al.*, 2016).

Tabel 1. Komposisi Batubara dalam Kelas Konvensional (Berkowitz, 1985)

Kelas batubara	Karbon tetap %	Volatil %	Kandungan air %	Nilai kalor	
				Btu/lb	kcal/kg
Lignit	37,8	18,8	43,4	7400	4110
Sub-Bituminus	42,4	34,2	23,4	9720	5398
Bituminus kualitas rendah	47,0	41,4	11,6	12880	7153
Bituminus kualitas sedang	54,2	40,8	5,0	13880	7708
Bituminus kualitas tinggi	64,6	32,2	3,2	15160	8419
Semi-bituminus kualitas rendah	75,0	22,0	3,0	15480	8597
Semi-bituminus kualitas tinggi	83,4	11,6	5,0	15360	8530
Semi-Antrasit	83,8	10,2	6,0	14880	8264
Antrasit	95,6	1,2	3,2	14440	8019

### Klasifikasi Batubara

Batubara secara konvensional diklasifikasi menurut ASTM kedalam beberapa kelas seperti terlihat pada Tabel 2. Lignit adalah batubara peralihan dari *peat* (gambut) ke sub-bituminus. Warnanya coklat seperti kayu atau tanah. Kandungan airnya umumnya tinggi bervariasi dari 30 - 50 %. Nilai kalornya tergolong rendah. Lignit lebih mudah melepaskan kandungan airnya dan volatil melalui proses pemanasan dibanding dengan batubara kelas yang lain. Untuk ini, perhatian khusus harus diberikan dalam hal penyimpanan sehingga permasalahan pembakaran spontan dapat ditanggulangi. Lignit lebih cocok untuk bahan baku pembuatan gas melalui proses gasifikasi.

Batubara kelas sub-bituminus disebut juga sebagai batubara lignit hitam. Batubara sub-bituminus berbeda dengan lignit dalam hal warna

dan ketidak-adaan tekstur kayu sebagaimana yang dipunyai oleh lignit. Perbedaan dengan batubara bituminus adalah dalam hal karakteristik *slag* yang cenderung besar.

Batubara bituminus berbeda dengan batubara sub-bituminus dalam hal nilai kalornya. Kandungan karbon tetap berkisar antara 47 - 65 % dan kandungan volatil dalam rentang 32 - 42 %. Nilai kalor berada sekitar 7000 - 8400 kcal/kg. Batubara semi-bituminus memiliki kandungan karbon sekitar 70 - 83 %. Kandungan volatilnya menurun dari 22 - 11 % dengan naiknya karbon tetap. Nilai kalor lebih tinggi sedikit dari batubara bituminus. Kualitas batubara meningkat ke kelas antrasit dengan naiknya kandungan karbon tetap ke rentang 84 - 96 %. Kandungan volatil turun dari 10 - 1 %. Nilai kalor batubara ini lebih rendah dari nilai kalor sub-bituminus.

Tabel 2. Klasifikasi Batubara Berdasarkan Kadar Karbon dan Volatil  
(Ji *et. al.*, 2016) (Speight, 1994)

Kelas	Grup	Karbon tetap, % (db)		Volatil, % (db)		Nilai kalor, MJ/kg (db)		Karakter aglomerasi
		Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks	
Antrasit	Meta Antrasit, <b>Ma</b>	98	...	...	2	...	...	Non- aglomerasi
	Antrasit, <b>An</b>	92	98	2	8	...	...	
	Semi Antrasit, <b>Sa</b>	86	92	8	14	...	...	
Bituminus	Bituminus volatil rendah, <b>Lvb</b>	78	86	14	22	...	...	Umumnya aglomerasi
	Bituminus volatil sedang, <b>Mvb</b>	69	78	22	31	32,56	...	
	Bituminus volatil tinggi A, <b>hvAb</b>	...	69	31	...	30,24	32,56	
	Bituminus volatil tinggi B, <b>hvBb</b>	...	...	...	...	26,75	30,24	
	Bituminus volatil tinggi C, <b>hvCb</b>	...	...	...	...	24,42	26,75	
Subbitumi-nus	Subbituminus A, <b>SubA</b>	...	...	...	...	24,24	26,75	Aglomerasi
	Subbituminus B, <b>SubB</b>	...	...	...	...	22,10	24,42	
	Subbituminus C, <b>SubC</b>	...	...	...	...	19,31	22,10	
Lignit	Lignit A, <b>ligA</b>	...	...	...	...	14,65	19,31	Non- aglomerasi
	Lignit B, <b>ligB</b>	...	...	...	...	...	14,65	

### Pemodelan dengan Energi Bebas Gibbs untuk memprediksi unjuk kerja Proses Gasifikasi

Kajian gasifikasi pada umumnya dapat dilakukan dengan tiga pendekatan yaitu kajian gasifikasi aktual, kajian gasifikasi teoritis yang melibatkan kontrol laju proses dan kajian teoritis atas dasar termodinamika saja. Kajian termodinamika biasanya digunakan sebagai piranti prediksi kinerja gasifikasi aktual, dan melihat efek berbagai faktor secara cepat. Penyimpangan kinerja gasifier aktual terhadap hasil prediksi termodinamika sering ditemui dan biasanya dianggap sebagai akibat faktor-faktor teknis yang berhubungan dengan laju proses, misalnya pengontakan partikel dengan medium gasifikasi. Pada disertasi ini, kajian termodinamika disempurnakan dengan melibatkan pemodelan dekomposisi batubara yang sangat tergantung pada jenis batubara. Harapannya, pengabungan model dekomposisi batubara yang diusulkan dalam penelitian ini dan model kesetimbangan reaksi konvensional menghasilkan kajian termodinamika yang lebih rasional.

Kajian proses gasifikasi secara teoritis dapat dilakukan dengan dua macam model kesetimbangan yaitu yang menggunakan konstanta kesetimbangan empiris dan yang menggunakan Energi Bebas Gibbs. Kesetimbangan reaksi dengan nilai konstanta

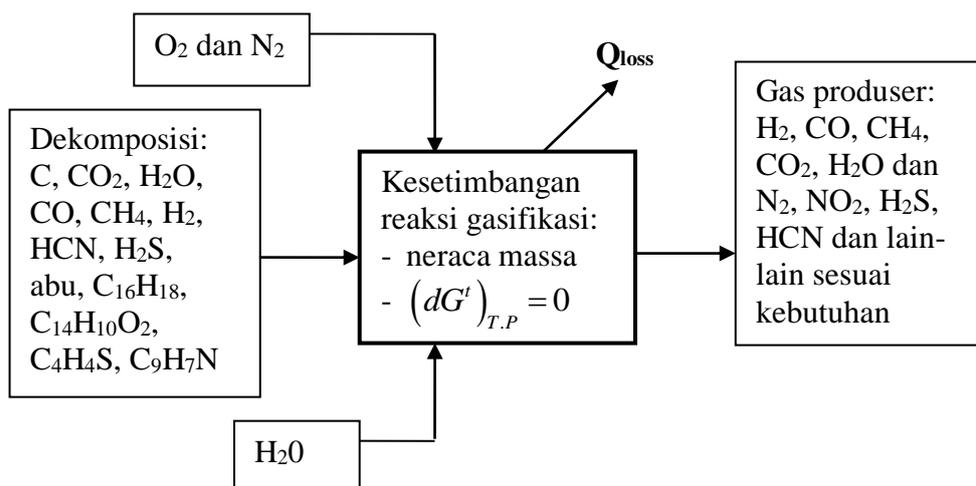
empiris yang terkenal disusun oleh Gumz dan oleh Schlapfer. Gumz (1950) menyusun kesetimbangan reaksi-reaksi heterogen dan Schlapfer menyusun kesetimbangan reaksi homogen.

Secara sederhana model kesetimbangan reaksi gasifikasi atas dasar Energi Bebas Gibbs diilustrasikan dengan Gambar 1. Umpan terdiri dari udara, kukus dan hasil dekomposisi batubara. Gas hasil dapat berupa berbagai senyawa tanpa persamaan reaksi. Komponen dan komposisi batubara dapat diwakili dengan hasil-hasil dekomposisi.

Kriteria untuk mencapai kesetimbangan reaksi kimia dapat diwakili oleh Energi Bebas Gibbs Total. Energi Bebas Gibbs Total dari sistem tertutup pada temperatur dan tekanan konstan harus turun selama proses irreversibel dan kondisi kesetimbangan tercapai pada nilai minimum Energi Bebas Gibbs Total. Kondisi kesetimbangan dalam bentuk Persamaan (1).

$$\left(dG^t\right)_{T,P} = 0 \quad (1)$$

Pada pemodelan dengan Energi Bebas Gibbs, diperlukan data Energi Bebas Gibbs masing-masing komponen yang umumnya tersedia dalam termodinamika.



Gambar 1. Skema Model Gasifikasi Termodinamika

Algoritma simulasi gasifikasi keseimbangan termodinamik dimulai dari data batubara dan kondisi operasi. Data batubara terdiri dari analisis proksimat, analisis ultimat dan analisis sulfur. Data kondisi operasi terdiri dari temperatur, tekanan, laju massa dan fraksi massa. Rumus molekul-molekul yang terlibat dimasukkan pada simulator dan simulator langsung mengakses ke data termodinamika keseimbangan tersedia. Persamaan keadaan yang dipilih adalah *Peng-Robinson*. Nilai entalpi batubara dihitung dengan *metoda Boie*.

Pendekatan dilakukan dalam model gasifikasi termodinamika adalah menetapkan senyawa-senyawa yang terlibat dalam reaksi, karbon dapat dikonversi semua dan nilai rugi-rugi panas gasifier merupakan fungsi dari nilai kalor batubara. Senyawa-senyawa terlibat adalah C, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S, C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>S, C<sub>9</sub>H<sub>7</sub>N, S, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> dan C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>.

Nilai kalor tersedia selama proses gasifikasi dijadikan acuan dalam perkiraan rugi-rugi panas gasifier selama proses gasifikasi. Nilai kalor diambil dari data *heating value* batubara. Besarnya panas keluar dari gasifier disimulasi dengan cara membuang panas dari gasifier.

Karbon dalam proses gasifikasi mengalami proses oksidasi dan proses reduksi. Proses

oksidasi berguna sebagai penyuplai panas untuk proses reduksi karbon dan devolatilisasi. Proses reduksi terjadi antara karbon dengan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O dari hasil oksidasi atau kukus dapat disuplai dari luar gasifier. Unjuk kerja gasifikasi optimal didapatkan dengan cara memberikan oksidan dengan kebutuhan minimal proses dan kukus dengan kebutuhan maksimal proses.

### Prediksi Kinerja Proses Gasifikasi dengan Mempertimbangkan Kadar Karbon

Komposisi gas produser merupakan fungsi dari elemen pembentuk batubara, proses devolatilisasi dan kondisi operasi. Komposisi elemen batubara berpengaruh pada dekomposisi yang beracuan pada teori devolatilisasi dan neraca massa elemen. Jadi perancangan sebuah gasifier harus melibatkan perhatian pada jenis batubara.

Simulasi berikut membandingkan dekomposisi dan unjuk kerja gasifikasi tiga jenis batubara. Ketiga jenis batubara tersebut yaitu antrasit, bituminus dan lignit. Tiga jenis batubara tersebut memiliki analisis ultimat dan analisis proksimat yang dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Analisis Ultimat (db) Tiga Jenis Batubara

Nama	% C	% H	% O	% N	% S	abu
Antrasit	85.048	1.715	2.572	0.857	2.401	7.407
Bituminus	83.817	4.337	2.622	1.210	0.605	7.407
Lignit	54.963	6.522	29.933	0.880	0.341	7.407

Tabel 4. Analisis Proksimat (db) Tiga Jenis Batubara

Nama	VM	FC	abu
Antrasit	4.115	88.477	7.407
Bituminus	18.256	74.336	7.407
Lignit	42.384	50.209	7.407

Ketiga jenis batubara berdasarkan analisis proksimat dan analisis ultimat didekomposisi. Dari hasil dekomposisi kadar gas metan bituminus dan antrasit lebih banyak dari lignit. Sedangkan kadar gas CO dan CO<sub>2</sub> jenis bituminus dan antrasit lebih sedikit dari jenis lignit, seperti tampak pada Tabel 5.

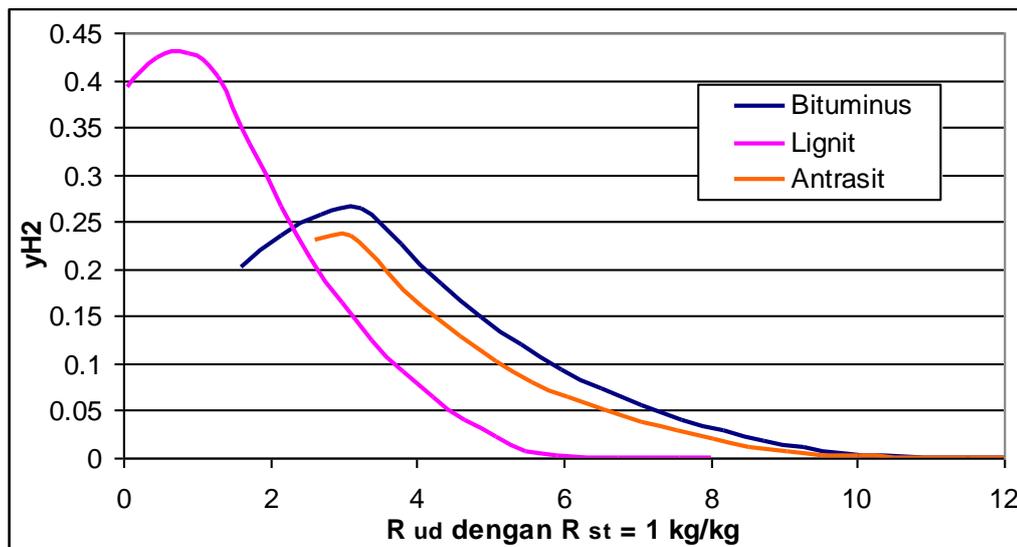
Tabel 5. Asumsi Dekomposisi Batubara

Nama	Antrasit	Bituminus	Lignit
Air	0.01101	0.001700	0.258186
Abu	0.07407	0.074074	0.074074
H <sub>2</sub>	0.00122	0.030216	0.023403
CH <sub>4</sub>	0.02936	0.021151	0.005276
CO	0.00856	0.010576	0.042979
CO <sub>2</sub>	0.01345	0.024928	0.109782
C	0.70820	0.692320	0.386795
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S	0.05137	0.015863	0.008936
C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> N	0.07889	0.121808	0.082338
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	0.02385	0.007365	0.008298

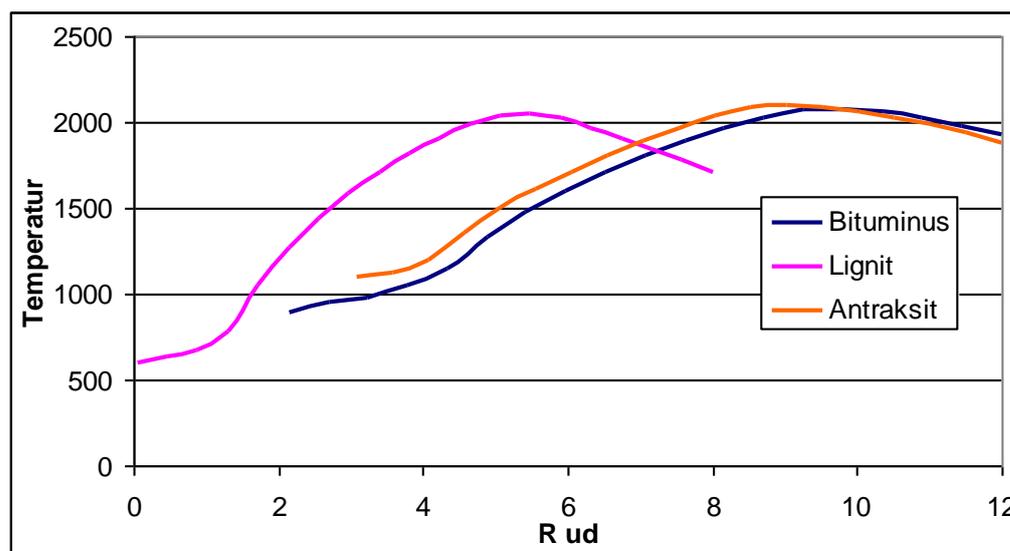
## DATA DAN ANALISA

Hasil dekomposisi masing-masing jenis batubara diatas digunakan sebagai masukan simulasi proses gasifikasi. Fraksi mol gas hidrogen maksimum yang dihasilkan lignit lebih tinggi daripada antrasit dan bituminus, berturut-turut 0,43 dan 0,25. Fraksi mol maksimum gas hidrogen dari lignit berada pada laju udara/batubara sekitar 1,2 kg/kg sedangkan antrasit dan bituminus berada pada sekitar 3 kg/kg. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 2.

Temperatur proses gasifikasi, seperti diduga sangat dipengaruhi oleh jenis batubara sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Temperatur maksimum yang disajikan dalam Gambar 3 sebenarnya adalah temperatur pembakaran stoisiometri. Sesuai dengan kadar H<sub>2</sub> yang tampak pada Gambar 2, temperatur gasifikasi sebaiknya dijaga sekitar 1000 °C (R<sub>u</sub> = 2, 4 dan 4 berturut-turut untuk batubara lignit, antrasit, dan bituminus). Pada temperatur sekitar 1000 °C, tar secara praktis sudah terdekomposisi lebih lanjut, sehingga gas produser hanya sedikit mengandung tar.

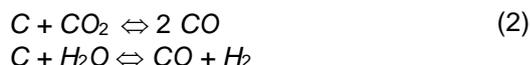


Gambar 2. Pengaruh Laju Udara/Batubara dengan Fraksi H<sub>2</sub> dalam Gas Produser (Jenis Batubara sebagai Parameter)



Gambar 3. Temperatur Proses Gasifikasi untuk Tiga Jenis Batubara Berbeda

Peningkatan temperatur akan meningkatkan konsentrasi CO dan H<sub>2</sub> didalam gas produser. Hal ini terjadi karena reaksi-reaksi reduksi dibawah ini merupakan reaksi endotermik, yaitu:

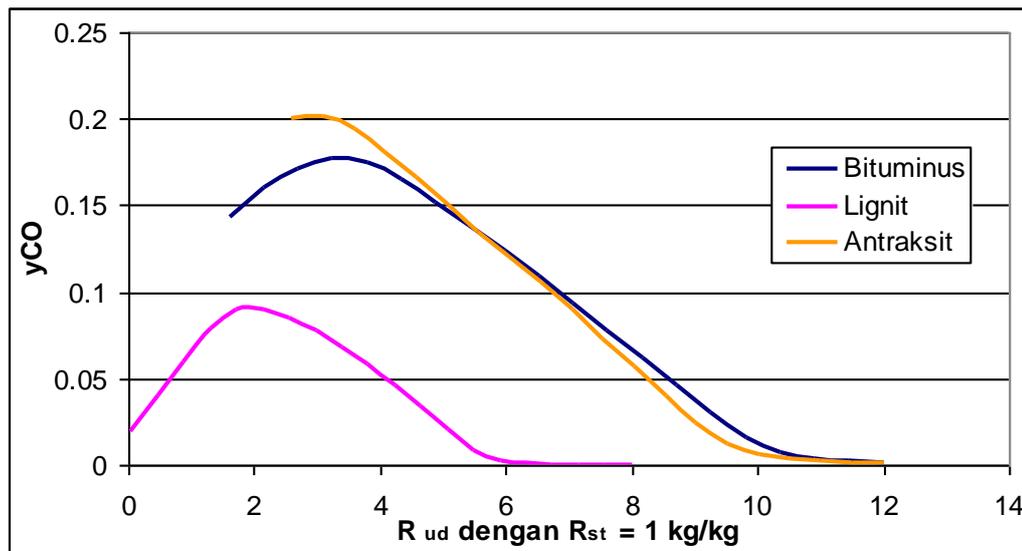


Sejauh ini hasil investigasi menyatakan rentang temperatur gasifikasi fluidisasi 850 - 900 °C (Pinto *et. al.*, 2003). Perubahan temperatur gas terkait dengan rasio laju O<sub>2</sub>/batubara dalam gasifier. Kenaikan O<sub>2</sub>/batubara akan meningkatkan temperatur. Panas diproduksi dari oksidasi parsial untuk memenuhi kebutuhan panas reaksi endotermik dalam proses gasifikasi (Pan *et. al.*, 2016) (Feng *et. al.*, 2016).

Temperatur juga mempengaruhi proses devolatilisasi. Pencapaian konversi karbon yang tinggi dan kadar tar yang rendah terjadi pada temperatur operasi diatas 800 °C dalam gasifier. Gas produser mempunyai kadar tar rendah, jika temperatur gasifikasi tinggi yang dapat dicapai dengan jalan menaikkan laju oksidan. Efek kenaikan temperatur tidak hanya berakibat pada kadar tar tetapi juga pada komposisi tar. Fenol, cresol dan benzofuran terdapat dalam jumlah yang besar pada temperatur dibawah 800 °C. Penguraian *aromatic hydrocarbons* terjadi pada temperatur diatas 850 °C (Devi *et. al.*, 2003).

Antraksit memiliki kadar CO maksimum paling tinggi, diikuti oleh bituminus dan lignit, seperti tampak pada Gambar 4 Kondisi ini sesuai dengan banyaknya kadar karbon dari masing-masing batubara. Makin banyak kadar karbon batubara bereaksi dengan karbon dioksida melalui reaksi Boudouart menghasilkan CO. Perubahan temperatur dari 700 sampai 850 °C diobservasi menaikkan kadar H<sub>2</sub> dari 5 menjadi 10 % dan sedikit menurunkan CO<sub>2</sub> (Devi *et. al.*, 2003).

Hasil gasifikasi teoritis yang diamati berikutnya adalah kurva R<sub>ud</sub> terhadap fraksi mol CO. Oksidan menggunakan udara tanpa kukus akan menghasilkan fraksi mol CO maksimum ≈ 0,27. Fraksi mol CO maksimum terjadi didaerah pirolisis dan kadar CO akan turun pada daerah gasifikasi. Fraksi mol CO selama proses gasifikasi sangat dipengaruhi dengan penambahan kukus. Oksidan udara dan kukus menghasilkan fraksi mol CO sekitar 0,1, tampak pada Gambar 4. Hal ini berarti penambahan kukus akan menurunkan kadar CO gas produser. Hasil simulasi ini diperkuat oleh pengamatan Rizeq dan West (2003), penambahan kukus mendorong terbentuknya H<sub>2</sub> lebih banyak tetapi mengurangi fraksi mol CO. Fraksi mol CO dalam gas produser turun secara tajam disebabkan oleh reaksi geser (*water shift reaction*) yaitu CO bereaksi dengan kukus menghasilkan H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>.



Gambar 4. Fraksi mol CO dalam Gas Produser pada 3 Jenis Batubara Berbeda

## KESIMPULAN

Investigasi menggunakan kajian termodinamika sebagai piranti prediksi kinerja gasifikasi dan dapat melihat efek berbagai faktor secara cepat. Hasil investigasi diantaranya fraksi mol gas hidrogen maksimum yang dihasilkan lignit lebih tinggi daripada antrasit dan bituminus, berturut-turut 0,43 dan 0,25.

Fraksi mol maksimum gas hidrogen dari lignit berada pada laju udara/batubara sekitar 1,2 kg/kg sedangkan antrasit dan bituminus berada pada sekitar 3 kg/kg. Temperatur proses gasifikasi, seperti diduga sangat dipengaruhi oleh kadar karbon.

Sesuai dengan kadar  $H_2$ , temperatur gasifikasi sebaiknya dijaga sekitar  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_u = 2,4$  dan  $4$  berturut-turut untuk batubara lignit, antrasit dan bituminus). Keuntungan pada temperatur sekitar  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  yaitu tar secara praktis sudah terdekomposisi lebih lanjut, sehingga gas produser hanya sedikit mengandung tar.

## REFERENSI

- Berkowitz, N. *The Chemistry of Coal*, Elsevier, Netherland, 1985.
- Devi, L., Ptasinski, K. and F. J.J. Janssen. (2003), A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass & Bioenergy*, 2003; 24 (2): 125-140. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00102-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00102-2)
- Feng, P. *et. al.* Entrained flow gasification of coal/bio-oil slurries. *Energy*. 2016; 111: 793-802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.05.115>

- Ji, Q. *et. al.*, A review on the coal gasification wastewater treatment technologies: past, present and future outlook. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 126: 38-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.147>
- Mill, C. *Pyrolysis of Fine Coal Particles at High Heating Rate and Pressure*, Tesis Doktor, New South Wales University, Australia. 2000.
- Pan, C., Liang, Q., Guo, X., Dai, Z., Liu, H. and Gong, X. Characteristics of Different Sized Slag Particles from Entrained-Flow Coal Gasification. *Energy Fuels*. 2016; 30 (2): 1487-1495. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01326>
- Pinto, F. *et. al.* Effect of experiment condition on co-gasification of coal, biomass and plastics wastes with air/steam mixture in a fluidized bed system. *Fuel*, 2003; 82 (15-17): 1967-1976. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00160-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00160-1)
- Purnama, A. dan Ariosuko. Analisis Perbandingan Sifat Fisis Dan Mekanis Bantalan Peluru Baru, Telah Dipakai dan Rusak Untuk Kendaraan Bermotor Roda Dua. *SINERGI*. 2014; 18 (2): 92-98.
- Schlosberg, R. *Chemistry of Coal Conversion*. Springer Science+Business Media, LLC. NY. 1985. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-3632-5>
- Smolinski, A. and N. Howaniec. Co-gasification of coal/sewage sludge blends to hydrogen-rich gas with the application of simulated high temperature reactor excess heat. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41 (19): 8154-8158.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.145>

Speight, J. G. *The Chemistry and Technology of Coal*, USA, Marcel Dekker, 2nd edition. 1994.  
Wei, Juantao, *et. al.* Study on reactivity characteristics and synergy behaviours of rice

straw and bituminous coal co-gasification. *Biosource Technology*. 2016; 220: 509-515.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.116>