

Submitted : 17 April 2019

Revised : 30 April 2019

Accepted : 28 Mei 2019

MODEL GASIFIKASI BIOMASSA MENGGUNAKAN PENDEKATAN KESETIMBANGAN TERMODINAMIKA STOIKIOMETRIS DALAM MEMPREDIKSI GAS PRODUSER

Hafid Alwan^{1*}

¹ Jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jenderal Sudirman Km.03 Cilegon, Banten – Indonesia 42443

*Email: hafidalwan@untirta.ac.id

Abstrak

Reaksi dalam sistem gasifikasi meliputi reaksi oksidasi, bouduard, WGR, WGSR, dan metanasi. Reaksi-reaksi tersebut dapat dimodelkan melalui kesetimbangan reaksi termodinamika untuk memprediksi komposisi gas produser. Biomassa digambarkan sebagai $CH_xO_yN_z$ dengan agen pengoksidasi berupa udara. Produk gasifikasi yang disebut dengan gas produser terdiri atas gas CO, CO₂, H₂, CH₄, dan N₂. Model yang digunakan untuk memperkirakan gas produser adalah model homogen atau model schlapfer. Dalam model ini, persamaan reaksi yang dijadikan model reaksi adalah reaksi *water gas shift* (WGSR). Reaksi tersebut dapat memprediksi hampir seluruh komposisi gas produser di dalam sistem gasifikasi. Rasio udara terhadap bahan bakar yang digunakan (AFR) sebesar 0,3. Nilai konstanta kesetimbangan termodinamik dari model ini sebesar $K = 0,262$ pada suhu kesetimbangan gasifikasi 1073 K. Komposisi gas produser yang dihasilkan dari model ini yaitu CO= 24,55 %-mol, H₂= 12,81 %-mol, CO₂= 6,89 %-mol, H₂O= 13,74 %-mol, dan N₂= 40 %-mol.

Kata Kunci: Biomassa, Gasifikasi, Kesetimbangan termodinamik, Stoikiometris

Abstract

The reaction in the gasification system includes oxidation, bouduard, WGR, WGSR, and methanation reactions. These reactions can be modeled by the thermodynamic equilibrium reactions to predict the composition of the producer gas. The biomass is represented as $CH_xO_yN_z$ with air as the oxidizing agent. Gas producer consist of CO, CO₂, H₂, CH₄ and N₂. The model used in estimating producer gas is a homogeneous model or schlapfer model. In this model the reaction equation used as a reaction model is a water gas shift reaction (WGSR). It can predict almost all of the gas composition of the output in the gasification system. The ratio of air to fuel used (AFR) is 0.3. The value of the thermodynamic equilibrium constant of this model is $K = 0.262$ at the gasification equilibrium temperature of 1073 K. The producer gas composition produced from this model is CO = 24.55 %-mole, H₂ = 12.81 %-mole, CO₂ = 6.89 %-mole, H₂O = 13.74 %-mole and N₂ = 40 %-mole.

Keywords: Biomass, Gasification, Gibbs free energy, Thermodynamic equilibrium, Stoichiometric

1. PENDAHULUAN

Dalam kurun waktu beberapa dekade terakhir ini pengolahan biomassa sebagai salah satu alternatif penghasil energi terbarukan semakin meningkat. Biomassa merupakan salah satu penghasil energi yang ramah lingkungan serta ketersediaannya yang melimpah, maka sudah selayaknya untuk dikembangkan lebih jauh untuk menggantikan energi fosil yang ketersediaannya terbatas dan memiliki emisi CO₂ yang cukup tinggi. Hal ini juga senada dengan *Kyoto Protocol* yang dikeluarkan pada tahun 1980 dimana

emisi CO₂ yang dilepas ke udara akibat dari penggunaan energi fosil harus dibatasi. Sehingga untuk mencapai tujuan tersebut proporsi penggunaan bahan bakar terbarukan yang ramah lingkungan terhadap bahan bakar fosil harus ditingkatkan. Emisi CO₂ yang dihasilkan dari bahan bakar yang bersumber dari biomassa lebih kecil, yaitu sebesar 17-49 g/MJ. dibandingkan dengan bahan bakar fosil sebesar 86 g/MJ (Judd, 2003). Hal ini dapat dilihat pada tabel 1. di bawah ini.

Tabel 1. Emisi CO₂ yang dihasilkan dalam produksi energi menggunakan berbagai bahan baku

Bahan Bakar	Bahan Baku	CO ₂ (g/MJ)				
		Disimpan dalam bahan baku	Ditambahkan ke dalam proses	Konversi dan Distribusi	Pembakaran	Emisi ke lingkungan
Diesel	Minyak bumi	0	13	6	67	86
Biodiesel	Minyak Canola	-64	14	7	92	49
FT Diesel	Kayu	-162	7	113	59	17
Etanol	Gandum	-138	3	89	81	35
Etanol	Kayu	-135	3	95	81	44

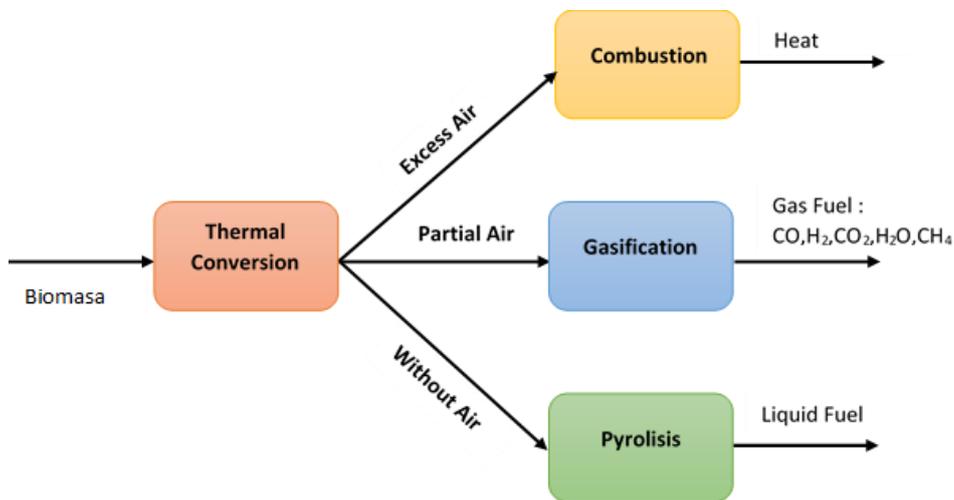
Biomassa merupakan sebutan yang diberikan untuk material yang tersisa dari makhluk hidup terutama tanaman atau hewan. Energi yang terkandung di dalam biomassa berasal dari matahari melalui proses fotosintesis. Sumber biomassa di Indonesia bervariasi mulai dari sampah kota, limbah hutan, serta limbah pertanian dan perkebunan. Sumber yang potensial di Indonesia sebagai negara agraris adalah limbah pertanian dan perkebunan. Salah satu contohnya adalah sekam padi, data dari BPS pada tahun 2018 menunjukkan bahwa potensi sekam padi di Indonesia cukup besar yaitu sekitar 12 juta ton dengan lokasi produksi terbesar berada di Jawa Tengah, Jawa Barat, dan Jawa Timur.

Data karakteristik beberapa biomassa yang dinyatakan dalam bentuk analisa ultimat dan proksimat dapat dilihat pada tabel 2 di bawah ini. Data ini berguna untuk perhitungan neraca massa dan energi dalam konversi termokimia, sehingga

dapat dimodelkan secara termodinamika untuk menentukan komposisi gas produser pada reaksi kesetimbangan.

Gas produser dari biomassa dapat dihasilkan melalui dekomposisi termal. Secara umum terdapat tiga jalur konversi termal biomassa, yaitu melalui jalur pembakaran, gasifikasi serta pirolisis dan hidrotermal. Perbedaan ketiga proses tersebut adalah pada kebutuhan udara.

Gas sintesis (*syngas*) dengan kandungan utama berupa gas CO dan H₂ dari ketiga cara tersebut hanya dihasilkan melalui proses gasifikasi, dimana konversi ini dilakukan menggunakan udara parsial. Kedua jenis gas mudah bakar tersebut dapat dikonversi menjadi turunan bahan kimia lainnya ataupun digunakan sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan, sebagai contoh untuk bahan bakar pembangkit kukus, dimana kukus digunakan untuk membangkitkan energi listrik.



Gambar 1. Jalur konversi termal biomassa serta produk yang dihasilkan

Tabel 2. Data analisa ultimat dan proksimat biomassa pertanian dan perkebunan (%db) (Yin, 2011)

No	Biomassa	Analisa Proksimat (%wt)			Analisa Ultimat (%wt)					HHV Mj/kg
		VM	FC	Abu	C	H	N	O	S	
1	Sekam Padi	61,81	16,95	21,24	38,50	5,20	0,45	34,61	-	14,69
2	Baggas Tebu	83,66	13,15	3,20	45,48	5,96	45,21	0,15	-	18,73
3	Jerami	65,47	15,86	18,67	38,24	5,20	0,87	36,26	0,18	15,09
4	Cangkang Sawit	77,28	17,59	5,14	48,34	6,20	2,62	37,44	0,26	20,71
5	Cangkang Kelapa	77,19	22,10	0,71	50,22	5,70	43,37	0	-	20,50
6	Kayu Bambu	86,80	11,24	1,95	48,76	6,32	0,20	42,77	-	20,55

Gasifikasi biomassa merupakan konversi termokimia dari bahan bakar biomassa padat menjadi bahan bakar yang mudah terbakar dengan adanya sejumlah oksigen kurang dari yang dibutuhkan untuk pembakaran stoikiometri (Sansaniwale et al., 2017). Gasifikasi dilakukan dalam reaktor yang disebut gasifier, dan melibatkan berbagai reaksi pembentukan gas yang mengubah material karbon menjadi gas yang mudah terbakar dan bahan bakar cair. Meskipun merupakan teknologi yang menjanjikan untuk aplikasi pembangkit listrik dan panas, gasifikasi biomassa memiliki beberapa hambatan teknologi yang membatasi komersialisasinya. Dalam operasi mesin, gas produser bisa menjadi bahan bakar alternatif yang bisa dikenali untuk transportasi dan pembangkit listrik. Hal tersebut tidak hanya menghasilkan listrik dengan biaya rendah namun juga mengurangi bahaya kesehatan yang diakibatkan oleh emisi dan menjaga kebersihan atmosfer.

Reaksi gasifikasi merupakan reaksi endotermis, dengan oksidator berupa udara, kukus, dan oksigen dalam jumlah yang terbatas. Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi berupa karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), sedikit hidrokarbon berantai tinggi (etena dan etana), air (H₂O), nitrogen (N₂), dan berbagai partikulat kecil seperti arang, abu, tar, alkali, dan senyawa sejenisnya. Dalam beberapa penelitian yang dipublikasikan menjelaskan bahwa komposisi gas produser (CO, CO₂, H₂, CH₄) lebih besar jika menggunakan agen oksidasi berupa kukus dibandingkan dengan udara (Aydin et al., 2018; Balat et al., 2009; Cempa-Balewicz et al., 2013; Shayan et al., 2018).

Tar yang terbentuk dari hasil samping gasifikasi dalam skala kecil tidak terlalu berpengaruh terhadap gas produser, tetapi jika dalam jumlah yang besar perlu dilakukan perlakuan khusus untuk menghilangkannya sebelum gas produser memasuki proses selanjutnya. Untuk mengatasi pembentukan tar yang berlebihan berbagai upaya telah dilakukan. Salah satunya adalah dengan cara *catalytic reforming*, untuk mengkonversi tar menjadi senyawa hidrokarbon ringan (J. Huang et al. 2011; Wang et al., 2008). Adnan et al. (2017) dalam hasil penelitiannya mengungkapkan bahwa produksi tar di dalam gas sintesis dapat ditekan hingga seminimal mungkin dengan cara mengkombinasikan penggunaan agen pengoksidasi (udara, kukus, dan oksigen).

Untuk menghasilkan gas sintesis dari biomassa yang efisien dan bersih dari polutan bergantung pada jenis reaktor yang digunakan, jenis biomassa, agen oksidasi, dan kondisi operasi. Wang et al. (2008) dalam hasil penelitiannya memaparkan bahwa teknologi gasifikasi memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing serta agen oksidasi yang umum digunakan. Pembentukan tar dan arang yang berlebihan, serta nilai kalor gas produser yang rendah dapat terjadi, jika pemilihan reaktor, agen oksidasi, dan kondisi operasinya tidak tepat.

Miccio et al. (2008) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa reaktor unggun terfluidakan (*fluidized bed*) pada tekanan atmosferik merupakan

reaktor gasifikasi dengan teknologi yang fleksibel untuk menangani biomassa dan sampah kota hingga skala yang besar sekalipun. Reaktor unggun terfluidakan dapat meminimalisir tar serta partikulat kecil lainnya di dalam gas produser, dan memiliki nilai kalor (*heating value*) gas sintesis yang tinggi serta komposisi gas H₂ yang besar, sehingga memungkinkan gas sintesis untuk dikonversi menjadi bahan kimia.

Perolehan produk hasil gasifikasi sangat bergantung terhadap beberapa reaksi yang kompleks, seperti *fast pyrolysis*, *partial oxidation pyrolysis*, gasifikasi arang, konversi tar dan hidrokarbon rantai pendek, dan *water gas shift reaction*. Selain proses yang kompleks tersebut, distribusi produk juga dipengaruhi laju perpindahan panas dan waktu tinggal di reaktor. Karena kompleksnya fenomena yang terjadi di dalam gasifier, maka diperlukan suatu model matematika yang bisa digunakan untuk membantu memprediksi komposisi keluaran gasifier serta efisiensi kerja gasifier. Model yang bisa digunakan adalah model laju reaksi kinetika, model kesetimbangan termodinamika, serta *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dan *Artificial Neural Network* (ANN) model (Baruah & Baruah, 2014).

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk memodelkan proses gasifikasi menggunakan model kesetimbangan termodinamika. Minimalisasi energi bebas Gibbs merupakan pendekatan model kesetimbangan termodinamika non-stoikiometri yang telah banyak digunakan untuk memprediksi gas sintesis dari proses gasifikasi (Adnan et al., 2017; Aydin et al., 2018; Cempa-Balewicz et al., 2013; Huang & Ramaswamy, 2009; Jarunthammachote & Dutta, 2008; Miccio et al., 2008; Shayan et al., 2018). Beberapa peneliti mengembangkan model dengan mempertimbangkan pembentukan tar di dalam proses gasifikasi (Adnan et al., 2017).

2. DESKRIPSI MODEL

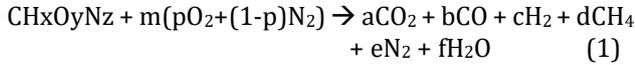
Konversi termal biomassa pada sistem gasifikasi dapat dibagi menjadi tiga proses utama, yaitu pengeringan, pirolisis dan gasifikasi. Pirolisis merupakan konversi termal tanpa adanya oksigen pada rentang temperatur 400–500°C (Bridgwater, 2012). Produk dari pirolisis berupa arang, bio-oil dan gas pirolisis. Agen oksidasi gasifikasi berupa udara akan bereaksi dengan arang menghasilkan gas produser. Untuk mencapai konversi maksimal, temperatur gasifikasi berada pada rentang 800°C atau lebih tinggi.

Model matematis yang dibangun sedapat mungkin menggambarkan proses gasifikasi biomassa secara keseluruhan. Sehingga, model ini dibangun berdasarkan pendekatan-pendekatan tertentu, supaya persamaan-persamaan yang terbentuk dapat diselesaikan. Beberapa asumsi yang digunakan dalam penyelesaian model matematis ini diantaranya:

- Biomassa direpresentasikan dalam bentuk CH_xO_yN_z
- Produk gasifikasi terdiri atas gas CO₂, CO, H₂, H₂O, CH₄, dan N₂
- Reaksi berjalan pada kesetimbangan termodinamika

- d. Reaksi dijalankan pada kondisi non-adiabatik, artinya reaksi ini membutuhkan panas.
- e. Gas produser yang terbentuk mengikuti sifat gas ideal sehingga berlaku persamaan-persamaan gas ideal

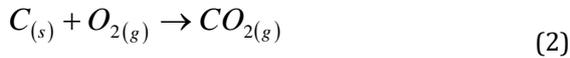
Berdasarkan pendekatan di atas, reaksi umum gasifikasi biomassa dengan udara dapat dituliskan sebagai berikut;



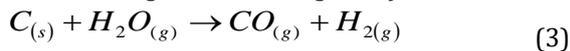
x menunjukkan rasio hidrogen dengan karbon (H/C), y menunjukkan rasio oksigen dengan karbon (O/C) dan z menunjukkan rasio antara nitrogen dengan karbon (N/C). Kandungan air di dalam biomassa diabaikan dan kualitas produk bergantung dari harga y dan x.

Kebutuhan udara dari reaksi di atas dihitung berdasarkan kebutuhan udara untuk pembakaran. Kebutuhan udara untuk gasifikasi (AFR) memiliki rentang dari 0,25–0,50 dari kebutuhan udara pembakaran (Prins, 2005). Reaksi yang berlangsung dalam sistem gasifikasi adalah sebagai berikut:

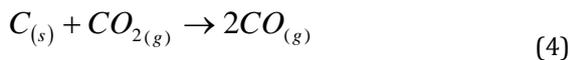
- a. Reaksi oksidasi



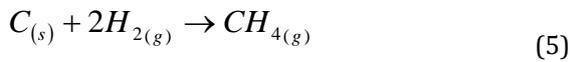
- b. Reaksi *heterogeneous water gas shift*



- c. Reaksi bouduard



- d. Reaksi metanasi

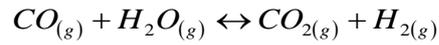


- e. Reaksi *homogeneous water gas shift*



Empat reaksi pertama (Pers. (2) s/d. (5)) merupakan reaksi independen, sedangkan reaksi terakhir atau reaksi *homogeneous WGS* merupakan penjumlahan dari reaksi *heterogeneous water gas shift* dan reaksi bouduard. Reaksi oksidasi umumnya berlangsung dengan sangat cepat dan sempurna, sedangkan reaksi bouduard, *heterogeneous water gas shift* dan metanasi berlangsung pada reaksi kesetimbangan.

Model yang digunakan pada makalah ini adalah model homogen atau biasa disebut juga dengan model schlapfer, dimana hanya satu persamaan reaksi yang digunakan sebagai model kesetimbangan reaksi gasifikasi (Susanto & Beenackers, 1996). Reaksi yang digunakan untuk memodelkan sistem gasifikasi ini harus mencakup gas produser yang dihasilkan. Sehingga komposisi gas keluaran dapat diketahui, meskipun hanya menggunakan satu persamaan reaksi. Persamaan reaksi yang digunakan dalam makalah ini adalah reaksi *homogeneous water gas shift* (WGSR), dimana reaksi ini merupakan reaksi simultan antara reaksi bouduard dan reaksi *heterogeneous water gas shift* (Susanto & Beenackers, 1996). Konstanta kesetimbangan reaksi berdasarkan neraca massa dapat dituliskan sebagai berikut:



$$r_f = K_f \cdot [CO] \cdot [H_2O] \quad (7)$$

$$r_r = K_r \cdot [H_2] \cdot [CO_2]$$

$$K_y = \frac{K_r}{K_f} = \frac{[H_2] \cdot [CO_2]}{[CO] \cdot [H_2O]}$$

$$y_{CO} + y_{H_2O} + y_{H_2} + y_{CO_2} + y_{CH_4} + y_{N_2} = 1 \quad (8)$$

Komposisi CH₄ di dalam gas produser ditetapkan dengan mengacu dari beberapa jurnal penelitian yang telah dipublikasikan, harga y_{CH₄} di dalam gas produser berada pada rentang 2-3 %-mol (Aydin et al., 2018; Shayan et al., 2018; Susanto & Beenackers, 1996). Model neraca massa dapat dibangun melalui neraca massa atom karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen, sehingga didapat persamaan neraca massa sebagai berikut:

Neraca massa masuk (n_i) = Neraca massa keluar (n_o)

$$C : y_C \cdot B = (y_{CO} + y_{CO_2} + y_{CH_4}) \cdot G \quad (9)$$

$$H : y_C \cdot B = (2 \cdot y_{H_2} + y_{H_2O} + y_{CH_4}) \cdot G \quad (10)$$

$$O : y_O \cdot B + 2 \cdot y_O \cdot U = (y_{CO} + 2 \cdot y_{CO_2} + 2 \cdot y_{H_2O}) \cdot G \quad (11)$$

$$N : y_N \cdot B + 2 \cdot y_N \cdot U = 2 \cdot y_N \cdot G \quad (12)$$

Hubungan antara konstanta kesetimbangan reaksi berdasarkan neraca massa dan termodinamika pada fase gas dinyatakan sebagai berikut et al., 2005);

$$K_y = K_T \cdot \left(\frac{P}{P^\circ} \right)^{-\nu} \quad (13)$$

$$\prod_i (y_i \hat{\phi}_i)^{\nu_i} = K_T \cdot \left(\frac{P}{P^\circ} \right)^{-\nu}$$

Dimana $\nu = \sum_i \nu_i$ dan P^o adalah tekanan

standar/referensi (umumnya 1 bar atau 1 atm). $\hat{\phi}_i$ merupakan nilai fugasitas masing-masing komponen. Jika gas produser diperlakukan sebagai gas ideal, dan kondisi operasi reaktor berada pada tekanan rendah (atmosferik) dan temperatur tinggi, maka nilai

fugasitas komponen, $\hat{\phi}_i = 1$ (Smith et al., 2005). Nilai K_T pada persamaan tersebut dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$K_T = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (14)$$

Dimana harga K₀, K₁ dan K₂ dapat dicari dengan persamaan berikut ini:

$$K_0 = \exp\left(\frac{-\Delta G_0^\circ}{R \cdot T_0}\right) \quad (15)$$

$$K_1 = \exp\left[\frac{\Delta H_0^\circ}{R \cdot T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\right] \quad (16)$$

$$K_2 = \left\{ \begin{aligned} &\Delta A \left[\ln \tau - \left(\frac{\tau-1}{\tau} \right) \right] + \frac{1}{2} \Delta B \cdot T_0 \left[\frac{(\tau-1)^2}{\tau} \right] + \\ &\left[\frac{1}{6} \Delta B \cdot T_0^2 \left[\frac{(\tau-1)^2(\tau-1)}{\tau} + \frac{1}{2} \frac{\Delta D}{T_0^2} \frac{(\tau-1)^2}{\tau^2} \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Dengan ΔG_0° menyatakan energi bebas Gibbs standar (J/mol) dan T_0 menyatakan temperatur awal (K) dan R menyatakan konstanta gas universal (8.314 J/mol.K).

ΔH_0° merupakan perubahan entalpi standar (J/mol), A, B, C, dan D merupakan nilai kapasitas campuran reaktan dan produk.

Neraca energi dari sistem gasifikasi ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta H_R = \Delta H_R(T_R) + \sum_{i=1}^n n_i \int_{T_R}^T c_{pi} dT \quad (18)$$

Panas reaksi (ΔH_R) pada temperatur referensi dihitung menggunakan panas pembakaran masing-masing komponen. n_i menunjukkan jumlah setiap omponen i dan C_{pi} menunjukkan kapasitas panas komponen i . Keenam persamaan aljabar non-linier di atas (8-13) dapat diselesaikan secara simultan untuk memperoleh nilai fraksi setiap komponen, dimana nilai ini menunjukkan komposisi gas produk.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Validasi Model

Pada bagian ini, hasil yang didapatkan dari model dibandingkan dengan hasil dari eksperimen beberapa peneliti. Kesalahan dalam perbandingan antara nilai dari model yang dikembangkan dengan hasil eksperimen diestimasi dengan nilai *root-mean-square error* (RMSE) untuk setiap set data (tabel 3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (eksperimen_i - model_i)^2}{n}} \quad (19)$$

Dimana n adalah jumlah data.

Akurasi model yang dikembangkan dibandingkan dengan data eksperimen yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti ilmiah disajikan pada tabel 3. Model berdasarkan laju reaksi homogen, yaitu reaksi *water gas shift* menunjukkan nilai RMSE yang cukup kecil. Nilai RMSE yang kecil memiliki arti, penyimpangan model dengan data eksperimen sangat kecil. Model ini valid pada kondisi operasi tekanan yang rendah dan komponen gas diperlakukan sebagai gas ideal. Model homogen memiliki kelemahan, yaitu parameter input salah satu gas produser (gas CH₄) harus didefinisikan. Dari beberapa literatur telah disebutkan bahwa fraksi mol gas CH₄ berkisar antara 2–3%-mol (Aydin et al., 2018; Shayan et al., 2018; Susanto & Beenackers, 1996).

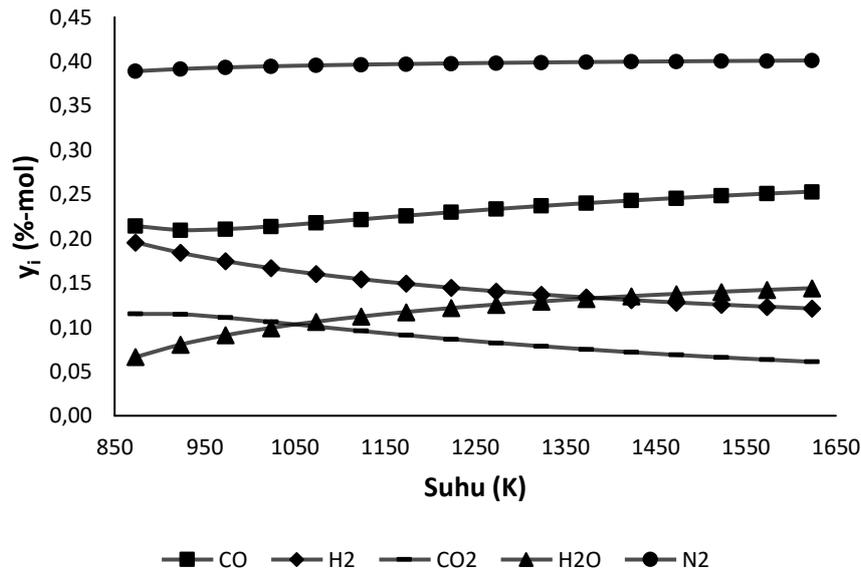
3.2 Analisa Sensitivitas Temperatur Gasifikasi terhadap Perolehan Gas Produser

Sistem gasifikasi yang dimodelkan dalam artikel ini tidak mengikutsertakan kadar air di dalam reaksinya, artinya proses pengeringan dilakukan di alat yang terpisah dengan proses pirolisa dan gasifikasi. Reaksi yang digunakan sebagai model kesetimbangan termodinamika adalah reaksi *water gas shift* (WGSR). Reaksi ini digunakan karena reaksi ini sudah mewakili hampir semua komponen gas produser (kecuali CH₄).

Reaksi gasifikasi berlangsung pada tekanan atmosferis dengan temperatur gasifikasi 800°C. Pada gambar 2 ditunjukkan bahwa pada temperatur 800°C komponen CO dan H₂ didalam gas sintesis cukup besar dibandingkan temperatur yang lebih tinggi. Hal ini juga terlihat pada gambar 3, yaitu rasio antara gas hidrogen (H₂) terhadap gas karbon monoksida (CO) memiliki harga yang terus menurun jika temperatur dinaikkan. Pada beberapa literatur menyebutkan bahwa proses gasifikasi dapat berlangsung pada temperatur diatas 800°C (Miccio et al., 2008). Konstanta kesetimbangan reaksi (K) dari model perhitungan neraca massa dan energi sama dengan harga K dari model perhitungan termodinamik, yaitu K=0,2618.

Tabel 3. Perbandingan nilai gas produser antara model yang dikembangkan (model homogen) dengan hasil eksperimen.

Komponen	Model yang dikembangkan	Wei et al. (2011)	Son et al. (2011)	Olgun et al. (2011)	Simone et al., (2012)	Mendiburu et al. (2014)	Fortunato et al. (2017)
CO	21,98	21,62	15,90	24,00	21,60	25,43	22,63
H ₂	17,90	19,19	16,50	13,50	17,60	19,15	18,43
CO ₂	12,10	11,58	15,30	12,00	12,00	10,44	9,07
CH ₄	2,46	2,41	2,10	3,00	2,30	2,48	3,03
N ₂	45,57	45,20	50,20	47,50	46,00	42,49	46,23
Suhu (°C)	862	850	850	900	900	843	850
RMSE	-	0,60	3,43	2,14	0,28	2,07	1,33



Gambar 2. Analisa sensitivitas temperatur gasifikasi terhadap komposisi gas produser

Agen oksidasi yang digunakan pada sistem gasifikasi biomassa berupa udara yang memiliki komposisi (%-mol) 21% oksigen dan 79% nitrogen. Penggunaan udara sebagai agen oksidasi memang memiliki banyak kelemahan akan tetapi dari segi ekonomi jauh lebih murah dibandingkan dengan oksigen ataupun kukus. Penggunaan udara juga akan memberikan efek terhadap peralatan di sisi hilir, yaitu pada saat pemisahan. Tentunya hal ini tidak menjadi masalah jika gas produser yang dihasilkan digunakan sebagai bahan bakar seperti untuk *gas engine* ataupun *diesel engine*. Pada gambar 2 diperlihatkan bahwa harga gas nitrogen (N_2) semakin tinggi seiring dengan naiknya temperatur gasifikasi. Pembentukan gas N_2 di dalam gas produser perlu dihindari karena akan mempengaruhi entalpi di aliran gas produser, dan juga mempengaruhi beban panas yang harus disuplai ke dalam sistem gasifikasi. Pada sistem ini panas yang disuplai agar reaksi dapat berlangsung yaitu sebesar 211,4 MW. Semakin banyak N_2 yang terlibat semakin besar panas yang harus dimasukkan ke dalam sistem.

Pada gambar 2 terlihat bahwa komposisi gas CO semakin besar seiring dengan naiknya temperatur. Komposisi CO jelas dipengaruhi oleh komposisi CO_2 , dimana CO sebagian besar dihasilkan dari reaksi boudouard dengan reaktan karbon dan CO_2 . Pada gambar 2 komposisi gas CO_2 terus mengalami penurunan seiring dengan naiknya temperatur hal itu berbanding terbalik dengan komposisi CO yang terus meningkat. Komposisi gas H_2 di dalam gas produser mengalami penurunan terhadap kenaikan temperatur, Schuster et al. (2001) menjelaskan bahwa seharusnya komposisi gas H_2 di dalam gas produser berbanding lurus dengan komposisi gas CO. Jika diperhatikan komposisi H_2O di dalam gas produser terus mengalami kenaikan, padahal jika dilihat dari reaksi yang membatasi sistem gasifikasi ini yaitu WGSR, H_2O

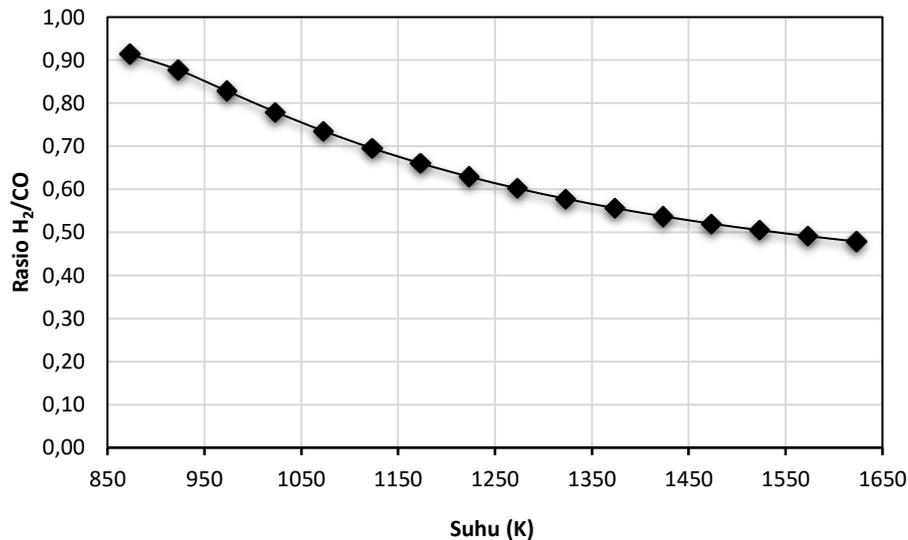
merupakan reaktan yang mempengaruhi perolehan (*yield*) gas H_2 di dalam gas produser. Bisa disimpulkan jika WGSR di dalam sistem gasifikasi ini tidak berjalan sebagai mestinya, hal itu diindikasikan dari komposisi gas H_2 yang terus menurun dan komposisi H_2O yang terus meningkat. Schuster et al. (2001) juga menyimpulkan dalam penelitiannya jika komposisi gas H_2 dapat diperbesar dengan menambahkan kukus ke dalam sistem gasifikasi sehingga reaksi WGSR dapat bergeser ke arah kanan yaitu ke arah produk.

3.3 Analisa Sensitivitas Temperatur Gasifikasi terhadap Rasio Gas H_2/CO

Pada gambar 3 diperlihatkan juga rasio antara gas H_2/CO yang terus mengalami penurunan. Hal ini tentu perlu diantisipasi dan dicarikan solusinya, karena gas produser yang dihasilkan dan kemudian akan dikonversi menjadi bahan kimia lainnya seperti FT-fuel, methanol, dan sebagainya perlu diperhatikan rasio antara H_2/CO yang akan masuk ke dalam reaktor.

Naiknya temperatur gasifier memberikan efek terhadap perolehan gas H_2 . Tingginya temperatur menyebabkan H_2 terkonversi menjadi H_2O . Sebagai hasilnya hal ini juga memberikan dampak menurunnya rasio molar H_2/CO di gas produser.

Komposisi yang dihasilkan di gas produser ini merupakan hasil simulasi dengan satu model reaksi. Jika ditinjau secara keseluruhan sistem gasifikasi ini memiliki lima persamaan reaksi yang mencakup seluruh komponen gas produser. Penurunan komposisi H_2 pada gambar 2 dan rasio H_2/CO pada gambar 3, dapat diminimalisir dengan memodelkan lebih dari satu persamaan reaksi. Selain itu gas produser yang dihasilkan, dimodelkan dengan mengikuti persamaan-persamaan gas nyata, sehingga penyimpangan yang terjadi di komposisi gas produser dapat diminimalisir.



Gambar 3. Rasio H₂/CO pada berbagai temperatur gasifikasi

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Simulasi sistem gasifikasi ini dibangun berdasarkan model kesetimbangan termodinamik stoikiometri dengan satu model reaksi (model homogen). Komposisi gas produser serta rasio H₂/CO memiliki nilai yang terbalik terhadap temperatur. Penyimpangan yang terjadi didalam simulasi ini dapat dikenali dari komposisi H₂ didalam gas produser. Reaksi yang dijadikan model kesetimbangan memperlihatkan bahwa reaksi bergeser ke arah kiri, sehingga komposisi CO dan H₂O di dalam gas produser semakin besar.

4.2 Saran

Kedepan, reaksi yang akan dijadikan model kesetimbangan termodinamik bisa lebih dari satu model reaksi (model heterogen) untuk meminimalisir penyimpangan yang terjadi. Dan metode penyelesaian persamaan-persamaan non-linier yang terbentuk dapat menggunakan metode komputasi yang memiliki kemampuan penyelesaian numerik yang jauh lebih baik, sehingga nilai yang dihasilkan lebih akurat.

5. DAFTAR PUSTAKA

Adnan M.A. et al., Enhancement of hydrogen production in a modified moving bed downdraft gasifier - A thermodynamic study by including tar, *Int. J. Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 42, No 16. P. 10971-10985.

Aydin E.S., Yucel O., Sadikoglu H. Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification, *Int. J. Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 43, No 2. P. 1105-1115.

Baruah D., Baruah D.C. Modeling of biomass gasification: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014. Vol. 39. P. 806-815.

Bridgwater A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 2012. Vol. 38. P. 68-94.

Cempa-Balewicz M. et al., Equilibrium Model of Steam Gasification of Coal, *J. Sustain. Min.* 2013. Vol. 12, No 2. P. 21-28.

Fortunato B. et al., Thermodynamic model of a downdraft gasifier, *Energy Convers. Manag.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 140. P. 281-294.

Huang H.-J., Ramaswamy S. Modeling biomass gasification using thermodynamic equilibrium approach., *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2009. Vol. 154, No 1-3. P. 14-25.

Huang J., Schmidt K.G., Bian Z. Removal and conversion of tar in Syngas from woody biomass gasification for power utilization using catalytic Hydrocracking, *Energies*. 2011. Vol. 4, No 8. P. 1163-1177.

Jarunthammachote S., Dutta A. Equilibrium modeling of gasification: Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers, *Energy Convers. Manag.* 2008. Vol. 49, No 6. P. 1345-1356.

Judd B. Feasibility of Producing Diesel Fuels From Biomass in New Zealand, *Biomass*. 2003. No June. P. 1-46.

Mendiburu A.Z. et al. Thermochemical equilibrium modeling of a biomass downdraft gasifier: Constrained and unconstrained non-stoichiometric models, *Energy*. 2014. Vol. 71. P. 624-637.

Miccio F. et al. Biomass gasification in internal circulating fluidized beds: A thermodynamic predictive tool, *Korean J. Chem. Eng.* 2008. Vol. 25, No 4. P. 721-726.

Olgun H., Ozdogan S., Yinesor G. Results with a bench scale downdraft biomass gasifier for agricultural and forestry residues, *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 2011. Vol. 35, No 1. P. 572-580.

Prins M.J. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, *Library*. 2005. 156 p.

Sansaniwal S.K., Rosen M.A., Tyagi S.K. Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 80, No March 2016. P. 23-43.

Schuster G. et al. Biomass steam gasification - An extensive parametric modeling study, *Bioresour. Technol.* 2001. Vol. 77, № 1. P. 71–79

Shayan E., Zare V., Mirzaee I. Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents, *Energy Convers. Manag.* 2018. Vol. 159, № August 2017. P. 30–41.

Simone M. et al. Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier, *Bioresour. Technol.* Elsevier Ltd, 2012. Vol. 116. P. 403–412.

Smith J.M., Ness H. Van, Abbott M.M. Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 2005. 817 p.

Son Y. Il et al. Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier, *Biomass and Bioenergy.* Elsevier Ltd, 2011. Vol. 35, № 10. P. 4215–4220.

Susanto H., Beenackers A.A.C.M. A moving-bed gasifier with internal recycle of pyrolysis gas, *Fuel.* 1996. Vol. 75, № 11. P. 1339–1347.

Wang L. et al. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production, *Biomass and Bioenergy.* 2008. Vol. 32, № 7. P. 573–581.

Wei L. et al. Co-gasification of hardwood chips and crude glycerol in a pilot scale downdraft gasifier, *Bioresour. Technol.* Elsevier Ltd, 2011. Vol. 102, № 10. P. 6266–6272.

Yin C.-Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses, *Fuel,* 2011, Vol. 90, № 3. P. 1128–1132.