

Pemodelan dan Simulasi Kinerja Downdraft Gasifier Menggunakan Teknik Minimisasi Energi Bebas Gibbs

Rio Nanda Novendra, Zuchra Helwani, Sri Helianty, Zulfansyah

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293
rionandanovendra@yahoo.co.id

ABSTRACT

Gibbs free energy minimization method has been used in modelling the performance of a downdraft gasifier. The performance is represented by the composition of resulting gas. Sixteen gases considered are H_2 , CO , CH_4 , H_2O , CO_2 , N_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , NO , NO_2 , N_2O , HCN , NH_3 , H_2S and SO_2 . The simulation is carried out making used of EXCEL. The result showed that the predicted value of model fit reasonably well with experimental data. The model was also used to investigate the influence of biomass composition, oxidant ratio and composition of oxidizing agent to composition of the resulting gas. Three kinds of biomass considered are oil palm shell, oil palm frond and empty fruit bunch. The oxidant ratio simulated is varied from 0 to 1 while composition of oxidizing agent is varied from 21% - 100% oxygen. The simulation result showed that those three parameters play an important role in gasification process which in combination can produce total H_2 and CO up to more than 85%.

Keyword : Gasification, modelling, downdraft gasifier, Gibbs free energy minimization.

1 Pendahuluan

Biomassa merupakan sumber energi yang tersedia di alam dalam jumlah besar. Limbah pertanian, perkebunan, peternakan dan sampah kota merupakan sumber - sumber penghasil biomassa. Selain ketersediaannya yang melimpah, biomassa juga merupakan sumber energi terbarukan. Dengan ketersediaan dalam jumlah besar dan kontinyu, biomassa memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi sumber energi alternatif pengganti energi fosil.

Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi belum dilakukan secara optimal, hanya sebagian kecil biomassa yang dimanfaatkan, seperti bahan bakar untuk memasak pada daerah pedesaan. Meskipun telah banyak penelitian ditujukan pada penggunaan biomassa sebagai sumber energi untuk bahan bakar cair kendaraan, seperti etanol dan biodiesel, penggunaan biomassa baru mencapai 2% dari energi biomassa dunia [Hall, 1997; Coyle, 2007]. Dengan demikian, konversi energi dari biomassa masih perlu ditingkatkan lagi.

Pemanfaatan biomassa secara termokimia dapat dilakukan melalui gasifikasi biomassa. Proses gasifikasi merupakan proses konversi yang memberikan kemudahan, baik dalam pemilihan bahan baku yang digunakan maupun produk akhir yang diinginkan. Berbagai jenis bahan baku seperti batubara, potongan kayu maupun sampah kota bisa dijadikan sebagai umpan *gasifier*. Proses gasifikasi mengubah biomassa menjadi produk yang lebih bernilai yaitu *syngas*. *Syngas* bisa digunakan pada *turbin gas* pembangkit listrik maupun

sebagai umpan reaksi katalitik Fischer-Tropsch untuk produksi bahan bakar cair.

Komposisi gas yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa bergantung pada kinerja *gasifier* yang digunakan. Komposisi gas hasil merupakan parameter evaluasi kinerja *gasifier* yang paling penting karena menentukan tingkat kelayakan *syngas* untuk digunakan pada aplikasi selanjutnya. Pemodelan *gasifier* untuk penentuan komposisi gas hasil akan memudahkan evaluasi kinerja *gasifier* sehingga membuat teknologi gasifikasi semakin kompetitif dan dapat diterapkan pada berbagai aplikasi.

Pendekatan kinetika dan kesetimbangan telah dikembangkan untuk memodelkan dan mengoptimasi *gasifier* biomassa [Buragohain dkk, 2010]. Model kinetika memperhitungkan laju reaksi berbagai reaksi simultan dan paralel yang terjadi di dalam *gasifier*. Meskipun model kinetika secara fisika lebih realistis, aplikasi model ini secara luas masih terbatas karena tidak bisa digeneralisasi. Model ini melibatkan parameter-parameter fisika dan laju kinetika yang biasanya tergantung dari masing-masing tipe biomassa, sesuai dengan kandungan selulosa, hemiselulosa dan lignin [Atnaw dkk, 2011]. Sebaliknya, model kesetimbangan memprediksi batas konversi yang dapat dicapai pada kondisi yang berbeda-beda, sehingga bisa memberikan dasar yang bermanfaat untuk proses perancangan dan proses optimasi.

Metode kalkulasi kesetimbangan kimia diklasifikasikan dalam metode stoikiometri dan nonstoikiometri. Metode stoikiometri memperhitungkan berbagai reaksi yang terjadi dalam proses gasifikasi dan

konstanta kesetimbangannya. Metode ini biasanya digunakan untuk menentukan kesetimbangan kimia pada sistem yang sederhana. Untuk menentukan kesetimbangan kimia pada sistem yang melibatkan multifasa dan banyak spesies, biasanya digunakan teknik minimisasi energi bebas Gibbs atau lebih dikenal dengan nama metode non-stoikiometri [Vonka dan Leitner, 2000]. Metode non-stoikiometri memberikan kemudahan yaitu tidak membutuhkan analisa stoikiometri sistem. Metode non-stoikiometri memungkinkan kalkulasi pada aliran umpan dengan rumus kimia dan senyawa kimia yang tidak diketahui dengan mudah. Kemudahan ini disebabkan karena pada metode non-stoikiometri tidak memperhitungkan neraca massa stoikiometri dan konstanta kesetimbangan reaksi yang bergantung pada jenis reaksi dan rumus kimia senyawa.

Model berdasarkan kesetimbangan stoikiometri telah dikembangkan untuk mempelajari kinerja *downdraft gasifier* dengan biomassa berbeda [Zainal dkk, 2001]. Model digunakan untuk menginvestigasi pengaruh biomassa dan kandungan air yang berbeda terhadap komposisi gas. *Heating value* gas yang diprediksi oleh model cukup sesuai dengan yang diperoleh dari data eksperimen. Pendekatan yang sama digunakan oleh Jarunghammachote dkk [2007] untuk memprediksi komposisi gas *downdraft gasifier*. Nilai prediksi model dibandingkan dengan hasil eksperimen peneliti lain. Beberapa koefisien untuk konstanta kesetimbangan reaksi *water-gas shift* dikoreksi. Hasil prediksi model menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen.

Kesetimbangan nonstoikiometri dan stoikiometri memiliki konsep yang sama. Metode nonstoikiometri dapat dikembangkan untuk memprediksi komposisi gas hasil *downdraft gasifier* dengan metode kalkulasi yang lebih sederhana sehingga mempermudah proses simulasi pada berbagai rentang parameter operasi *gasifier*. Jenis biomassa, jumlah oksigen pengoksidasi dan komposisi agen gasifikasi yang berbeda akan disimulasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap komposisi gas hasil pada proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit, pelepah sawit dan tandan kosong sawit.

2 Metode Penelitian

Langkah awal dalam penyusunan model adalah pengidentifikasian sistem. Proses identifikasi sistem ini menghasilkan asumsi-asumsi yang selanjutnya dikembangkan untuk menyusun model matematika sistem. Data-data yang diperlukan dimasukkan ke dalam model matematika untuk memverifikasi model dengan data eksperimen. Model yang telah diverifikasi kemudian disimulasi. Hasil dari simulasi adalah berupa informasi mengenai pengaruh komposisi biomassa, jumlah pengoksidasi dan komposisi agen gasifikasi terhadap komposisi gas hasil. Diagram blok prosedur penelitian ditampilkan pada Gambar 1.

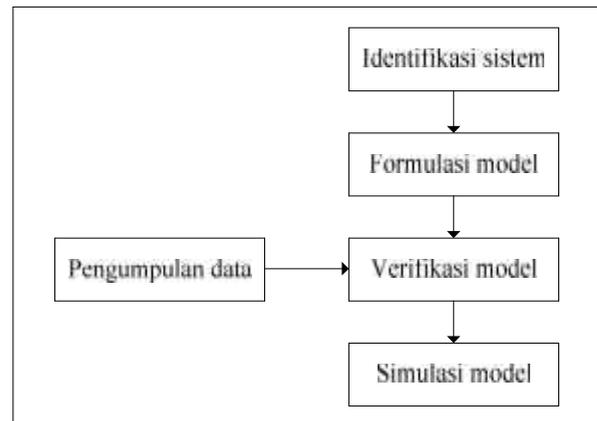
2.1 Identifikasi Sistem

Dalam pemodelan ini ditetapkan beberapa asumsi yaitu:

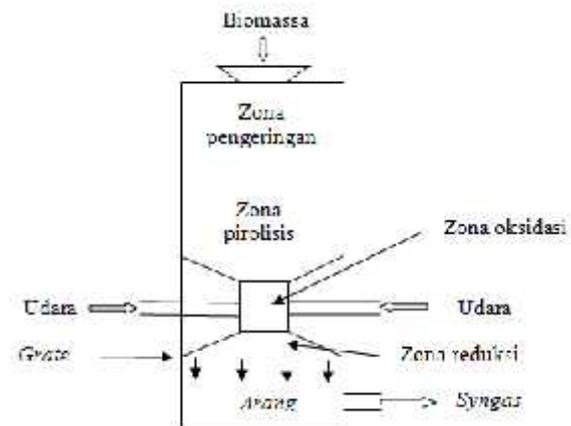
1. Suhu *syngas* dianggap sama dengan suhu pada zona reduksi

2. *Residence time* di dalam reaktor dianggap cukup untuk mencapai kondisi kesetimbangan
3. Semua ter dianggap teroksidasi
4. *Pathway* reaksi dan pembentukan intermediet tidak dimodelkan
5. Komponen gas hasil terdiri dari H_2 , CO , CH_4 , H_2O , CO_2 , N_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , NO , NO_2 , N_2O , HCN , NH_3 , H_2S , SO_2 .

Skema *downdraft gasifier* ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram blok prosedur penelitian.



Gambar 2. Skema *downdraft gasifier*

Variabel dalam penelitian ini adalah jenis biomassa, rasio oksigen pengoksidasi dan komposisi agen pengoksidasi. Biomassa yang akan disimulasi terdiri dari cangkang sawit, pelepah sawit, dan tandan kosong sawit, rasio oksigen pengoksidasi divariasikan dari 0 sampai 1, sedangkan agen pengoksidasi yang akan disimulasi terdiri dari udara, udara dengan oksigen yang diperkaya, dan oksigen murni.

2.2 Pengembangan Model

2.2.1 Persamaan Energi Bebas Gibbs Sistem

Dalam pemodelan ini, komponen gas yang akan disimulasi terdiri dari 16 komponen yaitu hidrogen, karbon monoksida, metana, uap air, karbon dioksida, nitrogen, nitrogen dioksida, nitrogen monoksida, nitrous oksida, belerang dioksida, etana, etena, amonia, asam sianida dan hidrogen sulfida. Persamaan energi

bebas Gibbs sistem yang terdiri dari 16 komponen tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$G^t = \sum_{i=1}^{16} n_i \Delta G_{f,i} + n_i RT \ln \left(\frac{n_i}{\sum_{i=1}^{16} n_i} \right) \quad (1)$$

Karena energi bebas Gibbs pembentukan merupakan fungsi entalpi dan entropi, persamaan 1 juga dapat dinyatakan dalam bentuk berikut.

$$G^t = \sum_{i=1}^{16} n_i \left(\Delta H_{f,i}(T) - T \Delta S(T) \right) + n_i RT \ln \left(\frac{n_i}{\sum_{i=1}^{16} n_i} \right) \quad (2)$$

$$G^t = \sum_{i=1}^{16} n_i \left(\left(\Delta H_{f,i}(T) + \int_T^T \Delta C_{p,reaksi} dT \right) - T \left(\Delta S_{f,i}(T) + \int_T^T \frac{\Delta C_{p,reaksi}}{T} dT \right) \right) + n_i RT \ln \left(\frac{n_i}{\sum_{i=1}^{16} n_i} \right) \quad (3)$$

dimana $\Delta C_{p,reaksi}$ merupakan selisih antara kapasitas panas senyawa dengan kapasitas panas unsur atau komponen penyusunnya.

2.2.1 Persamaan Neraca Massa

Dalam kalkulasi neraca massa tanpa melibatkan reaksi – reaksi yang terjadi, perhitungan harus dilakukan dengan meninjau jumlah mol unsur. Karena jumlah mol unsur yang masuk sama dengan jumlah mol unsur yang keluar, maka jumlah total mol unsur pada umpan biomassa dan pengoksidasi akan sama dengan jumlah total mol unsur pada gas hasil.

Jumlah mol unsur masuk = jumlah mol unsur keluar

$$\sum_{j=1}^n m_{j,in} = \sum_{j=1}^n m_{j,out} \quad (4)$$

m_j merupakan unsur ke-j. Untuk tiap – tiap komponen gas hasil, jumlah molekul unsur yang terdapat pada tiap komponen dapat dinyatakan sebagai hasil kali jumlah atom unsur pada komponen ($v_{i,j}$) dengan jumlah mol komponen (n_i), sehingga

$$\sum_{i=1}^n v_{i,j} n_i = B_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, k \quad (5)$$

B_j merupakan jumlah mol total unsur ke-j pada umpan. Unsur penyusun biomassa yang terlibat dalam reaksi gasifikasi dianggap hanya terdiri dari C, H, O, N dan S sehingga hasil penguraian persamaan menghasilkan persamaan – persamaan berikut:

$$n_{CO} + n_{CH_4} + n_{CO_2} + 2n_{C_2H_2} + 2n_{C_2H_4} + 2n_{C_2H_6} + n_{HCN} = B_C \quad (6)$$

$$2n_{H_2} + 4n_{CH_4} + 2n_{H_2O} + 2n_{C_2H_2} + 4n_{C_2H_4} + 6n_{C_2H_6} + 3n_{NH_3} + n_{HCN} + 2n_{H_2S} = B_H \quad (7)$$

$$n_{CO} + n_{H_2O} + 2n_{CO_2} + 2n_{NO_2} + n_{NO} + n_{N_2O} + 2n_{SO_2} = B_O \quad (8)$$

$$2n_{N_2} + n_{NO_2} + n_{NO} + 2n_{N_2O} + n_{NH_3} + n_{HCN} = B_N \quad (9)$$

$$n_{SO_2} + n_{H_2S} = B_S \quad (10)$$

B_C, B_H, B_O, B_N dan B_S merupakan jumlah mol unsur C, H, O, N dan S pada umpan. B_O dan B_N dapat dituliskan dalam fungsi rasio oksigen pengoksidasi dan komposisi agen gasifikasi seperti berikut.

$$B_O = F_O + \alpha \theta \quad (11)$$

$$B_N = F_N + \alpha \beta \theta \quad (12)$$

Dimana F_O merupakan jumlah mol unsur oksigen pada biomassa, F_N merupakan jumlah mol unsur nitrogen pada biomassa, α merupakan rasio pengoksidasi, β merupakan rasio antara nitrogen dengan oksigen pada agen gasifikasi dan θ merupakan jumlah kebutuhan oksigen untuk pembakaran sempurna yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\theta = 2F_C + 0.5F_H + 2F_S \quad (13)$$

F_C, F_H , dan F_S merupakan jumlah mol unsur C, H dan S pada biomassa. F_C, F_H , dan F_S dapat dianggap sama dengan B_C, B_H dan B_S jika agen gasifikasi hanya terdiri dari komponen oksigen dan nitrogen. F_C, F_H , dan F_S juga dapat dinyatakan sebagai fungsi kadar analisis *ultimate* biomassa seperti berikut.

$$F_C = \frac{w_C W}{12} \quad (14)$$

$$F_H = \frac{w_H W}{1} \quad (15)$$

$$F_O = \frac{w_O W}{16} \quad (16)$$

$$F_N = \frac{w_N W}{14} \quad (17)$$

$$F_S = \frac{w_S W}{32} \quad (18)$$

w_C, w_H, w_O, w_N dan w_S merupakan kadar analisis *ultimate* biomassa dan W adalah basis dalam satuan massa. $W, w_C, w_H, w_O, w_N, w_S, T, \alpha$ dan β merupakan variabel *independent* yang dapat ditentukan nilainya sedangkan $n_{H_2}, n_{CO}, n_{CH_4}, n_{CO_2}, n_{H_2O}, n_{N_2}, n_{C_2H_2}, n_{C_2H_4}, n_{C_2H_6}, n_{HCN}, n_{NH_3}, n_{NO}, n_{NO_2}, n_{N_2O}, n_{H_2S}$ dan n_{SO_2} merupakan variabel *dependent* yang akan hitung melalui proses kalkulasi.

Permasalahan yang akan diselesaikan adalah meminimisasi fungsi objektif G^t dengan *constraint*-nya neraca unsur. Permasalahan optimasi ini bisa diselesaikan dengan metode Lagrange. Metode Lagrange mengubah permasalahan optimasi dengan n variabel dan k *constraint* menjadi persamaan dengan $n + k$ variabel tanpa *constraint*. Penggunaan metode Lagrange membutuhkan manipulasi fungsi objektif dan *constraint*. Manipulasi dilakukan dengan cara mengalikan persamaan – persamaan *constraint* dengan bilangan Lagrange λ_j , kemudian dikurangkan dari persamaan fungsi objektif G^t . Hasil manipulasi fungsi objektif dan *constraint* menghasilkan persamaan berikut.

$$L = G^t - \sum_{j=1}^k \lambda_j \left(\sum_{i=1}^N v_{i,j} n_i - B_j \right) \quad (19)$$

Untuk menemukan titik minimumnya, fungsi L diturunkan terhadap masing – masing variabel n_i dan λ_j . Turunan parsial fungsi L kemudian diset sama dengan nol. Hasil turunan parsial terhadap masing – masing variabel akan menghasilkan persamaan dengan jumlah persamaan dan variabel 21 ($n = 16$ dan $k = 5$).

$$\frac{dL}{dn_i} = 0 \text{ dan } \frac{dL}{d\lambda_j} = 0 \quad (20)$$

Bentuk umum $\frac{\partial L}{\partial n_i}$ untuk tiap komponen adalah seperti berikut.

$$\frac{\partial L}{\partial n_i} = \Delta G_{f,i} + \frac{1}{n_i} x \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^{16} n_k}{\sum_{i=1}^{16} n_i} - \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^{16} n_k RT}{\sum_{i=1}^{16} n_i} - \sum_{j=1}^5 v_{i,j} \lambda_j \quad (21)$$

sedangkan untuk $\frac{\partial L}{\partial \lambda_j}$, bentuk persamaan umumnya

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_j} = \sum_{i=1}^{16} v_{i,j} n_i - B_j \quad (21)$$

Hasil turunan persamaan L terhadap masing – masing variabel akan menghasilkan sistem persamaan nonlinier dengan jumlah persamaan dan variabel $i + j$.

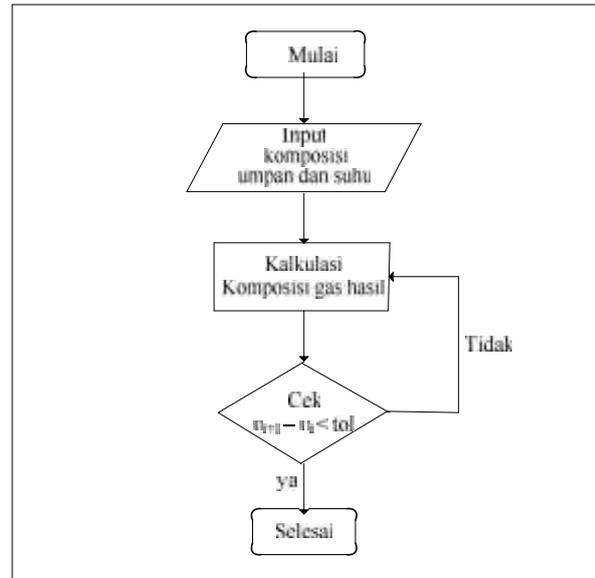
2.3 Penyelesaian Model

Simulasi model pada penelitian ini menggunakan Microsoft Excel. Optimisasi diselesaikan menggunakan fungsi *add-in* Solver. Diagram balok algoritma perhitungan dapat dilihat pada Gambar 3. Data yang menjadi masukan dalam model adalah komposisi umpan yang terdiri dari komposisi biomassa, jumlah oksigen pengoksidasi, komposisi agen gasifikasi, suhu dan basis. Setelah data diinputkan, komposisi dari gas hasil diiterasi hingga nilai G_t mencapai titik minimum.

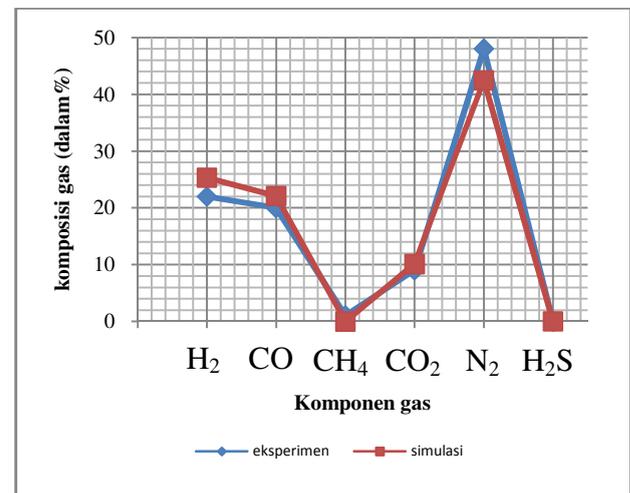
3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Verifikasi Model

Untuk melihat kesesuaian model dengan eksperimen, model disimulasi dan dibandingkan dengan data eksperimen. Data perbandingan diambil dari data eksperimen Sivakumar dan Mohan (2010). Jenis biomassa yang disimulasi adalah sekam padi. Suhu gasifier dan rasio oksigen yang digunakan adalah 800°C dan 0,25. Hasil simulasi ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Algoritma perhitungan penyelesaian model.



Gambar 4. Kurva perbandingan antara komposisi gas hasil simulasi dengan eksperimen proses gasifikasi berbahan baku sekam padi.

Gambar 4 menampilkan kurva perbandingan antara komposisi gas hasil simulasi dengan eksperimen proses gasifikasi berbahan baku sekam padi. Komposisi gas yang diperoleh dari simulasi model memperlihatkan *trend* yang sama dengan data yang diperoleh dari eksperimen. Selisih antara persentase komposisi gas hasil simulasi dengan eksperimen secara berturut – turut

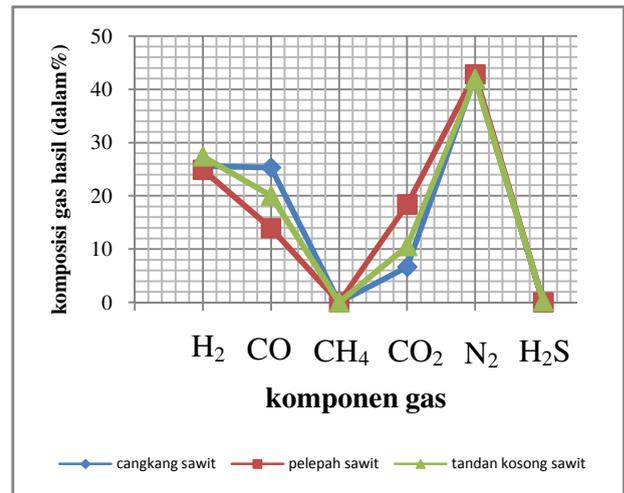
dari H₂ sampai H₂S adalah 3,323%; 2,102%; 1%; 1,113%; 5,556%; 0,019%.

Dari kurva dapat diamati bahwa terdapat sedikit perbedaan antara persentase gas hasil simulasi dengan persentase gas hasil eksperimen. Perbedaan ini mungkin diakibatkan karena komposisi biomassa yang diinputkan pada model merupakan komposisi analisis *ultimate* biomassa yang merupakan analisis dengan basis kering (*dry basis*). Analisis *ultimate* biomassa memberikan data komposisi unsur penyusun biomassa seperti C, H, O, N dan S dengan kadar air 0%. Pada eksperimen, biomassa yang digunakan mungkin masih mengandung sejumlah kecil air. Air pada biomassa akan mempengaruhi komposisi umpan biomassa. Karena komposisi kesetimbangan dipengaruhi oleh komposisi umpan, maka perbedaan komposisi umpan pada eksperimen dengan komposisi umpan pada proses simulasi menghasilkan persentase gas hasil yang berbeda. Perbedaan komposisi gas hasil simulasi dengan hasil eksperimen juga mungkin disebabkan pada asumsi kondisi setimbang yang ditetapkan. Kondisi setimbang merupakan kondisi dimana hanya terjadi perubahan komposisi secara mikro pada reaksi. Kondisi ideal seperti ini mungkin sulit untuk dicapai pada kondisi *real*, sehingga masih terdapat perbedaan antara data *real* dengan data simulasi.

3.2. Pengaruh Komposisi Biomassa Terhadap Komposisi Gas Hasil Gasifikasi

Untuk melihat pengaruh dari komposisi biomassa terhadap komposisi gas yang dihasilkan, model disimulasi dengan memvariasikan jenis biomassa yang digunakan sebagai bahan baku. Kurva pengaruh komposisi biomassa terhadap komposisi gas hasil gasifikasi ditampilkan pada Gambar 5. Kondisi proses gasifikasi yang digunakan adalah suhu 800 °C, rasio oksigen pengoksidasi 0,25 dan agen gasifikasi udara (21% oksigen dan 79% nitrogen).

Gambar 5 menampilkan data hasil simulasi proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit, pelepah sawit dan tandan kosong sawit. Komposisi gas hasil simulasi proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit adalah H₂ 25,592%, CO 25,319%, CH₄ 0%, CO₂ 6,683%, N₂ 42,292% dan H₂S 0,114%. Komposisi gas hasil simulasi untuk pelepah sawit adalah H₂ 24,9%, CO 13,895%, CH₄ 0%, CO₂ 18,369%, N₂ 42,805% dan H₂S 0,031% sedangkan untuk proses gasifikasi berbahan baku tandan kosong sawit, komposisi gas yang dihasilkan adalah H₂ 27,401%, CO 20,008%, CH₄ 0%, CO₂ 10,567%, N₂ 41,865% dan H₂S 0,16%. Dapat dilihat bahwa dari ketiga jenis biomassa yang digunakan, proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit menghasilkan jumlah total H₂ dan CO paling besar yaitu 50,911% (H₂ 25,592% dan CO 25,319%). Proses gasifikasi berbahan baku tandan kosong sawit menghasilkan jumlah total H₂ dan CO sebesar 47,409% (H₂ 27,401% dan CO 20,008%), lebih tinggi dibandingkan proses gasifikasi berbahan baku pelepah sawit yang hanya menghasilkan jumlah total H₂ dan CO sebesar 38,795% (H₂ 24,9% dan CO 13,895%).

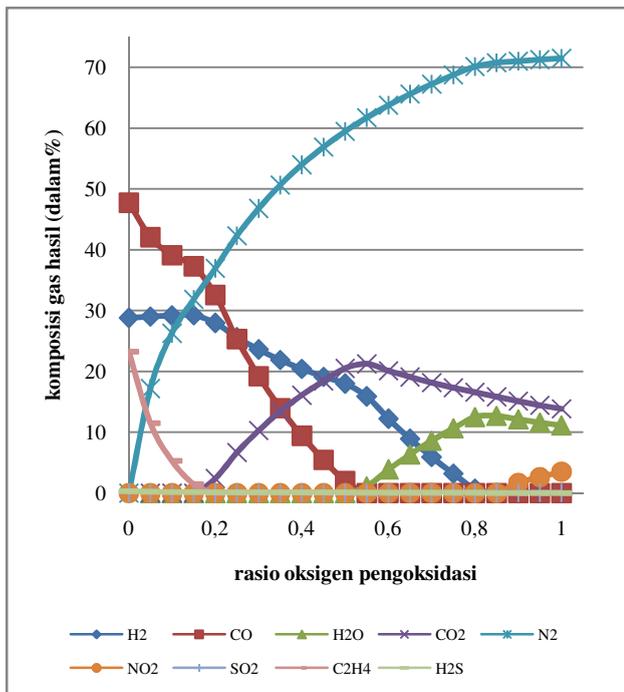


Gambar 5. Kurva pengaruh komposisi biomassa terhadap komposisi gas hasil gasifikasi.

Perbedaan komposisi gas yang dihasilkan disebabkan perbedaan komposisi umpan biomassa yang digunakan. Komposisi unsur hidrogen 7,33% pada tandan kosong sawit menyebabkan komposisi H₂ yang lebih tinggi yaitu 27,401%, dibandingkan komposisi hidrogen pada proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit dan pelepah sawit yang hanya menghasilkan persentase H₂ sebesar 25,591% dan 24,9% dengan komposisi unsur hidrogen pada bahan baku masing – masing 7,2% dan 5,48%. Unsur C pada biomassa berkontribusi pada jumlah total CO dan CO₂. Komposisi C yang lebih tinggi menghasilkan jumlah total CO dan CO₂ yang lebih tinggi. Pada proses gasifikasi dengan agen gasifikasi udara, peningkatan jumlah total mol CO dan CO₂ tidak selalu diiringi dengan peningkatan persentase total CO dan CO₂. Hal ini disebabkan karena pada proses gasifikasi menggunakan udara, jumlah N₂ berbanding lurus dengan komposisi C pada umpan yang menyebabkan jumlah mol total juga meningkat. Unsur O pada biomassa berkontribusi pada pembentukan CO dan CO₂. Unsur O yang tinggi pada biomassa memberikan dampak negatif terhadap kualitas *syngas* karena mendorong pembentukan CO₂ dibanding CO. Hal ini dapat dilihat pada proses gasifikasi berbahan baku pelepah sawit. Komposisi unsur O yang mencapai 49,68% menyebabkan komposisi CO₂ yang lebih besar yaitu 18,369%. Jumlah ini lebih tinggi dibandingkan komposisi CO₂ pada proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit dan tandan kosong sawit yang hanya menghasilkan persentase CO₂ sebesar 6,683% dan 10,567%. Kadar sulfur pada biomassa berkontribusi pada pembentukan senyawa sulfur. Kadar sulfur yang tinggi cenderung menghasilkan persentase senyawa sulfur yang lebih besar. Proses gasifikasi berbahan baku tandan kosong sawit yang mengandung kadar sulfur paling tinggi juga menghasilkan persentase H₂S yang paling tinggi yaitu 0,16%. Persentase H₂S yang dihasilkan tergolong kecil jika dibandingkan persentase senyawa lain. Meskipun demikian, pembentukan H₂S ini perlu diperhatikan karena bersifat sangat toksik.

3.3 Pengaruh Rasio Oksigen Pengoksidasi Terhadap Komposisi Gas Hasil Gasifikasi

Kurva pengaruh rasio oksigen pengoksidasi terhadap gas hasil gasifikasi ditampilkan pada Gambar 6. Kondisi proses yang digunakan adalah suhu 800 °C dan agen gasifikasi udara (21% oksigen dan 79% nitrogen). Komponen CH₄, NO, N₂O, C₂H₂, C₂H₆, NH₃ dan HCN tidak ditampilkan pada grafik karena pada rentang parameter operasi gasifikasi yang digunakan, persentase komponen – komponen tersebut bernilai nol.



Gambar 6. Kurva pengaruh rasio oksigen pengoksidasi terhadap gas hasil gasifikasi berbahan baku cangkang sawit.

Gambar 6 menampilkan kurva pengaruh rasio oksigen pengoksidasi terhadap komposisi gas hasil gasifikasi berbahan baku cangkang sawit. Dari kurva dapat dilihat bahwa persentase C₂H₄, H₂S, H₂ dan CO mengalami penurunan dengan meningkatnya rasio oksigen pengoksidasi yang digunakan. Persentase C₂H₄ mengalami penurunan yang signifikan hingga rasio oksigen pengoksidasi mendekati 0,2, sedangkan untuk H₂, CO dan H₂S, *trend* kurva memperlihatkan gradien penurunan yang lebih rendah. N₂ merupakan komponen gas yang mengalami peningkatan drastis dengan naiknya rasio oksigen pengoksidasi.

CO₂, H₂O, NO₂ dan SO₂ merupakan komponen yang tidak terdapat pada rasio oksigen pengoksidasi yang relatif kecil. Komponen CO₂ baru terlihat pada rasio oksigen pengoksidasi sekitar 0,2. Persentase CO₂ kemudian terus mengalami peningkatan hingga rasio oksigen pengoksidasi sekitar 0,4-0,6. *Trend* yang sama juga terjadi untuk komponen H₂O. H₂O baru terlihat pada rasio oksigen pengoksidasi 0,55, kemudian terus mengalami peningkatan hingga rasio oksigen pengoksidasi 0,85 dengan persentase 12,707%. Persentase H₂O selanjutnya turun hingga rasio oksigen pengoksidasi 1. Komponen NO₂ baru terlihat pada rasio

pengoksidasi yang relatif tinggi yaitu pada rasio oksigen pengoksidasi mendekati 1. Persentase NO₂ kemudian terus mengalami peningkatan dengan meningkatnya rasio oksigen pengoksidasi. Sama halnya dengan NO₂, SO₂ juga terbentuk pada rasio pengoksidasi yang relatif tinggi. SO₂ baru terbentuk pada rasio oksigen pengoksidasi 0,85 dengan persentase yang relatif kecil yaitu 0,056%, selanjutnya mengalami sedikit penurunan hingga rasio pengoksidasi 1.

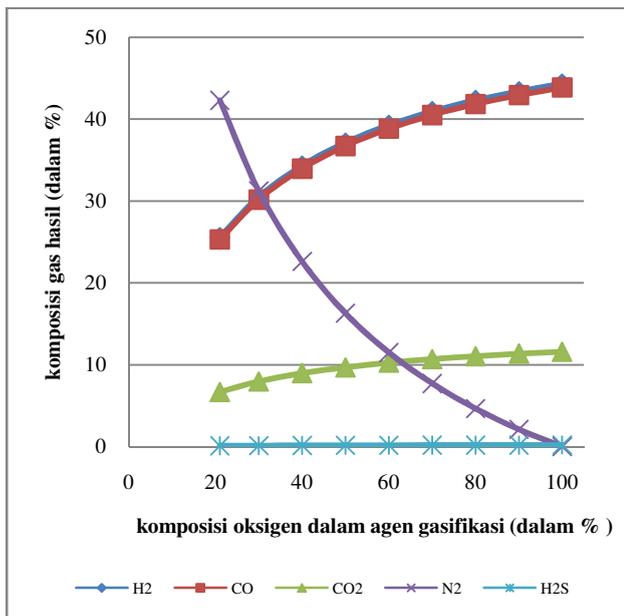
Dari ketiga jenis biomassa yang disimulasi dapat dilihat bahwa rasio oksigen pengoksidasi berpengaruh terhadap komposisi gas yang dihasilkan. Pada rasio oksigen pengoksidasi yang relatif rendah, komponen – komponen yang dihasilkan merupakan senyawa – senyawa yang tidak teroksidasi sempurna seperti H₂, CO, dan H₂S. Pembentukan komponen H₂ lebih dominan dari H₂O pada rentang rasio oksigen pengoksidasi 0 sampai 0,65. Pembentukan CO juga lebih dominan daripada CO₂ pada rasio oksigen yang rendah. Pembentukan CO lebih dominan daripada CO₂ pada rentang rasio oksigen pengoksidasi 0 sampai 0,35. Rasio oksigen pengoksidasi yang rendah juga mendorong pembentukan H₂S daripada SO₂. Pembentukan H₂S lebih dominan daripada SO₂ hingga pada rasio oksigen pengoksidasi 0,8.

Gambar 6 juga menunjukkan bahwa karbon lebih mudah teroksidasi daripada unsur – unsur lainnya seperti hidrogen, belerang dan nitrogen. CO₂ telah terbentuk pada rasio oksigen pengoksidasi 0,2, untuk pembentukan H₂O dibutuhkan rasio oksigen pengoksidasi 0,55, sedangkan untuk NO₂ dan SO₂ dibutuhkan rasio oksigen pengoksidasi yang lebih tinggi yaitu 0,9 dan 0,85. Perbedaan tingkat kemudahan pembentukan komponen – komponen tersebut disebabkan karena pada kondisi dengan rasio oksigen yang relatif kecil akan terjadi kompetisi pada reaksi – reaksi yang mengkonsumsi oksigen. Berdasarkan tinjauan termodinamika, reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih rendah akan lebih mudah berlangsung daripada reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih tinggi. Perbedaan energi bebas Gibbs reaksi menentukan tingkat spontanitas reaksi. Reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih rendah bersifat lebih spontan daripada reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih tinggi. Kecenderungan ini menyebabkan O lebih mudah bereaksi dengan C yang lebih spontan (energi bebas Gibbs reaksi yang lebih rendah) untuk membentuk CO₂ daripada bereaksi dengan H, S dan N untuk membentuk H₂O, SO₂, dan NO₂. Kecenderungan tersebut juga menyebabkan H₂ dan H₂S lebih dominan daripada H₂O dan SO₂ pada rasio oksigen pengoksidasi yang rendah.

3.4. Pengaruh Komposisi Agen Gasifikasi Terhadap Komposisi Gas Hasil Gasifikasi

Untuk melihat pengaruh komposisi agen gasifikasi terhadap komposisi gas hasil, model disimulasi dengan memvariasikan komposisi agen gasifikasi. Komposisi agen gasifikasi divariasikan mulai dari persentase oksigen 21% (persentase oksigen pada udara) hingga persentase oksigen 100% (oksigen murni). Kondisi proses yang digunakan adalah suhu 800 °C dan rasio

oksigen pengoksidasi 0,25. Grafik hasil data simulasi ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva pengaruh komposisi oksigen dalam agen gasifikasi terhadap gas hasil gasifikasi berbahan baku cangkang sawit.

Gambar 7 menampilkan kurva pengaruh komposisi agen pengoksidasi terhadap komposisi gas hasil gasifikasi berbahan baku cangkang sawit. Dari grafik dapat dilihat bahwa komposisi nitrogen pada gas hasil berkurang dengan meningkatnya komposisi oksigen dalam agen gasifikasi. Komposisi nitrogen pada gas hasil turun dari persentase lebih dari 40% pada komposisi agen gasifikasi oksigen 21% menjadi 0% pada komposisi agen gasifikasi oksigen 100%. Gradien penurunan kadar nitrogen tampak signifikan pada peningkatan kadar oksigen dari agen gasifikasi oksigen 21% ke 30% dimana persentase nitrogen turun lebih dari 10% dari persentase di atas 40% menjadi sekitar 30%. Gradien penurunan kadar nitrogen pada gas hasil kemudian menurun hingga komposisi agen gasifikasi oksigen 100%. Dari gambar juga dapat dilihat bahwa persentase hidrogen dan karbonmonoksida mengalami kenaikan dengan meningkatnya kadar oksigen pada agen gasifikasi. Untuk proses gasifikasi berbahan baku cangkang sawit, persentase hidrogen meningkat dari 25,292% pada komposisi agen gasifikasi oksigen 21% menjadi 44,348% pada komposisi pada komposisi oksigen 100% sedangkan CO meningkat dari 25,319% pada komposisi agen gasifikasi oksigen 21% menjadi 43,874% pada komposisi oksigen 100%. Grafik juga menunjukkan bahwa peningkatan kadar oksigen dari 70% menjadi 100% tidak memberikan kenaikan yang lebih dari 5% terhadap persentase CO dan H₂, untuk setiap kenaikan kadar oksigen sebesar 10% dari 70% ke 100%, hanya menyebabkan kenaikan persentase H₂ dan CO kurang dari 1,5%.

Peningkatan kadar oksigen pada agen gasifikasi memberikan pengaruh yang signifikan baik terhadap peningkatan H₂ dan CO maupun terhadap penurunan

kadar N₂ pada komposisi agen gasifikasi hingga kadar agen gasifikasi oksigen 80%. Peningkatan komposisi oksigen yang lebih dari 80% tidak memperlihatkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kadar H₂ dan CO dimana untuk setiap peningkatan kadar oksigen 10% dari 80% ke 100%, persentase H₂ dan CO hanya mengalami peningkatan sekitar 1%. Hasil yang sama juga dapat dilihat untuk N₂, dimana untuk setiap peningkatan kadar oksigen 10% dari 80% ke 100%, persentase N₂ hanya turun sekitar 2%.

4. Kesimpulan

Model yang dikembangkan pada penelitian ini dapat memprediksi komposisi gas hasil gasifikasi terhadap perubahan jenis biomassa, rasio pengoksidasi dan komposisi agen gasifikasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa selisih persentase komposisi gas hasil simulasi dengan hasil eksperimen berada pada kisaran di bawah 6%. Selain itu, dari hasil simulasi komposisi gas hasil terhadap variasi komposisi biomassa, rasio pengoksidasi dapat disimpulkan bahwa unsur O pada biomassa berkontribusi pada pembentukan CO₂ yang lebih dominan daripada CO, sedangkan rasio oksigen pengoksidasi yang kecil cenderung mendorong pembentukan senyawa – senyawa hidrokarbon. Peningkatan kadar oksigen pada agen pengoksidasi juga sangat berperan penting pada proses gasifikasi dimana pada kombinasi jenis biomassa cangkang sawit, rasio pengoksidasi 0,25 dan kadar oksigen di atas 70%, dapat dihasilkan kadar total H₂ dan CO hingga persentase melebihi 85%.

Daftar Pustaka

- Atnaw, S.M., Sulaiman, S.A., Yusup, S., 2011, A Simulation Study of Downdraft Gasification of Oil-Palm Fronds Using ASPEN PLUS, *Journal Of Applied Sciences*, Hal. 1-8
- Buragohain, B., Mahanta, P., Moholkar, V.S., 2010, Thermodynamic Optimization of Biomass Gasification for Decentralized Power Generation and Fischer-Tropsch Synthesis, *Energy*, Vol. 35, Hal. 2557-2579.
- Coyle, W., 2007, The Future of Biofuels: A Global Perspective, *Amber Waves*, Vol. 5, Hal. 24-29.
- Foley, G dan Barnard, G., 1985, Biomass Gasification in Developing Countries, *Earthcan*, London,UK.
- Hall, D.O., 1997, Biomass Energy in Industrialised Countries - A View Of The Future. *For Ecol. Manage.* Vol. 91, Hal. 17-45.
- Jarunghammachote, S., dan Dutta, A., 2007, Thermodynamic Equilibrium Model and Second Law Analysis of a Downdraft Waste Gasifier, *Energy*, Vol. 32, Hal. 1660-1669.
- Zainal, Z., Ali, R., Lean, C.H., Seetharamu, K.N., 2001, Prediction of Performance of Downdraft Gasifier Using Equilibrium Modeling for Different Biomass Materials, *Energy*, Vol 42, Hal.1499-1515.

Daftar simbol

n_i mol unsur ke-i

$\Delta G_{f,i}$	energi bebas Gibbs pembentukan komponen i (MJ/kmol)
G^t	energi bebas Gibbs sistem (MJ/kmol)
R	konstanta gas universal (Pa.m ³ /mol.K)
T	suhu (K)
F_C	jumlah mol unsur C pada biomassa
F_H	jumlah mol unsur H pada biomassa
F_O	jumlah mol unsur O pada biomassa
F_N	jumlah mol unsur N pada biomassa
F_S	jumlah mol unsur S pada biomassa
w_C	persentase unsur C pada analisis ultimate biomassa
w_H	persentase unsur H pada analisis ultimate biomassa
w_O	persentase unsur O pada analisis ultimate biomassa
w_N	persentase unsur N pada analisis ultimate biomassa

w_S	persentase unsur S pada analisis ultimate biomassa
W	basis (kg)
λ_i	konstanta Lagrange
L	persamaan Lagrange
$v_{i,j}$	jumlah atom ke-j pada komponen ke-i