

## Gasifikasi-uap Biomassa untuk Menghasilkan Hidrogen – Simulasi dengan Model Keseimbangan

\* Adjar Pratoto , \*\* Slamet Raharjo

\*Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas  
Kampus Limau Manis, Padang 25163

\*\*Jurusan Teknik Lingkungan, Universitas Andalas  
Kampus Limau Manis, Padang 25163

\*Email: [adjar\\_pratoto@yahoo.com](mailto:adjar_pratoto@yahoo.com), \*\*[sraharjo@ft.unand.ac.id](mailto:sraharjo@ft.unand.ac.id)

### Abstrak

*Pada penelitian ini, dilakukan simulasi numerik gasifikasi-uap biomassa (tandan kosong kelapa sawit) dengan menggunakan model keseimbangan termodinamika. Parameter yang digunakan dalam simulasi adalah suhu dan rasio uap terhadap biomassa. Untuk simulasi digunakan variasi suhu dari 200°C-1000°C dan rasio uap/biomassa S/B: 0,5; 1,0; dan 2,0. Dari simulasi, terlihat bahwa produksi hidrogen bertambah dengan kenaikan suhu. Pada suhu-suhu rendah, produksi hidrogen rendah dan meningkat seiring dengan kenaikan suhu hingga mencapai suatu puncak dan kemudian produksi hidrogen menurun lagi. Kenaikan rasio (S/B) akan menggeser puncak produksi hidrogen ke arah suhu rendah. Hasil yang serupa juga diamatai untuk produksi karbon monoksida, tetapi karbon monoksida tidak memperlihatkan penurunan produksi pada suhu tinggi terutama pada rasio (S/B) yang tinggi. Sedangkan, profil metana tidak terlalu dipengaruhi oleh rasio (S/B). Hasil simulasi ini dapat dimanfaatkan sebagai input dalam desain gasifier.*

*Kata kunci: gasifikasi, biomassa, simulasi numerik, model keseimbangan*

### 1. Pendahuluan

Hidrogen merupakan sumber energi yang tidak mengandung karbon dan relatif bersih ditinjau dari polusi yang dihasilkannya. Hidrogen merupakan energi sekunder yang dihasilkan dari sumber energi primer. Kebanyakan hidrogen diperoleh melalui steam reforming gas alam. Sumber energi primer lainnya yang memiliki potensi untuk produksi hidrogen adalah batubara dan biomassa. Saat ini batubara lebih banyak digunakan sebagai komoditi ekspor atau digunakan secara langsung melalui proses pembakaran. Adapun, potensi biomassa sebagai sumber energi yang bersih belum banyak digali.

Indonesia memiliki sumber biomassa yang berlimpah. Di antara sumber-sumber biomassa yang potensial untuk dimanfaatkan tersebut adalah limbah dari pertanian, seperti sekam dan jerami padi, ampas tebu, dan limbah pengolahan minyak sawit. Limbah pengolahan sawit berupa tandan kosong, sabut, cangkang, dan lumpur (*sludge*). Sabut dan cangkang sawit telah dimanfaatkan sebagai sumber energi boiler dalam pabrik pengolahan minyak sawit. Sementara itu, lumpur dan tandan kosong belum dimanfaatkan. Dengan pertumbuhan perkebunan sawit yang terus meningkat, produksi limbah juga semakin meningkat. Pemanfaatan limbah ini menarik ditinjau dari dua aspek, yaitu peningkatan pasokan energi yang bersih dan yang kedua adalah pengendalian limbah. Limbah sawit yang tidak dikelola dengan baik ini memiliki potensi dalam kontribusi pemanasan global antara lain melalui emisi metana. Pada penelitian ini, akan dikaji melalui suatu simulasi pemanfaatan tandan kosong sawit sebagai sumber energi hidrogen melalui proses hidrogen. Simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan model keseimbangan termodinamika, suatu model yang telah banyak diterapkan dalam gasifikasi berbagai biomassa (Jangsawang, dkk., 2005; Jarunghammachote & Dutta, 2006; Khadse, dkk., 2006; Melgar, dkk., 2007). Hasil dari simulasi ini dapat dimanfaatkan sebagai input dalam desain ataupun proses gasifikasi (Melgar, dkk., 2007).

## Proses Gasifikasi Biomassa

Gasifikasi merupakan salah satu proses konversi termokimia bahan bakar, seperti batubara, biomassa, dan limbah-limbah. Proses termokimia lainnya adalah pembakaran dan pirolisis (pembakaran tanpa oksigen). Pada gasifikasi, bahan bakar padat diubah menjadi gas (*gas producer*) yang dapat dibakar secara langsung sebagai bahan bakar maupun digunakan sebagai bahan baku untuk produksi gas sintetik atau hidrogen. Gasifikasi biomassa merupakan proses termokimia yang kompleks yang meliputi sejumlah reaksi kimia elementer. Gasifikasi diawali dengan oksidasi parsial bahan bakar lignoselulosik dengan agen gasifikasi (misalnya udara, oksigen, uap air, atau CO<sub>2</sub>). Kemudian, unsur volatil (*volatile matter*) akan dilepaskan ketika bahan bakar dipanaskan melalui oksidasi parsial dan menghasilkan produk-produk pembakaran H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>. Air yang terkandung dalam biomassa akan menguap dan proses pirolisis berlanjut bilamana bahan tersebut terus dipanaskan. Penguraian termal dan oksidasi parsial gas-gas pirolisis terjadi pada suhu yang lebih tinggi dan menghasilkan CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, gas hidrokarbon lainnya, tar, arang, unsur anorganik, dan abu.

Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi umumnya berupa CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, dan N<sub>2</sub>. Selain itu, dalam gasifikasi juga akan dihasilkan bahan organik (tar) dan bahan anorganik (H<sub>2</sub>S, HCl, NH<sub>3</sub>, logam-logam alkali) serta partikel. Komposisi dari gas-gas hasil gasifikasi tergantung dari jenis dan komposisi umpan serta parameter operasi gasifikasi, seperti suhu, tekanan, dan agen gasifikasi (*gasifying agent*). Pada Tabel 1 diperlihatkan komposisi tandan kosong sawit melalui analisis ultimasi.

Tabel 1 Analisis ultimasi tandan kosong sawit

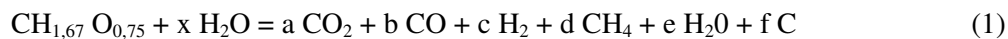
Komponen	C	H	N	S	O
Persentase (wt% d.a.f)	46,10	6,41	1,21	0,11	46,17

Mengingat komposisi nitrogen dan sulfur cukup kecil, untuk tujuan simulasi ini kedua komponen tersebut diabaikan. Namun, bila diinginkan evaluasi terhadap potensi polusi terutama dari sulfur, maka kandungan sulfur tersebut perlu dipertimbangkan. Dengan demikian, pada penelitian ini, komposisi tandan kosong sawit didekati dengan model CH<sub>x</sub>O<sub>y</sub>. Berdasarkan analisis ultimasi tersebut, persamaan kimia untuk tandan kosong sawit adalah CH<sub>1,67</sub> O<sub>0,75</sub>.

Dalam simulasi proses gasifikasi, untuk menyederhanakan persoalan, digunakan asumsi-asumsi berikut:

1. Produk gasifikasi berupa CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, dan karbon tak terbakar;
2. Gas produk adalah gas ideal;
3. Reaksi berada dalam keseimbangan termodinamik;
4. Reaksi berlangsung secara adiabatik; dan
5. Biomassa berada dalam keadaan kering (tidak mengandung air).

Dengan mengacu pada asumsi tersebut, maka persamaan reaksi untuk gasifikasi-uap tandan kosong sawit adalah



Pers.(1) merupakan persamaan umum gasifikasi-uap. Reaksi-reaksi selang biasanya berlangsung pada saat proses gasifikasi. Reaksi-reaksi selang tersebut adalah:

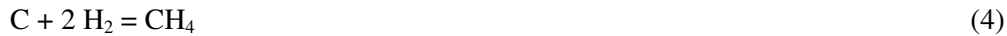
*Gasifikasi uap*



*Reaksi Boudouard*



*Reaksi pembentukan metana (methanation reaction)*



*Reaksi pergeseran air-gas*



### Model Keseimbangan Termodinamika

Komposisi akhir suatu proses gasifikasi dapat diperkirakan dengan menggunakan minimisasi energi bebas Gibb atau dengan menggunakan model keseimbangan termodinamik. Pada model keseimbangan termodinamik, reaksi keseimbangan antara produk dan reaktan dikaitkan dengan suatu konstanta keseimbangan. Pada Pers. 2 – 4, konstanta keseimbangan diberikan oleh, masing-masing, Pers. 6 – 8.

*Gasifikasi uap*

$$K_{p1} = \frac{y_{CO} y_{H_2} P}{y_{H_2O}} \quad (6)$$

*Reaksi Boudouard*

$$K_{p2} = \frac{y_{CO}^2 P}{y_{CO_2}} \quad (7)$$

*Reaksi pembentukan metana (methanation reaction)*

$$K_{p3} = \frac{y_{CH_4}}{y_{H_2}^2 P} \quad (8)$$

Pada Pers.6 – 8,  $K_p$  adalah konstanta keseimbangan,  $y$  adalah fraksi mol spesies, dan  $P$  adalah tekanan total. Reaksi pergeseran air-gas dapat dipandang sebagai pengurangan reaksi gasifikasi uap dan reaksi Boudouard (Khadse, dkk., 2006). Konstanta keseimbangan dapat dinyatakan sebagai fungsi dari energi bebas Gibbs dan suhu dengan menggunakan persamaan berikut (Benson, 1977):

$$\ln K_p = - \Delta G^\circ / (RT) \quad (9)$$

atau untuk tiap-tiap reaksi keseimbangan  $i$ , konstanta keseimbangan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K_{pi} = \exp \left( - \frac{\Delta G_i^\circ}{RT} \right) \quad (10)$$

Pada Pers. 9 atau 10,  $\Delta G^\circ$  adalah energi bebas Gibbs pada suhu dan tekanan standar (STP),  $R$  adalah konstanta gas universal, dan  $T$  adalah suhu. Energi bebas Gibbs ditentukan dari potensial kimia komponen dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta G_i^\circ = \sum_j v_{ji} \mu_j^\circ \quad (11)$$

dimana  $v$  adalah koefisien stoikiometrik komponen,  $\mu^\circ$  adalah potensial kimia komponen pada tingkat keadaan standar (STP) yang dapat ditentukan dengan menggunakan Pers. 12.

$$\mu_j^o(T) = \int_{T_0}^T c_{p,j} dT' + \Delta h_{fj}^o(T_0) - T \left[ s_j^o(T_0) + \int_{T_0}^T \frac{c_{p,j}}{T'} dT' \right] \quad (12)$$

## Metode Penyelesaian Persamaan

Dalam Pers. 1 terdapat tujuh bilangan yang tidak diketahui, yaitu x, a, b, c, d, e, dan f. Bilangan x adalah jumlah uap yang digunakan dalam gasifikasi atau merupakan perbandingan uap terhadap biomassa (S/B). Dalam simulasi ini, x divariasikan sebanyak tiga, yaitu 0,5; 1,0; dan 2,0.. Dengan menggunakan neraca atom karbon, hidrogen, dan oksigen pada Pers.1, diperoleh hubungan berikut:

$$\text{Karbon} \quad 1 = a + b + d + f \quad (13)$$

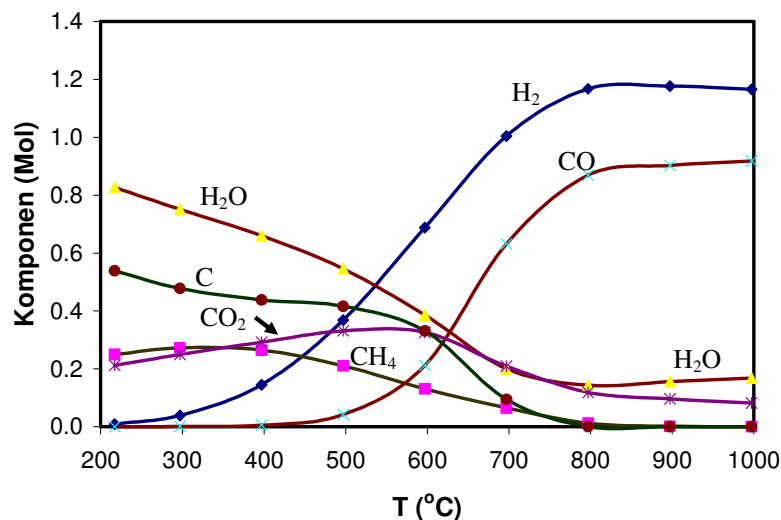
$$\text{Hidrogen} \quad 1,67 + 2x = 2c + 4d + 2e \quad (14)$$

$$\text{Oksigen} \quad 0,75 + x = 2a + b + e \quad (15)$$

Enam persamaan aljabar taklinier (Pers.6 – 8 dan Pers.13 – 15) dipecahkan secara simultan untuk menentukan koefisien a, b, c, d, e, dan f.

## 2. Hasil dan Pembahasan

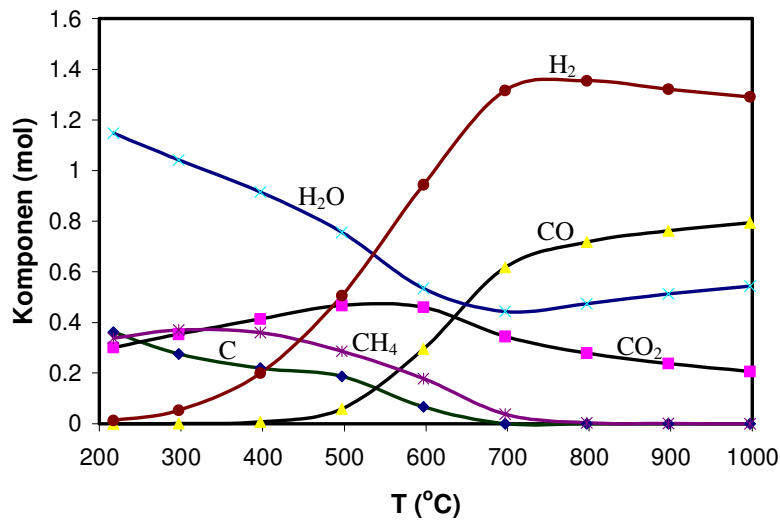
Gambar 1 – 3 memperlihatkan komposisi gas producer pada gasifikasi-uap tandan kosong sawit untuk perbandingan uap terhadap biomassa (S/B), masing-masing, sebesar 0,5; 1,0; dan 2,0. Produksi hidrogen meningkat seiring dengan kenaikan suhu gasifikasi hingga mencapai suatu puncak dan kemudian menurun lagi. Dengan membandingkan ketiga variasi (S/B) tersebut, terlihat bahwa pergeseran puncak beranjak menuju suhu rendah dengan kenaikan (S/B). Pada suhu tinggi, hidrogen bereaksi kembali dengan oksigen membentuk uap air. Dari grafik juga terlihat kenaikan jumlah uap air seiring dengan penurunan produksi hidrogen.



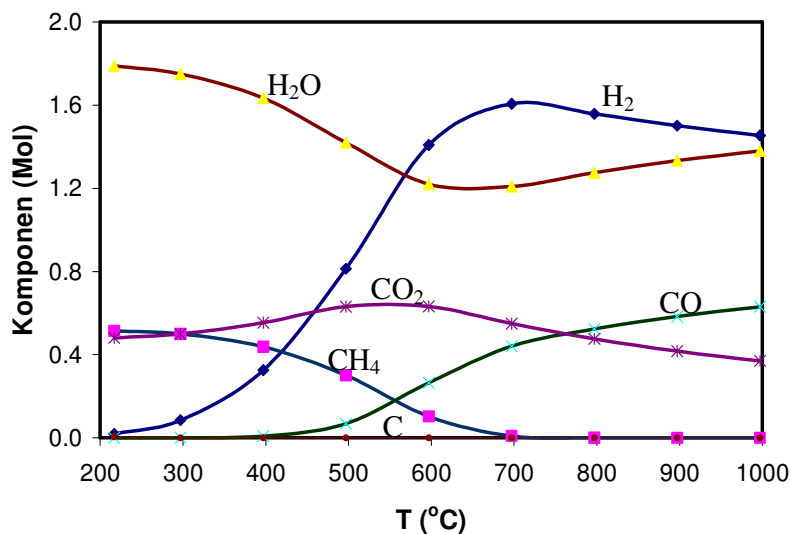
Gambar 1 Komposisi gas producer sebagai fungsi dari suhu untuk (S/B) = 0,5

Uap sebagai agen gasifikasi akan memicu proses secara kesekuruhan melalui reaksi endotermik uap-karbon untuk membentuk hidrogen dan karbon monoksida. Konversi karbon menurun dengan meningkatnya suhu gasifikasi. Dengan peningkatan rasio (S/B), karbon yang tak terbakar semakin mengecil. Produksi karbon monoksida meningkat secara lambat mulai dari suhu sekitar 500°C, kemudian meningkat dengan agak tajam hingga suhu sekitar 700°C dan setelah itu peningkatan melambat lagi. Namun, dengan kenaikan jumlah uap akan mengurangi jumlah produksi karbon

monoksida. Sedangkan, produksi metana menurun dengan kenaikan suhu. Produksi metana tidak terpengaruh secara nyata terhadap rasio uap-biomassa, terutama untuk rasio yang tinggi.



Gambar 2 Komposisi gas producer sebagai fungsi dari suhu untuk (S/B) = 1,0



Gambar 3 Komposisi gas producer sebagai fungsi dari suhu untuk (S/B) = 2,0

### 3. Kesimpulan

Simulasi numerik proses gasifikasi dengan model keseimbangan termodinamik telah dilakukan dengan menggunakan model tandan kosong sawit sebagai umpan gasifikasi dan uap sebagai agen gasifikasi. Rasio uap-biomassa memengaruhi secara nyata produksi hidrogen dan karbon monoksida, namun tidak terlalu berpengaruh terhadap produksi metana, terutama untuk rasio yang tinggi. Rasio uap-biomassa yang tinggi menggeser produksi hidrogen maksimum ke arah suhu yang lebih rendah.

## Rujukan

- Benson, R.S., 1977, *Advanced Engineering Thermodynamics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Pergamon Press, Oxford
- Jangsawang, W., Klimanek, A., & Gupta, A.K., 2005, Enhanced yield of hydrogen from wastes using high temperature steam gasification, *Trans. ASME, J. Energy Resources Technology*
- Jarunghammachote, S. & Dutta, A., 2006, Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier, *The 2<sup>nd</sup> Joint Intl. Conf. on Sustainable Energy and Environment*, Bangkok, 21 – 23 November
- Khadse, A., Parulekar, P., Aghalayam, P., & Ganesh, A., 2006, Equilibrium model for biomass gasification, *Advances in Energy Research*,
- Melgar, A., Perez, J.F., Laget, H., & Horillo, A., 2007, Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process, *Energy Conversion and Management* **48**, 59–67