

M8-019 Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Menggunakan Reaktor Downdraft dengan Dua Tingkat Laluan Udara

Bambang Sudarmanta, Dania Baroroh Murtadji, Dita Firsta Wulandari

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS

Kampus ITS Jalan Arief Rahman Hakim Keputih-Sukolilo Surabaya, 60111
Telp.: (031) 5946230; Faks.: (031) 5922941; E-mail: sudarmanta@me.its.ac.id

ABSTRAK

Gasifikasi biomassa merupakan teknologi proses thermo-kimia yang mengubah berbagai jenis biomassa padat menjadi syn-gas (CO , H_2 , CH_4) dengan pemberian sejumlah energi panas. Sasaran penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakterisasi proses gasifikasi biomassa menggunakan reaktor downdraft dengan dua tingkat laluan udara dengan variasi rasio udara-bahan bakar dan suhu udara yang masuk melalui tingkat laluan kedua. Karakterisasi yang dimaksud berupa identifikasi zone tahapan proses gasifikasi, Identifikasi losses serta perhitungan efisiensi thermal proses konversi biomassa menjadi syn-gas.

Penelitian dimulai dari karakterisasi biomassa sekam padi secara proximate dan ultimate analysis dan dilanjutkan dengan karakterisasi proses gasifikasi menggunakan reaktor downdraft. Reaktor downdraft dipilih dengan maksud untuk mereduksi kandungan tar pada syn-gas hasil gasifikasi. Upaya mereduksi kandungan tar juga dilakukan dengan pemakaian katalis arang kayu yang diletakkan dibawah zone reduksi. Identifikasi zone tahapan proses gasifikasi dilakukan dengan pemasangan 5 titik pengukuran suhu sepanjang reaktor gasifikasi untuk mendapatkan zone drying, pyrolysis, oksidasi parsial serta reduksi. Pengaturan suhu udara pada laluan tingkat kedua dimulai dari suhu 30^0C , 40^0C , 50^0C sampai 60^0C dengan cara melewatkannya saluran udara tersebut pada bak air yang sudah dipanaskan. Perhitungan menggunakan pendekatan sistem batch..

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakterisasi suhu proses gasifikasi menggunakan reaktor downdraft dengan pendekatan sistem batch ini didapatkan hasil sebagai berikut: drying pada suhu $100 \sim 150^0C$, pirolisis sampai suhu 300^0C , oksidasi parsial sampai suhu 960^0C dan reduksi pada suhu $400 \sim 500^0C$. Identifikasi losses berdasarkan kesetimbangan energi menunjukkan masih adanya losses hingga 20 % diluar losses arang karbon, ash dan losses panas ke lingkungan. Secara menyeluruh, efisiensi thermal dari reaktor gasifikasi mencapai 50% yaitu pada kondisi suhu udara 50^0C .

Kata kunci : Sekam padi, gasifikasi, syn-gas, pengeringan, pyrolysis, oksidasi parsial dan reduksi.

1. Pendahuluan

Krisis energi yang melanda Indonesia mengakibatkan berbagai permasalahan yang bersifat multi-dimensi, mulai terjadinya kelangkaan bahan bakar minyak, naiknya harga bahan bakar minyak yang diikuti oleh kenaikan harga kebutuhan pokok, naiknya biaya operasional industri yang menyebabkan dilakukannya penghematan dengan cara pengurangan tenaga kerja, serta permasalahan-permasalahan sosial ekonomi lainnya. Oleh sebab itu penangannannya memerlukan partisipasi dan tanggung jawab semua pihak, termasuk perguruan tinggi sebagai pelaku kegiatan riset dan pengembangannya. Sebagai wujud peran serta ITS dalam melaksanakan pengembangan bidang energi untuk mengatasi masalah krisis energi di Indonesia adalah melalui pemanfaatan energi biomassa dari limbah pertanian sebagai solusi yang terintegrasi antara energi dan lingkungan.

Gasifikasi biomassa dipilih sebagai salah satu cara untuk memanfaatkan limbah biomassa menjadi energi. Gasifikasi biomassa merupakan suatu proses dekomposisi termal dari bahan-bahan organik melalui pemberian sejumlah panas dengan suply oksigen terbatas untuk menghasilkan synthesis gases yang terdiri dari CO, H₂, CH₄ (selanjutnya disebut dengan syn-gas) sebagai produk utama dan sejumlah kecil arang karbon dan abu sebagai produk ikutan (Higman dan Burgh, 2003).

Secara umum, proses gasifikasi melibatkan 4 tahapan proses berupa drying, pyrolysis, oksidasi parsial dan reduksi. Drying merupakan tahapan pertama dari proses gasifikasi, yaitu proses penguapan kandungan air didalam biomassa melalui pemberian sejumlah panas pada interval suhu 100 ~ 300⁰C. Pada drying ini, biomassa tidak mengalami penguraian unsur-unsur kimianya (dekomposisi kimia), tetapi hanya terjadi pelepasan kandungan air dalam bentuk uap air. Proses drying dilanjutkan dengan dekomposisi termal kandungan volatile matter berupa gas dan menyisakan arang karbon, dimana proses ini biasa disebut sebagai pirolisis. Proses pirolisis merupakan proses eksoterm yang melepas sejumlah panas pada interval suhu 300 ~ 900⁰C. Selanjutnya sisa arang karbon akan mengalami proses oksidasi parsial, dimana proses ini merupakan proses eksoterm yang melepas sejumlah panas pada interval suhu diatas 900⁰C. Panas yang dilepas dari proses oksidasi parsial ini digunakan untuk mengatasi kebutuhan panas dari reaksi reduksi endotermis dan untuk memecah hidrokarbon yang telah terbentuk selama proses pirolisis. Proses reduksi gas CO₂ dan H₂O ini terjadi pada interval suhu 400 ~ 900⁰C. Reduksi gas CO₂ melalui reaksi kesetimbangan *Boudouard equilibrium reaction* dan reduksi gas H₂O melalui reaksi kesetimbangan *water-gas reaction*, dimana reaksi-reaksi tersebut secara dominan dipengaruhi oleh suhu dan tekanan.

Gasifikasi dapat dibedakan berdasarkan mode fluidisasi, arah aliran dan *gas agent* yang diperlukan untuk proses gasifikasi. Berdasarkan mode fluidisasi, gasifikasi dapat dibedakan menjadi gasifikasi unggul tetap (*fixed bed gasification*), gasifikasi unggul bergerak (*moving bed gasification*), gasifikasi unggul terfluidisasi (*fluidized bed gasification*), dan *entrained bed*. Berdasarkan arah aliran, gasifikasi dibedakan menjadi gasifikasi aliran searah (*downdraft gasification*) dan gasifikasi aliran berlawanan (*updraft gasification*). Pada gasifikasi *downdraft*, arah aliran *agent gas* dan arah aliran padatan adalah sama-sama ke bawah. Pada gasifikasi *updraft*, arah aliran padatan ke bawah sedangkan arah aliran *agent gas* ke atas. Berdasarkan *agent gas* yang perlukan untuk proses gasifikasi, gasifikasi dibedakan menjadi gasifikasi udara dan uap. Pada gasifikasi udara, *agent gas* yang digunakan untuk

proses gasifikasi adalah udara, sedangkan pada gasifikasi uap, *agent gas* yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah uap.

Pemilihan reaktor gasifikasi jenis *downdraft* didasarkan pada rendahnya kandungan *tar* yang dihasilkan dibandingkan jenis *updraft*. Hal ini dikarenakan bahwa kandungan *tar* hasil pirolisis terbawa bersama gas dan kemudian masuk ke dalam proses oksidasi parsial yang mencapai suhu hingga 900 °C, dimana pada suhu tersebut kandungan *tar* dimungkinkan dapat terurai menjadi senyawa yang lebih ringan. Hasil syn-gas dari gasifikasi sistem *downdraft* ini setelah direfinery dan didinginkan dapat langsung dimasukkan ke dalam motor diesel yang dapat dioperasikan secara dual system. Sistem dua laluan agent gas berupa udara dan steam dapat meningkatkan produksi hidrogen pada reaktor gasifikasi (Pengmei et al, 2007). Satake (2006) melakukan proses penelitian menggunakan metode gasifikasi downdraft berbahan baku sekam padi. Pada dasarnya Satake mencoba membuat reaktor gasifikasi dengan menggunakan berbagai jenis waste biomassa. Selain itu juga membandingkan produksi syn-gas untuk proses perlakuan gas yang berbeda, yaitu dengan menggunakan *cyclone*, *scrubber*, dan *filter*. Hasil menunjukkan bahwa proses drying terjadi pada suhu 100 - 300 °C, pirolisis pada suhu 300 - 900 °C, oksidasi parsial pada suhu diatas 900 °C dan reduksi pada suhu 400– 900 °C. Syn-gas keluaran dari proses dengan suhu rata-ratanya sebesar 450 °C.

Sasaran tulisan ini adalah untuk mendapatkan karakterisasi proses gasifikasi biomassa menggunakan reaktor *downdraft* dengan dua tingkat laluan udara dengan variasi suhu udara masuk melalui tingkat laluan kedua. Karakterisasi yang dimaksud berupa identifikasi zone tahapan proses gasifikasi, kestimbangan massa dan energi selama proses serta efisiensi thermal proses konversi biomassa menjadi syn-gas.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental untuk mengetahui kualitas dan kuantitas syn-gas yang dihasilkan dari reaktor gasifikasi *downdraft* dengan bahan baku sekam padi serta perhitungan unjuk kerja dari reaktor gasifikasi yang dibuat.

2.1. Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan adalah sekam padi yang didapatkan dari limbah penggilingan padi di Surabaya. Selengkapnya hasil proximate and ultimate analysis ditunjukkan pada Tabel 1.

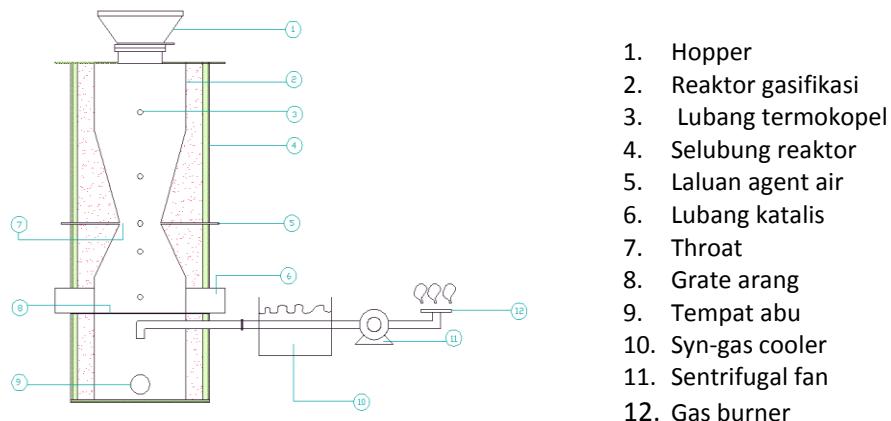
Tabel 1. Hasil proximate dan ultimate sekam padi

| No | Parameter | Unit | Nilai |
|----|------------------|------|-------|
| 1 | Moisture content | % wt | 9,2 |
| 2 | Ash content | % wt | 17,5 |
| 3 | Volatile matter | % wt | 65,3 |

| | | | | |
|---|--------------|-------|------|------|
| 4 | Fixed carbon | % wt | 17,4 | |
| 5 | Density | Kg/m3 | 188 | |
| 6 | LHV | MJ/kg | 14,1 | |
| 7 | Komponen | C | % wt | 37,6 |
| | | H | % wt | 5,0 |
| | | N | % wt | 0,3 |
| | | S | % wt | 0 |
| | | O | % wt | 36,6 |

2.2. Peralatan Pengujian

Peralatan pengujian tersusun dari reaktor gasifikasi, syn-gas cooler dan burner gas, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Reaktor dibuat dari batu tahan api yang mampu menahan suhu sampai 1100°C dengan geometri bagian tengah menyempit (*throat system*). Dimensi reaktor adalah tinggi 1,5 m, dan diameter dalam 0,35 m. Di bagian bawah terdapat grate tempat meletakkan arang kayu sebagai katalis dalam proses gasifikasi tersebut. Pengukuran suhu pada tahapan proses dilakukan dengan pemasangan termokopel sepanjang ketinggian reaktor sebanyak 5 titik.



Gambar 1. Skema pengujian gasifikasi biomassa

2.3. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dimulai dengan memasukkan arang kayu yang berfungsi sebagai katalis diatas grate secara merata. Kemudian sekam padi dimasukkan melalui hopper dengan posisi menutupi arang kayu. Selanjutnya sekam padi dalam reaktor dinyalakan dan induced fan dihidupkan untuk melakukan pemanasan awal pada reaktor. Pengisian umpan sekam padi dilakukan sampai penuh untuk sekali pengambilan data sistem batch. Suhu menyeluruh dari reaktor gasifikasi dinaikkan step-by-step sampai suhu pada throat mencapai 800 °C. Setelah itu, pengukuran dapat dimulai, yaitu suhu pada lima posisi termokopel diukur setiap interval waktu 3 menit. Gas yang dihasilkan diukur secara simultan menggunakan flow meter gas. Biasanya pengujian mencapai kondisi steady setelah mencapai 15 menit dari permulaan. Untuk meyakinkan keandalan dari hasil pengujian ini, setiap kondisi operasi diulang dua kali dan hasil pengujian yang dipresentasikan disini adalah nilai rata-rata dari dua pengukuran tersebut.

3. Pembahasan

3.1. Karakterisasi Biomassa Sekam Padi

Biomassa merupakan bahan organik yang berasal dari alam, termasuk didalamnya tumbuhan, hewan dan limbah serta memiliki sifat yang dapat diperbarui karena dapat diproduksi dengan cepat. Proses fotosintesis yang melibatkan matahari yang terjadi pada biomass merupakan sumber energi yang dimiliki biomass. Sedangkan bahan organik yang diproses melalui proses geologi seperti batubara dan minyak tidak termasuk dalam kelompok biomass ini.

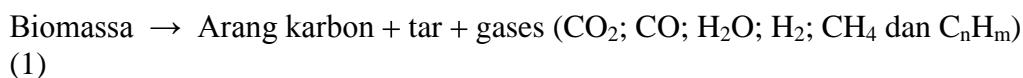
Untuk mengetahui karakteristik suatu biomass digunakan metode pengujian secara analitis (*proximate analysis*) dan secara kimia (*ultimate analysis*). *Proximate analysis* melakukan pengujian komposisi bahan bakar yang berupa kandungan air (*moisture*), *volatile matter*, *fixed carbon*, *ash* serta nilai kalor yang dimiliki oleh biomass, sedangkan *ultimate analysis* melakukan pengujian terhadap komposisi kimia biomass berupa karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen.

Karakterisasi biomass sekam padi didasarkan pada hasil proximate dan ultimate analysis seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Dari Tabel 1 terlihat bahwa kandungan moisture untuk sekam padi berkisar 9,2 % sehingga dalam pemanfaatan sekam padi menjadi syn-gas membutuhkan energi panas untuk mengeluarkan kandungan moisture tersebut. Komposisi terbesar berupa volatile matter, yaitu mencapai 65,3%. Volatile matter merupakan hasil dekomposisi pada saat proses pemanasan, terdiri dari flammable gas seperti H₂, CO dan HC dan non-flammable gas seperti CO₂. Kandungan fixed carbon pada sekam padi mencapai 17,4%, sedangkan sisa-sisa organik yang tidak teroksidasi berupa ash mencapai 17,4%.

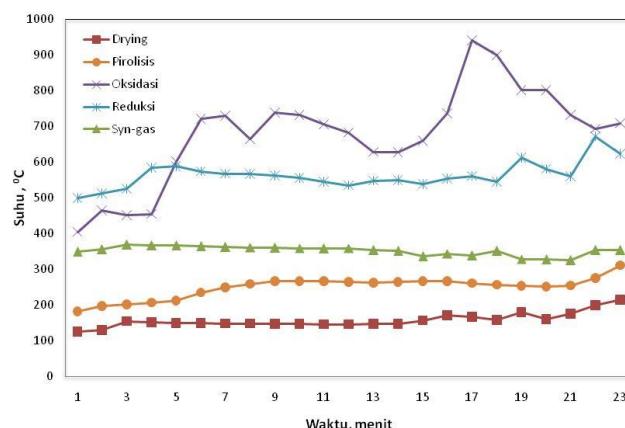
3.2. Distribusi suhu dalam reaktor gasifikasi

Distribusi suhu sepanjang reaktor gasifikasi ditunjukkan pada Gambar 2, dimana suhu diukur pada 5 titik pengukuran dengan penempatan termokopel seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Urutan penempatan termokopel dari atas berturut-turut adalah suhu drying, pirolisis, oksidasi parsial, reduksi serta syn-gas. Dari Gambar 2 terlihat bahwa suhu drying berkisar antara 100 sampai dengan 150 °C, yaitu suhu yang dibutuhkan untuk mengeluarkan kandungan moisture didalam biomassa sekam padi. Selama pengukuran ini suhu drying relative stabil dan tidak mengalami fluktuasi. Hal ini dikarenakan pada tahap drying ini biomassa tidak mengalami penguraian unsur-unsur kimianya (dekomposisi kimia), tetapi hanya terjadi pelepasan kandungan air dalam bentuk uap air.

Setelah tahap drying terlampaui, biomassa akan mengalami pirolisis hingga mencapai suhu 300 °C. Pada tahap pirolisis ini, biomassa mengalami dekomposisi termal menjadi arang karbon, tar dan gas. Proses pirolisis merupakan proses eksoterm yang melepas sejumlah panas pada interval suhu 300 ~ 900 °C. Secara menyeluruh, proses dekomposisi termal biomassa pada tahap pirolisis ditunjukkan sebagai berikut:



Sedangkan, reaksi pembentukan gas methana pada tahap pirolisis ini dituliskan sebagai berikut:

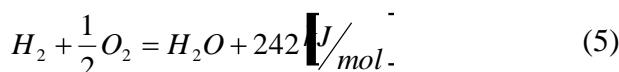


Gambar 2. Profil distribusi suhu sepanjang reaktor

Sisa arang karbon dan hidrogen akan mengalami proses oksidasi parsial hingga mencapai suhu 960 °C. Oksidasi parsial merupakan proses eksoterm yang memanfaatkan suplay oksigen terbatas dalam reaktor dan melepas sejumlah panas. Panas yang dilepas dari proses oksidasi parsial ini digunakan untuk mengatasi kebutuhan panas dari reaksi reduksi endotermis dan untuk memecah hidrokarbon yang telah terbentuk selama proses pirolisis. Selengkapnya reaksi oksidasi ditunjukkan pada persamaan 3 s/d 5.

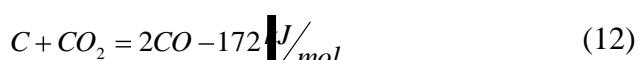
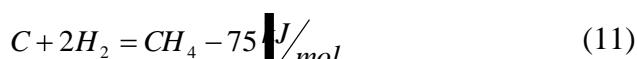
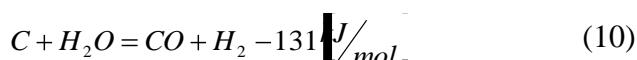
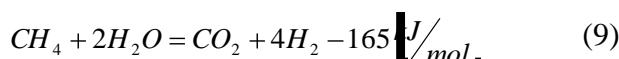
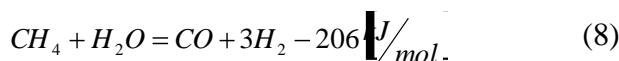
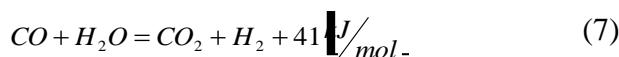
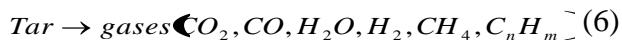
SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009



Kecenderungan kurva suhu pada zone oksidasi parsial ini adalah terjadinya fluktuasi nilai suhu oksidasi. Hal ini merupakan suatu phenomena yang menarik untuk dikaji lebih lanjut. Secara general, phenomena tersebut dapat disebabkan deflagrasi O_2 akibat dari akumulasi lokal. Hal ini memberikan suatu inspirasi bahwa pengaturan suplay agent gasifikasi, baik itu berupa udara, O_2 maupun steam membutuhkan suatu mekanisme pengaturan yang baik. Mekanisme ini terutama sekali dibutuhkan untuk reactor dengan multi stage “agent gasifikasi” untuk mencapai suplay O_2 yang seragam dan menghindari akumulasi lokal.

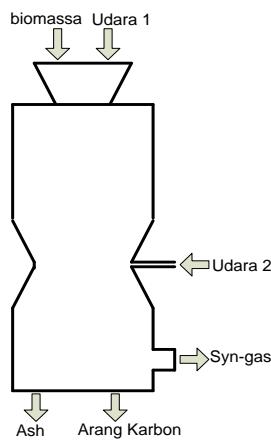
Proses reduksi gas CO_2 dan H_2O terjadi pada suhu 400°C . Proses ini merupakan reaksi endoterm yang dapat terjadi pada interval suhu $400 \sim 900^{\circ}\text{C}$. Reduksi gas CO_2 melalui reaksi kesetimbangan Boudouard equilibrium reaction dan reduksi gas H_2O melalui reaksi kesetimbangan water-gas reaction, dimana reaksi-reaksi tersebut secara dominan dipengaruhi oleh suhu dan tekanan. Gas CO_2 dan H_2O akan melewati lapisan karbon panas sehingga menimbulkan reaksi reduksi yang berkelanjutan dan menghasilkan syn-gas berupa CO , H_2 dan CH_4 . Selengkapnya, reaksi yang terjadi pada tahap reduksi ini ditunjukkan seperti pada persamaan 6 s/d 12.



Hasil akhir dari proses gasifikasi biomassa ini adalah syn-gas dengan suhu relatif konstan sebesar 350°C .

3.3. Analisis kesetimbangan massa dan energy

Perhitungan kesetimbangan massa dan energi dilakukan dengan pendekatan system batch, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Model sistem reaktor gasifikasi

Dari model sistem reaktor gasifikasi pada Gambar 3 dapat diturunkan persamaan kesetimbangan massa dan energi untuk kondisi steady sebagai berikut:

Kesetimbangan massa:

$$\sum \text{massa}_{\text{masuk}} = \sum \text{massa}_{\text{keluar}} \quad (13)$$

$$m_{\text{biomassa}} + m_{\text{udara1}} + m_{\text{udara2}} = m_{\text{syn-gas}} + m_{\text{arang-karbon}} + m_{\text{ash}}$$

Kesetimbangan energi:

$$\begin{aligned} \sum \text{energi}_{\text{masuk}} &= \sum \text{Energi}_{\text{keluar}} \\ &= \sum \text{Energi}_{\text{berguna}} - \sum \text{energi}_{\text{losses}} \\ &= E_{\text{syn-gas}} - E_{\text{arang-karbon}} - E_{\text{ash}} - E_{\text{heat-transfer}} \end{aligned} \quad (14)$$

Dari persamaan kesetimbangan massa pada persamaan 13 dapat diketahui besarnya kesetimbangan massa untuk variasi suhu udara seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

Tabel 2. Perhitungan kesetimbangan massa pada reaktor gasifikasi

| Suhu | Massa masuk (kg) | | | | Massa Keluar (kg) | | | |
|------|------------------|---------|---------|---------|-------------------|--------|---------|---------|
| | Biomassa | Udara 1 | Udara 2 | Total | Arang karbon | Ash | Syn-gas | Total |
| 30° | 5 | 2.6421 | 2.6421 | 10.2842 | 1.3000 | 0.0795 | 8.2606 | 9.6401 |
| 40° | 5 | 2.6421 | 2.5657 | 10.2078 | 1.4500 | 0.1200 | 8.3806 | 9.9506 |
| 50° | 5 | 2.6421 | 2.4893 | 10.1314 | 1.4800 | 0.1512 | 8.8581 | 10.4893 |
| 60° | 5 | 2.6421 | 2.4129 | 10.0550 | 1.5000 | 0.2450 | 8.7835 | 10.5285 |
| 70° | 5 | 2.6421 | 2.3367 | 9.9788 | 1.7000 | 0.4900 | 8.7478 | 10.9378 |

Tabel 2 menunjukkan bahwa besarnya massa keluar reaktor gasifikasi sudah mendekati massa yang masuk. Kecenderungan yang terjadi adalah bahwa pemanasan udara masuk cenderung menghasilkan massa syn-gas yang lebih besar sehingga secara keseluruhan memperbesar total massa yang keluar. Selain itu, besarnya *air fuel ratio* juga masih dibawah 1,5 yang mana nilai tersebut memungkinkan terjadinya proses gasifikasi.

Sedangkan, hasil selengkapnya kesetimbangan energi yang didapat dari persamaan 13 ditunjukkan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 terlihat bahwa perhitungan kesetimbangan energy yang dibuat memberikan hasil yang belum sama antara energy masuk dan energy keluar. Berdasarkan perhitungan tersebut masih ada kehilangan energy selain kandungan energy yang dibawa arang karbon, ash dan kehilangan energi berupa panas yang dilepaskan kesekelilingnya, yaitu mencapai 20%. Kecenderungan pemanasan udara menunjukkan produksi syn-gas yang meningkat sampai pemanasan 50 °C dan selanjutnya cenderung konstan

Tabel 3. Perhitungan kesetimbangan energi pada reaktor

| Suhu | Energi masuk (kJ) | | | | Energi Keluar (kJ) | | | | |
|------|-------------------|---------|---------|----------|--------------------|--------------|-------|---------------|----------|
| | Biomassa | Udara 1 | Udara 2 | Total | Syn-gas | Arang karbon | Ash | Heat transfer | Total |
| 30° | 88000.92 | 806.26 | 806.26 | 89613.44 | 41311.03 | 22880.24 | 10.65 | 986.47 | 65188.40 |
| 40° | 88000.92 | 806.26 | 809.10 | 89616.29 | 42028.52 | 25520.27 | 15.24 | 802.77 | 68366.80 |
| 50° | 88000.92 | 806.26 | 810.41 | 89617.59 | 44644.95 | 26048.27 | 26.16 | 2359.59 | 73078.98 |
| 60° | 88000.92 | 806.26 | 810.17 | 89617.36 | 44136.96 | 26400.28 | 40.92 | 1578.87 | 72157.02 |
| 70° | 88000.92 | 806.26 | 808.47 | 89615.66 | 44001.67 | 29920.31 | 63.70 | 1538.82 | 75524.51 |

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

Unjuk kerja reaktor gasifikasi dapat dirumuskan sebagai total energy yang dikandung syn-gas dibagi dengan energy yang dikandung biomassa, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\eta_{gasifikasi} = \frac{Energi\ Syn-gas}{Energy\ biomassa} \times 100\% \quad (15)$$

Hasil perhitungan pada persamaan 15 menunjukkan bahwa pemanasan udara dapat meningkatkan efisiensi gasifikasi hingga mencapai 50%. Hal ini terjadi pada suhu pemanasan 50 °C. Sedangkan pemanasan diatas 50 °C cenderung tidak memberikan kenaikan efisiensi gasifikasi.

4. Kesimpulan

Karakterisasi suhu proses gasifikasi menggunakan reaktor downdraft dengan pendekatan sistem batch ini adalah sebagai berikut:

- Drying pada suhu 100 ~ 150 °C
- Pirolisis sampai suhu 300 °C
- Oksidasi parsial sampai suhu 960 °C
- Reduksi pada suhu 400 – 500 °C

Identifikasi losses berdasarkan kesetimbangan energi menunjukkan masih adanya losses hingga 20 % diluar losses arang karbon, ash dan losses panas ke lingkungan Efisiensi thermal dari reactor gasifikasi mencapai 50% yaitu pada kondisi pemanasan udara pada suhu 50 °C.

Ucapan Terima Kasih

Artikel ini merupakan bagian dari kegiatan riset yang didanai oleh DIKTI melalui LPPM ITS tahun anggaran 2009, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Dirjen DIKTI dan LPPM ITS atas pendanaan yang telah diberikan.

Daftar Pustaka

- [1] Bureau of Energy Efficiency, “*Energy Efficiency in Thermal Utilities. Chapter 1*”, 2004.
- [2] Dogru, M et al. (2002), Fuel Processing Technology, *Gasification of sewage sludge using throated downdraft gasifier and uncertainty analysis*, Vol. 75, pp. 55-82.
- [3] Dumbleton, F. (2001), *Standardisation of Solid Biofuels in the UK* , AEA Technology Environment, Report 1, ESTA 32192001
- [4] Hudson G., Patel N. dan Haskard P., “*The Development of An Efficient Combustion System that Fires Bio-Fuels*”, Thesis Report of Mechanical Engineering Department of The University of Adelaide, Australia.
- [5] Jakobsen, H.J. and Helge, T., 2005, *Gasification breakthrough in biomass*, Denmark.

SEMINAR NASIONAL TAHUNAN TEKNIK MESIN (SNTTM) - VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-14 Agustus 2009

- [6] Kwant, K.W., 2004, *Status of Gasification in Countries Participating in the IEA and GasNet Activity August 2004*, IEA Bioenergy Gasification and EU Gasification Network.
- [7] Lawanaskol, S., 1997," *Dual Fuel Gasifier-Engine For 10 kWe Power Generation*", Departement of Mechanical engineering, Faculty of engineering, Rajamangala, University of Technology Tyanyaburi.
- [8] McIlveen, W. et al. (2001), Bioresource Technology, *A re-appraisal of wood-fired combustion*, Vol. 76, pp 183-190.
- [9] Opet, 2002, *Review of Finnish Biomass Gasification Technologies*, technical report, VTT, Finland.
- [10] Ronald, V.S. (2002), *How European Waste Will Contribute to Renewable Energy*, Vol. 30 pp. 471-475.
- [11] Satake, " *Biomass Gasification and solution for Agro Waste*", Jepang, 2006
- [12] Tippayawong, N., Promwungkwa A. and Rekkriangkrai, P., 2007, " *Long-term operation of a small biogas/diesel dual-fuel engine for on-farm electricity generation*" , Journal of Biosystem Engineering, vol. 98, pp 26-32.
- [13] Xiu, L.Y. et al (2002), *Biomass & Bioenergy, Design and operation of CFB gasification and power generation system for rice husk*, Vol. 23, pp 181-187.