

ANALISIS ENERGI DAN SEBARAN SUHU PADA GASIFIER UNGGUN TETAP¹

Analyses of Energy and Temperature Distribution in Imbert Downdraft Gasifier

Yogi Sirodz Gaos², Armansyah H. Tambunan³, Kamaruddin Abdullah⁴, Prawoto⁵

ABSTRACT

Performance test of Imbert Downdraft Gasifier by using cyclone as an auxiliary for tar filtering has been conducted with three kinds of feeding chips, i.e; borneo wood, tamarind wood and leucena wood. The research has been developed to support as an energy source for combined heat power generation. Gasifier will be coupled to diesel generating set and waste heat from the exhaust gas will be used as energy source for an adsorption type refrigeration system. The test had produced the best combustible gas with the chemical composition CO = 55,59 %, CH₄ = 0,14 %, C₂H₆ = 0,3 % and C₃H₈ = 0,08 %. The maximum temperature 1142 °C has been found in oxidation zone based on the leucena wood test, meanwhile the calculation result of energy availability for the combustible gas was 60,39 kW and specific energy availability was 0,082 kg/kWh. The test result of temperature distribution along the reactor compare to numerical solution of mathematical modelling has got the similar curve.

Keywords : *Downdraft gasifier, combustible gas and energy availability*

Diterima: 26 Februari 2007; Disetujui: 25 Mei 2007

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pembangunan nasional dewasa ini. Minyak bumi masih berperan sebagai sumber daya energi utama di dalam negeri, sementara cadangannya semakin terbatas, maka pengelolaannya harus dilakukan secara efisien. Di samping itu, ketergantungan terhadap minyak bumi tidak dapat dipertahankan lagi untuk

jangka panjang, sehingga diperlukan upaya untuk mensubstitusi minyak bumi melalui pengembangan dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan, seperti tenaga surya, biofuel, biomasa, gambut, dan sebagainya.

Salah satu energi alternatif yang dapat dikembangkan di Indonesia pada saat ini maupun masa mendatang adalah biomasa (kayu, serbuk gergaji, sekam padi, sampah, dan lain-lainnya). Biomasa dapat diubah menjadi sumber energi listrik

¹ Bagian dari disertasi penulis pertama pada program studi Ilmu Keteknikan Pertanian Sekolah Pascasarjana IPB

² Mahasiswa Program Ddoktoral, Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian, PPS, IPB.

³ Staf pengajar Departemen Teknik Pertanian, FATETA IPB, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16002

⁴ Staf pengajar Departemen Teknik Pertanian, FATETA IPB, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16002

⁵ Peneliti di Laboratorium LTMP, PUSPIPTEK, Serpong Tangerang

dengan cara memanfaatkan teknologi gasifikasi. Abdullah *et al.* (1998), Bhattacharya (1997), dan Rao, *et al.* (1994) mendefinisikan bahwa gasifikasi biomasa merupakan suatu proses konversi bahan selulosa dalam suatu reaktor gasifikasi (*gasifier* jenis unggun tetap aliran ke bawah dengan umpan kayu) menjadi gas mampu bakar. Selanjutnya gas tersebut dipergunakan sebagai bahan bakar mesin pembangkit tenaga dan sebagai sumber energi untuk proses pengeringan.

Hasil penelitian gasifikasi biomassa dengan umpan sekam padi mampu menghasilkan tenaga listrik di sisi terminal generator sebesar 100 kW dengan konsumsi pemakain sekam spesifik padi di bagian terminal generator adalah 1,84 kg/kW-jam (Gaos, 2001), sedangkan dengan umpan kayu ramin, kapasitas 40 kW, dengan konsumsi pemakaian kayu spesifik di bagian terminal genertor adalah 1,56 kg/kW-jam (Trisaksono, 1993). Hasil penelitian yang sama mampu menghasilkan energi listrik pada terminal generator antara 3,5 kW sampai dengan 500 kW (Jain BC, 1996). Pada penelitian ini, dengan peralatan *heat exchanger*, energi gas buang dari mesin pembangkit tenaga dimanfaatkan sebagai sumber energi mesin pendingin jenis adsorpsi melanol silika-gel yang ramah lingkungan, sesuai dengan protokol Kyoto tahun 1997. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan energi biomassa untuk bahan bakar mesin pembangkit tenaga, pada penelitian selanjutnya gas buang dari mesin pembangkit tenaga gasifier-genset akan digunakan sebagai sumber panas generator mesin pendingin adsorpsi. Tujuan khusus penelitian ini adalah

1. Mengembangkan model matematika untuk menduga distribusi suhu dalam reaktor gasifikasi.
2. Membuat rancang bangun alat uji sistem gasifikasi dengan bahan bakar kayu.

BAHAN DAN METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Energi dan Elektrifikasi Pertanian, Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Penelitian berlangsung dari bulan Juni 2005 sampai dengan Desember 2006.

Alat dan Bahan

Bahan dan peralatan yang digunakan untuk dapat memenuhi tujuan penelitian tersebut diatas antara lain meliputi :

1. Peralatan unit gasifikasi meliputi : *downdraft gasifier*, *cyclon* dan *hot gas filter*, *hot gas filter*, *gas cooler*, *akumulator* dan *mixer*
2. Pengambilan gas mampu bakar di sisi keluaran *Downdraft Gasifier* dengan menggunakan plastik khusus yang kedap udara.
3. Analisis gas hasil gasifikasi dengan menggunakan alat Gas Chromatography (GC) dengan prinsip *thermal conductivity detector* (TCD) dan *flame ionization detector* (FID) di Laboratorium Balai Besar Energi Puspipptek Serpong
4. Analisis nilai kalor kayu (LCV), analisis proximat, dan ultimat dari kayu.
5. Bahan umpan kayu borneo, kayu asem, dan kayu lamtorogung.

Metoda Analisis Energi pada Sistim Gasifikasi

1. Pemodelan matematik suhu proses gasifikasi

Pemodelan matematika dimulai dari proses oksidasi. Zona oksidasi merupakan daerah terjadinya proses pembakaran (reaksi kimia antara hidrokarbon yang dimiliki umpan kayu dengan oksigen dari udara) yang menghasilkan energi dalam bentuk panas yang terjadi pada daerah sepanjang $0 \leq Z < L$, (Gambar 1) di mana Z adalah koordinat aksial gasifier, dan L tinggi gasifier, ditampilkan pada Gambar 1 dan

Gambar 2. Proses pembakaran terjadi ketika udara dimasukkan melalui $Z=0$ (proses awal oksidasi) dengan suhu T_1 dan kecepatan *supervicial* (v_1). (Bird et al, 1994)

$$v_1 = \frac{w}{\pi R^2 \rho_1} \quad (1)$$

Kecepatan aliran fluida ini dapat diselesaikan dengan mengasumsikan bahwa konduksi panas ke arah aksial mengikuti hukum Fourier.

Pada prinsipnya, laju volume dari energi panas yang dihasilkan oleh reaksi pembakaran (q_c) secara umum merupakan fungsi dari tekanan, suhu, komposisi bahan bakar, dan efektifitas pembakaran. Dalam penelitian ini q_c diasumsikan hanya merupakan fungsi suhu, sehingga

$$q_c = q_{cl} \frac{T - T^o}{T_1 - T^o} \quad (2)$$

Pada kondisi tunak persamaan umum keseimbangan energi termal yang terjadi dalam reaktor ini dapat dituliskan:

$$\begin{matrix} \text{Laju} & \text{Laju} & \text{Laju} & \text{Laju} \\ \text{energi} & \text{energi} & \text{energi} & \text{energi} \\ \text{masuk} & \text{keluar} & \text{pembakaran} & \text{hilang} \end{matrix} \quad (3)$$

Penyusunan persamaan matematika ini dianalisis pada reaktor berbentuk silinder berjari-jari R dengan satu dimensi ke arah sumbu Z.

Energi dalam bentuk panas masuk melalui konduksi sepanjang sumbu z adalah

$$Q_{cond-in} = \pi R^2 q_z|_z \quad (4)$$

Energi dalam bentuk panas masuk melalui aliran sepanjang sumbu z adalah

$$Q_{flow-in} = \pi R^2 m_1 C_p (T - T_o)|_z \quad (5)$$

Energi dalam bentuk panas keluar melalui konduksi pada $z + \Delta z$ adalah

$$Q_{cond-out} = \pi R^2 q_z|_{z+\Delta z} \quad (6)$$

Energi dalam bentuk panas keluar melalui aliran pada $z + \Delta z$ adalah

$$Q_{flow-out} = \pi R^2 m_1 C_p (T - T_o)|_{z+\Delta z} \quad (7)$$

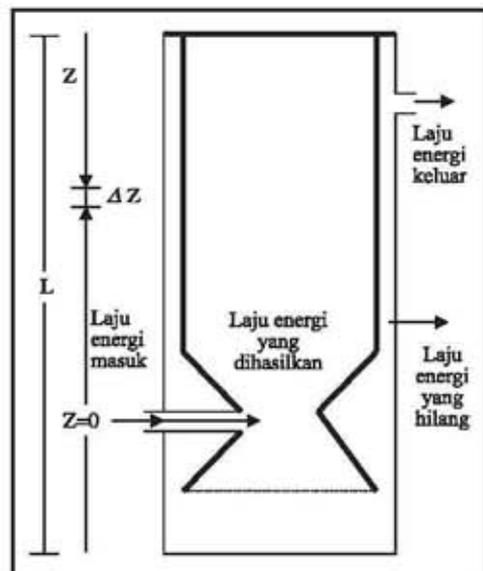
Energi dalam bentuk panas yang diproduksi adalah

$$Q_{prod} = (\pi R^2 \Delta Z) q_c \quad (8)$$

Apabila persamaan 4) sampai dengan 8) dimasukkan ke dalam persamaan 3), dengan laju energi hilang dianggap sama dengan nol dan kemudian dibagi dengan $(\pi R^2 \Delta Z)$ maka diperoleh

$$\left[\frac{dq_z}{dz} \right] + \left[m_1 C_p \frac{dT}{dz} \right] = [q_c] \quad (9)$$

Dengan mensubstitusi *Fourier's Law* ke dalam persamaan 9) dan mengasumsikan bahwa konduktivitas aksial efektif ($k_{z\text{ eff}}$) konstan, sehingga diperoleh persamaan berikut



Gambar 1. Skema Keseimbangan Energi dalam Reaktor Gasifier

$$\left[-k_{z,eff} \frac{d^2T}{dz^2}\right] + \left[m_1 C_p \frac{dT}{dz}\right] = [q_c] \quad (10)$$

Dari persamaan 10) dapat diaplikasikan pada zona I ($z < 0$) apabila q_c dibuat sama dengan nol. Zona I ($z < 0$) merupakan bagian gasifier dimana udara dihembuskan ke dalam reaktor dan sebagai tempat penampungan abu sisa hasil oksidasi. Sehubungan dengan hal tersebut persamaan 10) tersebut dapat dituliskan sebagai

$$\left[m_1 C_p \frac{dT}{dz}\right] = k_{z,eff} \frac{d^2T}{dz^2} \quad (11)$$

(a) Pemodelan matematika untuk zona I (di bawah grate)

Pendugaan distribusi suhu sepanjang arah aksial (z) pada Zona I ($z < 0$), dengan nilai $q_c = 0$ dapat dilakukan dengan menyelesaikan persamaan (10), sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} -k_{z,eff} \frac{d^2T^I}{dz^2} + m_1 C_p \frac{dT^I}{dz} &= 0 \\ -a \frac{d^2T^I}{dz^2} + b \frac{dT^I}{dz} &= 0 \quad (12) \\ -am^2 + bm &= 0 \end{aligned}$$

Penyelesaian umum : $K_1 e^{m_1 z} + K_2 e^{m_2 z}$

(b) Pemodelan matematika untuk zona II (di atas grate)

Pada zona II terjadi proses : oksidasi, pirolisis, dan pengeringan. Untuk menduga distribusi suhu sepanjang arah aksial (z) pada Zona II ($0 < z < L$), persamaan dapat diselesaikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} -k_{z,eff} \frac{d^2T^{II}}{dz^2} + m_1 C_p \frac{dT^{II}}{dz} &= q_c \\ -a \frac{d^2T^I}{dz^2} + b \frac{dT^I}{dz} - q_{c1} \frac{T - T^o}{T_1 - T^o} &= 0 \quad (13) \\ -am^2 + bm - c &= 0 \end{aligned}$$

Penyelesaian umum : $K_1 e^{m_1 z} + K_2 e^{m_2 z}$

2. Persamaan Imbert Gasifier Unggun Tetap Aliran Kebawah

Laju gas yang disyaratkan untuk gasifikasi dinyatakan dengan (TB Reed, HEM Stessen, 1985)

$$U_s = \frac{2 \cdot \Phi_m}{\pi \cdot 4 \cdot D^2} \quad (14)$$

Kecepatan minimum aliran gas

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g \cdot d_p} \left[\left((7,696)^2 + 0,00605 \cdot A_r \right)^{1/2} - 7,696 \right] \quad (15)$$

Konstanta gasifikasi

$$A_r = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (16)$$

Tinggi fluidized bed

$$H_f = H_{mf} + \frac{8,418 \cdot (U_s - U_{mf})^{0,738} \cdot d_p^{1,006} \cdot \rho_s^{0,376} \cdot H_{mf}}{U_{mf}^{0,937} \cdot \rho_g^{0,126}} \quad (17)$$

Untuk mendapatkan ukuran partikel yang ideal, *setting chamber* horizontal, panjang L, tinggi h, dan kecepatan gas V, maka dengan menerapkan teorema Stokes, diameter minimum partikel adalah

$$d_{min} = \sqrt{\frac{18h \cdot v \cdot \mu}{\rho_p \cdot g \cdot L}} \quad (18)$$

3. Energi Pembakaran Gas Hasil Gasifikasi

Energi yang dimiliki gas mampu bakar hasil proses gasifikasi dalam reaktor merupakan perkalian antara jumlah mol setiap unsur dengan nilai kalor pembakarannya, dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned} Q_g = & (m_{gasH_2})(\Delta H_{gasH_2}) + (m_{gasCO})(\Delta H_{gasCO}) \\ & + (m_{gasCH_4})(\Delta H_{gasCH_4}) + (m_{gasC_2H_6})(\Delta H_{C_2H_6}) \\ & + (m_{gasC_3H_8})(\Delta H_{C_3H_8}) \quad (19) \end{aligned}$$

Tabel 1. Hasil Analisis Proksimat dan Ultimat Kayu Borneo, Asem dan Lamtorogung

| No | Jenis Analisis | Kayu Borneo | Kayu Asem | Kayu Lamtorogung |
|----|----------------------------|-------------|-----------|------------------|
| 1 | Proximate | | | |
| | Kadara Air (%) | 9,25 | 7,78 | 12,98 |
| | Bahan Menguap (%) | 72,18 | 78,55 | 73,04 |
| | Karbon Tetap (%) | 18,31 | 12,06 | 12,96 |
| 2 | Ultimate | | | |
| | Kandungan Abu (%) | 0,25 | 1,59 | 1,02 |
| | Karbon (%) | 47,87 | 43,86 | 42,85 |
| | Hidrogen (%) | 5,23 | 5,23 | 4,93 |
| | Nitrogen (%) | 1,43 | 0,25 | 0,15 |
| | Oksigen (%) | 35,98 | 41,29 | 38,07 |
| 3 | Nilai Kalor (kJ/kg) | 18.897,12 | 17.224,29 | 16.351,34 |

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rancang Bangun Gasifier Unggun Tetap Jenis Imbert Aliran ke Bawah

Dengan batasan rancangan reaktor Gasifier yang mampu membangkitkan mesin pembangkit tenaga sebesar 20 kW dengan pola operasi 6 jam tanpa penambahan umpan kayu, reaktor dirancang agar menghasilkan gas mampu bakar yang optimum. Untuk meminimalkan kerugian energi ke udara sekeliling, maka bagian dalam reaktor dilapisi bata tahan api dan dengan mempertimbangkan laju aliran gas minimum yang disyaratkan untuk Imber Gasifier aliran kebawah setebal 100 mm, diameter reaktor 600 mm, diameter throat 120 mm dan tinggi 1.800 mm.

B. Analisis Proksimat dan Ultimat Kayu

Pengambilan sampel gas hasil gasifikasi pada gasifier ungun tetap aliran kebawah yang memanfaatkan kayu borneo, asem dan lamtorogung sebagai umpan dilakukan masing-masing dua kali

dan dianalisis dengan menggunakan Gas Chromatography di Laboratorium Sumber Daya Energi Puspipptek Serpong, dengan menggunakan metoda diteksi konduktivitas termal (TCD) dan diteksi ionisasi penyalaan (FID). Hasil analisis laboratorium komposisi kayu bakar yang meliputi kandungan karbon, hydrogen, dan oksigen ditampilkan pada Table 1. Tampak bahwa kandungan unsur C, H, dan O dari ketiga bahan uji menunjukkan komposisi yang berbeda, hal ini disebabkan karena kerapatan kayu tersebut berbeda. Kayu Borneo memiliki kandungan bahan menguap lebih kecil dibanding dua jenis kayu lainnya, sehingga kayu Borneo memiliki kepadatan dan kekerasan paling tinggi. Hal ini berhubungan dengan kandungan karbon tetap dan karbon terikat dari kayu Borneo yang tinggi, sehingga mempengaruhi komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan, terutama gas mampu bakar CO. Sedangkan untuk gas mampu bakar CH₄ kayu lamtorogung memberikan kandungan yang paling besar, walaupun kandungan karbonnya

Tabel 2. Data Analisis Gas Mampu Bakar Hasil Gasifikasi

| Komposisi & Uraian | H ₂ (%wt) | CO (%wt) | CO ₂ (%wt) | CH ₄ (%wt) | C ₂ H ₆ (%wt) | C ₃ H ₈ (%wt) |
|--------------------|----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Jenis Kayu | | | | | | |
| Borneo | 0 | 55,59 | 42,90 | 1,14 | 0,299 | 0,075 |
| Lamtorogung | 0 | 41,23 | 55,86 | 2,10 | 0,66 | 0,15 |
| Asem | 0 | 43,10 | 54,28 | 1,93 | 0,52 | 0,17 |

Tabel 3. Ketersediaan Energi dan Konsumsi Bahan Bakar

| Tipe Gasifier | Gasifier Unggun Tetap Aliran Kebawah, Jenis Imbert | | |
|-------------------------|--|---------------------|-----------------|
| Jenis Bahan Uji | Konsumsi Kayu (kg) | Konsumsi Arang (kg) | Abu (Ash) (kg) |
| Borneo | 29,7 | 5,0 | 1,2 |
| Lamtorogung | 30,6 | 5,0 | 0,9 |
| Asem | 37,0 | 5,0 | 1,1 |
| Energi hasil Pembakaran | Borneo | Lamtorogung | Asem |
| Q _g | 60,39 kW | 58,98 kW | 61,82 kW |
| Konsumsi Kayu Spesifik | 0,082 kg/kW-jam | 0,085 kg/kW-jam | 0,100 kg/kW-jam |

paling rendah, hal ini disebabkan oleh tingginya kadar air yang dimiliki (12,98%) Dengan tingginya kandungan karbon tersebut kayu Borneo memiliki nilai kalor paling tinggi.

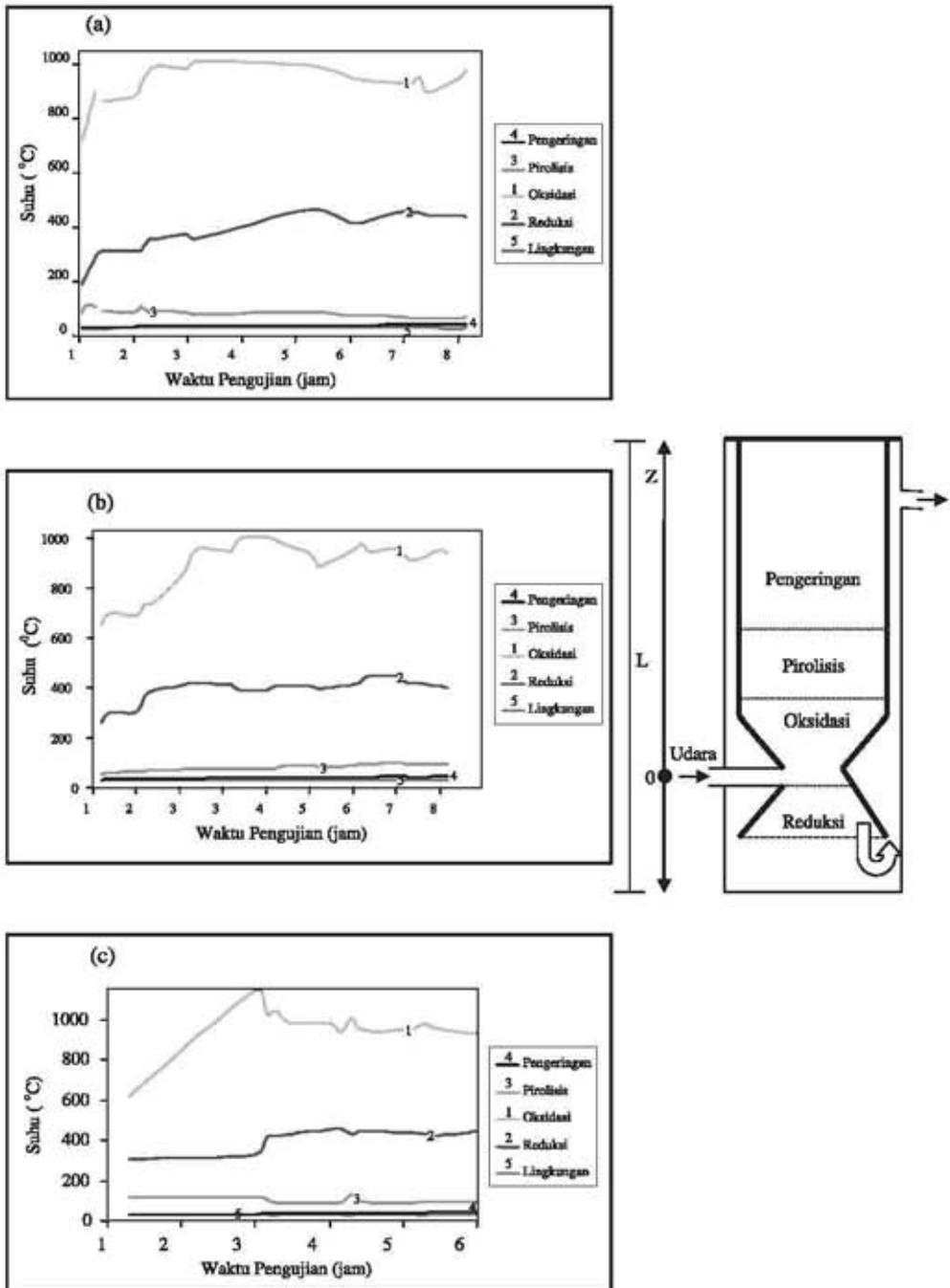
Kandungan Nitrogen berpengaruh langsung terhadap suhu pembakaran di daerah oksidasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kayu lamtorogung memberikan suhu oksidasi yang paling tinggi, karena kandungan nitrogennya paling kecil (0,15%).

Gas mampu bakar yang dihasilkan dari ketiga bahan uji yang terdiri dari karbon monoksida, hidrogen, metana, propana, etana dan gas lainnya, ditampilkan pada Tabel 2. Dari data hasil analisis kromatografi gas yang diambil pada sisi keluar reaktor menunjukkan kecenderungan bahwa besarnya kandungan karbon, hidrogen, dan oksigen dari ketiga bahan uji berpengaruh

terhadap komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan. Untuk kayu borneo memberikan komposisi mampu bakar CO jauh lebih tinggi dibanding dengan kedua van uji yang lain. Sedangkan untuk CH₄ dan gas mampu bakar lainnya tidak berbeda jauh hasilnya. Hal ini kemungkinan besar diakibatkan oleh proses pembentukan CO dari hasil reaksi pembakaran di zona reduksi berlangsung secara cepat dan merata. Dari hasil pengujian tidak diperoleh kandungan gas hidrogen, hal ini disebabkan karena kandungan air dalam umpan kayu relatif rendah yaitu dibawah 13 %

C. Analisis Energi

Konsumsi bahan bakar spesifik menggambarkan sejauh mana proses konversi energi bahan bakar menjadi energi mampu bakar yang dapat dimanfaatkan untuk mesin pembangkit



Gambar 2. Pola Suhu terhadap waktu pengujian (a) Kayu Borneo, (b) Kayu Asem, dan (c) Kayu Lamtorongung.

tenaga listrik dalam suatu instalasi gasifier unggun tetap aliran kebawah. Hasil analisis pemakaian bahan bakar spesifik dan energi selama 6 jam ditampilkan pada Tabel 3.

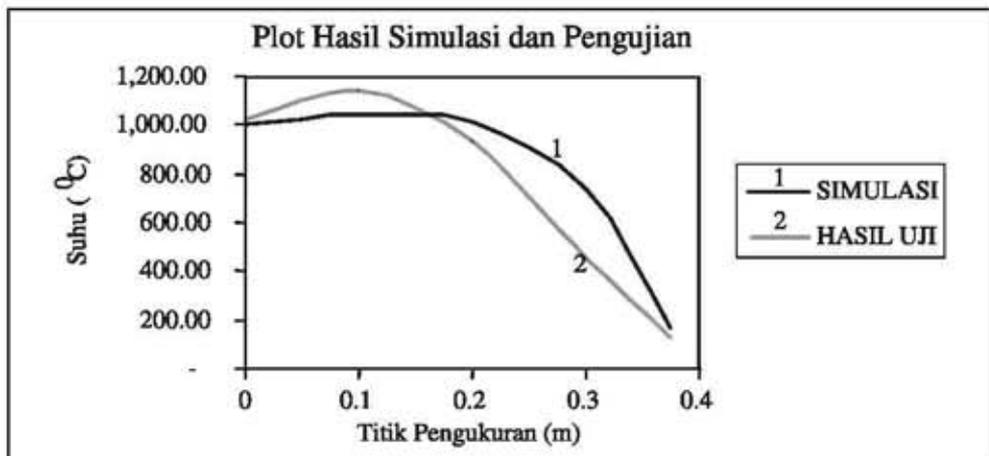
Dengan menggunakan data-data yang diperoleh dari hasil pengukuran dan analisis laboratorium, maka dapat dihitung besarnya konsumsi bahan bakar spesifik kayu dan energi pembakaran, yang dinyatakan sebagai Q_g . Dari Tabel 3 tampak bahwa konsumsi kayu spesifik borneo paling rendah (0,082 kg/kW-jam) dibandingkan dengan dua bahan uji lainnya, hal ini disebabkan karena dari hasil analisis ultimat dan proksimat, kayu borneo memiliki kandungan karbon tetap (18,31 %) dan karbon terikat yang paling tinggi (47,87%), sehingga untuk waktu pembakaran yang sama, jumlah kayu Borneo yang diperlukan untuk pembakaran tersebut lebih sedikit (29,7 kg). Untuk menghasilkan besaran daya yang relatif sama, kayu borneo memberikan konsumsi kayu spesifik yang paling baik.

Dari hasil perhitungan energi, diperoleh energi biomassa yang dihasilkan oleh gasifier sebesar 60,39 kW, angka ini diperoleh sebagai hasil perkalian konsumsi kayu per satuan

waktu terhadap nilai kalor dan perbedaan suhu yang terjadi. Sehingga dengan asumsi efisiensi termal mesin pembangkit tenaga sebesar 33 %, dapat digunakan mesin pembangkit berkapasitas maksimum 20 kW dan gas buang dari mesin pembangkit tenaga tersebut dapat dimanfaatkan untuk pemanas generator mesin pendingin adsorpsi pasangan methanol-silikagel.

D. Distribusi suhu gas dalam Gasifier

Pada proses gasifikasi dalam gasifier, suhu yang ditimbulkan berbeda untuk setiap zona dan waktu. Pola distribusi suhu di zona oksidasi, reduksi, pirolisis, dan pengeringan untuk ketiga jenis bahan uji ditampilkan pada Gambar 3. Suhu oksidasi dan reduksi secara teoritis seharusnya memiliki nilai suhu yang sama dan tidak merupakan fungsi waktu. Akan tetapi pola distribusi suhu yang ditampilkan pada Gambar 2 menunjukkan bentuk kurva yang berfluktuasi terhadap waktu. Hal ini disebabkan karena penurunan kayu dalam reaktor terjadi secara *intermitten*, sehingga kecepatan pembakaran tidak seragam untuk periode waktu yang sama. Pola ini tidak berlaku untuk pola distribusi suhu di zona pengeringan dan pirolisis, dimana



Gambar 3. Pola distribusi suhu hasil uji dan simulasi

keduanya memiliki kecenderungan yang relatif konstan.

Kemungkinan besar hal ini diakibatkan karena kedua zona tersebut tidak berhubungan langsung dengan reaksi pembakaran, melainkan mendapatkan energi termal dari proses pembakaran di zona oksidasi.

Pola distribusi perubahan suhu terhadap jarak ketinggian gasifier hasil simulasi dan hasil uji ditampilkan pada Gambar 3. Terjadi perbedaan suhu hasil penyelesaian numerik dengan suhu hasil uji selama proses oksidasi dan reduksi, akan tetapi keduanya memiliki kecenderungan bentuk kurva yang sama. Dari Gambar 3 tampak bahwa untuk jarak 150 mm dari zona oksidasi menunjukkan suhu yang tinggi dan relatif konstan, dengan penurunan suhu secara tajam dimulai pada jarak 200 mm yaitu di daerah pirolisis dan pengeringan, pada kedua daerah tersebut besarnya suhu diperoleh dari hasil rambatan energi panas dari daerah oksidasi sebagai sumber energi pembakaran.

KESIMPULAN

Dari 3 kali pengujian dengan jenis kayu borneo, asem, dan lamtorogung, yang dilanjutkan dengan analisis kromatografi gas dan analisis proksimat, ultimat serta nilai kalor bahan bakar, maka disimpulkan sebagai berikut

1. Model matematika yang dibuat sudah memenuhi kesesuaian dengan kondisi hasil pengujian sebenarnya.
2. Gasifier unggul tetap jenis aliran kebawah yang dirancang berdimensi dengan tebal 100 mm, diameter reaktor 600 mm, diameter throat 120 mm dan tinggi 1.800 mm mampu menghasilkan ketersediaan energi 60,39 kW dengan konsumsi pemakaian bahan bakar spesifik terkecil 0,082 kg/kW-jam untuk jenis umpan kayu Borneo.

DAFTAR NOTASI

- a : Konstanta
 b : Konstanta
 c : Konstanta
 C_p : Panas jenis udara (J/kg^oC)
 d_p : Rata-rata diameter partikel (m)
 D : Diameter reaktor gasifier (m)
 g : Percepatan gravitasi (m/detik²)
 H_f : Ketinggian dari fluidized bed (m)
 H_{mf} : Ketinggian dari fluidized bed terendah (m)
 q_{c1} : Laju volume energi hasil reaksi pembakaran, m³/detik
 Q_{gas} : Energi gas hasil gasifikasi (kJ)
 R : Jari-jari gasifier (m)
 T^o : Suhu lokal pada bed reaktor, °C
 T_1 : Suhu lokal pada masuk bed reaktor, °C
 T : Suhu lokal pada keluar bed reaktor, °C
 U_s : Kecepatan gas yang disyaratkan untuk gasifikasi (m/detik)
 U_{mf} : Kecepatan minimum fluida (m/detik)
 μ : Viskositas dari gas fluida (kg/m.detik)
 ρ_g : Massa jenis gas (kg/m³)
 ρ_s : Massa jenis partikel padatan (kg/m³)
 v_1 : Kecepatan superficial gas (m/det)
 w : Laju aliran massa (kg/det)
 ρ_s : Massa jenis partikel (normal 1000 – 1500 kg/m³)
 μ : Viskositas dari produksi gas (220 x 10⁻⁷ kg/m.detik pada suhu 250 °C)
 Φ_m : Stoikiometrik aliran udara pada suhu lantai (m³/detik)
 ρ_1 : Densitas kayu (kg/m³)
 ρ_s : Massa jenis partikel (kg/m³)
 ρ_g : Massa jenis gas (kg/m³)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah K et al. *Energi dan Listrik Pertanian*. 1998. JICA-DGHE/IPB PROJECT/ADAET:JTA-9a (132). Institut Pertanian Bogor. Bogor. IPB.

- Bhattacharya S.C.1997. *State of the Art of Biomass Gasification*. Bangkok. Thailand. Energy Program, Asian Institute of Technology.
- Bird, R.B. et al. *Transport Phenomena*. 1994. John Willey & Son Inc., New York.
- Gaos Y.S., *Prospek Penerapan Gasifier Unggun Tetap Aliran Kebawah untuk Pembangkit Tenaga Listrik dengan Umpan Sekam Padi*,2002, FT Univ. Indonesia.
- Jain B.C. 1996. *Downdraft Gasifier with Compression Ignation Engine Generator Output 3,5 kW to 500 kW* . Gujarat. Bagota. India.
- Sitharama Rao T.I. P. Rama Mohan, S. Srinivasa Rao, P. Ravi Kumar 1994. *Performance*