

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 6, No. 1, April 2018



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Ristek Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, dan mulai tahun ini berisi 15 naskah untuk setiap nomornya. Peningkatan jumlah naskah pada setiap nomornya ini dimaksudkan untuk mengurangi masa tunggu dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi online. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota PERTETA tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain meliputi teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam invited paper yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, review perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, technical paper hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta research methodology berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (online submission) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Scopus ID: 6602716827, Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya - Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, Institut Pertanian Bogor)
Muhammad Faiz Syuaib (Scopus ID: 55368844900, Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin - Makassar)
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana - Bali)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah (Scopus ID: 55782905900, Institut Pertanian Bogor)
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, Institut Pertanian Bogor)
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Anggota : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, Institut Pertanian Bogor)
Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, Institut Pertanian Bogor)
Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, Institut Pertanian Bogor)
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, Institut Pertanian Bogor)
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, Institut Pertanian Bogor)
Administrasi : Diana Nursolehat (Institut Pertanian Bogor)

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaan (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 6 No. 1 April 2018. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Edward Saleh, MS (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Nurpilihan Bafdal, M.Sc (Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran), Prof.Dr.Ir. Lilik Sutiarmo, M.eng (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Andri Prima Nugroho, STP., M.Sc (Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Bambang Purwantana (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Radite Praeko Agus Setiawan, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Prof.Ir. I Made Anom Sutrisna Wijaya, M.App.Sc., Ph.D (Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana), Dr.Ir. Amin Rejo, M.P (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Daniel Saputra, MS (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Hasbi, MSi (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Dr. Siti Nikmatin, M.Si (Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor), Dr. Farkhan (PT. CNC Controller Indonesia), Dr. Alimuddin, ST., MM., MT (Universitas Sultan Ageng Tirtayasa) Dr. Dedy Wirawan Soedibyo, STP., M.Si (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Jember), Dr. Radi, STP., M.Eng (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Lenny Saulia, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Nursigit Bintoro, M.Sc (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Andasuryani, STP., M.Si (Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Andalas), Dr.Ir. I Wayan Budiastara, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr. Ir. Nora H. Pandjaitan, DEA (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Rusnam, MS (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas), Dr. Radi, STP., M.Eng (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Universitas Gadjah Mada), Dr. Suhardi, STP., MP (Program Studi Keteknikan Pertanian, Universitas Hasanuddin) Dr. Ir. Yuli Suharnoto, M.Eng (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

Simulasi Tungku Gasifikasi Tipe Natural Draft Berbasis Model Efek Cerobong dan Keseimbangan Termokimia

Simulation of Natural Draft Gasification Stove based on Chimney Effect and Thermochemical Equilibrium

Leopold Oscar Nelwan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: lonelwan@yahoo.com
Dyah Wulandani, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: dwulandani@yahoo.com
Edy Hartulistiyoso, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor. Email: edyhartulistiyoso@gmail.com
Sri Endah Agustina, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Email: eendah@perdana-consulting.co.id
Dziyad Dzulfansyah, Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor.
Email: dziyadtmb46@gmail.com
Erlanda Augupta Pane, Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Institut Pertanian Bogor.
Email: pane_erlanda@yahoo.com

Abstract

This study was aimed to simulate a novel configuration of gasification stove with the natural draft principles (natural draft gasification or called as NDG stove) based on chimney effect and thermochemical equilibrium modeling. The thermochemical equilibrium model used general stoichiometric gasification, methanation and water-gas shift equations and their equilibrium constant equations as well as the general energy balance equation. Those equations were coupled with the chimney effect equation and then solved to obtain the reaction coefficients, equilibrium constants, reaction temperature as well as the mass flow rate of air. Simulation was performed by using VBA programming codes in Excel. Subsequently, a stove was built in order to obtain the charcoal consumption rate data which is required to validate the model. The test results showed that the combustion rate was constant i.e. 8.8 g/min and the quality of the flame of the stove was visually good. The calculation result showed that the model could successfully predict the product gases including CO, CH₄, CO₂, O₂, N₂ and other gases. The simulation showed that by using lower stove height (0.5 and 0.4 m) the combustible gases (CO, H₂ and CH₄) compositions were increased in such a way that with same combustion rate the potential heat of gas increased from 2.33 kW at stove height of 0.6 m to 2.63 kW at 0.4 m.

Keywords: NDG stove, charcoal, gasification, modeling

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasi tungku gasifikasi dengan konfigurasi baru yang menggunakan prinsip *natural draft* (tungku *natural draft gasification* atau disebut sebagai tungku NDG) didasarkan pada pemodelan efek cerobong dan keseimbangan termokimia. Model keseimbangan termokimia menerapkan persamaan stoikiometri untuk gasifikasi, *methanation* dan *water-gas shift*, persamaan-persamaan konstanta keseimbangannya serta persamaan neraca energi umum. Persamaan-persamaan tersebut digabungkan dengan persamaan efek cerobong dan dipecahkan untuk memperoleh koefisien reaksi, konstanta keseimbangan, suhu reaksi dan laju aliran massa udara. Selanjutnya tungku tersebut dikonstruksi dan diuji untuk memperoleh data laju konsumsi arang yang dibutuhkan untuk validasi model. Hasil pengujian kinerja menunjukkan bahwa penggunaan tungku untuk arang kayu memiliki laju pembakaran yang konstan 8.8 g/menit dan kualitas nyala api tungku ini cukup baik secara visual. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa model yang diterapkan telah dapat memprediksi konsentrasi gas-gas produk yang mencakup CO, CH₄, CO₂, O₂ serta gas N₂ dan gas-gas lainnya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tinggi tungku yang lebih rendah (0.5 dan 0.4 m) memberikan konsentrasi gas-gas mampu bakar yang lebih tinggi sedemikian hingga dengan laju konsumsi arang yang sama daya gas potensialnya meningkat dari 2.33 kW pada tinggi 0.6 m menjadi 2.63 kW pada tinggi 0.4 m.

Kata kunci: tungku NDG, arang, gasifikasi, pemodelan

Diterima: 27 Februari 2017; Disetujui: 6 Desember 2017

Pendahuluan

Sebagian masyarakat karena berbagai alasan masih menggunakan biomassa sebagai bahan bakar untuk memasak. Bahan bakar biomassa untuk tungku masak pada umumnya diperoleh dari limbah tanaman yang sumbernya bersifat berkelanjutan. Walaupun demikian, terdapat beberapa kendala dari penggunaan biomassa seperti nyala api yang kurang stabil, timbulnya asap selama proses pembakaran, sukar dikendalikan serta sulitnya menghidupkan atau mematikan tungku. Kendala-kendala ini menyebabkan biomassa dihindari penggunaannya sebagai bahan bakar terutama untuk memasak. Penggunaan arang biomassa sebagai bahan bakar tungku masak dapat mengurangi timbulnya asap akan tetapi pada pengoperasiannya pada umumnya udara harus dialirkan secara paksa untuk menjaga agar panas yang dihasilkan memadai dan stabil.

Beberapa desain tungku biomassa untuk mengatasi kendala-kendala di atas telah dikembangkan yaitu tungku biomassa berbasis gasifikasi terutama dalam konfigurasi *top lit updraft* (TLUD) (Field, 2012). Ada beberapa kendala dalam penggunaan konfigurasi TLUD yaitu: (1) proses pirolisis dan gasifikasi berlangsung bersamaan pada satu tempat sehingga penggunaan bahan bakar biomassa langsung masih menimbulkan masalah asap, (2) penggunaan bahan bakar arang pada tungku jenis ini sulit dilakukan karena proses pirolisis pada arang kurang memadai sehingga pembakaran lebih banyak terjadi pada permukaan yang tidak menimbulkan nyala api dan (3) untuk menjaga kontinuitas gas yang dihasilkan konfigurasi ini membutuhkan aliran udara yang digerakkan oleh kipas yang memerlukan input energi mekanik. Walaupun demikian, tungku TLUD dapat juga dioperasikan dengan basis *natural draft* namun harus dengan menggunakan biomassa langsung (Tryner et al., 2014). Penggunaan tungku arang biasa (konvensional) umumnya masih membutuhkan waktu untuk memasak yang cukup lama. Abasiryu et al. (2016) dengan tungku arang biasa dan laju konsumsi arang 8-9 g/menit membutuhkan waktu 18-21 menit untuk mendidihkan 2000 g air. Emisi CO dari tungku arang konvensional juga cukup tinggi (Zhang et al., 2011; Jetter et al., 2012) karena CO yang dihasilkan tidak terbakar dengan baik. Melalui proses gasifikasi, gas CO yang dihasilkan dapat mencapai konsentrasi dimana pembakaran dapat berlangsung. Pada umumnya proses gasifikasi harus menggunakan blower untuk mengalirkan udara pada laju yang memadai, akan tetapi biaya investasi dan operasinya menjadi mahal. Pengaliran udara dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip *natural draft*. Oleh karena itu, pengembangan tungku gasifikasi berbasis *natural draft* atau tungku *natural draft gasification* (NDG) dengan bahan bakar arang dapat mengatasi kendala kebutuhan input energi mekanik, meminimalkan asap yang dihasilkan dan

meningkatkan peluang pembakaran CO yang lebih baik, akan tetapi tungku jenis ini masih sangat jarang dikembangkan. Sebuah tungku NDG telah didesain dan dianalisis secara CFD (Nelwan et al. 2013; Pane et al. 2014) dan pada studi ini dilakukan pemodelan dan simulasi untuk pengembangannya.

Berbagai pemodelan pada tungku masak yang menggunakan biomassa telah dikembangkan (MacCarty and Bryden, 2015). Pemodelan keseimbangan termokimia telah digunakan pada proses-proses gasifikasi dengan hasil yang cukup baik (Gautam, 2010). Sedangkan pemodelan efek cerobong pada tungku biomassa secara umum telah dilakukan (Agenbroad, et al. 2011a, 2011b) akan tetapi pemodelan dan simulasi pada tungku memasak berbasis gasifikasi masih belum banyak dilakukan. Padahal dengan simulasi tersebut diharapkan desain tungku yang memberikan kinerja proses gasifikasi dan pembakaran yang baik dapat diperoleh. Desain tungku dalam hal ini ukuran tinggi tungku akan mempengaruhi besarnya aliran udara akibat *natural draft* yang dihitung melalui efek cerobong dan selanjutnya akan menentukan bagaimana komposisi gas yang akan terbentuk melalui proses gasifikasi yang dihitung melalui model ekuilibrium. Sebaliknya suhu gasifikasi dari proses tersebut akan menentukan laju aliran udara yang akan tercipta. Komposisi gas hasil gasifikasi menentukan kualitas gas untuk proses pembakaran dalam memasak. Tinggi tungku yang dipilih diharapkan dapat menghasilkan konsentrasi gas-gas mampu bakar yang menghasilkan daya pembakaran yang tinggi. Kajian pemodelan efek cerobong yang dipasangkan dengan model ekuilibrium untuk tungku tersebut masih belum banyak dikembangkan.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan simulasi komposisi gas pada tungku NDG berbasis model efek cerobong dan keseimbangan termokimia dengan bahan bakar arang kayu yang dapat digunakan untuk mengembangkan desain tungku NDG.

Bahan dan Metode

Desain Konsep

Skema desain tungku NDG dapat dilihat pada Gambar 1. Bahan bakar biomassa yang digunakan adalah arang kayu. Bagian dasar tungku dibuat dari pelat berlubang-lubang dengan diameter 2 mm. Arang kayu ditempatkan di ruang pengumpan dan ruang pembakaran primer. Selanjutnya, arang kayu pada ruang pembakaran primer dinyalakan. Arang kayu yang telah terkonsumsi di ruang pembakaran primer tersebut akan terganti oleh arang kayu yang berasal dari ruang pengumpan.

Karena perbandingan jumlah udara dan bahan tidak berada pada jumlah pembakaran sempurna (jumlah stoikiometrik), arang mengalami proses gasifikasi yang terdiri dari proses oksidasi dan juga reduksi sehingga terbentuk gas-gas yang mencakup

CO, H₂, CH₄, CO₂, H₂O dan gas-gas lain termasuk gas-gas penyusun udara yang tak bereaksi.

Gerakan aliran udara sekunder yang mengalir melalui bagian pinggir tungku diinduksi oleh konveksi bebas, sehubungan dengan beda suhu pada daerah pembakaran dan lingkungan. Selanjutnya gas-gas tersebut mengalir ke atas melalui saluran gas utama dan pada bagian tengah-atas gas-gas tersebut tercampur dengan aliran udara sekunder dan gas-gas mampu bakarakan mengalami proses pembakaran yang menghasilkan panas. Material yang digunakan untuk tungku tersebut adalah pelat besi dengan ketebalan 1 mm. Insulasi dilakukan dengan menggunakan *ceramic fiber*.

Pemodelan

Efek Cerobong

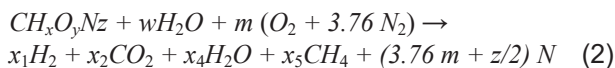
Efek cerobong pada kasus ini adalah gerakan aliran udara yang disebabkan oleh perbedaan suhu antara bagian dalam tungku (suhu gasifikasi) dengan suhu lingkungan. Laju aliran massa udara yang mengalir melalui tumpukan arang kayu yang digunakan pada proses gasifikasi dimodelkan menggunakan pemodelan efek cerobong pada tungku *rocket* (Agenbroad, 2010):

$$\dot{m}_a = CA \left(\frac{P}{R_s} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \sqrt{2gh \left(\frac{T - T_{amb}}{T_{amb}} \right)} \tag{1}$$

dimana \dot{m}_a adalah laju aliran massa udara (kg/s), C adalah konstanta efek cerobong, A luas penampang cerobong (m²), P adalah tekanan udara lingkungan, R_s adalah tetapan gas, T adalah suhu gasifikasi dan T_{amb} adalah suhu udara lingkungan (°C).

Keseimbangan Termodinamika Gasifikasi

Komponen utama unsur-unsur penyusun arang kayu diasumsikan mencakup C, H, O dan N. Produk reaksi gasifikasi diasumsikan hanya mencakup CO, H₂, CH₄, CO₂, H₂O serta gas yang tak bereaksi yaitu N₂. Reaksi gasifikasi arang kayu tersebut dapat ditulis sebagai:



di mana x , y , dan z masing-masing adalah jumlah atom hidrogen, oksigen, dan nitrogen per satu atom karbon pada biomassa, w merupakan jumlah air yang terkandung dalam biomassa per kmol biomassa, m adalah jumlah oksigen yang terkandung dalam udara per kmol biomassa, dan x_1 - x_5 , merupakan koefisien-koefisien pada produk reaksi.

Reaksi reduksi yang diasumsikan berlangsung hanya mencakup dua yaitu *water-gas shift* dan *methanation*, secara berturut-turut adalah:



Konstanta ekuilibrium K_{eq} , dapat dinyatakan sebagai:

$$\ln K_{eq} = - \frac{\Delta G_T^o}{RT} \tag{5}$$

Di mana R merupakan konstanta gas universal (8.314 kJ/kmol), T adalah suhu reaksi dan ΔG_T^o merupakan fungsi perubahan energi bebas Gibbs untuk reaksi pada kondisi standar. Fungsi ΔG_T^o sebagai jumlah dari energi bebas Gibbs komponen penyusunnya dapat dinyatakan sebagai berikut (Jarungthammachote dan Dutta, 2006):

$$\Delta G_T^o = \sum_i v_i \Delta g_{f,T,i}^o \tag{6}$$

Sehingga nilai ΔG_T^o untuk reaksi *water-gas shift* ($\Delta G_{T,1}^o$) adalah:

$$\Delta G_{T,1}^o = \Delta g_{f,CO_2}^o + \Delta g_{f,H_2}^o - \Delta g_{f,CO}^o - \Delta g_{f,H_2O}^o \tag{7}$$

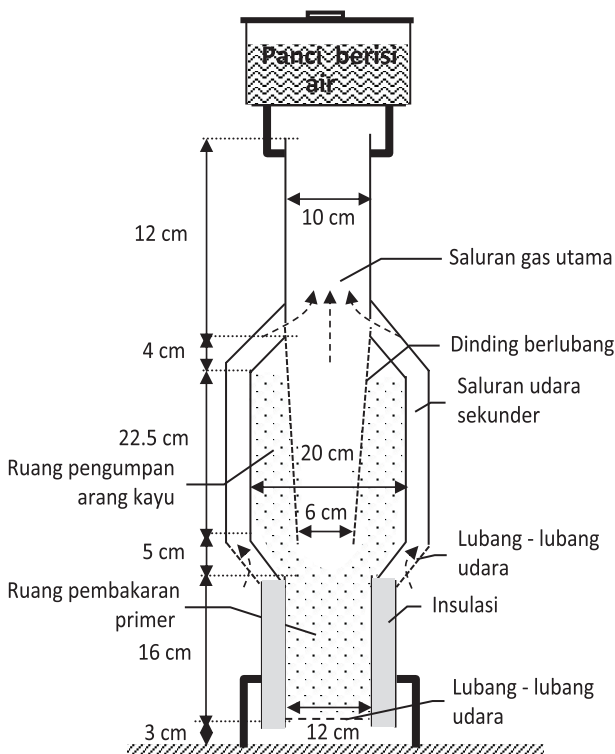
sedangkannilai ΔG_T^o untuk reaksi *methanation* ($\Delta G_{T,2}^o$) adalah:

$$\Delta G_{T,2}^o = \Delta g_{f,CH_4}^o - 2\Delta g_{f,H_2}^o \tag{8}$$

Di mana secara umum Δg_f^o menyatakan fungsi pembentukan Gibbs untuk reaksi standar terhadap suhudari suatu gas:

$$\Delta g_{f,T}^o = h_f^o - a \ln T - bT^2 - \frac{c}{2}T^3 - \frac{d}{3}T^4 + \frac{e}{2T} + f + gT \tag{9}$$

Nilai a , b , c , d , e , f , dan g adalah koefisien-koefisien



Gambar 1. Skema disain tungku gasifikasi tipe *natural draft*.

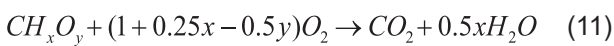
persamaan fungsi pembentukan Gibbs untuk reaksi standar.

Persamaan neraca energi antara reaktan dan produk dapat digunakan dalam menentukan suhu gasifikasi. Neraca energi tersebut dinyatakan sebagai (Syed et al. 2012):

$$\sum_{i=\text{reaktan}} x_i h_{f,i}^0 = \sum_{i=\text{produk}} x_j (h_{f,j}^0 + \Delta h_T) \quad (10)$$

Di mana $h_{f,i}^0$ merupakan entalpi pembentukan dari reaktan i , $h_{f,j}^0$ adalah entalpi pembentukan dari produk j , x_i adalah jumlah mol reaktan i , x_j jumlah mol produk j , Δh_T adalah selisih entalpi dari produk pada suhu T dan pada suhu acuan 298 K.

Reaksi pembakaran biomassa dapat dinyatakan sebagai:



Persamaan (12) dapat digunakan sebagai dasar untuk menghitung entalpi pembentukan biomassa (h_f) yaitu:

$$h_f = HHV - 0.5 x h_{H_2O} - h_{CO_2} \quad (12)$$

dimana HHV adalah *higher heating value* dari arang kayu. Dengan mengetahui persentase komposisi unsur dari arang kayu nilai HHV tersebut dapat diduga dari Syed, et al. (2012).

Selanjutnya, berdasarkan persamaan (2),(3), (4) dan (11) dapat dibentuk persamaan neraca massa untuk karbon, hidrogen dan oksigen serta konstanta ekuilibrium untuk reaksi *methanation* dan *water-gas shift* dapat dinyatakan sebagai:

$$f_1 = 1 - x_2 - x_3 - x_5 = 0 \quad (13)$$

$$f_2 = x + 2w - 2x_1 - 2x_4 - 4x_5 = 0 \quad (14)$$

$$f_3 = y + w + 2m - x_2 - 2x_3 - x_4 = 0 \quad (15)$$

$$f_4 = k_1 (x_2 x_4) - (x_3 x_1) = 0 \quad (16)$$

$$f_5 = k_2 (x_1)^2 - x_5 x_{total} = 0 \quad (17)$$

di mana x_{total} adalah jumlah mol total (dari x_1 sampai x_5).

Daya gas potensial (Q_g) dihitung melalui persamaan berikut:

$$Q_g = HHV_{gas} \times \dot{m}_f \times \frac{1}{Mr_f} \quad (18)$$

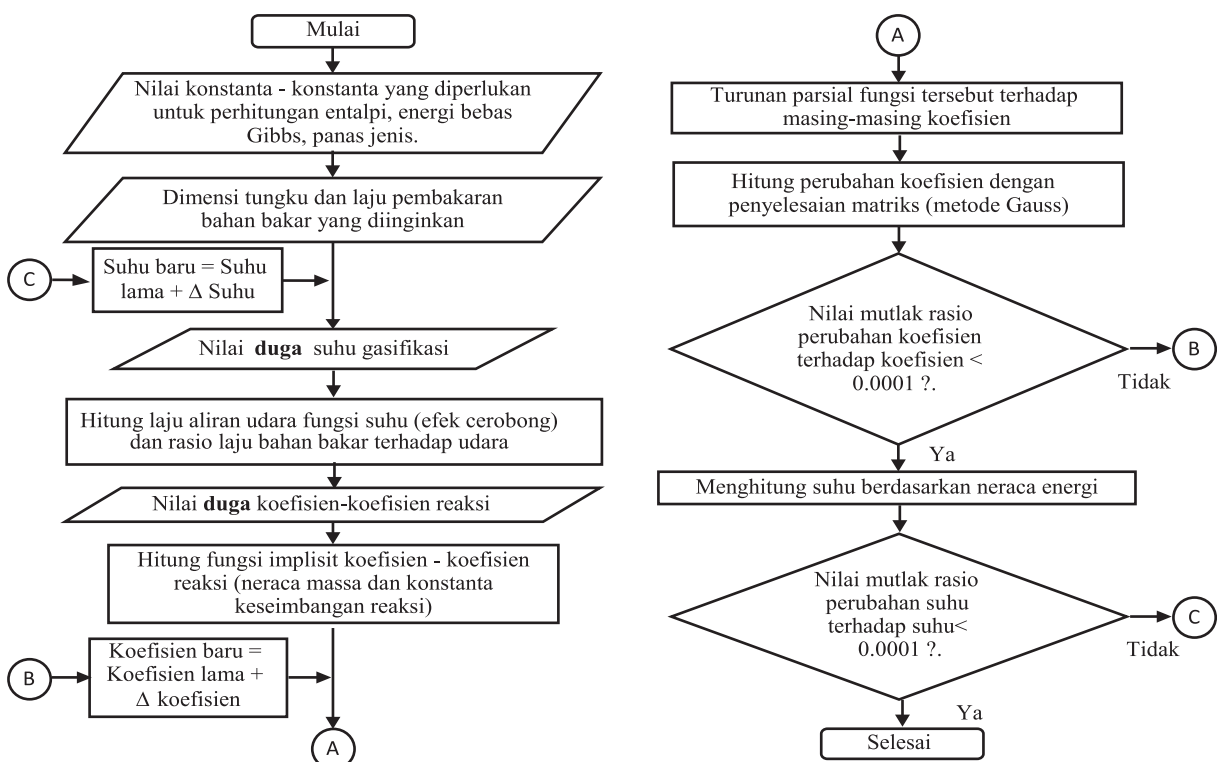
Di mana

$$HHV_{gas} = x_1 HHV_{H_2} + x_2 HHV_{CO} + x_5 HHV_{CH_4} \quad (19)$$

dengan m_f adalah laju konsumsi arang kayu, Mr_f adalah massa molekul dari arang kayu yang dihitung dari persen massa komponennya, sedangkan HHV_{H_2} , HHV_{CO} dan HHV_{CH_4} masing-masing adalah *higher heating value* dari H_2 , CO dan CH_4 .

Simulasi Pemodelan Keseimbangan Termokimia dan Efek Cerobong

Gambar 2 memperlihatkan bagan alir yang digunakan pada simulasi. Persamaan (13) – (17) memperlihatkan bahwa koefisien reaksi ditentukan oleh laju aliran udara (yaitu rasio udara-bahan



Gambar 2. Bagan alir perhitungan pemodelan keseimbangan termokimia dan efek cerobong.

bakar) dan suhu. Koefisien-koefisien reaksi, konstanta ekuilibrium, suhu, serta laju aliran udara akan diperoleh melalui pemecahan persamaan-persamaan tersebut dengan menggunakan metode Newton-Raphson. Perhitungan dilakukan menggunakan pemrograman VBA dalam Excel. Nilai persentase massa komponen arang kayu yang digunakan adalah karbon 84.2%, hidrogen 2.4%, dan oksigen 12.6%.

Pengujian

Pengujian diawali dengan cara mengisi arang kayu ke ruang pembakaran primer 188 g. Setelah ditambahkan dengan minyak solar sebanyak 32 g, arang kayu kemudian disulut. Setelah nyala api hampir padam, udara dihembuskan ke tumpukan ruang primer tersebut dengan menggunakan kipas dari atas saluran gas utama agar peningkatan suhu cepat berlangsung. Selanjutnya arang kayu sebanyak 1012 g ditambahkan ke ruang pengumpan. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan termokopel tipe K pada ruang pembakaran primer, nyala api, dan lingkungan. *Water Boiling Test* (WBT) dilakukan untuk melihat apakah tungku telah memberikan kinerja yang memadai. WBT dilakukan dengan cara memanaskan air sebanyak 5000 g dalam panci dari suhu lingkungan sampai mendidih.

Efisiensi termal tungku (sistem tungku-panci) dihitung dari:

$$\eta = \frac{m_{\text{avg}} c_p (T_{\text{boil}} - T_i) + m_{\text{uap}} h_{\text{fg,avg}}}{m_{\text{fuel}} LHV} \quad (20)$$

dengan m_{avg} adalah massa air rata-rata yang dipanaskan (kg), m_{uap} adalah massa air yang diuapkan (kg), m_{fuel} adalah massa arang kayu yang digunakan selama pengujian WBT (kg), c_p adalah panas jenis air (kJ/kg°C), T_{boil} adalah suhu air saat mendidih (°C), T_i adalah suhu air awal (°C), dan $h_{\text{fg,avg}}$ adalah panas laten penguapan air pada rata-rata (kJ/kg)

Selama proses pengujian tungku diletakkan di atas timbangan digital (kapasitas 30 kg, sensitivitas 1g) sehingga penurunan berat arang kayu yang dikonsumsi dapat diukur, akan tetapi panci diletakkan di atas penyangga sehingga tidak ikut ditimbang. Laju konsumsi bahan bakar dihitung dari penurunan massa arang kayu dibagi dengan waktu pembakaran.

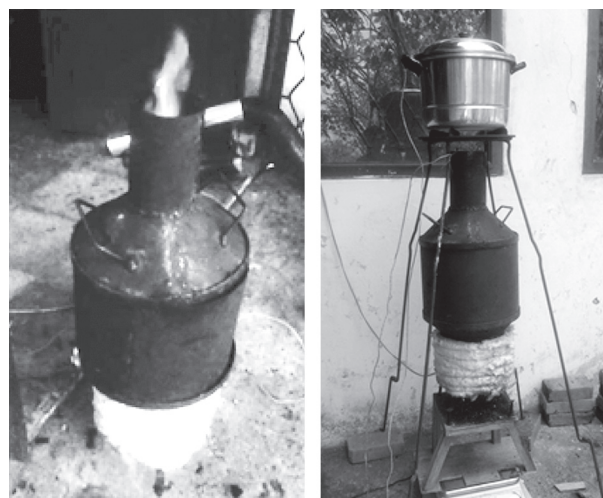
Warna api dan adanya asap diamati secara visual saja. Pengukuran gas yang dihasilkan oleh gasifikasi pada tungku dilakukan dengan menggunakan *gas analyzer* Lancom 4. Prosedur pengukuran dilakukan dengan memadamkan nyala api pada gas yang dihasilkan, sehingga gas yang terukur bukan gas yang telah terbakar di ruang pencampuran, akan tetapi gas hasil proses gasifikasi. Kadar air arang kayu diukur menggunakan metode gravimetri menggunakan *drying oven* SS-204D.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian

Pembakaran primer dilakukan dengan menyalakan arang yang telah dicampur dengan minyak solar dan menghembuskan udara dengan menggunakan kipas (laju aliran massa 0.01 kg/s) kira-kira selama 3-5 detik dan diulang 2-3 kali untuk meningkatkan pembakaran kira-kira sampai 6 menit setelah penyalaan dimulai. Dengan cara yang demikian suhu arang kayu meningkat secara cukup cepat. Dalam waktu 10 menit setelah penyalaan, suhu arang kayu telah mencapai lebih dari 800°C, dan pada saat itu timbul nyala api yang disebabkan oleh gas yang dihasilkan pada proses gasifikasi yang berwarna kebiruan (Gambar 3a). Setelah suhu lebih dari 900°C, nyala api cukup stabil dan udara dapat mengalir secara kontinyu menembus tumpukan arang kayu di ruang pembakaran primer. Setelah pengujian WBT (Gambar 3b), tungku dibiarkan terus menyala sampai arang kayu di dalam tungku hampir habis. Untuk waktu yang cukup lama (57 menit) suhu tumpukan arang kayu cukup stabil pada suhu 1032±26°C. Ini menunjukkan bahwa efek cerobong yang tercipta pada suhu tersebut memiliki laju aliran udara (gas) yang stabil.

Pada percobaan WBT, dibutuhkan waktu 24 menit untuk mendidihkan air sebanyak 5000 g dari suhu awal 31°C dengan konsumsi arang kayu sebesar 210 g. Dengan demikian konsumsi arang kayu rata-rata kurang dari 8.8 g/menit. Gambar 4 memperlihatkan konsumsi arang kayu yang hampir linier terhadap waktu pada pengujian tersebut. Hal ini menunjukkan konsumsi arang kayu berlangsung secara hampir konstan karena arang kayu yang diumpukan di ruang pengumpanan dapat menggantikan secara kontinyu arang kayu yang telah terkonsumsi di ruang pembakaran primer. Pada tahap pembakaran awal, laju konsumsi bahan bakarnya lebih tinggi karena pada saat tersebut



(a)

(b)

Gambar 3. Pengujian tungku: (a) Nyala api, (b) Percobaan WBT.

dihembuskan angin untuk mempercepat waktu peningkatan suhunya.

Pada pengujian WBT diperoleh bahwa asap tidak terlihat dan tidak terdapat jelaga pada panci yang digunakan untuk memasak. Hal ini disebabkan penggunaan arang kayu yang langsung mengalami proses gasifikasi sehingga menghasilkan tar dalam jumlah yang sangat sedikit. Gambar 5 menunjukkan bahwa perubahan suhu air terhadap waktu juga hampir linier. Salah satu faktor yang menyebabkan hal ini adalah laju konsumsi bahan bakar yang cukup konstan. Efisiensi sistem yang diukur dari energi yang digunakan untuk menaikkan suhu dan menguapkan air dalam panci dibagi energi yang diperoleh bahan bakar selama pengujian WBT. Dengan kondisi demikian, efisiensi tungku (η) yang diperoleh menggunakan persamaan (21) adalah 27.4%.

Validasi Model

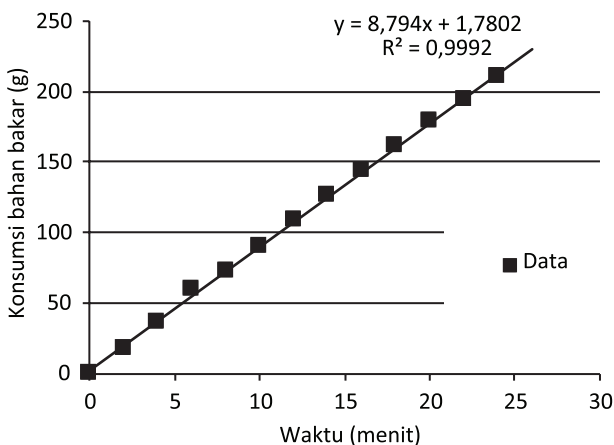
Simulasi keseimbangan termokimia dan termal ini dilakukan dengan menggunakan parameter input sebagaimana yang disajikan pada Tabel 1. Laju pembakaran bahan bakar yang digunakan diperoleh dari hasil percobaan yang dilakukan (8.8 g/menit). Tinggi tungku yang merupakan jarak dari inlet udara ke outlet gas adalah 0.6 m. Tinggi tungku ini lebih tinggi daripada lazimnya tungku biomassa. Hal ini ditujukan untuk membuat efek cerobong

Tabel 1. Parameter yang digunakan pada simulasi.

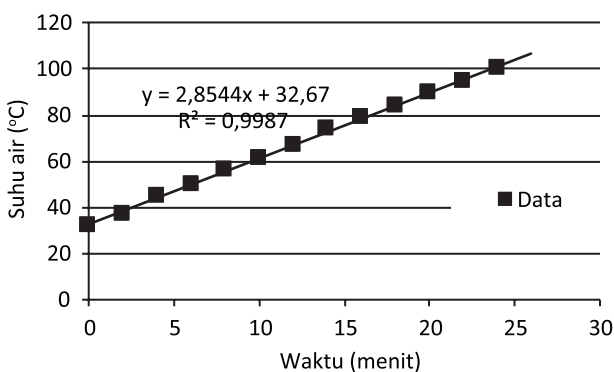
Parameter	Nilai
Laju pembakaran (g/menit)	8.8
Tamb (°C)	30
Diameter (m)	0,06
Luas (m ²)	0,002827
Tinggi (m)	0,6
Konstanta C (-)	0,2
T (°C)	1032
Kehilangan panas	26%
Tekanan udara lingkungan (kPa)	101,325

yang dihasilkan lebih besar. Diameter tungku yang digunakan adalah diameter terkecil yang dilalui oleh udara/gas. Konstanta C pada persamaan (2) yang digunakan adalah 0.2 sedangkan kehilangan panas dari tungku adalah 26%. Kedua parameter tersebut ditentukan secara *trial and error* sedemikian hingga suhu proses mendekati rata-rata suhu tumpukan hasil percobaan yaitu 1032°C. Hal ini dilakukan karena rumitnya pola aliran udara (gas) di dalam tungku terutama ketika gas harus melalui tumpukan arang dan melalui bentuk saluran dengan penampang yang tidak seragam (Gambar 1). Tekanan udara lingkungan diasumsikan sebesar 1 atm.

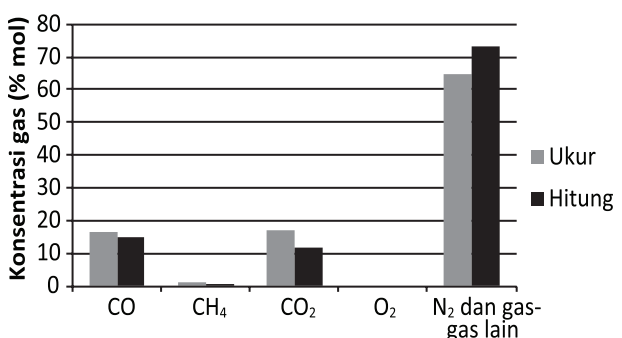
Gambar 6 memperlihatkan konsentrasi (%volume basis kering) dari beberapa gas yang terbentuk serta suhu pembakaran hasil pengukuran dan perhitungan. Secara umum model yang digunakan telah dapat mendekati konsentrasi gas-gas hasil pengukuran. Akan tetapi, dapat dilihat bahwa konsentrasi CO hasil perhitungan (15.1%) sedikit lebih rendah dibandingkan pengukuran (16.7%) sedangkan CO₂ hasil perhitungan (11.5%) lebih rendah dibandingkan pengukuran (17.2%). Hal ini mungkin terjadi akibat berlangsungnya pembakaran sebagian kecil CO dengan O₂ yang berlebih yang berasal dari udara yang masuk. Hal ini didukung dari data yang menunjukkan bahwa seluruh O₂ terkonsumsi dalam tungku sehingga jumlah oksigen yang terukur di outlet adalah 0%. Jumlah persentase dari CO dan CO₂ yang lebih rendah dibandingkan



Gambar 4. Konsumsi bahan bakar pada percobaan WBT.



Gambar 5. Perubahan suhu air selama uji WBT.



Gambar 6. Perbandingan konsentrasi gas antara pengukuran dan perhitungan.

Tabel 2. Hasil simulasi untuk tinggi tungku yang berbeda.

Parameter	Satuan	Tinggi tungku (m)			
		0.6	0.5	0.4	
Komponen pada gas produk	H ₂	%	3.01	3.45	3.99
	CO	%	15.12	17.77	21.11
	CO ₂	%	11.50	10.07	8.26
	H ₂ O	%	2.29	1.96	1.56
	CH ₄	%	0.33	0.42	0.53
	N ₂	%	67.75	66.33	64.55
Rasio mol udara –bahan bakar	(-)	0.67	0.62	0.57	
Suhu	(°C)	1036.4	953.3	853	
Laju udara	(Nm ³ /jam)	2.66	2.48	2.28	
Nilai kalor	MJ/m ³	2.796	2.901	3.39	
Pressure drop	Pa	4.52	3.69	2.87	
Laju bahan bakar	kg/jam	0.528	0.528	0.528	
Daya gas potensial (Q _g)	kW	2.33	2.36	2.63	
Efisiensi gasifikasi	%	47.0	52.7	59.1	

dengan pengukuran dapat disebabkan oleh jumlah (laju) aliran udara yang lebih besar dibandingkan dengan kenyataan. Laju aliran udara pada simulasi diakibatkan oleh efek cerobong yang diciptakan. Ketika laju aliran udara tinggi, maka gas N₂ yang merupakan gas yang relatif *inert* akan menjadi komponen gas produk yang dominan. Konsentrasi gas CH₄ hasil pengukuran dan perhitungan hampir sama (masing-masing 1.1 dan 0.3%) dan besarnya relatif rendah, sedangkan gas H₂ pada penelitian ini tidak diukur. Hasil perhitungan gas H₂ cukup rendah yaitu 3.0%. Rendahnya gas CH₄ dan H₂ disebabkan kandungan H pada arang kayu yang digunakan cukup rendah dan kadar airnya juga cukup rendah.

Simulasi Ukuran Tinggi Tungku

Tinggi tungku merupakan salah satu faktor penting yang menentukan besarnya laju aliran udara akibat efek *buoyancy*. Tabel 2 memperlihatkan bahwa pengaruh ukuran tinggi tungku terhadap komposisi gas serta parameter kinerja tungku lainnya. Dapat dilihat bahwa pada tungku dengan tinggi yang lebih rendah, seluruh komposisi gas mampu bakar terutama CO dan H₂ akan meningkat. Pada tungku yang didesain (tinggi 0.6 m), laju aliran udara yang terbentuk untuk membuat proses gasifikasi berlangsung cukup tinggi sehingga memberikan rasio mol udara–bahan bakar sebesar 0.67. Rasio ini terlalu tinggi untuk proses ideal gasifikasi. Oleh karena itu, konsentrasi gas CO dan H₂ yang dihasilkan masing-masing hanya 15.1% dan 3.0%. Konsentrasi gas CO tersebut hanya sedikit lebih tinggi di atas ambang dapat terbakar yaitu 12.5% sedangkan gas H₂ bahkan di bawah ambang yaitu 4%.

Laju aliran udara dapat diturunkan dengan menurunkan tinggi tungku. Desain dengan tinggi 0.4 m akan menurunkan laju aliran udara sehingga rasio

mol udara–bahan bakarnya turun sampai 0.57 (Tabel 2). Kondisi ini akan meningkatkan konsentrasi gas CO dan H₂ masing-masing menjadi 21.11% dan 3.99%. Kandungan gas H₂ yang rendah disebabkan oleh kandungan unsur hidrogen yang rendah pada arang kayu. Kandungan gas CH₄ yang terbentuk juga sangat rendah. Suhu gasifikasi berada pada kisaran 953-1073°C.

Nilai kalor (HHV) dari total gas produk yang meningkat sejalan dengan penurunan tinggi tungku dikontribusikan oleh konsentrasi gas CO dan H₂. Peningkatan konsentrasi gas CH₄ tidak signifikan untuk meningkatkan nilai kalor gas total. Dengan menjumlahkan hasil kali komponen gas dengan masing-masing nilai kalornya maka diperoleh bahwa potensi energi per satuan waktu (potensi daya) dari gas yang terbentuk adalah berkisar pada nilai 2.33 kW pada tinggi tungku 0.6 m dan 2.63 kW pada 0.4 m. Efisiensi gasifikasi yang merupakan rasio daya gas potensial terhadap daya biomassa yang dikonversi (yaitu 4.45 kW) menunjukkan nilai yang kurang dari 60%.

Beda tekanan yang dapat diatasi cukup rendah yaitu di bawah 5 Pa, sehingga metode *natural draft* sulit diterapkan pada tahanan tumpukan bahan bakar yang terlalu tebal. Untuk itu tebal tumpukan bahan bakar harus disesuaikan dengan karakteristik (porositas) bahan. Dengan demikian, tinggi tungku yang sesuai dibutuhkan untuk menjamin kontinuitas dan kestabilan laju aliran udara yang melalui tumpukan bahan bakar. Tinggi tungku yang terlalu rendah menyebabkan gaya *buoyancy* menjadi lemah sehingga laju aliran dapat dengan mudah terganggu ketika terjadi perubahan kondisi pada tumpukan. Jika tungku terlalu tinggi laju aliran udara akan lebih besar dan dapat menyebabkan reaksi yang terjadi di ruang bakar bukan gasifikasi melainkan pembakaran.

Simpulan

Hasil pengujian dengan penggunaan arang menunjukkan bahwa desain tungku yang berbasis gasifikasi dengan mode *natural draft* (NDG) dapat digunakan untuk bahan bakar arang dengan laju pembakaran yang konstan yaitu 8.8 g/menit dengan kualitas nyala api tungku yang cukup baik secara visual. Model ekulibrium yang dirangkai dengan model efek cerobong dapat memprediksi konsentrasi gas-gas produk yang dihasilkan oleh tungku NDG yang didesain. Simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa tinggi tungku yang rendah (0.5 dan 0.4 m) memberikan konsentrasi gas-gas mampu bakar yang lebih tinggi sehingga potensi daya gasnya meningkat dari 2.33 kW pada tinggi 0.6 m menjadi 2.63 kW pada tinggi 0.4 m. Walaupun demikian, karena beda tekanan yang cukup rendah secara praktis ukuran tinggi tungku yang dipilih harus memberikan aliran gas produk yang kontinyu dan stabil dengan komposisi gas mampu bakar yang tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai melalui program penelitian BOPTN IPB Tahun 2013 DANA DIPA IPB Tahun Anggaran 2013 dengan kode MAK: 2013.089.521219. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada saudara Kala, saudara Darma dan saudara Harto yang membantu dalam pengambilan data.

Daftar Pustaka

- Abasiryu T., A. Ayuba and A.E. Zira. 2016. Performance evaluation of some locally fabricated cookstoves in Mubi, Adamawa State, Nigeria. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)* Vol. 35, No. 1, (2016): 48 – 53. <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v35i1.8>
- Agenbroad, J., M. DeFoort, A. Kirkpatrick, C. Kreutzer. 2011a. A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves—Part 1: Setup and baseline validation. *Energy for Sustainable Development* 15 (2011) 160–168. doi:10.1016/j.esd.2011.04.004
- Agenbroad, J., M. DeFoort, A. Kirkpatrick, C. Kreutzer. 2011b. A simplified model for understanding natural convection driven biomass cooking stoves—Part 2: With cook piece operation and the dimensionless form. *Energy for Sustainable Development* 15 (2011) 169–175. doi:10.1016/j.esd.2011.04.002
- Field, J. 2012. *Gasifying Cookstoves Database*. Colorado State University.
- Gautam, G. 2010. *Parametric Study of a Commercial-Scale Biomass Downdraft Gasifier: Experiments and Equilibrium Modeling*. Thesis. Auburn University.
- Jarungthammachote, S., A. Dutta. 2006. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy*. 32(9): 1660 – 1669. doi: 10.1016/j.energy.2007.01.010
- Jetter, J., Y. Zhao, K.R. Smith, B. Khan, T. Yelverton, P. DeCarlo, and M. D. Hays. 2012. Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environmental Science & Technology*. 2012;46(19):10827-34.
- MacCarty, N., and K.M. Bryden. 2015. Modeling of household biomass cookstoves: A review. *Energy for Sustainable Development* 26 (2015) 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.02.001>
- Nelwan, L.O., S.E. Agustina, dan E. Hartulistiyo. 2013. *Pengembangan Disain Tungku Masak Gasifikasi Biomassa Berbasis Pemodelan Pindah Panas Dan Ekulibrium*. Laporan Penelitian Unggulan Penelitian Perguruan Tinggi. LPPM. IPB.
- Pane, E.A., L.O. Nelwan dan D. Wulandani. 2014. Pengembangan Tungku Gasifikasi Arang Biomassa Tipe *Natural Draft Gasification* Berdasarkan Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). *Jurnal Keteknik Pertanian* 28(2): 117-124
- Syed, S., I. Janajreh, C. Ghenai. 2012. Thermodynamics equilibrium analysis within the entrained flow gasifier environment. *International Journal of Thermal & Environmental Engineering*. 4(1): 47 – 54.
- Tryner, J., B.D. Willson, A.J. Marchese. 2014. The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves. *Energy for Sustainable Development* 23 (2014) 99–109. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.009>
- Zhang J., K.R. Smith, R. Uma, Y. Ma, V.V.N. Kishore, K. Lata, M.A.K. Khalil, R.A. Rasmussen, S.T. Thorneloe. 2011. Carbon monoxide from cookstoves in developing countries: 1. Emission factors. *Chemosphere: Global Change Science* 1 (1999) 353-366. http://ehsdiv.sph.berkeley.edu/krsmith/publications/99_zhang_2.pdf.