

## Pengembangan Tungku Gasifikasi Arang Biomassa Tipe *Natural Draft Gasification* Berdasarkan Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

### *Development of Bio-Char Gasifier Stove Natural Draft Gasification Using Computational Fluid Dynamics Analysis (CFD)*

Erlanda Augupta Pane, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: pane\_erlanda@yahoo.com

Leopold O. Nelwan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: lonelwan@yahoo.com

Dyah Wulandani, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: dwulandani@yahoo.com

#### Abstract

A biomass stove based on natural draft gasification (NDG) has been developed in a previous study (Nelwa, et al. 2013) by using simulation based on heat transfer and equilibrium modeling. In this study, a CFD simulation was performed in order to analyze the effect of chimney height, and inlet hole diameter of the stove to the performance of the stove. The results of simulation showed that power produced by stove was between 1863.9 J/s until 2585.7 J/s, and its gasification efficiency was 67.11%. The results of simulation also showed that charcoal gasification produces combustible gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{H}_2$ ) at the bottom and the center of stove, and then they were oxidized by secondary air at the top of stove. This oxidation reaction produces sufficient heat energy which can be used for cooking process.

**Keywords:** stove, power, combustible gas, gasification efficiency

#### Abstrak

Sebuah Disain tungku *natural draft gasification* (NDG) telah diciptakan sebelumnya (Nelwa, et al. 2013) dengan menggunakan pemodelan dan simulasi berbasis pindah panas, dan equilibrium. Penelitian ini menggunakan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) untuk menganalisis performa tungku pada bagian geometri cerobong gas bakar, dan lubang udara sekunder. Hasil simulasi dari beberapa skenario tungku yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa dari skenario disain tungku didapatkan daya tungku antara 1863.9 J/detik sampai dengan 2585.7 J/detik, dan memiliki efisiensi gasifikasi sebesar 67.11%. Proses gasifikasi arang kayu menghasilkan gas mampu bakar  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , dan  $\text{H}_2$ , dimana gas mampu bakar tersebut mengalami reaksi pembakaran dengan aliran udara sekunder yang masuk di bagian tengah saluran gas mampu bakar. Reaksi pembakaran ini, menghasilkan energi panas yang memadai untuk proses memasak.

**Kata Kunci:** tungku, daya, gas bakar, efisiensi gasifikasi

Diterima: 02 Mei 2014; Disetujui: 15 Agustus 2014

#### Pendahuluan

Sektor rumah tangga atau industri kecil sering menggunakan energi bahan bakar berasal dari fosil untuk proses memasak. Bahan bakar fosil yang digunakan umumnya berupa produk turunan berupa gas alam, minyak tanah dan LPG. Akan tetapi, pada akhir-akhir ini bahan bakar yang berasal dari fosil mulai menipis, diperlukan bahan bakar terbarukan salah satunya dengan bahan bakar biomassa. Bahan bakar biomassa memiliki beberapa kelebihan yang dapat dijadikan sebagai bahan bakar yaitu

sangat mudah untuk mendapatkan panas, dan menghasilkan  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{HCl}$ , dan dioksin rendah.

Beberapa tungku gasifikasi yang menggunakan bahan bakar biomassa telah ada di masyarakat contohnya antara lain tungku TLUD (*Top Lift Updraft*) (Field, 2012) namun tungku ini masih memiliki beberapa kekurangan akibat proses pirolisis dan gasifikasi bahan yang berlangsung secara bersamaan sehingga menyebabkan gas mampu bakar yang dihasilkan kurang optimal. Selain tungku TLUD, masih banyak tungku berbasis gasifikasi antara lain, tungku gasifikasi kayu (Reed

Tabel 1. Rumus rancangan disain tungku

No.	Bagian	Keterangan
1.	Ruang Pembakaran $R = [\text{laju pembakaran arang} + \text{laju memasak}] / 2$ $\pi r^2 L = R / \rho_{\text{arang kayu}}$ $L = 2r$	r : jari-jari ruang (cm) L : tinggi ruang (cm) R : kapasitas ruang pembakaran (kg) ρ : densitas bahan bakar (kg/m <sup>3</sup> ) π : phi (3.14)
2.	Ruang Pengumpulan ( <i>hopper</i> ) $L = [\text{Berat bahan bakar} / \text{densitas bahan bakar}] /$ Ketebalan tumpukan $D = [L / (1/4 * \pi)]^{0.5}$	L : luas ruang pengumpulan (cm <sup>2</sup> ) D : diameter ruang pengumpulan (cm)
3.	Lubang Udara $V = 4.48 * C * [(h * (T_g - T_\infty)) / (273 + T_\infty)]^{0.5}$ $L = V_{tm} / V$ $D = [L / (1/4 * \pi)]^{0.5}$	V : kecepatan angin (m/s) V <sub>tm</sub> : debit aliran fluida (m <sup>3</sup> /s) C : faktor keamanan h : tinggi cerobong gas bakar (cm) T <sub>g</sub> : suhu gas bakar (°C) T <sub>∞</sub> : suhu lingkungan (°C) L : luas lubang udara (cm <sup>2</sup> ) D : diameter lubang udara (cm)
4.	Cerobong Gas Bakar $L = V_{tm} / [C * (P/R) * (1/T_h) * (2gh / ((T_h - T_{amb}) / T_{amb}))^{0.5}]$ $D = [L / (1/4 * \pi)]^{0.5}$	V <sub>tm</sub> : debit aliran fluida (m <sup>3</sup> /s) C : konstanta efek cerobong asap P : tekanan 1 atm R : konstantas gas ideal (J/molK) T <sub>h</sub> : suhu gas bakar (K) T <sub>amb</sub> : suhu lingkungan (K) L : luas cerobong asap (cm <sup>2</sup> ) D : diameter cerobong asap (cm)

dan Larson, 1996), tungku gasifikasi briket (Stanley dan Venter, 2003), tungku gasifikasi IISc (Indian Institute of Science, 2004), dan tungku gasifikasi sekam padi (U Tin Win, 2005), namun dari semua tungku ini masih menggunakan sistem kinerja konveksi paksa dengan bantuan kipas sentrifugal untuk memberikan aliran udara guna mendorong terjadinya proses gasifikasi dengan bahan bakar biomassa yang terdapat di dalam tungku. Sekarang ini tungku gasifikasi biomassa dalam proses pengembangannya dilakukan dengan pendekatan pemodelan dan simulasi untuk mengatasi masalah-masalah yang terjadi sebelumnya.

Beberapa tungku biomassa telah dikembangkan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), antara lain tungku yang dikembangkan oleh Varunkumar *et al*, 2011 dimana tungku ini menggunakan tipe *gasifier based stove* dengan bahan bakar berupa potongan kayu bakar, akan tetapi tungku biomassa ini masih menggunakan kipas sentrifugal juga, sehingga dapat dikatakan belum cukup baik karena masih menggunakan prinsip kerja konveksi paksa. Kemudian, dilakukan pengembangan tungku *natural draft gasification* (NDG) oleh Nelwan *et al*, 2013. Tungku ini menggunakan prinsip kerja konveksi bebas untuk operasinya, prinsip kerja konveksi bebas yang dimaksud yaitu dengan menggunakan *buoyancy*

*effect*, efek ini terjadi akibat adanya perbedaan kerapatan antara gas hasil dengan udara ini yang menyebabkan adanya aliran gas bahan bakar ke atas saluran gas mampu bakar. Tungku ini memiliki kinerja yang baik dilihat dari sisi efektifitas tungku, namun tungku NDG yang dihasilkan ini masih memiliki beberapa kekurangan yaitu pembakaran primer yang belum cukup optimal diakibatkan adanya beberapa bagian disain geometri tungku NDG belum maksimal. Faktor geometri yang menentukan dalam tungku yang bekerja secara *natural draft* adalah tinggi cerobong dan inlet udaranya. Pemodelan dan simulasi yang digunakan menggunakan simulasi CFD dapat digunakan untuk memperbaiki geometri tungku yang dimaksud. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis beberapa disain ukuran tinggi cerobong dan luas inlet udara dari tungku NDG menggunakan metode CFD untuk dijadikan sebagai dasar pengembangan disain.

### Bahan dan Metode

#### Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah arang kayu dengan data pengujian kadar *proximate* dan *ultimate*, dimana data ini akan dijadikan sebagai data asupan untuk melakukan

proses simulasi dari tungku NDG tersebut. Peralatan yang digunakan adalah seperangkat komputer dengan *software Gambit 2.4.6* dan *Ansys Fluent 13*.

**Metode Penelitian**

Pengembangan tungku NDG ini akan dilakukan perubahan beberapa disain geometri untuk mendapatkan kinerja tungku NDG yang optimal. Tahapan pengembangan tungku yang dilakukan adalah

- Perancangan untuk pengembangan disain tungku NDG  
Perancangan ulang ini meliputi beberapa perubahan disain geometri tungku antara lain bagian ruang pembakaran, ruang *hopper* (masukan), lubang udara, dan cerobong gas mampu bakar. Beberapa data skenario digunakan pada bagian lubang udara dan cerobong gas mampu bakar. Data skenario pada lubang udara terfokus pada diameter lubang udara. Diameter lubang udara yang diskenarioakan menggunakan ukuran 4 cm, 3.5 cm, 3 cm, 2.5 cm, dan 2 cm. Cerobong gas mampu bakar menggunakan data tinggi cerobong dengan variasi ketinggian 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Rumus rancangan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.
- Penggambaran disain model tungku NDG  
Penggambaran disain menggunakan perangkat lunak *Gambit 2.4.6*. Pada tahap ini dilakukan proses *meshing* disain tungku. Jenis *mesh* yang digunakan adalah model *tri*, tipe *pave*. Kondisi batas pada disain rancangan tungku ini dibagi menjadi 2 tahap. Kondisi batas yang ditetapkan pada kondisi tahap pertama adalah dinding atau *wall*, *pressure inlet*, *pressure outlet*, *porous zone*, dan pembagian dua *cell zone* yakni *cell* arang kayu dan *cell* udara. Sedangkan pada kondisi tahap kedua yang digunakan sebagai kondisi batas adalah *mass flow inlet*, *pressure outlet*, *porous zone*, dan *velocity inlet*. Kondisi

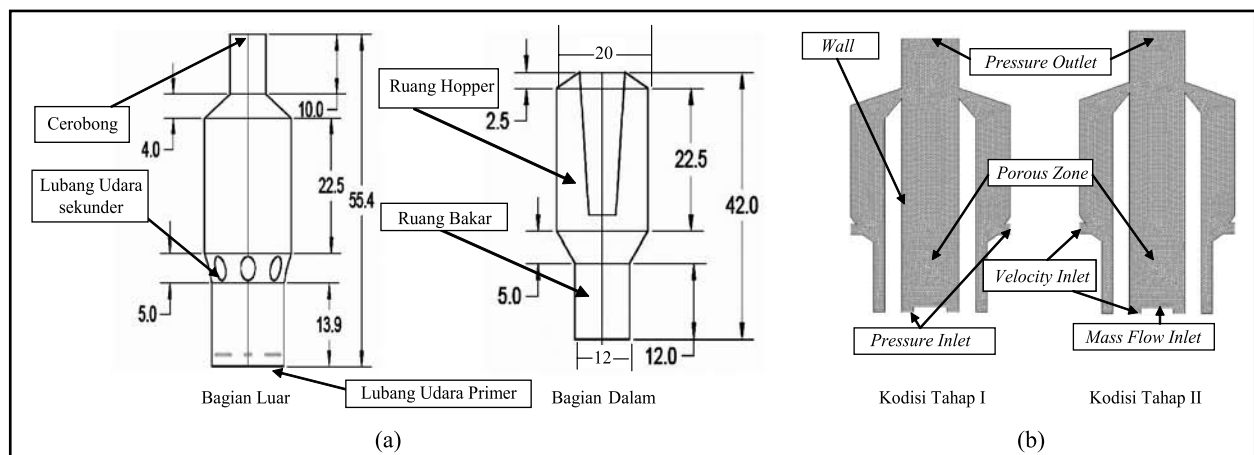
batas yang ditentukan dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

- Simulasi kinerja model tungku NDG dengan CFD  
Pada tahap ketiga dilakukan proses simulasi disain tungku. Model simulasi yang digunakan untuk mengukur kinerja dari tungku adalah menggunakan model energi untuk mengetahui aliran pindah panas dan suhu, model *viscous-epsilon (2 eqn)* untuk menganalisis aliran gas turbulent yang terdapat pada tungku, model ini digunakan karena memberikan hasil yang cukup konsisten (Silaen dan Wang, 2010), model radiasi *Roseland* model ini digunakan untuk memprediksi komposisi gas dan suhu, model ini digunakan karena menghasilkan model yang cukup stabil, dan model *species transport*, menggunakan model *finite-rate/eddy-dissipation*, model ini digunakan karena lebih riil dibandingkan dengan model *Eddy dissipation* (Silaen dan Wang, 2009). Laju reaksi pada model *finite rate/Eddy dissipation* didasarkan pada nilai terkecil dari model *finite rate* dan *Eddy dissipation*. Persamaan konservasi momentum yang digunakan mencakup persamaan RANS (*Reynold Averages Navier Stokes*)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_i u_j) \quad (1)$$

Keterangan :  $\rho$ : densitas ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$ : waktu (detik),  $u$ : kecepatan (m/detik),  $p$  : tekanan (Pa), dan  $\mu$  : viskositas (Pa-s)

Selain itu persamaan atur yang mencakup persamaan konservasi massa, konservasi energi dan konservasi spesies yang digunakan, didasarkan pada persamaan RANS di atas (Ansys, 2010). Bahan arang kayu yang dijadikan sebagai bahan biomassa akan ditentukan kadar *proximate* dan kadar *ultimate* nya. Kadar



Gambar 1. Tungku NDG (a) dan kondisi batas tungku NDG untuk simulasi CFD (b)

Tabel 2. Komposisi *proximate* dan *ultimate* arang kayu.

Parameter Proximate	Persentase (%)	Parameter Ultimate	Persentase (%)
Volatile	13.52	C	84.20
Fix Carbon	78.61	H	2.40
Ash	2.07	O	12.60
Moisture	5.80	N	0.80

Tabel 3. Reaksi yang terlibat pada proses gasifikasi.

No.	Reaksi	A	E (J/kmol)	Sumber
<b>Reaksi Heterogen</b>				
R1	$C_{(s)} + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	0.052	$6.1 \times 10^7$	Chen et al (2000)
R2	$C_{(s)} + CO_2 \rightarrow 2CO$	0.0732	$1.125 \times 10^8$	
R3	$C_{(s)} + H_2O \rightarrow CO + H_2$	0.0782	$1.15 \times 10^8$	
<b>Reaksi Homogen</b>				
R4	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$2.2 \times 10^{12}$	$1.67 \times 10^8$	Westbrook and Dryer (1981)
R5	$CO + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_2 + H_2$	$2.75 \times 10^{10}$	$8.38 \times 10^7$	Jones and Lindstedt (1998)
R6	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	$4.4 \times 10^{11}$	$1.68 \times 10^8$	
R7	$CH_{2.382}O_{1.075} \rightarrow 0.582 CO + 0.246 CO_2 + 0.171 CH_4 + 0.848 H_2$	<i>Eddy Dissipation</i>		Xijia Lu and Ting Wang (2014)
R8	$CH_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO + 2H_2$			
R9	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$6.8 \times 10^{15}$	$1.68 \times 10^8$	Jones and Lindstedt (1998)

*proximate* arang kayu dilakukan pengujiannya dengan metode SNI di Pusat Penelitian dan Pengembangan Keteknikan Kehutanan dan Pengolahan Hasil Hutan, sedangkan komposisi *ultimate* arang kayu diambil dari hasil rata-rata data arang kayu yang digunakan pada literature (J. Pastor, 2005). Kadar *proximate* dan *ultimate* dari arang kayu dapat disajikan pada Tabel 2.

Reaksi yang digunakan pada simulasi ini merupakan reaksi proses gasifikasi. Reaksi yang terlibat tersebut disajikan pada Tabel 3.

Perlu diketahui bahwa pada reaksi ini data E (J/kmol) merupakan data energi aktivasi yang terjadi pada proses reaksi tersebut, sedangkan pada data A, A merupakan *pre-exponential factor* yang terjadi pada proses pembakaran dan gasifikasi arang kayu tersebut. Simulasi laju reaksi yang terjadi pada tungku ditentukan oleh kedua data tersebut. Pada saat ini simulasi dilakukan dengan menggunakan dua tahap. Simulasi tahap pertama memiliki tujuan untuk menentukan kecepatan aliran udara yang digunakan pada simulasi kondisi tahap kedua. Kondisi tahap pertama untuk menentukan kecepatan aliran udara menggunakan kondisi *free convection* dari aliran udara yang melewati tumpukan bahan biomassa. Tumpukan bahan biomassa tersebut dianggap memiliki daerah *porous zone*, dimana daerah *porous zone* ini

merupakan daerah bahan bakar biomassa yaitu arang kayu dengan memiliki nilai porositas tertentu. Nilai porositas arang kayu sebesar 50.2%. Dengan data porositas ini kemudian akan ditentukan seberapa besar kecepatan aliran udara yang mampu melewati tumpukan biomassa tersebut. Data kecepatan aliran udara yang didapatkan pada kondisi tahap pertama ini digunakan sebagai kecepatan udara inlet kondisi tahap kedua dalam proses penentuan komposisi gas yang dihasilkan dan tingkatan energi yang dihasilkan dari proses reaksi pembakaran dan gasifikasi arang kayu dengan udara.

## Hasil dan Pembahasan

### Perancangan Disain Tungku NDG

Proses pengembangan disain geometri tungku *natural draft gasification* (NDG) dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan hasil kerja optimal dari tungku *natural draft gasification* (NDG) sebelumnya dengan melakukan perancangan ulang disain tungku, yang kemudian akan dilakukan uji simulasi CFD. Perancangan ulang yang dilakukan pada penelitian kali ini menitikberatkan pada disain bagian lubang udara untuk pemasukan udara, ruang pembakaran, ruang pengumpan (*hopper*) untuk bahan bakar dan cerobong gas mampu bakar.

Tabel 4. Kondisi laju aliran udara pada *porous zone* sebesar 50.20%.

Tinggi Cerobong (cm)	Diameter Cerobong (cm)	Kecepatan Aliran Udara (m/detik)	
		Lubang primer	Lubang sekunder
10	2	0.1	0.18
	2.5	0.1	0.15
	3	0.1	0.13
	4	0.1	0.11
15	2	0.1	0.23
	3	0.1	0.17
	4	0.1	0.14
20	2	0.1	0.29
	2.5	0.1	0.24
	3.5	0.1	0.18

Disain ruang pembakaran yang dirancang memiliki ukuran tinggi sebesar 12 cm, dan diameter sebesar 12 cm; pada ruang pengumpan (*hopper*) didapatkan ukuran tinggi sebesar 22.5 cm, dan diameter sebesar 20 cm. Disain bagian lubang udara dan cerobong gas mampu bakar yang dirancang dibagi menjadi beberapa skenario, dimana skenario yang dibuat antara lain diameter lubang udara dengan ukuran 4 cm, 3.5 cm, 2.5 cm, dan 2 cm; pada tinggi cerobong gas mampu bakar akan dibuat dengan ukuran 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Beberapa skenario ini akan dilakukan uji tahap simulasi, proses uji simulasi ini digunakan untuk melihat skenario mana yang terbaik untuk proses pengembangan tungku tersebut.

**Simulasi dan Analisis CFD**

Proses simulasi CFD dilakukan dengan dua tahap, pada kondisi tahap pertama dilakukan untuk menentukan kondisi laju aliran udara yang optimal pada tumpukan arang biomassa yang digunakan pada keadaan *free convection*. Penentuan kondisi porositas arang kayu menggunakan kondisi *porous zone* dari bahan arang kayu. Nilai porositas yang dimiliki oleh arang kayu adalah sebesar 50.20%, nilai tersebut kemudian dimasukkan sebagai data *porous zone* pada uji simulasi CFD. Kecepatan aliran yang didapatkan dengan kondisi *porous zone* sebesar 50.20% pada lubang udara primer adalah tetap, dan pada lubang sekunder bervariasi diakibatkan adanya perbedaan diameter lubang sekunder. Kondisi yang dihasilkan pada tahap pertama dapat ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Berdasarkan data Tabel 4 yang didapatkan dapat diketahui, bahwa apabila semakin kecil diameter lubang udara sekunder maka kecepatan aliran udara semakin besar, sedangkan apabila diameter lubang udara sekunder semakin besar maka akan mengakibatkan kecepatan aliran udara ke dalam tungku semakin kecil, ini akan berpengaruh terhadap suplai udara oksigen optimal

yang dibutuhkan untuk proses pembakaran dan gasifikasi di dalam tungku. Suplai udara oksigen yang optimal ini akan dibutuhkan untuk proses pembakaran dan gasifikasi arang kayu untuk menghasilkan komposisi gas mampu bakar yang optimal untuk energi gas mampu bakar tungku. Kecepatan aliran udara yang didapatkan ini akan menjadi data untuk tahap kedua simulasi CFD, dimana pada tahap kedua ini dengan menggunakan skenario lubang udara, dan tinggi cerobong akan didapatkan rancangan pengembangan hasil tungku yang terbaik. Rancangan tungku yang terbaik dapat diketahui dari beberapa parameter yaitu data energi dan komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan oleh tungku. Tingkatan energi yang dihasilkan oleh tungku ini didapatkan dari hasil parameter laju aliran, massa gas, dan suhu keluaran dari tungku tersebut. Kecepatan aliran udara merupakan parameter yang mempengaruhi laju aliran massa gas, dan suhu keluaran dari tungku. Tingkat energi tungku yang optimal dapat diketahui dengan menghitung menggunakan rumus :

$$Q = m_{gas} \times Cp_{gas} \times \Delta T \tag{2}$$

Keterangan

$m_{gas}$  : laju aliran gas bakar (kg/detik);

$Cp_{gas}$  : kalor jenis gas bakar (J/kg°C);

$\Delta T$  : Selisih Suhu keluar dan masukan (°C).

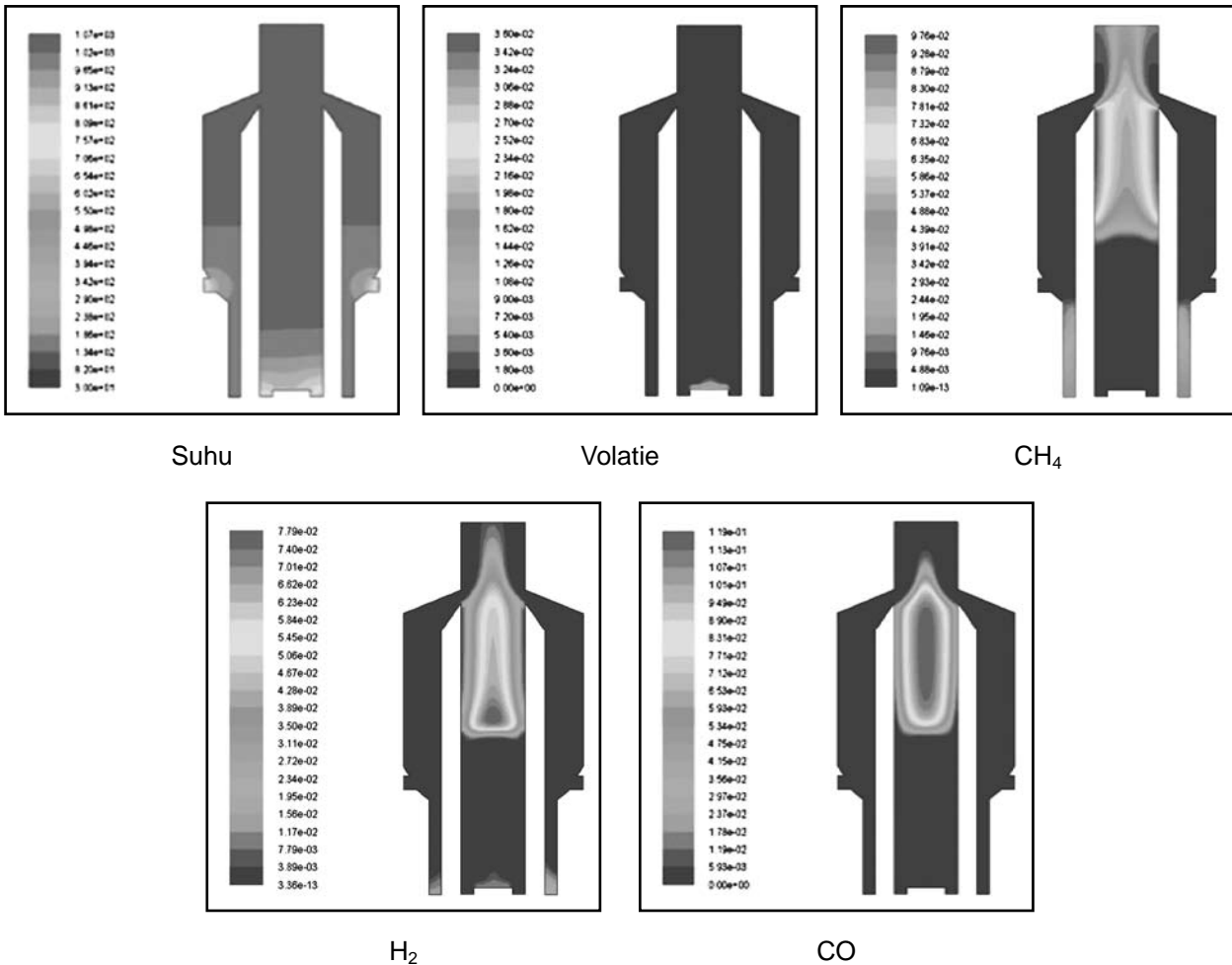
Tingkat energi yang optimal ini akan mengindikasikan proses reaksi pembakaran dan gasifikasi yang terjadi di ruang pembakaran dan proses pembakaran hasil gas pembakaran dengan aliran udara sekunder pada saluran gas mampu bakar terjadi secara sempurna. Beberapa skenario, yang dilakukan didapatkan bahwa disain tungku ini memiliki daya energi tungku dari 1863.9 J/detik sampai dengan 2585.7J/detik. Sisi efisiensi gasifikasi dilakukan untuk melihat tingkat efektifitas

Tabel 5. Data laju aliran gas, suhu outlet tungku, dan daya

Tinggi Cerobong (cm)	Diameter Lubang Udara (cm)	Laju Aliran Gas bakar (kg/detik)	Cp gas bakar (J/kg <sup>o</sup> C)	Selisih suhu outlet dan inlet (°C)	Daya Energi Tungku (J/detik)
10	2	0.0013	1434	1005	1873.5
	2.5	0.0013	1429	1012	1863.9
	3	0.0013	1419	1016	1874.2
	4	0.0014	1412	1017	2010.4
15	2	0.0015	1393	993	2074.8
	3	0.0016	1364	996	2173.6
	4	0.0016	1347	999	2153.0
20	2	0.0018	1381	996	2475.8
	2.5	0.0018	1361	996	2440.0
	3.5	0.0019	1365	997	2585.7

tungku untuk mengubah energi dari arang kayu menjadi gas mampu bakar. Penggunaan bahan bakar arang kayu dengan laju aliran bahan bakar arang kayu yang digunakan adalah  $1 \times 10^{-3}$  kg/detik dan memiliki nilai kalor sebesar 23900 kJ/kg maka energi bahan arang kayu yang dihasilkan sebesar 23.9 kJ/detik, dimana arang kayu tersebut diubah menjadi gas mampu bakar dengan laju aliran

sebesar  $1.4 \times 10^{-3}$  kg/detik dan memiliki nilai kalor total sebesar 11458.82 kJ/kg yang menghasilkan energi gas mampu bakar sebesar 16.04 kJ/detik. Maka dapat diketahui bahwa efisiensi gasifikasi perubahan energi arang kayu menjadi energi gas mampu bakar sebesar 67.11%, ini berarti proses pembakaran dan gasifikasi yang terjadi di dalam tungku optimal. Berikut hasil tingkat energi yang



Gambar 2. Disain kontur tungku NDG.

dihasilkan dari beberapa skenario tungku yang dibuat terdapat pada Tabel 5.

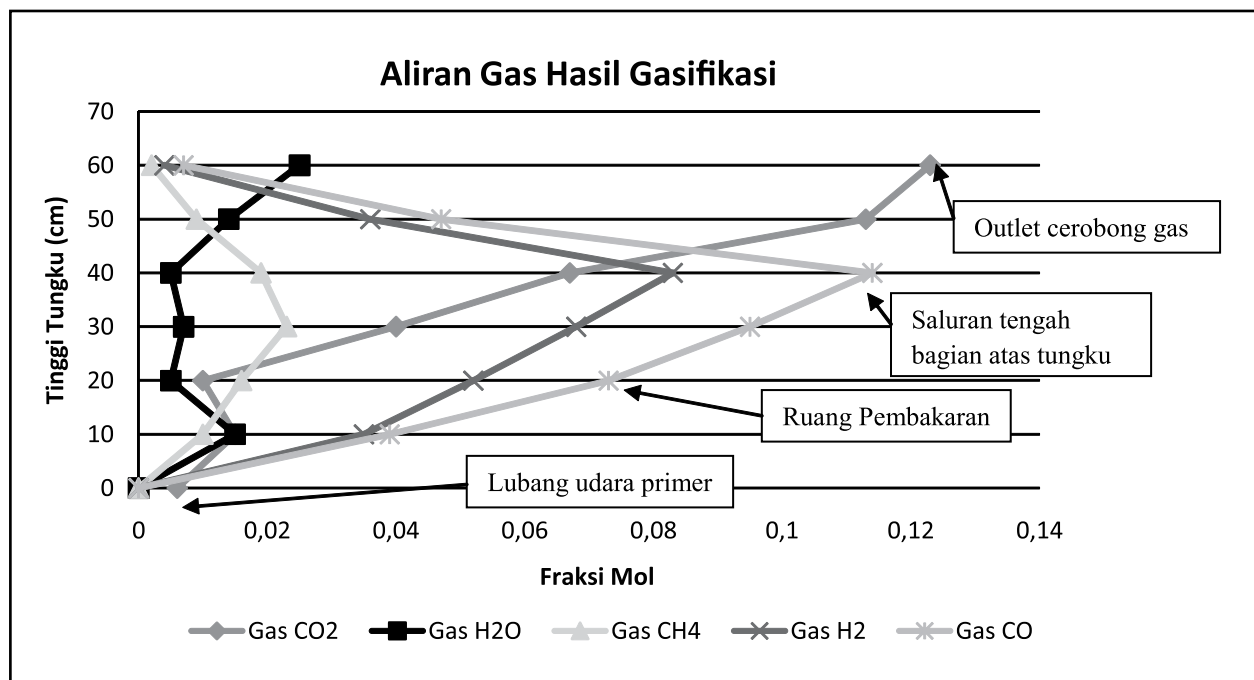
Pada tabel hasil data di atas dapat juga terlihat dimana laju aliran gas mampu bakar akan semakin kecil apabila diameter lubang udara sekunder semakin kecil, ini akan mengakibatkan tingkatan energi yang dihasilkan oleh tungku semakin rendah. Ukuran diameter lubang sekunder ini akan sangat berpengaruh terhadap adanya aliran udara selain untuk proses pembakaran dengan gas hasil pembakaran, juga membantu untuk mendorong gas hasil pembakaran tersebut untuk mencapai cerobong gas mampu bakar. Beberapa kondisi yang terdapat pada tungku dapat dilihat pada gambar kontur yang disajikan pada Gambar 2.

Hasil dari simulasi disain tungku ini juga dapat menentukan sebaran komposisi gas yang dihasilkan baik dari proses pembakaran dan gasifikasi bahan bakar, hasil reaksi pembakaran gas bakar dengan udara sekunder, dan hasil keluaran outlet dari cerobong gas mampu bakar. Keseluruhan proses tersebut digambarkan pada data reaksi (reaksi Tabel 3) yang dijadikan sebagai data dasar untuk simulasi tungku yang mana dari reaksi tersebut akan dihasilkan data simulasi komposisi gas. Komposisi gas yang dihasilkan dari simulasi reaksi tersebut antara lain gas CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, dan CO. Komposisi gas yang dihasilkan dari ketiga tempat proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.

Hasil rata-rata grafik pembakaran dan gasifikasi arang kayu yang digunakan didapatkan kandungan gas (CO<sub>2</sub> 1%), (H<sub>2</sub>O 0.5%), (CH<sub>4</sub> 1.6%), (CO 7.3%), dan (H<sub>2</sub> 5.2%) pada proses pembakaran dan gasifikasi, kandungan gas (CO<sub>2</sub> 6.7%), (H<sub>2</sub>O 0.5%), (CH<sub>4</sub> 1.9%), (CO 11.4%), dan (H<sub>2</sub> 8.3%) pada pembakaran dengan udara sekunder, dan

kandungan gas (CO<sub>2</sub> 12%), (H<sub>2</sub>O 2.5%), (CH<sub>4</sub> 0.2%), (CO 0.7%), dan (H<sub>2</sub> 0.4%) pada keluaran outlet cerobong. Hasil tersebut dapat dijelaskan bahwa pada saat proses reaksi gasifikasi dan pembakaran yang terjadi pada ketinggian 20 cm [C<sub>(s)</sub> + 0.5O<sub>2</sub> → CO] dimana dengan bantuan udara primer yang berasal dari bawah tungku melakukan proses reaksi tersebut dengan arang kayu menghasilkan gas mampu bakar CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub> serta gas lainnya yaitu CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O namun hasilnya belum optimal. Aliran gas mampu bakar tersebut kemudian akan mengalir menuju cerobong, akan tetapi sebelum mencapai cerobong, aliran gas mampu bakar tersebut bertemu dengan aliran udara sekunder yang berasal dari lubang udara sekunder pada ketinggian 40 cm, dimana reaksi yang terjadi [CO + 0.5O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub>], [H<sub>2</sub> + 0.5O<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>O], dan [CH<sub>4</sub> + 0.5 O<sub>2</sub> → CO + 2H<sub>2</sub>] menyebabkan reaksi pembakaran gas bakar yang akan menghasilkan gas bakar yang optimal untuk digunakan pada proses memasak. Reaksi pembakaran gas digambarkan dengan laju reaksi (kgmol/m<sup>3</sup>s); laju reaksi tersebut berlangsung di saluran utama gas bagian tengah-tengah pembakaran.

Setelah mengalami proses pembakaran yang terjadi di saluran utama gas bagian tengah-tengah pembakaran tersebut maka gas mampu bakar tersebut akan habis pada saat keluaran outlet di cerobong gas, karena telah mengalami proses pembakaran gas yang sempurna menjadi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Hasil simulasi komposisi gas CO, CH<sub>4</sub>, dan CO<sub>2</sub> dari disain tungku terpilih ini dapat dibandingkan dengan komposisi gas dari percobaan tungku NDG yang dilakukan sebelumnya (Nelwan *et al*, 2013). Didapatkan komposisi gas CO sebesar 16%, CH<sub>4</sub> sebesar 2% pada pengukuran sedangkan



Gambar 3. Aliran gas CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O.

pada hasil simulasi didapatkan komposisi gas CO sebesar 11.4%, dan CH<sub>4</sub> sebesar 1.9%. Dari hasil perbandingan tersebut dapat dikatakan data hasil simulasi yang dilakukan mendekati data pengukuran yang dilakukan di laboratorium. Selain perbandingan dengan komposisi gas, dapat dibandingkan juga nilai kalor. Nilai kalor hasil pengukuran sebesar 2622.02 kJ/kg sedangkan hasil simulasi sebesar 2105.2 kJ/kg. Nilai kalor pada hasil pengukuran lebih besar diakibatkan persentase gas mampu bakar hasil pengukuran lebih besar diakibatkan hasil simulasi. Hasil pengembangan disain tungku ini dapat membuat kinerja dari tungku lebih optimal.

### Simpulan

Simulasi disain skenario tungku dilakukan terhadap disain geometri lubang udara dan tinggi cerobong gas mampu bakar dapat disimpulkan bahwa dari skenario tersebut didapatkan daya energi tungku antara 1863.9 J/detik sampai dengan 2585.7 J/detik, dan memiliki tingkat efisiensi gasifikasi sebesar 67.11%. Proses simulasi tungku NDG juga mampu menganalisis hasil komposisi gas mampu bakar (CO, CH<sub>4</sub>, dan H<sub>2</sub>). Perbandingan komposisi gas antara hasil simulasi dengan pengukuran sebelumnya mendapatkan nilai data simulasi hampir mendekati nilai data pengukuran, sedangkan pada perbandingan nilai kalor, didapatkan pada pengukuran nilai kalor lebih besar ini diakibatkan komposisi gas mampu bakar pada hasil pengukuran lebih besar dibandingkan dengan data simulasi.

### Ucapan Terima Kasih

Penelitian Pengembangan Tungku Gasifikasi Arang Biomassa Tipe *Natural Draft Gasification* Berdasarkan Analisis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) ini telah didanai oleh Bantuan Operasional Penelitian Perguruan Tinggi Negeri (BOPTN).

### Daftar Pustaka.

Anslys Inc. 2010. *Fluent Theory Guide*.  
 C. Chen, M. Horio dan T. Kojima. *Numerical Simulation of Entrained Flow Coal Gasifier*, Chemical Engineering Science, Vol. 55, no.18, 2000, pp 3861-3833, [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00030-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00030-0)  
 C. K. Westbrook dan F.L.Dryer, *Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames*, Combustion Science and Technology, Vol. 27, 1981, pp. 31-43.

Field, J. 2012. *Gasifying Cookstoves Database*. Colorado State University  
 IPOBIS., 2004. *Portable Wood/Biomass Stoves*. Combustion, Gasification and Propulsion Laboratory, Indian Institute of Science Bangalore. <http://cgpl.iisc.ernet.in/stvfinal.pdf>  
 J. Pastor-Villegas, Pastor-Valle 2005. *Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents*. International Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 76 (2006) Doi : 10.1016/j.jaap.2005.08.002.p 103-108  
 Lu, Xijia., T. Wang. 2014. *Investigation of Low Rank Coal Gasification in a Two-Stage Downdraft Entrained-Flow Gasifier*. International Journal of Clean Coal and Energy 2014, 3, 1-12 <http://dx.doi.org/10.4236/ijcce.2014.21001>  
 Nelwan, L.O., Sri Endah. A., dan Edy, H. 2013. *Pengembangan Disain Tungku Masak Gasifikasi Biomassa Berbasis Pemodelan Pindah Panas dan Ekuilibrium*. Laporan Akhir Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi. IPB. Bogor.  
 Reed, T.B., dan Larson, Ronal, 1996. *A Wood-Gas Stove for Developing Countries*. The Biomass Energy Foundation, Golden, CO., USA. Conference on "Developments in Thermochemical Biomass Conversion", Banff, Canada, 20-24 Mei 1996.  
 Silaen, A, T. Wang. 2009. *Comparison of instantaneous, equilibrium, and finite-rate gasification models non entrained-flow coal gasifier*. Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh (US), September 20-23 2009. p 1-11.  
 Silaen, A, T. Wang. 2010. *Effect of turbulence and devolatilization models on gasification simulation*. International Journal of Heat and Mass Transfer-53 : 2074-2091. Doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.047  
 Stanley, Richard, dan Venter, Kobus., 2003. *Holey Briquette Gasifier Stove Development*. Aug. 2003. <http://www.repp.org/discussiongroups/resources/stoves/Stanley/BriqGasstove.htm>.  
 Win Tin, U, 2005. SAN SAN INDUSTRIAL Cooperative., Ltd., Myanmar. Accessed 20 Feb 2014. <http://www.benergyssic.com/sansanrice.htm>  
 W.P. Jones dan R.P. Lindstedt, *Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion*, [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(88\)90021-1](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(88)90021-1)  
 Varunkumar, S., N.K.S. Rajan, H.S Mukunda. *Experimental and Computational Studies on a Gasified Based Stove*, Energy Conversion and Management, Vol. 53, 2011, pp 135-1141 <http://dx.doi.org/10.1016/j.encoman.2011.08.022>