

ANALISIS KARAKTERISTIK TUNGKU GASIFIER TIPE *FIX-BED* MENGGUNAKAN METODA *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

Cheko S. Paat¹⁾, Abrar Riza²⁾ dan Steven Darmawan³⁾

¹⁾Mahasiswa Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara

^{2,3)}Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara

e-mail: ¹⁾cheko.515180013@stu.untar.ac.id, ²⁾abrarr@ft.untar.ac.id, ³⁾stevend@ft.untar.ac.id

Abstract: *One of the alternative energy sources that are cheap and easy to obtain is biomass. One of the technologies that can utilize biomass energy sources is to use gasification technology. The gasification process occurs in the gasifier reactor and produces syn-gas. In previous studies, experimental research has been carried out on the gasification process using a fixed-bed gasifier using wood biomass with a mass of 1 kg and 1,5 kg and it was found that the gasification process did not occur due to excessive air supply. The purpose of this study was to obtain the characteristics of the gasification process using the CFD method on the mass fraction parameters of syn-gas gas (CO, H₂, and CH₄) along with the temperature distribution in the gasification furnace. The simulation is done using ANSYS FLUENT software. From the simulation results the use of fuel variations of 1 kg and 1,5 kg with variations in air inlet speed of 1,5 m/s, 2,5 m/s, 3,5 m/s. It was found that the highest syngas content was at the air intake velocity variation of 1,5 m/s, where the percentage of syngas gas at the velocity variation at 1 kg and 1,5 kg fuel mass was 36,645% and 41,178%, respectively, with the value of the Equivalence ratio are 0,23 and 0,153.*

Keywords: *Biomass, syngas, gasification, CFD.*

PENDAHULUAN

Pemakaian energi Indonesia terus bertambah diikuti oleh peningkatan jumlah penduduk dan ekonomi dari tahun ke tahun, khususnya penggunaan bahan bakar minyak (BBM). Di sisi lain ketersediaan energi terus mengalami penurunan akibat eksploitasi energi untuk memenuhi kebutuhan konsumsi yang mengakibatkan kenaikan harga minyak bumi. Untuk itu diperlukan penelusuran sumber energi pengganti yang dapat mensubstitusi minyak bumi. Sumber energi alternatif yang murah dan mudah didapatkan adalah biomassa. Biomassa adalah bahan bakar yang didapatkan dari makhluk hidup atau limbah padat yang memiliki energi tersimpan dan dapat diperbaharui.

Stok limbah biomassa saat ini (nilai tahunan) diperkirakan sekitar 43 EJ untuk biomassa peternakan, 48 EJ untuk biomassa pertanian, dan 37 EJ untuk biomassa kehutanan dengan total sekitar 128 EJ. Sekitar 22 EJ kotoran sapi merupakan sumber daya terbesar dan diikuti dengan sekitar 20 EJ dari limbah kayu. Salah satu teknologi yang bisa memanfaatkan sumber energi biomassa adalah dengan menggunakan teknologi gasifikasi [1].

Teknologi gasifikasi adalah salah satu cara yang efektif dalam mengatasi masalah sampah padat karena produk yang dihasilkan dari proses gasifikasi berupa bahan bakar gas. Proses gasifikasi adalah proses konversi bahan bakar padat menjadi gas yang mampu bakar (*flammable gas*) melalui proses termokimia dengan temperatur 600-700°C dan suplai udara terbatas (20-40% dari udara stoikiometri) [2].

Karbon dalam proses gasifikasi mengalami proses oksidasi dan proses reduksi. Proses oksidasi berguna sebagai penyuplai panas untuk proses reduksi karbon dan devolatilisasi. Proses reduksi terjadi antara karbon dengan CO₂ dan H₂O dari hasil oksidasi. Unjuk kerja gasifikasi optimal didapatkan dengan cara memberikan oksidan dengan kebutuhan minimal proses gasifikasi dan kukus dengan kebutuhan maksimal proses untuk mendorong terbentuknya gas H₂ [10].

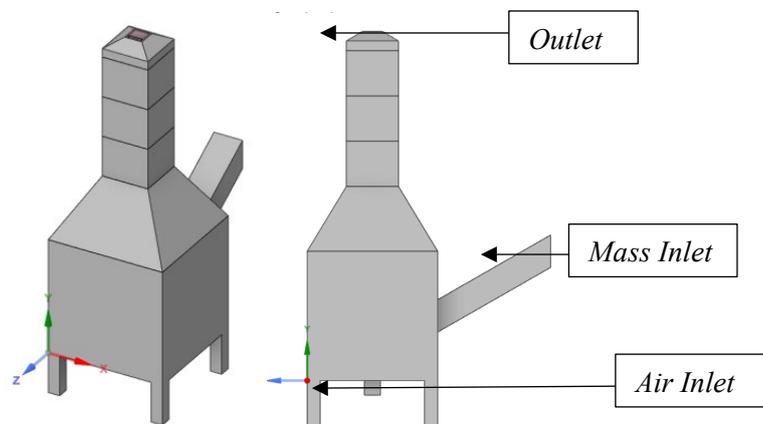
Berdasarkan penelitian eksperimental yang dilakukan menggunakan tungku gasifikasi tipe *updraft fix-bed gasifier* dengan biomassa jenis kayu, dengan variasi 1 kg dan 1,5 kg, tidak menghasilkan *syngas* sebagai output dari proses gasifikasi [3]. Penelitian saat ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik dari tungku gasifikasi berupa distribusi temperatur dan kadar *syngas* menggunakan metode CFD dengan variasi kecepatan udara, sehingga dapat diketahui suplai udara yang dibutuhkan untuk menghasilkan *syngas* yang merupakan *output* dari proses gasifikasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan melakukan simulasi tungku gasifikasi tipe *fix-bed* dengan menggunakan variasi kecepatan udara pada *inlet* udara sebesar 1,5 m/s, 2,5 m/s dan 3,5 m/s pada masing-masing variasi massa bahan bakar sebesar 1 kg dan 1,5 kg. Simulasi menggunakan *software* ANSYS FLUENT. Tahapan penelitian yaitu yang pertama adalah kajian pustaka mengenai proses gasifikasi. Kemudian melakukan tinjauan pustaka yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan seperti karakteristik biomassa dan suplai udara untuk proses gasifikasi. Tahapan berikutnya adalah proses simulasi yang memiliki 3 tahapan penting yaitu *Pre-processing*, *Processing & Post Processing*. Proses pembuatan desain tungku gasifikasi dilakukan dengan menggunakan Autodesk Fusion 360.

Model Geometri

Model Geometri berupa pembuatan model 3D dari tungku gasifikasi. Pembuatan model geometri ruang *gasifier* ini dilakukan pada software fusion 360.



Gambar 1. Model geometri

Berikut adalah ukuran dari *inlet* udara dan bahan bakar beserta *outlet* dari tungku gasifikasi.

Tabel 1. Konfigurasi tungku gasifikasi

	Ukuran	Satuan
<i>Mass Inlet</i>	90x90	mm
<i>Air Inlet</i>	40x40	mm
<i>Outlet</i>	50x50	mm

Model CFD

Meshing berfungsi untuk membagi *domain* geometri menjadi elemen-elemen kecil sehingga untuk membagi *domain* geometri menjadi elemen-elemen kecil sehingga proses analisis memberikan hasil yang konvergen. *Meshing* yang dilakukan menghasilkan 316920 *cells*. Berikut adalah *report mesh*, hasil *meshing*, beserta *boundary condition* pada geometri tungku gasifikasi.

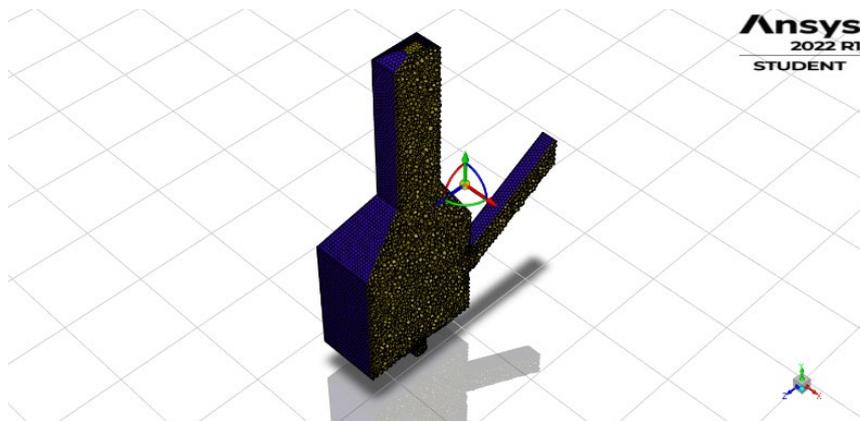
Pemodelan turbulensi yang diaplikasikan pada penelitian ini adalah k-e model *standard wall*, model turbulensi ini dijabarkan pada persamaan berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$



Gambar 2. Report mesh



Gambar 3. Meshing tungku gasifikasi

Boundary Name	Boundary Type
air-inlet	velocity-inlet
mass-inlet	mass-flow-inlet
outlet	pressure-outlet

Gambar 4. Tipe boundary

Untuk model radiasi yang digunakan adalah model P1 berfungsi untuk memprediksi suhu dan komposisi dari gas. Pemodelan radiasi bisa dijabarkan pada persamaan berikut:

$$q_r = - \frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (3)$$

Dasar dari pendekatan pemodelan *non premixed* adalah pendekatan melibatkan solusi persamaan transpor yang dikenal sebagai *mixture fraction*. Persamaan *mixture fraction* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (4)$$

Untuk semua aliran, *ANSYS Fluent* memecahkan persamaan kekekalan massa dan momentum. Persamaan kekekalan massa, atau persamaan kontinuitas, dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (5)$$

Kekekalan momentum dalam kerangka acuan inersia dinyatakan dalam persamaan berikut oleh:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (6)$$

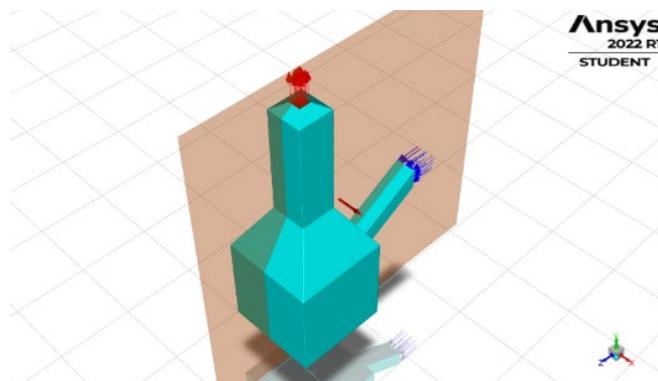
Dimana p adalah tekanan statik $\bar{\tau}$ adalah tegangan *tensor* dan $\rho \vec{g}$ dan \vec{F} adalah grafitasi *body force* dan *external body forces* [16]. Berikut adalah konfigurasi simulasi yang digunakan:

Tabel 2. Konfigurasi model simulasi

	<i>Model</i>	<i>Settings</i>	<i>Information</i>
<i>Model Setting</i>	<i>space</i>	3D	-
	<i>Energy Equation</i>	<i>On</i>	-
	<i>Turbulence</i>	<i>k – e model standard wall</i>	-
	<i>radiation</i>	P-1	-
	<i>Heat Exchanger</i>	<i>Off</i>	-
	<i>Species</i>	<i>Non – Premixed Combution</i>	-
<i>Material</i>	<i>Name</i>	<i>Type</i>	
	<i>Air</i>	<i>Fluid</i>	21% O2
	<i>Fuel</i>	<i>PDF Mixture</i>	Menggunakan data <i>ultimate analysis</i> dari biomassa kayu
<i>Boundary Condition</i>	<i>Name</i>	<i>Type</i>	
	<i>Air Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>	1.5 m/s, 2.5 m/s, 3.5 m/s
	<i>Mass Inlet</i>	<i>Mass Flow Inlet</i>	0.001667 kg/s, 0.0025 kg/s
	<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	-

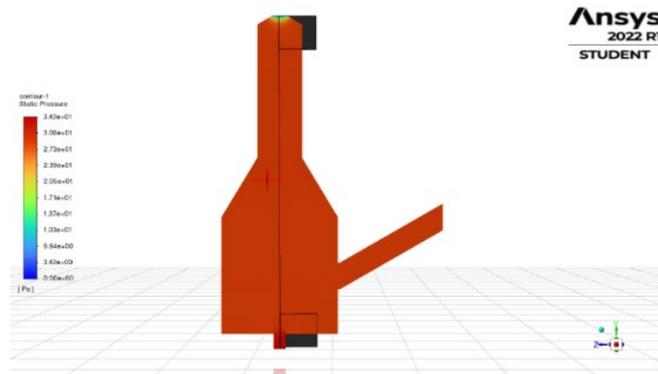
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi ditampilkan menggunakan *plane* untuk menampilkan *contour* hasil simulasi berupa *contour mass fraction* dan distribusi temperatur dari hasil proses gasifikasi. Fitur lain yang digunakan adalah *rake/line* yang berfungsi untuk menampilkan grafik dari hasil simulasi.



Gambar 5. Lokasi *plane*

Posisi *plane* terlekat pada sumbu YZ, dengan posisi 0,2 meter pada sumbu X. letak *plane* berada pada bagian tengah tungku sehingga membagi tungku secara simetris.

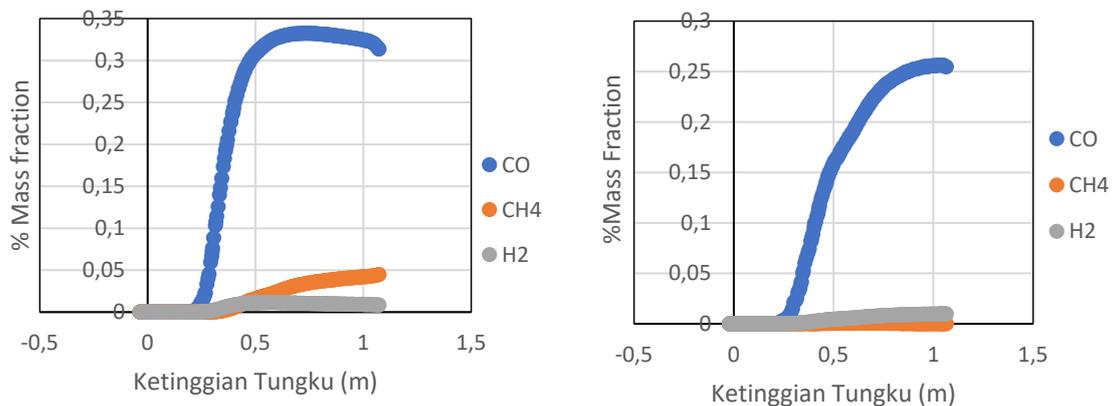


Gambar 6. Lokasi *line*

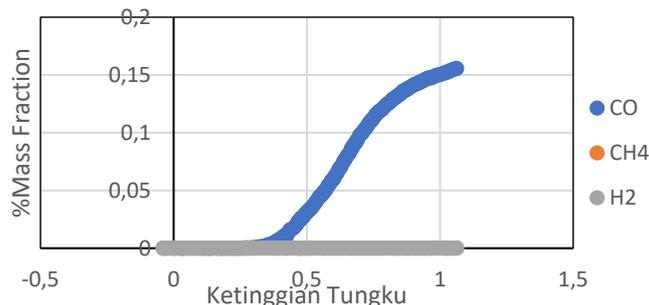
Untuk posisi *line* diambil vertikal dari bagian bawah tungku menuju *outlet* dengan panjang sebesar 1,1 meter.

Kadar Syngas

Berikut adalah hasil simulasi untuk presentase *syngas* dengan variasi massa 1 kg pada kecepatan udara *inlet* sebesar 1,5 m/s, 2,5 m/s dan 3,5 m/s.



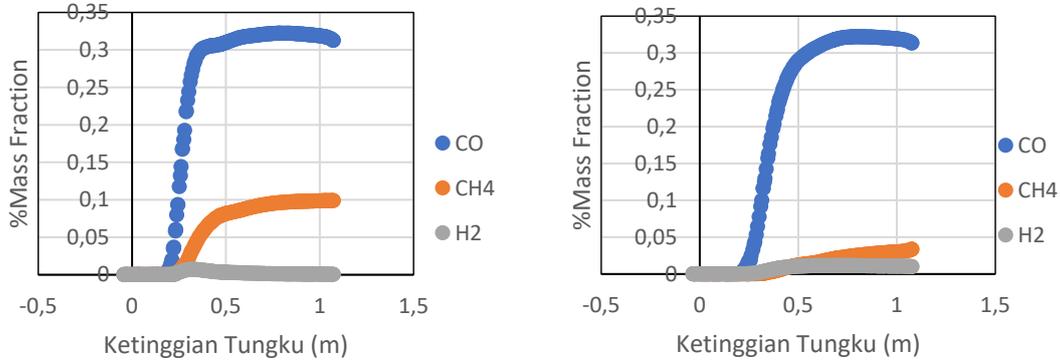
Gambar 7. Grafik perbandingan kadar *syngas* untuk variasi kecepatan *inlet* 1,5 m/s dan 2,5 m/s pada massa bahan bakar 1 kg



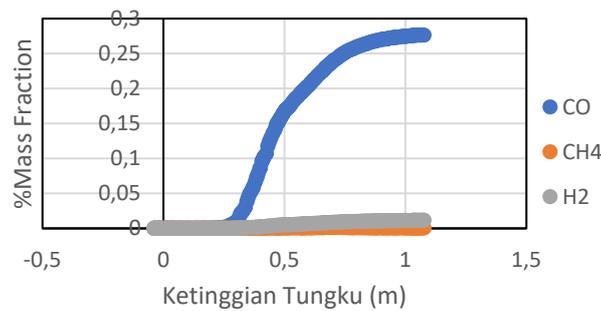
Gambar 8. Grafik perbandingan kadar *syngas* untuk variasi kecepatan *inlet* 3,5 m/s pada massa bahan bakar 1 kg

Berdasarkan grafik presentase *syngas* untuk percobaan dengan variasi 1,5 m/s dengan massa bahan bakar sebesar 1 kg didapatkan presentase kadar CO, CH₄ dan H₂ masing-masing sebesar 31,354%, 4,463% dan 0,8269% dengan total *syngas* sebesar 36,645%, lebih besar dari variasi kecepatan 2,5 m/s dan 3,5 m/s dengan total *syngas* sebesar 26,605% dan 15,906%. Variasi dengan

kecepatan 1,5 m/s memiliki kadar *syngas* yang lebih tinggi disebabkan oleh suplai udara untuk pembakaran sesuai dengan kebutuhan untuk terjadinya proses gasifikasi, berbeda dengan variasi kecepatan *inlet* 2,5 m/s dan 3,5 m/s dianggap memiliki suplai udara yang berlebihan sehingga menyebabkan proses gasifikasi tidak maksimal. Berikut adalah hasil simulasi untuk presentase *syngas* dengan variasi massa 1,5 kg pada kecepatan udara *inlet* sebesar 1,5 m/s, 2,5 m/s dan 3,5 m/s.

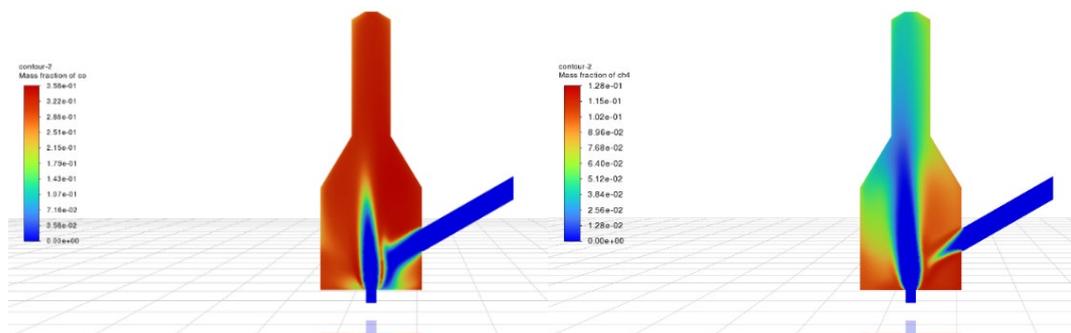


Gambar 9. Grafik perbandingan kadar *syngas* untuk variasi kecepatan *inlet* 1,5 m/s dan 2,5 m/s pada massa bahan bakar 1,5 kg

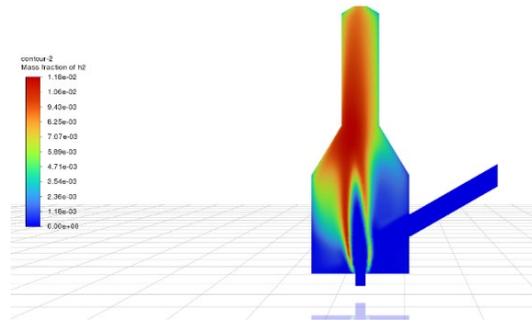


Gambar 10. Grafik perbandingan kadar *syngas* untuk variasi kecepatan *inlet* 3,5 m/s pada massa bahan bakar 1,5 kg

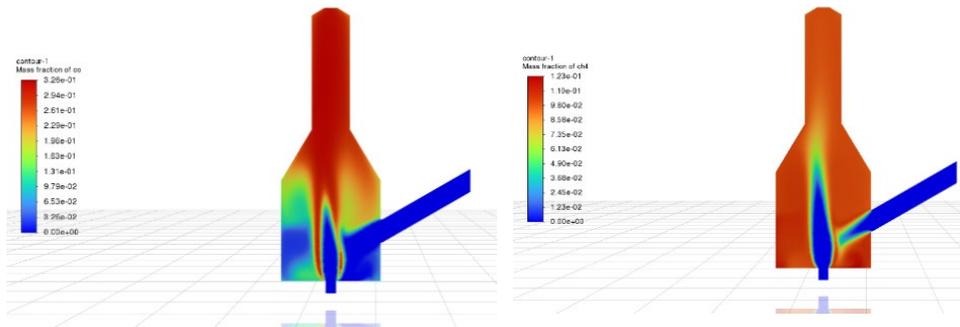
Berdasarkan grafik dari presentase gas *syngas* didapatkan bahwa variasi kecepatan *inlet* 1,5 m/s mempunyai presentase gas CO, CH₄ dan H₂ sebesar 31,24%, 9,89%, dan 0,048% dengan total presentase gas *syngas* sebesar 41%, lebih besar dari variasi kecepatan *inlet* udara 2,5 m/s dan 3,5 m/s. Berikut adalah *contour* dari *syngas* untuk kecepatan *inlet* udara 1,5 m/s pada variasi massa 1 kg dan 1,5 kg.



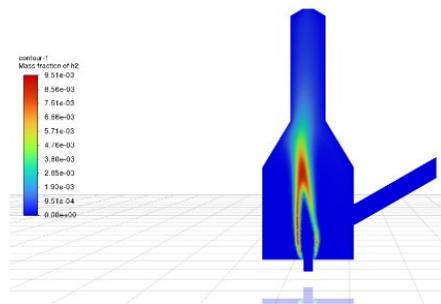
Gambar 11. Kontur *syngas* CO dan CH₄ variasi massa bahan bakar 1 kg



Gambar 12. Kontur *syngas* H₂ variasi massa bahan bakar 1 kg



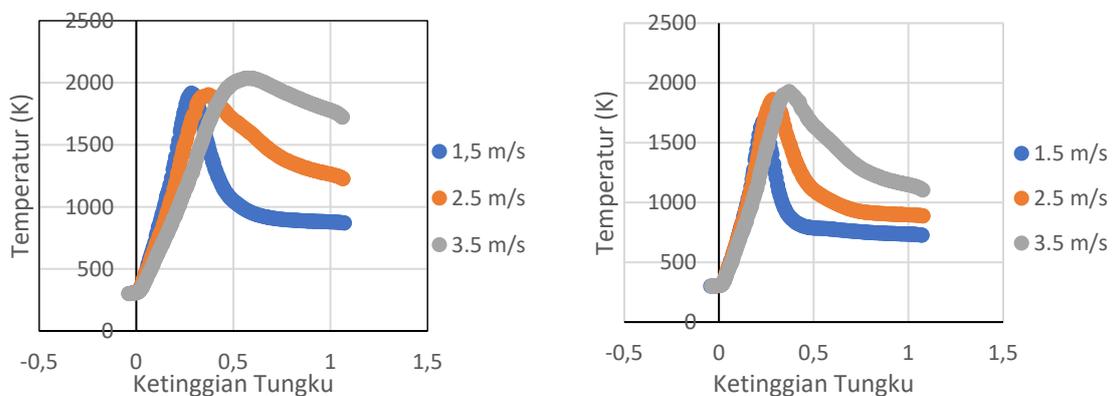
Gambar 13. Kontur *syngas* CO dan CH₄ variasi massa bahan bakar 1,5 kg



Gambar 14. Kontur *syngas* H₂ variasi massa bahan bakar 1,5 kg

Distribusi Temperatur

Hasil simulasi juga memperlihatkan distribusi temperatur pada tungku. Peningkatan suhu terjadi akibat adanya reaksi pembakaran antara bahan bakar dan udara. Berikut adalah grafik perbandingan distribusi temperatur pada tungku pada variasi *inlet* udara sebesar 1,5 m/s, 2,5 m/s dan 3,5 m/s, untuk variasi massa bahan bakar 1 kg dan 1,5 kg.



Gambar 15. Grafik perbandingan distribusi temperatur untuk variasi massa bahan bakar 1 kg dan 1,5 kg

Pada simulasi dengan massa bahan bakar 1,5 kg, karakteristik distribusi temperatur tidak jauh berbeda dengan variasi massa bahan bakar 1 kg. Nilai distribusi temperatur tertinggi ada pada variasi kecepatan *inlet* 3,5 m/s. Untuk presentase kadar *syngas*, variasi 3,5 m/s memiliki presentase paling rendah dimana temperatur yang terlalu tinggi adalah salah satu faktor penyebab kecilnya presentase *syngas* pada proses gasifikasi karena sebagian *syngas* terbakar.

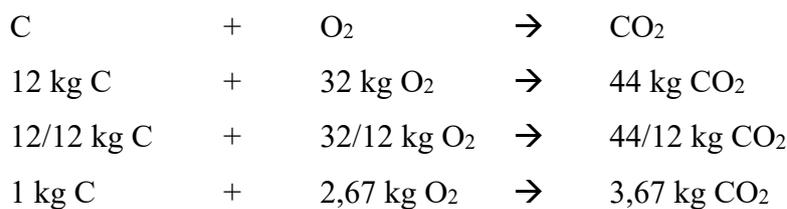
Perhitungan *Equivalence Ratio* (λ)

Equivalence ratio (λ) adalah perbandingan antara jumlah AFR aktual dan AFR stokiometri. Sebelum menentukan nilai λ , langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan perhitungan untuk mencari nilai AFR_{stokiometri}. Nilai AFR_{stokiometri} dicari berdasarkan kebutuhan udara untuk pembakaran sempurna pada bahan bakar biomassa [14]. Kebutuhan udara untuk biomassa kayu dapat dihitung berdasarkan data analisis ultimat dan proksimat dari biomassa. Berikut adalah perhitungan kebutuhan udara untuk pembakaran sempurna pada biomassa kayu dengan jenis kayu *Lophira Alata*.

Tabel 3. Ultimate analisis *Lophira Alata*

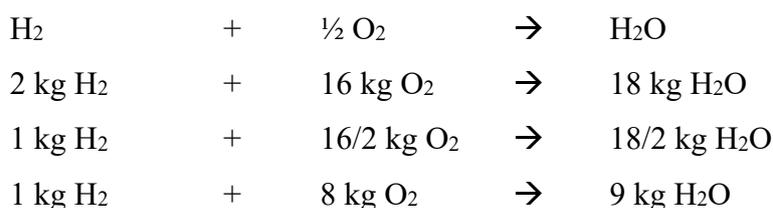
<i>Species</i>	%wt
C	56,45
H	5,59
O	37,75
N	0,15
S	0,06

1. Karbon (C) terbakar sempurna menjadi CO₂ menurut persamaan:



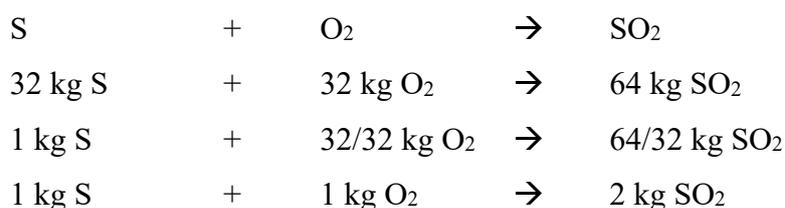
Hal ini berarti, setiap 1 kg C (karbon) akan bereaksi dengan 2,67 kg O₂ (oksigen) untuk membentuk 3,67 kg CO₂ (karbon monoksida).

2. Hidrogen (H₂) terbakar sempurna menjadi H₂O menurut persamaan:



Hal ini berarti, setiap 1 kg H₂ (hidrogen) akan bereaksi dengan 8 kg O₂ (oksigen) untuk membentuk 9 kg H₂O (air).

3. Belerang (S) terbakar sempurna menjadi SO₂ menurut persamaan:



Hal ini berarti, setiap 1 kg S (belerang) akan bereaksi dengan 1 kg O₂ (oksigen) untuk membentuk 2 kg SO₂.

Karena di dalam bahan bakar terkandung unsur-unsur seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4, maka total udara yang dibutuhkan adalah massa udara pada reaksi dikalikan dengan massa unsur yang terkandung di dalamnya, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 &= (2,67 \text{ kg O}_2 \times 56,45\%) + (8 \text{ kg O}_2 \times 5,59\%) + (1 \text{ kg O}_2 \times 0,06\%) \\
 &= 1,507215 \text{ kg O}_2 + 0,4472 \text{ kg O}_2 + 0,0006 \text{ kg O}_2 \\
 &= 1,955015 \text{ kg O}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Karena di dalam bahan bakar sudah terkandung oksigen sebesar } 37,75\% \text{ (Tabel 4), maka:} \\
 &= 37,75\% \times 1 \text{ kg O}_2 \\
 &= 0,3775 \text{ kg O}_2
 \end{aligned}$$

Sehingga, dapat diketahui oksigen yang dibutuhkan adalah total oksigen pada masing-masing unsur yang bereaksi dikurangi dengan oksigen yang sudah dimiliki bahan bakar atau terkandung di dalam bahan bakar, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 &= 1,955015 \text{ kg O}_2 - 0,3775 \text{ kg O}_2 \\
 &= 1,577515 \text{ kg O}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Karena udara mengandung } 21\% \text{ oksigen, maka jumlah udara kering yang dibutuhkan adalah:} \\
 &= 1,577515 \text{ kg O}_2 / 21\% = 7,51 \text{ kg O}_2 \text{ kering}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Rasio udara teoritis yang dibutuhkan untuk mengetahui kebutuhan udara pembakaran adalah:} \\
 &AFR = (7,51 \text{ kg}) / (1 \text{ kg}) \\
 &AFR = 7,51
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan untuk kebutuhan udara pada pembakaran sempurna didapatkan bahwa nilai AFR_{stokiometri} sebesar 7,51.

Langkah selanjutnya untuk mencari nilai ER, adalah mencari nilai AFR_{aktual}. Nilai AFR_{aktual} dicari berdasarkan perbandingan kebutuhan udara dan massa biomassa pada proses gasifikasi. Untuk mencari jumlah udara pada variasi kecepatan udara, digunakan persamaan laju aliran massa. Berikut adalah perhitungan massa udara dengan variasi kecepatan *inlet* udara 1,5 m/s

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{udara} &= 1,2 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,0016 \text{ m}^2 \times 1,5 \text{ m/s} \\
 &= 0,00288 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

Proses simulasi dianggap berlangsung selama 10 menit, sehingga nilai *mass flow rate* dari bahan bakar adalah sebesar 0,001667 kg/s. AFR aktual adalah perbandingan antara massa laju udara dan massa laju bahan bakar, sehingga didapatkan:

$$AFR_{aktual} = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bahan\ bakar}} = \frac{0,00288 \text{ kg/s}}{0,001667 \text{ kg/s}}$$

$$AFR_{aktual} = 1,73$$

λ adalah perbandingan antara nilai AFR_{aktual} dan $AFR_{\text{stokiometri}}$ sehingga didapatkan nilai sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{AFR_{\text{aktual}}}{AFR_{\text{stokiometri}}} = \frac{1,73}{7,51} = 0,23$$

Gasifikasi merupakan suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO , CH_4 , dan H_2) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20%-40% udara *stoikiometri*). Berikut adalah tabel perhitungan λ untuk variasi kecepatan *inlet* 1,5 m/s, 2,5 m/s dan 3.5 m/s dengan massa bahan bakar sebesar 1 kg dan 1,5 kg.

Tabel 4. Analisis data perhitungan

Massa	Kecepatan Inlet	% CO	% CH ₄	% H ₂	Total % Syngas	AFR Aktual	λ
1 Kg	1,5 m/s	31,354	4,463	0,8279	36,645	1,73	0,23
	2,5 m/s	25,46	0,148	0,977	26,605	2,879	0,38
	3,5 m/s	15,56	0,000014	0,346	15,906014	4,031	0,537
1,5 Kg	1,5 m/s	31,24	9,89	0,048	41,178	1,152	0,153
	2,5 m/s	31,34	3,346	0,9857	35,7617	1,92	0,256
	3,5 m/s	27,619	0,0464	1,161	28,8264	2,688	0,358

Dari hasil perhitungan nilai *equivalence ratio*, semakin tinggi nilai ER, presentase gas *syngas* makin berkurang. Pada variasi massa bahan bakar 1 kg, presentase gas *syngas* paling tinggi ada pada variasi 1,5 m/s, dimana nilai λ dari variasi kecepatan udara 1,5 m/s adalah yang terkecil dengan nilai sebesar 0,23. Hal tersebut disebabkan karena nilai λ berbanding lurus dengan suplai udara untuk pembakaran, dan apabila suplai udara semakin tinggi maka proses pembakaran lebih mendekati pembakaran sempurna. Untuk simulasi menggunakan variasi massa bahan bakar 1,5 kg, presentase kadar *syngas* terbesar ada pada variasi 1,5 m/s juga, dimana nilai λ yang didapatkan adalah sebesar 0,153.

SIMPULAN

Pada simulasi proses gasifikasi pada tungku gasifikasi dengan tipe *fix-bed gasifier*, pada variasi bahan bakar biomassa kayu sebesar 1 kg, presentase *syngas* terbesar adalah pada variasi kecepatan *inlet* udara sebesar 1,5 m/s, dimana komposisi *syngas* yang didapatkan adalah $CO = 31,354\%$, $CH_4 = 4,463\%$, dan $H_2 = 0,8279\%$ dengan total *syngas* sebesar 36,645%. Untuk variasi bahan bakar biomassa kayu sebesar 1,5 kg, presentase *syngas* terbesar adalah pada variasi kecepatan *inlet* udara sebesar 1,5 m/s juga, dengan komposisi $CO = 31,24\%$, $CH_4 = 9,89\%$, dan $H_2 = 0,048\%$ dengan total *syngas* sebesar 41,178%.

Pada perhitungan nilai *equivalence ratio* (λ), didapatkan nilai λ berbanding terbalik dengan presentase *syngas*, dimana makin kecil rasio $AFR_{\text{aktual}}/AFR_{\text{stokiometri}}$, semakin besar presentase *syngas* yang didapatkan. Nilai ER pada variasi massa bahan bakar 1 kg, presentase *syngas* paling tinggi ada pada variasi 1,5 m/s, dimana nilai λ dari variasi kecepatan udara 1,5 m/s adalah yang terkecil dengan nilai sebesar 0,23. Pada variasi massa bahan bakar 1,5 kg, presentase kadar *syngas* terbesar ada pada variasi 1,5 m/s juga, dimana nilai λ yang didapatkan adalah sebesar 0,153.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Yokoyama, "Buku Panduan Biomassa Asia: Panduan untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa.," *Japan Inst. Energy*, 2008, [Online]. Available: http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Indonesian/All_I.pdf.
- [2] A. F. Aji, *Kaji eksperimental dan simulasi cfd proses pengayaan hidrogen dalam gas hasil*

gasifikasi sekam padi dan arang kayu dengan media uap. 2012.

- [3] S. Teknik, "PENGUJIAN KARAKTERISTIK FIXED BED GASIFIER DENGAN BAHAN BAKAR BIOMASSA Oleh : Aristo Seandy Themas PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN," 2019.
- [4] U. Kumar and M. C. Paul, "CFD modelling of biomass gasification with a volatile break-up approach," *Chem. Eng. Sci.*, no. September, pp. 413–422, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2018.09.038.
- [5] G. C. Umenweke, I. C. Afolabi, E. I. Epelle, and J. A. Okolie, "Machine learning methods for modeling conventional and hydrothermal gasification of waste biomass: A review," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 17, no. February, p. 100976, 2022, doi: 10.1016/j.biteb.2022.100976.
- [6] *Gasification for Synthetic Fuel Production*. 2015.
- [7] P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. 2013.
- [8] T. Suyitno, "Produksi Gas dari Padatan," *Dasar-dasar, Tek. Simulasi dan Apl.*, vol. 44, no. 8, pp. 21–25, 2011, [Online]. Available: <http://www.elsevier.com/locate/scp>.
- [9] K. D. Ramachandriya *et al.*, "Critical factors affecting the integration of biomass gasification and syngas fermentation technology," *AIMS Bioeng.*, vol. 3, no. 2, pp. 188–210, 2016, doi: 10.3934/bioeng.2016.2.188.
- [10] A. Riza, Y. Bindar, H. Susanto, and D. Sasongko, "Pengaruh Kadar Karbon Pada Proses Gasifikasi," *Sinergi*, vol. 21, no. 1, p. 1, 2017, doi: 10.22441/sinergi.2017.1.001.
- [11] Y. P. B. Putranto, "Pengaruh Variasi Kecepatan Udara Dan Penambahan Udara Bantu Pada Reaktor Terhadap Performa Kompor Gasifikasi UpDraft Dengan Bahan Bakar Sekam Padi," 2017.
- [12] E. P. Akhator, A. I. Obonor, and A. O. Ugege, "Physico-chemical properties and energy potential of wood wastes from sawmills in Benin metropolis, Nigeria," *Niger. J. Technol.*, vol. 36, no. 2, p. 452, 2017, doi: 10.4314/njt.v36i2.18.
- [13] A. Ghurri, "Dasar-Dasar Mekanika Fluida," *Dasar-Dasar Mek. Fluida*, p. 1, 2014, [Online]. Available: https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_pendidikan_1_dir/2e54aeb12421ee1a17c35e14ba49cb23.pdf.
- [14] H. Bhakti and B. Sudarmanta, "Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Sistem Ceratan pada Gasifikasi Biomassa Briket Municipal Solid Waste terhadap Performa Gasifier Tipe Downdraft," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 610–614, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.20188.
- [15] T. R. Taha, *An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics*, vol. 6, no. 4. 2005.
- [16] T. D. Canonsburg, "ANSYS Fluent Theory Guide," *ANSYS Inc., USA*, vol. 15317, no. November, p. 814, 2013, [Online]. Available: http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm.
- [17] G. Rinovianto, "Karakteristik Gasifikasi Pada Updraft Double Gas Outlet," *J. Tek. Mesin UI*, 2012.