

**SIMULASI PENGARUH UKURAN PARTIKEL *BED* TERHADAP
SYNGAS YANG DIHASILKAN PADA *BUBBLING FLUIDIZED BED*
GASIFIER MENGGUNAKAN SOFTWARE CPFD BARRACUDA
VIRTUAL REACTOR 17.1.0**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik**

Oleh:

**MUH. MAULANA KURNIAWAN
D 200 160 194**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
2020**

HALAMAN PERSETUJUAN

**SIMULASI PENGARUH UKURAN PARTIKEL *BED* TERHADAP
SYNGAS YANG DIHASILKAN PADA *BUBBLING FLUIDIZED BED*
GASIFIER MENGGUNAKAN *SOFTWARE* CPFD BARRACUDA
VIRTUAL REACTOR 17.1.0**

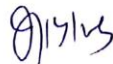
PUBLIKASI ILMIAH

oleh:

MUH. MAULANA KURNIAWAN
D 200 160 194

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen
Pembimbing



Nur Aklis, S.T., M.Eng.
NIDN. 0001037801

HALAMAN PENGESAHAN

**SIMULASI PENGARUH UKURAN PARTIKEL *BED* TERHADAP
SYNGAS YANG DIHASILKAN PADA *BUBBLING FLUIDIZED BED*
GASIFIER MENGGUNAKAN *SOFTWARE* CPFD BARRACUDA
VIRTUAL REACTOR 17.1.0**

OLEH:

MUH. MAULANA KURNIAWAN

D 200 160 194

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Pada hari Sabtu, 28 November 2020

dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Nur Akli, S.T., M.Eng.

(Ketua Dewan Penguji)

2. M. Alfath Hendrawan, S.T., M.T.

(Anggota I Dewan Penguji)

3. Amin Sulistyanto, S.T., M.T.

(Anggota II Dewan Penguji)



Dekan,

M. S. Sunarjono, M.T., Ph.D., IPM.
NIK. 682

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 3 Desember 2020

Penulis



MUH. MAULANA KURNIAWAN
NIM. D 200 160 194

**SIMULASI PENGARUH UKURAN PARTIKEL *BED* TERHADAP
SYNGAS YANG DIHASILKAN PADA *BUBBLING FLUIDIZED BED*
GASIFIER MENGGUNAKAN SOFTWARE CPFD BARRACUDA
VIRTUAL REACTOR 17.1.0**

Abstrak

Penggunaan bahan bakar fosil dalam skala besar mengakibatkan ketersediaan bahan bakar semakin menipis yang berdampak pada ketersediaan bahan bakar sehingga perlu dilakukan usaha untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dengan mencari alternatif bahan bakar baru dan terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel *bed* terhadap komposisi syngas yang dihasilkan yang berpotensi menjadi pengganti bahan bakar fosil. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi CPFD yang digunakan adalah reaktor tipe *bubbling fluidized bed* dengan ukuran diameter 400 mm dan tinggi 3800 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah pelet kayu berukuran 8 mm. Partikel *bed* yang digunakan adalah pasir silika dengan variasi ukuran 100-200 μm , 200-300 μm dan 300-400 μm . Penelitian ini menggunakan *software* Barracuda Virtual Reactor dengan melibatkan reaksi kimia gasifikasi sehingga dapat dianalisa komposisi dari *syngas* yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar ukuran partikel *bed* dapat menurunkan distribusi temperatur, komposisi dan konsentrasi *syngas*. Ukuran partikel *bed* 100-200 μm menghasilkan distribusi temperatur, komposisi *syngas* serta konsentrasi *syngas* tertinggi dan ukuran partikel *bed* 300-400 μm menghasilkan distribusi temperatur, komposisi *syngas* dan konsentrasi *syngas* terendah.

Kata kunci: *Bubbling Fluidized Bed Gasifier*, Simulasi, Ukuran Partikel *Bed*, Komposisi *Syngas*, CPFD.

Abstract

The use of fossil fuels on a large scale results in the depletion of fuel availability which has an impact on the availability of fuel so it is necessary to make efforts to reduce dependence on fossil fuels by looking for new and renewable fuel alternatives. This study aims to determine the effect of bed particle size on the resulting syngas composition which has the potential to become a substitute for fossil fuels. The research was conducted using the CPFD simulation method which used a bubbling fluidized bed type reactor with a diameter of 400 mm and a height of 3800 mm. The fuel used is wood pellets measuring 8 mm. The bed particles used were silica sand with a size variation of 100-200 μm , 200-300 μm and 300-400 μm .

This research uses Barracuda Virtual Reactor software which involves gasification chemical reactions so that the composition of the syngas can be analyzed. The results showed that the larger the bed particle size can reduce the temperature distribution, composition and syngas concentration. The bed particle size of 100-200 μm resulted in the temperature distribution, syngas composition and the highest syngas concentration and the bed particle size of 300-400 μm resulted in the lowest temperature distribution, syngas composition and syngas concentration.

Keywords: Bubbling Fluidized Bed Gasifier, Simulation, Bed Particle Size, Syngas Composition, CPFD.

1. PENDAHULUAN

Krisis energi merupakan masalah utama dan sangat di perhatikan di beberapa negara, tidak terkecuali di Indonesia. Banyak krisis energi yang menjadi masalah secara berkelanjutan. Sumber-sumber energi seperti energi fosil yang tidak dapat diperbarui, terus dieksploitasi secara terus menerus yang berdampak pada kelangkaan bahan bakar (BPPT, 2017). Oleh karena itu, sumber energi terbarukan menjadi solusi atas masalah krisis energi yang dialami saat ini.

Energi biomassa adalah jenis bahan bakar yang cara pengolahannya dengan cara mengkonversi bahan biologis seperti tanaman, kotoran hewan, dan mikroorganisme. Terdapat berbagai macam cara untuk mengkonversi energi yang tergantung dalam biomassa, seperti proses *combustion*, *pyrolysis*, *liquefaction* dan *gasification*. Salah satu proses yang efektif untuk menghasilkan gas yaitu gasifikasi. Gasifikasi adalah proses termokimia yang mengubah zat padat bahan bakar (misal, batubara, biomassa, dll.) menjadi campuran gas yang mengandung terutama metana, karbon dioksida, karbon monoksida, hidrogen, dan nitrogen. Selain gas produk, beberapa produk sampingan sukaabu, tar, partikel arang. (Loha *et al*, 2014).

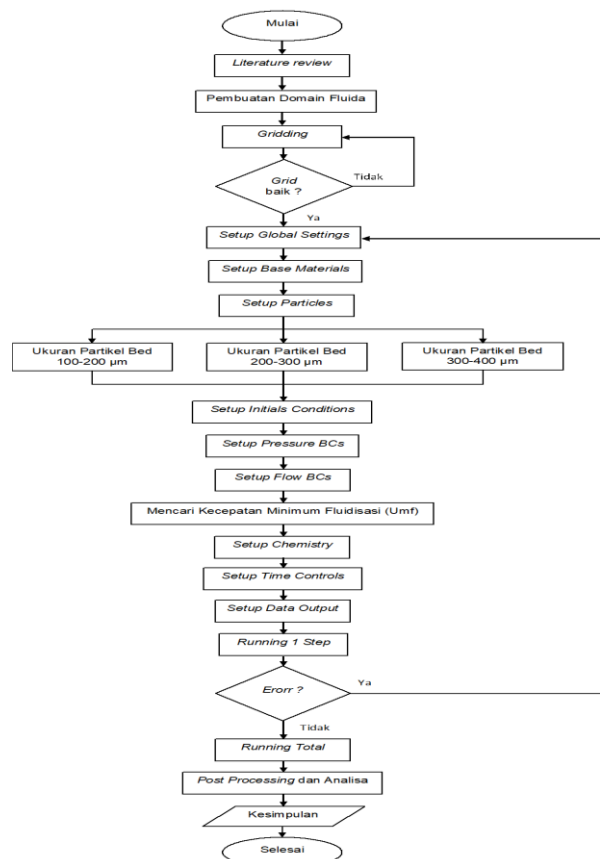
Teknologi gasifikasi dikelompokkan menjadi 3 jenis, yaitu *fixed bed*, *fluidized bed*, dan *entrained flow*. Salah satu teknologi yang digunakan adalah *fluidized bed*. *Fluidized bed* adalah teknologi yang mengubah bahan bakar padat yang mengandung karbon menjadi *syngas*. *Gasifier* ini dioperasikan dengan oksigen dan suhu yang terkontrol. Media fluidisasi berupa udara dengan material unggun berupa pasir silika (Aries, 2017). Salah satu keunggulan dari reaktor

fluidized bed adalah pada penggunaan bahan bakar maupun material *bed* dimana bahan bakar dan material *bed* yang dipakai dapat menggunakan beberapa jenis dan pada jangkauan ukuran yang fleksibel, namun demikian penelitian yang dilakukan oleh Cahyanto dkk (2016) menunjukkan adanya pengaruh ukuran partikel *bed* terhadap *syngas* yang dihasilkan *bubbling fluidized bed*. Penelitian ini akan membahas mengenai pengaruh ukuran partikel *bed* terhadap *syngas* yang dihasilkan *bubbling fluidized bed gasifier* dengan metode simulasi.

Penelitian berbasis metode simulasi banyak dipilih dan dilakukan karena untuk mengurangi resiko *trial* dan *error* pada metode eksperimen. Salah satu metode simulasi yang digunakan adalah *software* Barracuda Virtual Reactor dengan menggunakan persamaan Euler dan Lagrangian.

2. METODE

2.1 Langkah Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

a. *Literature Review*

Penelitian ini dilakukan menggunakan desain penelitian sebelumnya dan membaca jurnal-jurnal dari berbagai sumber yang terkait dengan simulasi *bubbling fluidized bed gasifier*.

b. Pembuatan Desain Geometri

Pembuatan desain reaktor *gasifier* dibuat sesuai dengan ukuran aslinya menggunakan *software* Solidwork 2018.

c. *Gridding*

Proses *gridding* dilakukan untuk membagi desain sebelumnya menjadi beberapa bagian yang lebih kecil dan sama besarnya (*grid*). *Grid* yang digunakan pada simulasi ini adalah *grid* jumlah 45000.

d. *Global Settings*

Setup simulasi pada Barracuda VR dimulai dengan memasukan percepatan gravitasi sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$.

e. *Setup Base Materials*

Meng-*import* semua material yang terlibat dalam simulasi, termasuk senyawa-senyawa kimia yang terkandung di dalam biomassa.

f. *Setup Particles*

Mendefinisikan *volatiles* (zat menguap) dan menentukan ukuran partikel dan biomassa yang digunakan. *Setup Initial Conditions*

Fluid ICs untuk menentukan kondisi awal fluida yang terlibat yaitu udara dengan temperatur masuk 27° C dan tekanan 1 atm dan *Particle ICs* untuk menentukan ketinggian *bed* yaitu 50 cm dengan temperatur masuk 27° C .

g. *Setup Pressure BCs*

Yaitu menentukan kondisi batas jalur keluar masuk aliran fluida dengan tekanan tertentu.

h. *Setup Flow BCs*

Yaitu menentukan kondisi batas jalur keluar masuk aliran fluida.

- i. Mencari Kecepatan Minimum Fluidisasi
Proses fluidisasi yang dapat dicari dengan persamaan Archimedes dan persamaan Bilangan Reynold.
- j. *Setup Chemistry*
Pada simulasi ini, melibatkan reaksi kimia dan laju kinetik untuk mengidentifikasi gas yang dihasilkan.
- k. *setup Time Control*
Menentukan durasi *running* simulasi , yaitu selama 60 detik.
- l. *Setup Data Output*
Menu *data output* pada simulasi ini digunakan *data output* jenis *flux planes* dan *transient point*. *Flux planes* adalah bidang imajiner yang dipasang pada saluran untuk mengetahui atau mendeteksi pergerakan partikel dan fluida. *Transient point* adalah titik sensor yang dipasang pada titik-titik grid yang ada.
- m. *Running 1 Step*
Melakukan *check setup* yang dihasilkan selama 1 proses simulasi.
- n. *Error*
Memeriksa hasil *running 1 step* benar atau salah.
- o. *Running Total*
Mendapatkan data yang diharapkan sesuai dengan *setting* sebelumnya, dengan cara pilih bagian *run solver*, akan keluar pilihan kemudian ketik “O” yang artinya *overwrite*.
- p. *Postprocessing* dan Analisa
Pada bagian *plot manager* parameter yang dicari seperti temperatur *gasifier* dan komposisi *syngas* yang dihasilkan dari variasi nilai parameter tersebut dapat dibandingkan dan dianalisis.

2.2 Alat Penelitian dan Desain Reaktor

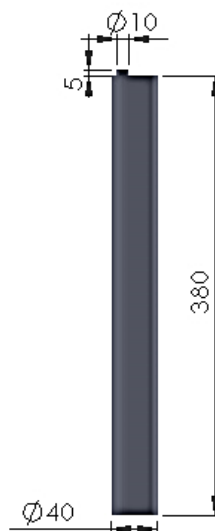
- a. Alat Penelitian
Spesifikasi *hardware* dari komputer dan *software* yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi *Hardware* dan *Software* yang Digunakan

Spesifikasi <i>Hardware</i>	
<i>Processor</i>	Intel Core i5-2320 CPU @3.00 GHz
<i>Memory</i>	4096 MB RAM
<i>VGA Card</i>	AMD Radeon HD 6450
<i>Operating System</i>	Windows 10 Pro 64-Bit
<i>DirectX Version</i>	DirectX 12
<i>GPU memory</i>	1012 MB
Spesifikasi <i>Software</i>	
<i>Software</i>	Fungsi
Barracuda VR 17.1.0	Simulasi partikel dan fluida BFB <i>Gasifier</i>
Solidwork 2018	Pembuatan domain fluida

b. Desain Reaktor

Geometri dan ukuran yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan dengan *literature review* dari sebuah jurnal. Susunan dimensi lengkap *bubbling fluidized bed gasifier* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Reaktor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kecepatan Minimum Fluidisasi

Kecepatan minimum fluidisasi adalah faktor penting dalam menentukan rezim *bubbling*. Hal ini dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Ar = \frac{g \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2} d_p^3$$

$$Ar = \frac{(9,81 \text{ m/s}^2) (1,1614 \text{ kg/m}^3) (2500 \text{ kg/m}^3 - 1,1614 \text{ kg/m}^3)}{(1,846 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}})^2} (150 \times 10^{-6} \text{ m})^3$$

$$Ar = 281$$

Bilangan Reynold pada kecepatan minimum fluidisasi yaitu :

$$Ar = 1,75 \frac{(Re_{mf})^2}{(C_p) (\epsilon_{mf})^3} + 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})(Re_{mf})}{(C_p)^2 (\epsilon_{mf})^3}$$

$$281 = 1,75 \frac{(Re_{mf})^2}{(1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K}) (0,42)^3} + 150 \frac{(1 - 0,42)(Re_{mf})}{(1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{K})^2 (0,42)^3}$$

$$Re_{mf} = 0,234$$

Kecepatan minimum fluidisasi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

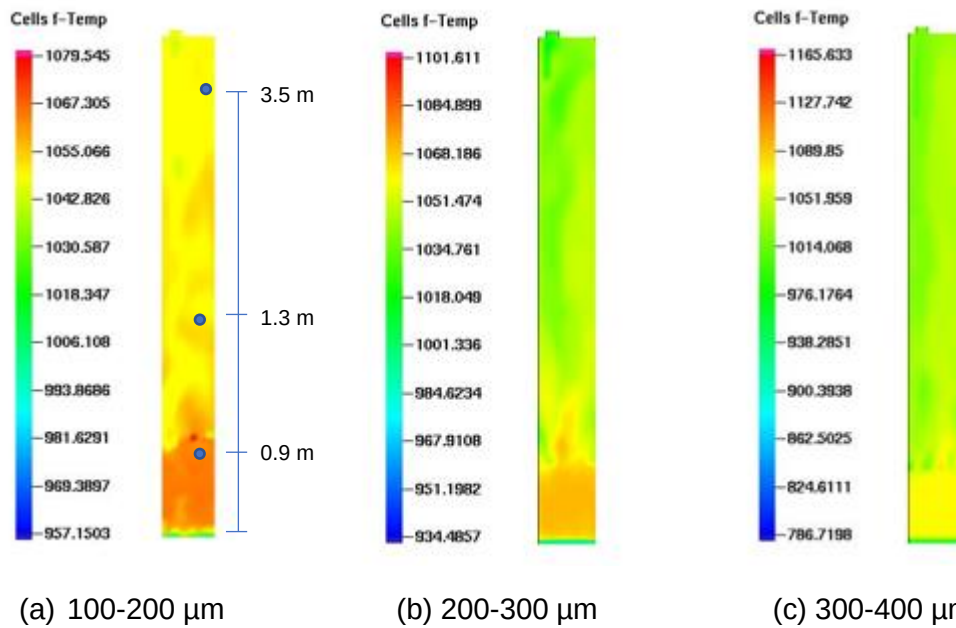
$$U_{mf} = Re_{mf} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g d_p} \right)$$

$$U_{mf} = 0,234 \left(\frac{1,846 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}{1,1614 \text{ kg/m}^3 \times (150 \times 10^{-6} \text{ m})} \right)$$

$$U_{mf} = 0,024 \text{ m/s}$$

3.2 Distribusi Temperatur

Distribusi perbedaan temperatur diseluruh bagian BFBG tiap variasi ukuran partikel *bed*.



Gambar 3. Distribusi Temperatur *Gasifier* Terhadap Variasi Ukuran Partikel *Bed*

Pada gambar 3. point a, untuk variasi ukuran partikel *bed* 100-200 μm pada bagian bawah *gasifier* (ketinggian 0.25 m) temperaturnya sebesar 1066.262 K, pada bagian tengah *gasifier* (ketinggian 1.3 m) temperaturnya sebesar 1058.681 K, dan pada bagian atas *gasifier* (ketinggian 3.5 m) temperaturnya sebesar 1043.256 K.

Pada gambar 3. point b, untuk variasi ukuran partikel *bed* 200-300 μm pada bagian bawah *gasifier* (ketinggian 0.25 m) temperaturnya sebesar 1071.709 K, pada bagian tengah *gasifier* (ketinggian 1.3 m) nilai temperaturnya sebesar 1050.660 K, dan pada bagian atas *gasifier* (ketinggian 3.5 m) temperaturnya sebesar 1040.400 K.

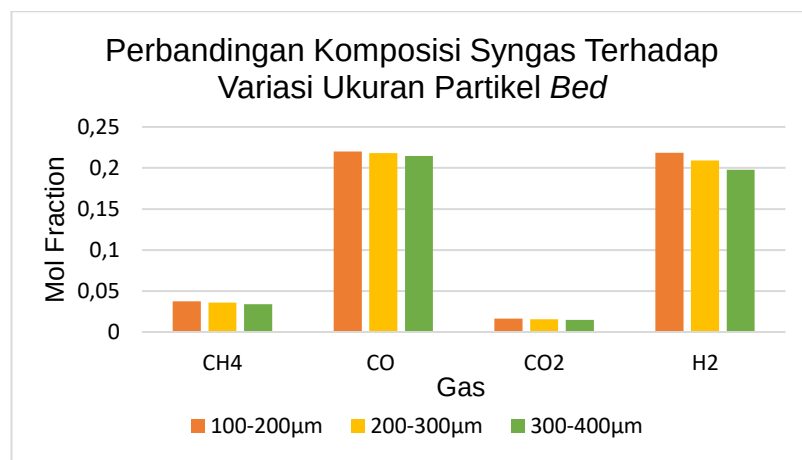
Pada gambar 3. point c, untuk variasi ukuran partikel *bed* 300-400 μm pada bagian bawah *gasifier* (ketinggian 0.25 m) temperaturnya sebesar

1072.623 K, pada bagian tengah *gasifier* (ketinggian 1.3 m) temperaturnya sebesar 1048.433 K, dan pada bagian atas *gasifier* (ketinggian 3.5 m) temperaturnya sebesar 1032.207 K.

3.3 Karakteristik Syngas

3.3.1 Komposisi Syngas

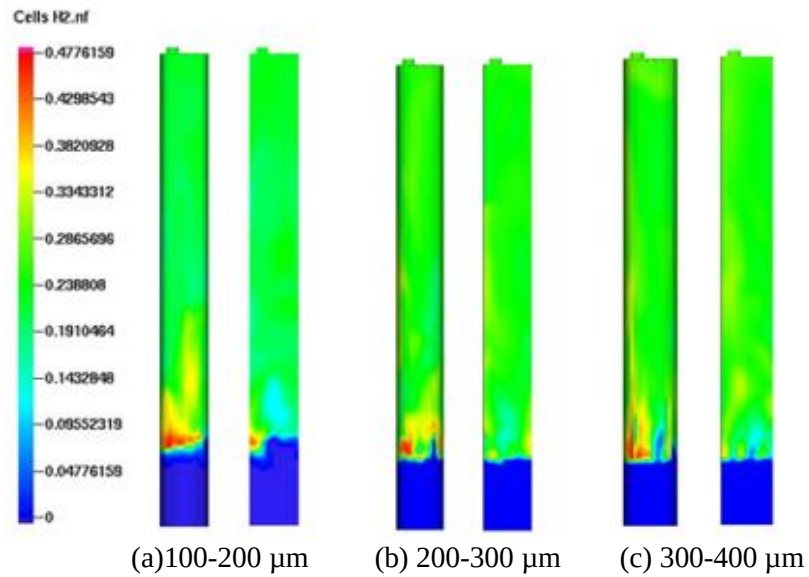
Perubahan fraksi mol dari gas yang dihasilkan selama simulasi berlangsung dapat dilihat pada gambar 4.



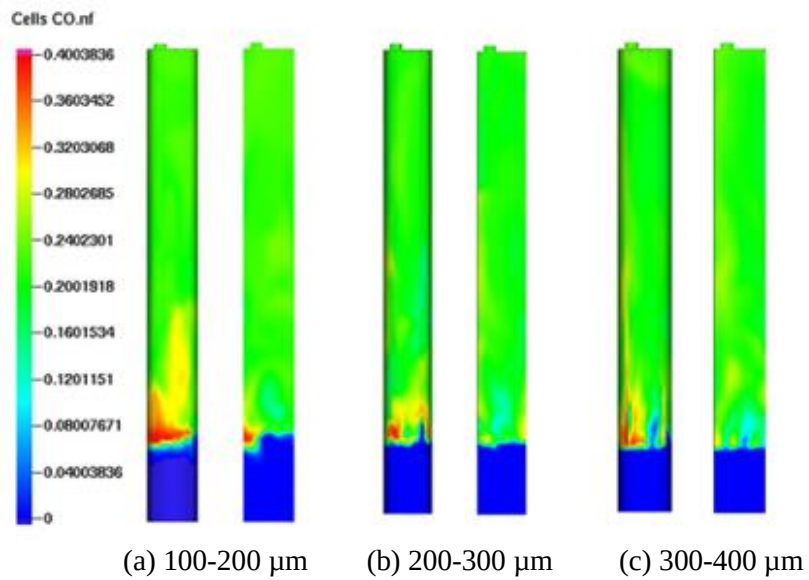
Gambar 4. Diagram Perbandingan Komposisi Syngas Terhadap Variasi Ukuran Partikel *Bed*.

Perubahan ukuran partikel *bed* dalam *gasifier* mengakibatkan perubahan yang cukup signifikan terhadap gas yang dihasilkan. Ketika ukuran partikel *bed* dari 100-200 µm sampai 200-300 µm mengakibatkan gas H₂ menurun dari 0.2185 menjadi 0.2090, gas CO mengalami penurunan dari 0.2199 menjadi 0.2144, gas CH₄ mengalami penurunan dari 0.0373 menjadi 0.0357, CO₂ mengalami penurunan dari 0.0161 menjadi 0.0154. Ukuran partikel *bed* dari 200-300 µm sampai 300-400 µm mengakibatkan gas H₂ menurun dari 0.2090 menjadi 0.1977, gas CO mengalami penurunan dari 0.2180 menjadi 0.2144, gas CH₄ mengalami penurunan dari 0.0357 menjadi 0.0337, CO₂ mengalami penurunan dari 0.0154 menjadi 0.0146.

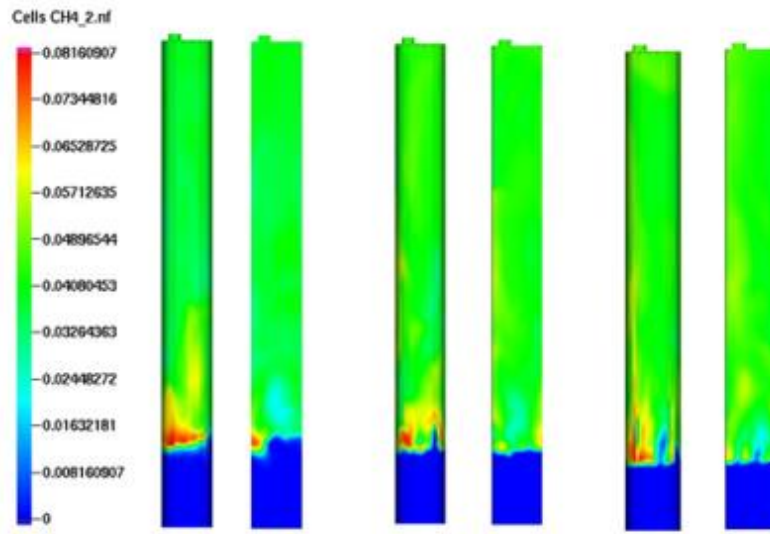
3.3.2 Distribusi Konsentrasi Syngas



Gambar 5. Distribusi Konsentrasi Gas H_2 Terhadap Variasi Ukuran Partikel *Bed*

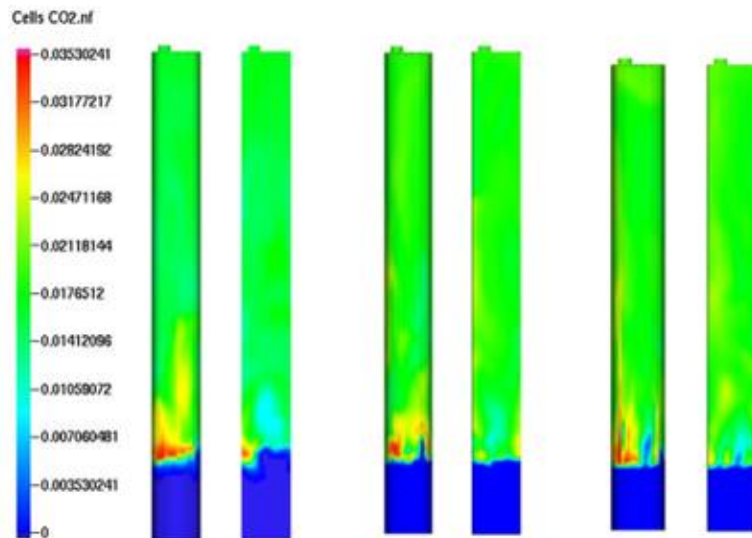


Gambar 6. Distribusi Konsentrasi Gas CO Terhadap Variasi Ukuran Partikel *Bed*



(a) 100-200 μm (b) 200-300 μm (c) 300-400 μm

Gambar 7. Distribusi Konsentrasi Gas CH₄ Terhadap Variasi Ukuran Partikel *Bed*

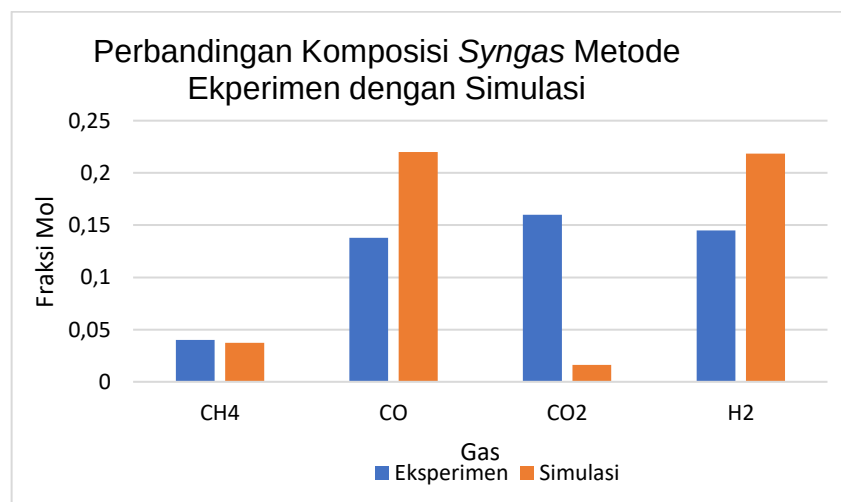


(a) 100-200 μm (b) 200-300 μm (c) 300-400 μm

Gambar 8. Distribusi Konsentrasi Gas CO₂ Terhadap Variasi Ukuran Partikel *Bed*

3.3.3 Perbandingan Komposisi Syngas Metode Ekperimen dengan Simulasi

Data output komposisi *syngas* hasil simulasi dibandingkan dengan rujukan eksperimen sebelumnya (Kim *et al.*, 2013) menggunakan pembanding variasi ukuran partikel bed 100-200 μm . Perbandingan komposisi *syngas* metode ekperimen dengan simulasi dapat dilihat pada gambar 9.



Berdasarkan diagram diatas dapat diketahui bahwa komposisi *syngas* CO dan H₂ hasil simulasi lebih tinggi dibandingkan eksperimen, sedangkan komposisi *syngas* CO₂ dan CH₄ hasil simulasi lebih rendah dibandingkan eksperimen. Faktor penyebab terjadinya perbedaan hasil antara simulasi dan eksperimen yaitu, alasan pertama perbedaan lama waktu gasifikasi antara simulasi dengan eksperimen, alasan kedua yaitu penggunaan persamaan untuk menghitung *volatile* antara simulasi dengan eksperimen.

4. PENUTUP

Setelah dilakukan analisa terhadap hasil simulasi dari operasi *BFB Gasifier* didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin besar ukuran partikel *bed* maka disrtibusi temperatur *gasifier* yang dihasilkan semakin menurun. Distribusi temperatur tertinggi

didapatkan pada partikel bed 100-200 μm sedangkan distribusi temperatur terendah didapatkan pada partikel bed 300-400 μm .

2. Semakin besar ukuran partikel *bed* maka komposisi *syngas* yang dihasilkan semakin menurun. Komposisi *syngas* tertinggi didapatkan pada partikel bed 100-200 μm sedangkan komposisi *syngas* terendah didapatkan pada partikel bed 300-400 μm .
3. Semakin besar ukuran partikel *bed* maka konsentrasi *syngas* yang dihasilkan semakin menurun. Konsentrasi *syngas* tertinggi didapatkan pada partikel bed 100-200 μm sedangkan konsentrasi *syngas* terendah didapatkan pada partikel bed 300-400 μm .

PERSANTUNAN

Terima kasih kepada Bapak Nur Aklis, S.T., M.Eng. selaku Pembimbing Tugas Akhir, Bapak M. Alfatih Hendrawan, S.T., M.T. dan Bapak Amin Sulistyanto, S.T., M.T. selaku Anggota Dewan Penguji I dan II atas bimbingannya dalam penulisan Laporan Tugas Akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Aklis, N., Descessar, A., Wibawa, P., & Rudiyanto, F. (2017). *Pengaruh Ukuran Bahan Bakar Terhadap Hasil Gas Reaktor Bubbling Fluidized Bed Gasifier*. February, 2–8.
- Amal Kamala Dalimunthe, Rosyida Permatasari, S. C. (2018). Pengaruh Diameter Partikel Terhadap Fenomena Fluidisasi Di Dalam Fluidized Bed. *Seminar Nasional Cendekiawan Ke 4 Tahun 2018 Buku 1: "Teknik, Kedokteran Hewan, Kesehatan, Lingkungan Dan Lanskap"*, April 2020.
- Aries. (2017, Agustus 24). The scalable solution to waste (and energy and emissions) issues. Aries Online. Diakses dari <https://ariescleanenergy.com>
- Basu, P. (2006). Combustion and gasification in fluidized beds. *In Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. <https://doi.org/10.1201/9781420005158>.
- Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis practical design. Canada: Elsevier Inc
- BPPT. 2017. BPPT Outlook Energi Indonesia 2017. Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia, Jakarta.

- Cahyanto, W. T., Riyadi, M. A., Sukarno, G. R., Teknik, F., Muhammadiyah, U., Teknik, F., Muhammadiyah, U., Teknik, F., Muhammadiyah, U., Teknik, F., & Muhammadiyah, U. (2016). *Tahapan penelitian dapat dijelaskan sebagaimana gambar 1 . Tahapan penelitian meliputi. c*, 86–93.
- Chen, C., Werther, J., Heinrich, S., Qi, H. Y., & Hartge, E. U. (2013). CPFD simulation of circulating fluidized bed risers. *Powder Technology*, 235, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.014>
- Geldart, D. (1972). The effect of particle size and size distribution on the behaviour of gas-fluidised beds. *Powder Technology*, 6(4), 201–215. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)83014-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)83014-6)
- Ismail, T. M., Ramos, A., Monteiro, E., El-Salam, M. A., & Rouboa, A. (2020). Parametric studies in the gasification agent and fluidization velocity during oxygen-enriched gasification of biomass in a pilot-scale fluidized bed: Experimental and numerical assessment. *Renewable Energy*, 147, 2429–2439. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.029>
- Kim, Y. D., Yang, C. W., Kim, B. J., Kim, K. S., Lee, J. W., Moon, J. H., Yang, W., Yu, T. U., & Lee, U. Do. (2013). Air-blown gasification of woody biomass in a bubbling fluidized bed gasifier. *Applied Energy*, 112, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.072>
- Kunii, D. & Levenspiel, O. (1969). Fluidization engineering. New York: Reed Publishing, Inc.
- Lim, K. S., Zhu, J. X., & Grace, J. R. (1995). Hydrodynamics of gas-solid fluidization. *International Journal of Multiphase Flow*, 21, 141–193. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00038-Y](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00038-Y)
- Loha, C., Chattopadhyay, H., & Chatterije, P.K. (2014). Three dimensional kinetic modelling of fluidized bed biomass gasification. *Chemical Engineering Science*, 109, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.01>
- Zhou, T., Yang, S., Wei, Y., Hu, J., & Wang, H. (2020). Impact of wide particle size distribution on the gasification performance of biomass in a bubbling fluidized bed gasifier. *Renewable Energy*, 148(xxxx), 534–547. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.059>