

Pengaruh Penambahan Dry Scrubber Terhadap Produksi Tar Pada Downdraft Gasifier Dengan Feedstock Sekam Padi

Nashrul Chanief Hidayat¹, Harwin Saptoadi²

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada^{1,2}

e-mail: nashrul.chanief@mail.ugm.ac.id¹, harwins@ugm.ac.id²

ABSTRACT

Downdraft gasifier is a type of gasifier capable of producing syngas with low tar content. To be used as fuel in internal combustion engines, the tar content in syngas must be in the range of 50-100 mg/Nm³. Downdraft gasifier is not compatible for biomass feedstock with moisture content > 30%. The syngas temperature when it comes out of the gasifier is around 200-400°C. This research was conducted to determine the effect of adding a dry scrubber on tar production and its effectiveness in reducing the moisture content of cocoa husk. Cocoa husk with sizes of 1 cm, 2 cm, and 3 cm, with mass of 3 kg, 4 kg, and 5 kg were used as dry scrubber media. Gasification was carried out using 5 kg of rice husk feedstock in each test. The gasification medium used is the air with an equivalent ratio of 0.30. Analysis of tar content in syngas was carried out using the gravimetric tar method, using impinging bottles filled with isopropanol. The results showed that the addition of dry scrubber with 2 cm and 5 kg cocoa husk could reduce tar production in syngas to 1.20 g/Nm³, while moisture content in cocoa hulls could be reduced to 8.66%. The compositions of H₂, CO, CH₄, and CO₂ in syngas were 9.76%, 6.24%, 1.20%, and 15.49%, with cold gas efficiency value of 55.85%.

Keywords: Cocoa husk, downdraft, dry scrubber, gasification, rice husk, syngas, tar.

ABSTRAK

Downdraft gasifier merupakan jenis gasifier yang mampu menghasilkan syngas dengan kandungan tar rendah. Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar pada mesin pembakaran didalam, kandungan tar pada syngas harus berkisar 50-100 mg/Nm³. Downdraft gasifier kurang kompatibel untuk feedstock biomassa dengan kandungan moisture >30%. Temperatur syngas ketika keluar dari dari gasifier berkisar 200-400°C. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan dry scrubber terhadap produksi tar dan efektifitas dalam menurunkan kandungan moisture pada kulit kakao. Kulit kakao dengan ukuran 1 cm, 2 cm, dan 3 cm, dengan massa 3 kg, 4 kg, dan 5 kg digunakan sebagai media dry scrubber. Gasifikasi dilakukan dengan menggunakan feedstock sekam padi sebanyak 5 kg pada setiap pengujian. Media gasifikasi yang digunakan adalah udara dengan equivalent ratio 0,30. Analisa kandungan tar pada syngas di lakukan dengan menggunakan metode tar gravimetric, dengan menggunakan impinggin botol yang di isi dengan isopropanol. Hasil penelitian menunjukan bahwa penambahan dry scrubber dengan ukuran kulit kakao 2 cm dan massa 5 kg dapat menurunkan produksi tar pada syngas menjadi 1,20 g/Nm³, sementara kandungan moisture pada kulit kakao dapat berkurang menjadi 8,66%. Komposisi H₂, CO, CH₄, dan CO₂ pada syngas sebesar 9,76%, 6,24%, 1,20%, dan 15,49%, dengan nilai cold gas efficiency sebesar 55,85%.

Kata kunci: Downdraft, dry scrubber, gasifikasi, kulit kakao, sekam padi, syngas, tar.

PENDAHULUAN

Energi baru terbarukan (EBT) adalah sumber energi yang tidak mencemari lingkungan dan tidak memberikan kontribusi terhadap pemanasan global. Sumber energi baru terbarukan didapatkan dari proses alam yang berkelanjutan, seperti sinar matahari, angin, air, panas bumi, dan biomassa. Potensi biomassa untuk tenaga listrik di Indonesia mencapai 13.662 MWe. Namun yang termanfaatkan baru 1.364 MWe, dengan 75,5 MWe yang terpasang ke grid [1]. Hal ini berarti potensi biomassa yang telah dimanfaatkan baru 10% dari produksi energi nasional. Sekam padi dan kulit buah kakao merupakan biomassa yang memiliki potensi sebagai sumber energi baru terbarukan melalui proses gasifikasi. Gasifikasi merupakan proses pemecahan senyawa karbon kompleks melalui proses pembakaran didalam gasifier [2]. Pembatasan kandungan oksigen pada proses gasifikasi menyebabkan pembakaran tidak sempurna sehingga menghasilkan berbagai senyawa gas mampu bakar. Gas yang dihasilkan melalui proses gasifikasi biasa disebut dengan syngas. Secara umum syngas terdiri dari CO₂, CO, H₂O, H₂, CH₄, dan berbagai jenis senyawa hidrokarbon. Gasifikasi menghasilkan produk residu berupa tar dan ash.

Dari berbagai jenis *gasifier*, *downdraft gasifier* merupakan jenis *fixed bed gasifier* dengan konstruksi sederhana. *Downdraft gasifier* banyak digunakan pada sistem gasifikasi skala kecil (kapasitas input termal < 1 MW). *Downdraft gasifier* mampu bekerja secara optimal dengan kandungan *moisture* pada *feedstock* < 30% [3]. *Gasifier* jenis ini memiliki kelebihan di mana produksi tar cukup rendah dibandingkan *gasifier* jenis lainnya, yaitu < 1 g/Nm³. Batas kandungan tar pada *syngas* untuk digunakan sebagai bahan bakar pada *internal combustion engine* yaitu berkisar 50-100 mg/Nm³[4]. Tar akan mulai terkondensasi pada temperatur 20°C. Temperatur *syngas* ketika keluar dari *downdraft gasifier* dengan *feedstock* sekam padi dan serbuk gergaji berkisar 200-400 °C [5].

Beberapa upaya untuk menurunkan produksi tar telah dilakukan oleh peneliti terdahulu, antara lain *Porous filtering media comparison through wet and dry sampling of fixed bed gasification products* [6]. *Effect of syngas cooling and biomass filter medium on tar removal* [7]. *Fuel gas production from peanut shell waste using a modular downdraft gasifier with the thermal integrated unit* [8]. *An experimental technology of drying and clean combustion of biomass residues* [9]. *Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier* [10]. *Development and evaluation of gasifier waste heat based feedstock dryer* [11].

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilaporkan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa masing-masing *gasifier* memiliki rancangan yang berbeda, pengujian dilakukan dengan biomassa yang berbeda, dan parameter pengujian yang berbeda. Sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan *dry scrubber* terhadap produksi tar pada *downdraft gasifier* dengan *feedstock* sekam padi.

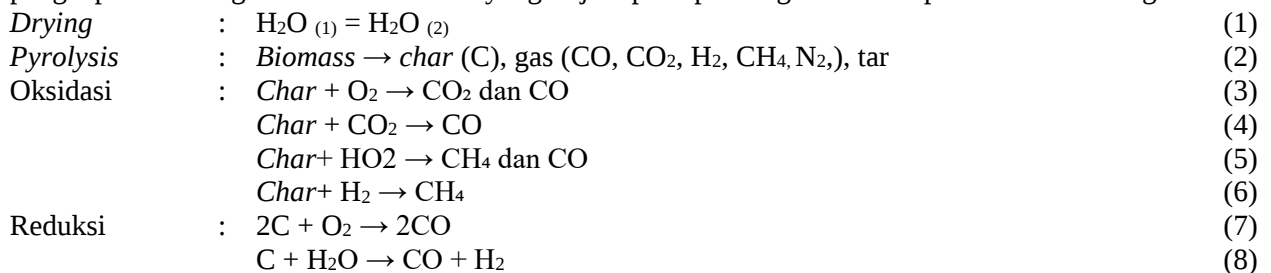
TINJAUAN PUSTAKA

Biomassa

Biomassa merupakan bahan bakar dengan kandungan karbon netral. Setiap pembakaran biomassa tidak menambah kadar karbon dioksida ke lingkungan. Kadar karbon dioksida yang dihasilkan melalui pembakaran biomassa sebanding dengan kadar karbon dioksida yang diserap selama tumbuhan hidup [2]. Salah satu jenis biomassa yang banyak ditemukan di Indonesia adalah sekam padi dan kulit kakao. Sekam padi biasa digunakan untuk berbagai kebutuhan dalam berbagai bidang industri. Komposisi sekam padi terdiri dari 34,4% selulosa, 24,3% hemiselulosa, dan 19,2% lignin [12]. Kulit kakao merupakan limbah biomassa padat yang didapatkan dari sisa pengolahan buah kakao. Massa kulit kakao berkisar antara 70-75% dari massa utuh buah kakao, sedangkan sisanya merupakan biji dan daging buah [13]. Kulit kakao terdiri dari 23,36% hemiselulosa, 24,51 % selulosa, dan 30,46% lignin [14]

Gasifikasi Biomassa

Gasifikasi merupakan suatu teknologi konversi biomassa melalui proses *thermochemical* didalam *gasifier* untuk menghasilkan produk gas atau *Syngas*. Berdasarkan cara kerjanya, *gasifier* dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu *fixed bed*, *fluidized bed*, dan *entrained-flow bed*. Secara umum proses gasifikasi terdiri dari beberapa tahap meliputi *drying*, *pyrolysis*, reduksi, dan oksidasi [15]. *Drying* merupakan proses penguapan kandungan *moisture* yang terkandung dalam *feedstock*. Proses ini terjadi pada temperatur 100-200°C[16]. Panas dikonveksikan dan diradiasikan ke permukaan partikel *feedstock* sehingga terjadi penguapan kandungan *moisture*. Reaksi yang terjadi pada proses gasifikasi dapat dituliskan sebagai:



Downdraft Gasifier

Downdraft gasifier merupakan jenis *fixed bed gasifier* dengan konstruksi sederhana. *Downdraft gasifier* banyak digunakan pada sistem gasifikasi skala kecil (kapasitas input termal < 1 MW) dengan *feedstock* biomassa. *Downdraft gasifier* mampu bekerja secara optimal dengan kandungan *moisture* pada *feedstock* < 30%. *Gasifier* jenis ini memiliki kelebihan dimana produksi tar cukup rendah dibandingkan *gasifier* jenis lainnya, yaitu < 1 g/Nm³. Di sisi lain, *downdraft gasifier* memiliki kekurangan dimana temperatur *syngas* ketika keluar *gasifier* masih tinggi, yaitu berkisar 200-400°C [5].

Tar

Tar merupakan campuran kompleks dari berbagai senyawa hidrokarbon yang dapat terkondensasi. Di antaranya mengandung oksigen, cincin aromatik 1 sampai 5, dan hidrokarbon poliaromatik kompleks. Tar terbentuk melalui polimerisasi selama tahap pirolisis pertama yang terjadi pada temperatur relatif rendah dari 200°C sampai dengan 500°C [4]. Dalam kisaran suhu ini komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin dari biomassa terurai menjadi tar primer. Pada temperatur di atas 500°C komponen tar primer mulai terbentuk kembali menjadi gas tak terkondensasi yang lebih ringan serta serangkaian molekul lebih berat yang disebut dengan tar sekunder [16]. Tar dapat menimbulkan masalah seperti penyumbatan saluran perpipaan dan polimerisasi menjadi struktur yang lebih kompleks.

Dry Scrubber

Dry scrubber berbasis biomassa dapat menjadi salah satu pilihan dalam mengurangi produksi tar dalam *syngas*. *Syngas* yang keluar dari *gasifier* dialirkan menuju *dry scrubber* yang di isi dengan kulit kakao. Proses tersebut menyebabkan kondensasi tar pada kulit kakao. Pada sisi lain, kandungan *moisture* kakao akan menurun karena menerima panas dari *syngas*.

METODE

Bahan Penelitian

Sekam padi yang digunakan sebagai *feedstock* gasifikasi berasal dari penggilingan padi yang berlokasi di Jalan Imogiri Barat, kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kulit buah kakao yang digunakan sebagai media *dry scrubber* di dapatkan dari limbah pengolahan buah kakao yang berada di Desa Sukoharjo, Kecamatan Kali Bawang, Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Analisa proksimat dan ultimat sekam padi dilakukan di Laboratorium Puslitbag Tekmira, Kementerian ESDM, Bandung, Jawa Barat.

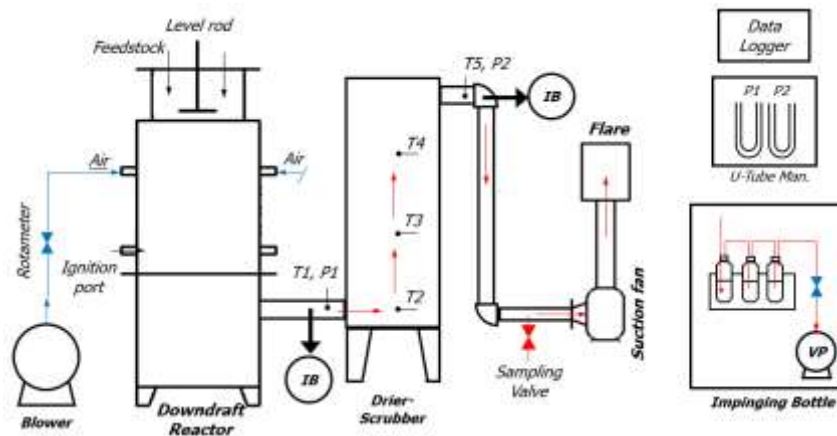
Tabel 1. Hasil Analisis Ultimat Proksimat, dan Nilai Kalor Sekam Padi

Analisis Proksimat (adb)	
Fixed carbon	12,83%
Volatile matter	56,20%
Ash	21,17%
Moisture in air dried	9,80%
Analisa Ultimat (adb)	
C	34,05%
H	5,35%
O	39,14%
N	0,17%
S	0,12%
HHV (adb)	
3201 cal/gram	
13,393 MJ/kg	

Sekema Alat Penelitian

Proses gasifikasi dilakukan pada *downdraft gasifier* dengan menggunakan *feedstock* sekam padi. *Feedstock* dimasukkan kedalam *gasifier* melalui bagian atas gasifier. Media gasifikasi yang digunakan pada penelitian ini adalah udara yang disuplay oleh *blower* dengan equivalence ratio 0,30. Udara dimasukkan kedalam

gasifier melalui *tuyer* pada dinding *gasifier*. Pembakaran *feedstock* pada *gasifier* dilakukan melalui *ignition port*. Pada dinding *gasifier* dipasang *thermocouple* tipe K yang dihubungkan dengan *data logger* untuk menganalisa temperatur aksial zona gasifikasi dan zona *dry scrubber*. Syngas yang dihasilkan dari proses gasifikasi dialirkan keluar *gasifier* melalui pipa pada bagian bawah *gasifier* menuju *dry scrubber* dengan bantuan *suction fan*. Pada saluran masuk dan keluar *dry scrubber* terdapat *thermocouple* tipe K untuk mengukur temperatur syngas. Syngas dialirkan melalui *impinging* botol dengan bantuan *vacuum pump*. Didalam *impinging* botol diisi cairan isopropanol sebagai media kondensor tar. Rangkaian penelitian dapat dilihat pada gambar 2.

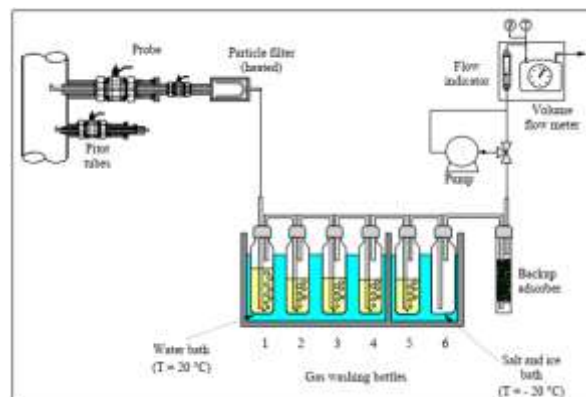


Gambar 2. Rangkaian Penelitian

Sumber: dokumen pribadi

Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan dengan *feedstock* sekam padi sebanyak 5 kg dengan waktu pengujian 30 menit. Variasi massa kulit kakao yang digunakan sebagai media *dry scrubber* yaitu 3 kg, 4 kg, dan 5 kg, dengan ukuran 1 cm, 2 cm, dan 3 cm. Pengukuran dan pengujian yang dilakukan meliputi kandungan tar pada syngas sebelum dan setelah *dry scrubber*, kandungan *moisture* pada kulit kakao sebelum dan setelah *dry scrubber*, nilai kalor pada syngas, dan *cold gas efficiency*. Pengujian sampel tar dilakukan dengan analisis *gravimetric* sesuai dengan standar *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases* seperti pada gambar 3. Syngas di alirkan ke dalam *impinging* bottol yang berisi isopropanol yang diletakan didalam kotak pendingin. Rangkaian botol pertama terdiri dari empat botol yang berisi 50 ml isopropanol pada masing masing botol dan dijaga pada temperatur 20°C. Rangkaian botol kedua terdiri satu botol dengan 50 ml isopropanol dan satu botol kosong yang dijaga pada temperatur -20°C. Syngas dialirkan ke dalam rangkaian *impinging* botol menggunakan *vacuum pump* dengan laju aliran 8 lpm. Tar yang terkondensasi didalam *impinging* botol di uapkan dengan oven selama 17 jam pada temperatur 50°C.



Gambar 3. Rangkaian pengambilan sampel tar

Sumber: [17]

Kandungan tar pada syngas dapat dihitung dengan persamaan:

$$C_T = \frac{M_T}{V} [g/m^3] \quad (9)$$

dan

$$M_T = M_{T1} - M_{T0} \quad (10)$$

Dimana:

- C_T = kandungan tar
 V = volume syngas
 M_T = Massa tar
 M_{T1} = Massa wadah berisi tar
 M_{T0} = Massa wadah kosong

Kandungan *moisture* dalam biomassa dapat diuji dengan menggunakan standar pengujian ASTM E-871-82. Sampel uji sebanyak 50 gram dioven selama 30 menit pada temperatur 103°C. Persentase kandungan *moisture* (MC) *wet basis* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\%MC = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet}} \times 100\% \quad (11)$$

Dimana:

- $\%MC$ = kandungan *moisture* kulit kakao (*wet basis*)
 W_{wet} = massa kakao sebelum di oven
 W_{dry} = massa kakao setelah di oven

Nilai kalor syngas dapat diketahui dengan menghitung nilai *higher heating value* (HHV_g) dari persentase gas mampu bakar meliputi CO, H₂, dan CH₄. HHV_g dihitung menggunakan persamaan:

$$HHV_g = \frac{[(X_1 HHV)_{CO} + (X_3 HHV)_{H_2} + (X_4 HHV)_{CH_4}]}{100} \quad (12)$$

Dimana: x_1, x_2, x_3, x_4 dan x_5 didapatkan dari hasil uji *gas chromatography* dari H₂, CO, CO₂, CH₄, dan N₂. Nilai kalor CO, H₂, dan CH₄ diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan oleh [5], dengan nilai masing masing sebesar 12,71, 12,78, dan 39,76 MJ/Nm³.

Cold gas efficiency (CGE) dapat dicari dengan melakukan tahapan perhitungan sebagai berikut:

1. Produksi syngas per kilogram *feedstock*:

$$m_g = \frac{\sum X_i \cdot M_{wi}}{n} \quad (13)$$

2. Massa jenis syngas:

$$\rho_g = \frac{[(X_1 \rho)_{CO} + (X_2 \rho)_{CO_2} + (X_3 \rho)_{H_2} + (X_4 \rho)_{CH_4} + (X_5 \rho)_{N_2}]}{100} \quad (14)$$

3. Energi syngas per kilogram:

$$E_g = \frac{m_g \cdot HHV_g}{\rho_g} \quad (15)$$

4. *Cold gas efficiency*:

$$CGE = \frac{E_g}{HHV_f} \quad (16)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Produksi Tar Pada Syngas

Dengan melakukan analisa menggunakan persamaan (9) dan (10), hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *dry scrubber* dengan massa kulit kakao 5 kg dan ukuran 2 cm menghasilkan kandungan tar pada syngas paling rendah, yaitu 1,20 g/Nm³, jika dibandingkan dengan penelitian gasifikasi sekam padi tanpa penambahan *dry scrubber*, yaitu 5,8 g/Nm³[5]. Pengujian dengan menggunakan massa kulit kakao 5

kg mampu mengurangi produksi tar lebih baik dibandingkan pengujian dengan massa kulit kakao 3 kg, dan 4 kg. Hal ini disebabkan karena semakin banyak massa kulit kakao maka semakin banyak tar yang terfiltrasi. Semakin besar ukuran kulit kakao akan mengurangi laju perpindahan kalor, sehingga proses *pyrolysis* didalam dry scrubber berlangsung lebih lambat. Dimana *pyrolysis* merupakan proses utama terbentuknya tar yang terjadi pada temperatur 200-600°C, sementara temperatur pada zona *dry scrubber* dalam penelitian ini mampu mencapai 565,5°C. Hal yang sama juga ditemukan pada penelitian yang dilakukan oleh [6]. Hasil pengujian pengaruh penambahan dry scrubber terhadap produksi tar dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengaruh penambahan *dry scrubber* terhadap produksi tar

Massa kulit kakao	Ukuran kulit kakao	Kandungan tar
3 Kg	1 cm	2,25 g/Nm ³ .
	2 cm	2,45 g/Nm ³ .
	3 cm	2,04 g/Nm ³ .
4 kg	1 cm	4,66 g/Nm ³ .
	2 cm	3,66 g/Nm ³ .
	3 cm	2,29 g/Nm ³ .
5 kg	1 cm	3,12 g/Nm ³ .
	2 cm	1,20 g/Nm ³ .
	3 cm	1,54 g/Nm ³ .

Kandungan *Moisture* Kulit Kakao

Dengan melakukan analisa menggunakan persamaan (11), dapat diketahui bahwa penggunaan *dry scrubber* mampu menurunkan kandungan *moisture* kulit kakao dari kandungan awal sebelum masuk *dry scrubber* 16,23%, menjadi 6,43% dengan massa kulit kakao 3 kg dan ukuran 1 cm. Hal ini disebabkan karena terjadinya perpindahan kalor secara konduksi dari *syngas* bertemperatur tinggi ke kulit kakao didalam *dry scrubber*. Jika ditinjau dari pengaruh massa dan ukuran kulit kakao, maka semakin kecil dan semakin sedikit ukuran biomassa memiliki kontak permukaan per unit volume lebih luas. Sehingga proses perpindahan panas berlangsung lebih cepat dan akan berakibat pada peningkatan laju penguapan kandungan *moisture*[5]. Hal yang sama juga ditemukan pada penelitian yang dilakukan [9]. Pengaruh penggunaan *dry scrubber* terhadap kandungan *moisture* kulit kakao dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh penggunaan *dry scrubber* terhadap kandungan *moisture* kulit kakao

Massa kulit kakao	Ukuran kulit kakao	Kandungan <i>moisture</i> (MC_{wb})
3 Kg	1 cm	6,43%
	2 cm	10,15%
	3 cm	10,34%
4 kg	1 cm	8,48%
	2 cm	9,34%
	3 cm	12,18%
5 kg	1 cm	11,18%
	2 cm	8,66%
	3 cm	9,54%

Nilai Kalor Syngas (HHV)

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan dengan menggunakan persamaan (12), HHV yang diperoleh dari penambahan *dry scrubber* dengan massa kulit kakao 5 kg dan ukuran 2 cm yaitu 2,51 MJ/Nm³. Sementara komposisi H₂, CO, dan CH₄ pada syngas dari hasil pengujian *gas chromatography* adalah 9,76%, 6,24%, dan 1,20%. Jika dibandingkan dengan HHV dari gasifikasi sekam padi tanpa penambahan *dry scrubber* yaitu 3,34 MJ/Nm³, dengan persentase H₂, CO, dan CH₄ yaitu sebesar 8,05%, 16,68%, dan 0,99% [5]. HHV yang dihasilkan dari penelitian ini lebih rendah karena berkurangnya fraksi H₂, CO, dan CH₄ pada syngas akibat reaksi oksidasi yang terjadi di dalam *dry scrubber*. Hasil pengukuran temperatur aksial pada zona *dry scrubber* mampu mencapai 565,5°C.

Cold Gas Efficiency (CGE)

Dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan (13), (14), (15), dan (16), CGE yang dihasilkan dari penambahan *dry scrubber* dengan massa kulit kakao 5 kg dan ukuran 2 cm yaitu sebesar 55,85%. Penambahan *dry scrubber* mengakibatkan penurunan nilai CGE jika dibandingkan dengan hasil pengujian gasifikasi sekam padi tanpa tambahan *dry scrubber*, yaitu 78,39%[5]. Hal ini disebabkan karena penurunan nilai HHV pada syngas.

KESIMPULAN

Penambahan *dry scrubber* pada *downdraft gasifier* mampu menurunkan kandungan tar pada syngas dari 5,8 g/Nm³ menjadi 1,20 g/Nm³ dengan menggunakan massa kulit kakao 5 cm dan ukuran 2 cm. Meskipun demikian, kandungan tar pada syngas masih melebihi batas yang telah ditetapkan untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar *internal combustion engine*, yaitu 50-100 mg/Nm³. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa penggunaan *dry scrubber* dapat menurunkan kadar *moistur* pada kulit kakao. Namun demikian, penambahan *dry scrubber* menyebabkan penurunan HHV dan CGE.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen dan rekan peneliti yang tergabung dalam WCR (*world class research*), melalui anggaran dana penelitian Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "FIX2_Jurnal_Energi_Edisi_2_17112016(1)".
- [2] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis : practical design and theory*. Academic Press, 2010.
- [3] A. Putu Susastriawan, A. Susastriawan, H. Saptoadi, and C. Author, "Comparative Study of Two Small-Scale Downdraft Gasifiers in Terms of Continuous Flammability Duration of Producer Gas from Rice Husk and Sawdust Gasification," 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320021294>
- [4] J. P. A. Neeft *et al.*, "Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases."
- [5] A. A. P. Susastriawan, H. Saptoadi, and Purnomo, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76. Elsevier Ltd, pp. 989–1003, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.112.
- [6] G. Allesina, S. Pedrazzi, L. Montermini, L. Giorgini, G. Bortolani, and P. Tartarini, "Porous filtering media comparison through wet and dry sampling of fixed bed gasification products," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 547, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/547/1/012003.

- [7] S. Thapa, P. R. Bhoi, A. Kumar, and R. L. Huhnke, "Effects of syngas cooling and biomass filter medium on tar removal," *Energies*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/en10030349.
- [8] J. Nisamaneenate, D. Atong, P. Sornkade, and V. Sricharoenchaikul, "Fuel gas production from peanut shell waste using a modular downdraft gasifier with the thermal integrated unit," *Renewable Energy*, vol. 79, no. 1, pp. 45–50, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.09.046.
- [9] A. Al-Kassir, P. Coelho, J. García-Sanz-Calcedo, F. J. Moral, R. K. Al-Karany, and T. Yusaf, "An experimental technology of drying and clean combustion of biomass residues," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/app8060905.
- [10] Alves *et al.*, "Co-Gasification of Sewage Sludge Mixed with Waste Wood in Different Proportions," *Proceedings*, vol. 38, no. 1, p. 9, Dec. 2019, doi: 10.3390/proceedings2019038009.
- [11] R. N. Singh and K. K. Dubey, "Design, Development and Evaluation of Gasifier Waste Heat Based Feedstock Dryer," *International Journal of Scientific Research in Research Paper. Multidisciplinary Studies E*, vol. 5, pp. 1–05, 2019, [Online]. Available: www.isroset.org
- [12] N. Soltani, A. Bahrami, M. I. Pech-Canul, and L. A. González, "Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials," *Chemical Engineering Journal*, vol. 264, Elsevier, pp. 899–935, Mar. 05, 2015. doi: 10.1016/j.cej.2014.11.056.
- [13] R. Campos-Vega, K. H. Nieto-Figueroa, and B. D. Oomah, "Cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 81, Elsevier Ltd, pp. 172–184, Nov. 01, 2018. doi: 10.1016/j.tifs.2018.09.022.
- [14] "Aplikasi_Limbah_Kulit_Buah_Kakao_sebagai_Media_Fer".
- [15] T. A. Milne, R. J. Evans, and N. Abatzoglou, "Biomass Gasifier 'Tars': Their Nature, Formation, and Conversion." [Online]. Available: <http://www.doe.gov/bridge/home.html>
- [16] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis : practical design and theory*. Academic Press, 2010.
- [17] J. P. A. Neeft *et al.*, "Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases."