

Kajian Teknologi Gasifikasi Biomassa/Sampah Untuk

Produksi Syngas dan Listrik Berkelanjutan

Muhammad Arief Saputro¹, Mochamad Syamsiro¹, Bayu Megaprastio¹, Feri Febriana Laksana²

¹*Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik*

Universitas Janabadra

Jl. T.R. Mataram No 55-57 Yogyakarta. Telp/fax : 0274-561039;

²*Prodi Teknik Komputer Fakultas Teknologi Informasi*

Universitas Nahdlatul Ulama (UNU) Yogyakarta

Jl. Lowanu No. 47 Yogyakarta. Telp/fax : 0274-419769

**email: syamsiro@janabadra.ac.id*

ABSTRAK

Pada zaman modern ini energi listrik merupakan energi yang paling dibutuhkan. Karena banyak alat yang sumber tenaganya dari listrik. Maka dari itu, harus diimbangi dengan ketersediaan listrik yang memadai. Maka membutuhkan sebuah pembangkit listrik untuk menyediakan energi listrik yang cukup. Salah satu teknologi yang menjanjikan ke depannya adalah teknologi gasifikasi tipe downdraft, dimana biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakarnya yang ketersediaannya di Indonesia sangat melimpah. Beberapa biomassa yang dapat dimanfaatkan yaitu sekam padi, serabut kelapa, tempurung kelapa, limbah sawit, sampah perkotaan. Berdasarkan hasil kajian literatur terkait komposisi dan nilai kalor syn-gas yang dihasilkan, maka biomassa yang paling mudah tergasifikasi yaitu gabungan antara daun kelapa sawit / oil palm frond (OPF) dan cangkang inti sawit / palm kernel shell (PKS) dengan perbandingan 20/80. Dengan perbandingan komposisi tersebut dapat menghasilkan syn-gas dengan komposisi 21% CO, 3% CH₄, dan 17% H₂. Dan untuk nilai kalornya sebesar 5850 kJ/m³. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis feedstock biomassa sangat berpengaruh terhadap komposisi dan nilai kalor syn-gas yang dihasilkan. Karena setiap jenis biomassa menghasilkan karakteristik syn-gas yang berbeda-beda.

Kata kunci: biomassa, downdraft, gasifikasi, komposisi gas, nilai kalor.

ABSTRACT

In this modern era, electrical energy is the most needed energy. Because a lot of equipment is powered by electricity. As a result, it must be balanced in relation to the availability of electrical energy. To provide enough electrical energy, a power plant is required. One of the promising technologies in the future is the downdraft gasification technology, where biomass can be used as a very abundant fuel in Indonesia. Rice husk, coconut fiber, coconut shell, palm oil waste, and urban waste are some of the biomass materials used. Based on the results of a literature review regarding the composition and calorific value of the syn-gas produced, the easiest biomass to gasify is a combination of palm fronds/palm fronds (OPF) and palm kernel shells (PKS) with a ratio of 20/80. With this composition ratio, it is possible to produce syn-gas with a composition of 21% CO, 3% CH₄, and 17% H₂ with a heating value of 5850 kJ/m³. It can be concluded that the type of biomass feedstock greatly influences the composition and calorific value of the syn-gas produced. Because each type of biomass produces different syn-gas characteristics.

Keywords: biomass, downdrafts, gasification, gas composition, heating value.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi yang sangat dibutuhkan untuk saat ini. Karena sangat banyak peralatan yang memanfaatkan energi listrik sebagai sumber tenaganya. Baik itu peralatan rumah tangga sederhana hingga alat-alat yang digunakan di pabrik-pabrik besar. Tidak terkecuali di Indonesia yang masyarakatnya sudah bergantung pada energi listrik untuk menjalankan kehidupan sehari-harinya.

Konsumsi listrik di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1. Pada Gambar 1. tersebut dapat dilihat bahwa mulai dari tahun 2015-2021 konsumsi listrik di Indonesia terus meningkat. Bahkan di tahun 2021 konsumsi listrik di Indonesia mencapai 1.109 kilowatt jam (kWh) per kapita.



Gambar 1. Konsumsi Listrik di Indonesia (Situmorang dkk., 2020)

Mengingat hal tersebut, maka harus diimbangi dengan ketersediaan pasokan listrik yang dapat digunakan. Untuk membangkitkan energi listrik dapat menggunakan generator listrik. Biasanya, generator listrik ini bergantung pada jenis bahan bakar tertentu, seperti bensin, solar, gas alami, batu bara, energi nuklir, dan lain-lain. Indonesia merupakan negara tropis sehingga terdapat banyak sumber yang dapat dijadikan sebagai biomassa. Diantaranya yaitu tanaman pertanian dan residu, tanaman energi khusus, limbah dan residu industri, residu hewan, sampah perkotaan dll.

Teknologi Gasifikasi

Proses Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses termokimia yang mengubah bahan organik atau bahan yang mengandung karbon menjadi gas yang dapat dimanfaatkan kembali yang kemudian disebut dengan *synthesis gas* (*syn-gas*) (Basu, 2013). *Syn-gas* tersebut biasanya terdiri dari CO, H₂, CO₂, dan CH₄. Kandungan tersebut dapat berubah-ubah tergantung dari unsur utama gasifikasi yaitu campuran udara (oksigen, uap air, dan CO₂) pada temperatur di atas 700°C.

Terdapat 4 langkah utama yang biasa terdapat dalam proses gasifikasi ini yaitu pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi (Pambudi dkk., 2017)(Guan dkk., 2016). Langkah yang pertama pemanasan/ pengeringan. Pada langkah ini biomassa diupkan untuk mengurangi kadar airnya. Untuk beberapa tipe biomassa yang masih segar biasanya mengandung 30-60% kadar air di dalamnya. Maka biomassa dikeringkan dengan cara memanaskan biomassa yang terkadang hingga mencapai temperatur 200°C sampai kadar airnya turun menjadi di bawah 15% yang merupakan kadar kelembaban yang optimal untuk dilakukan proses gasifikasi (Dhyani & Bhaskar, 2018)(Guan dkk., 2016).

Langkah yang kedua yaitu dekomposisi atau pirolisis. Pada proses ini biomassa akan terurai menjadi senyawa volatil dan residu padat. Senyawa volatil terdiri dari molekul gas kecil dan produk cair yang disebut dengan tar. Dan komponen utamanya yaitu padatan yang mengandung karbon dan tidak dapat diuraikan lagi disebut arang (*char*). Tahap pirolisis membutuhkan temperatur mulai dari 220°C (Sansaniwal dkk., 2017)(Nur dkk., 2016).

Dengan adanya unsur utama gasifikasi (oksigen) maka akan terjadi oksidasi atau pembakaran parsial yang merupakan langkah ketiga dalam proses gasifikasi. Langkah reduksi terjadi dengan adanya unsur utama gasifikasi lainnya seperti uap air dan CO₂, dimana senyawa volatil dan arang akan bereaksi dengan unsur utama gasifikasi tersebut untuk menghasilkan CO, CH₄, dan H₂. Ini adalah reaksi endotermik yang biasanya terjadi pada temperatur di atas

800°C. Kemudian residu terakhir yang tersisa di gasifier berupa abu (Ramos *dkk.*, 2018).

Jadi secara umum proses gasifikasi melibatkan banyak reaksi yang terjadi secara hampir bersamaan. Beberapa reaksi merupakan reaksi endotermik dan yang lainnya reaksi eksotermik. Reaksi eksotermik juga dapat memasok panas untuk reaksi endotermik.

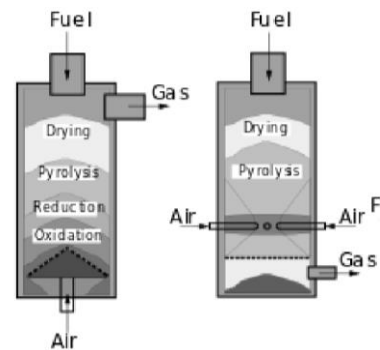
Mesin Gasifier

Pada proses gasifikasi membutuhkan sebuah mesin yang biasa disebut dengan gasifier. Salah satu jenis gasifier yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Fixed bed gasifiers (updraft dan downdraft)*. Pada reaktor ini sampah ditempatkan pada hampir seluruh reaktor dan oksigen gasifikasi di alirkan melalui sampah tersebut sehingga terdapat beberapa zona seperti pengeringan, pirolisis, reduksi, dan oksidasi. Terdapat dua jenis *fixed bed gasifiers*, dimana perbedaan kedua jenis ini dapat terlihat dari arah aliran oksigen gasifikasi.

Yang pertama yaitu Sistem *updraft fixed bed gasifiers*, pada sistem *updraft* ini sampah dimasukkan dari bagian atas reaktor dan oksidan gasifikasi dialirkan dari arah bawah sehingga sampah bergerak relatif berlawanan arah dengan oksidan. Sampah dikeringkan pada bagian atas sehingga material dalam keadaan basah dapat digunakan. Menurut Rivas (Rivas, 2012), *updraft* gasifier dapat digunakan untuk *feedstock* berkadar air sebanyak 60%. Sampah dapat dimasukkan ke dalam reaktor dari atas, kemudian media gasifikasi (udara) dimasukkan dari bawah reaktor. Produk berbentuk gas dialirkan keluar melalui lubang di atas, sedangkan produk padatan terkumpul di bawah reaktor. Temperatur tertinggi dihasilkan dekat dengan rangka bakar, dimana oksigen bertemu dengan *feedstock*. Gas panas kemudian mengalir ke atas, memberikan energi panas untuk reaksi endotermik gasifikasi. Dari semua jenis gasifier yang ada, reaktor tipe *Updraft* merupakan reaktor yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan di masyarakat sebagai pengganti gas LPG untuk kebutuhan memasak sehari-hari (Widyawidura *dkk.*, 2017).

Yang kedua ada sistem *downdraft fixed bed gasifier*, yang pada sistem ini sampah dimasukkan dari bagian atas reaktor dan media gasifikasi dialirkan dari samping dan atas sehingga gas dan

sampah bergerak ke arah yang sama. Sebagian sampah terbakar dan jatuh melewati *gasifier throat* dan membentuk bed. *Downdraft* gasifier dapat digunakan untuk *feedstock* berkadar air sebanyak 25%. Temperatur tertinggi terjadi di bawah zona pembakaran. Udara dan tar yang terbentuk melalui proses pirolisis kemudian mengalir ke bawah, memberikan pembakaran tambahan sehingga produk gas keluaran dapat mencapai suhu 1000 – 1400 °C (Sikarwar *dkk.*, 2016).



Gambar 2. Perbedaan *Updraft Gasifier* (kiri) dan *Downdraft Gasifier* (kanan) (Nizar, 2018)

Biomassa

Biomassa biasanya berasal dari tumbuhan dan hewan (Dhyani dan Bhaskar, 2018). Menurut Syamsiro (Syamsiro, 2016), bahan bakar padat biomassa mempunyai densitas massa dan energi yang relatif rendah. Beberapa contoh biomassa yang biasa digunakan untuk bahan bakar gasifier yaitu sekam padi, serabut kelapa, tempurung kelapa, dan lain-lain. Dari beberapa material tersebut juga menghasilkan komposisi dan karakteristik gas yang berbeda beda juga. Sebagai contoh dapat dilihat pada karakteristik minyak nabati yang tidak memungkinkan penggunaannya secara langsung karena terdapat asam lemak bebas, gum dan viskositasnya tinggi sehingga dapat mengganggu performa mesin diesel dan dapat mengakibatkan pengendapan pada mesin diesel. Oleh karena itu sebagai bahan bakar sehingga diperlukan suatu proses untuk mengubah minyak nabati menjadi bahan bakar, salah satunya yaitu dengan proses pirolisis.

Berbeda dengan bioetanol perlu dimurnikan lagi hingga mencapai 99% yang lazim disebut *fuel grade etanol (FGE)*. Proses pemurnian dengan prinsip dehidrasi umumnya dilakukan

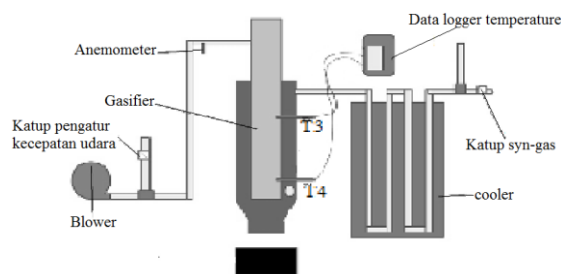
dengan metode molecular sieve, untuk memisahkan air dari senyawa etanol (Herlambang dkk., 2017). Selain pengaruh dari material itu sendiri, komposisi perbandingan udara dan bahan bakar pun juga mempengaruhi yang sering disebut dengan *Air Fuel Ratio* (AFR).

Selain AFR, ukuran biomassa yang masuk ke dalam gasifier pun dapat mempengaruhi kualitas *syn-gas* yang dihasilkan (Hadi dan Darsopuspito, 2013). Semakin kecil ukuran biomassa maka akan semakin mudah terbakar dan efisiensi gasifikasi lebih besar (Najib dan Darsopuspito, 2012). Maka dari itu perlu adanya pemrosesan awal biomassa sebelum dimasukkan ke dalam gasifier (Ruiz dkk., 2013). Salah satunya yaitu dengan mencacah biomassa menjadi ukuran yang lebih kecil dan bervariasi untuk mengetahui ukuran terbaik sebagai bahan bakar gasifier.

Peforma Gasifikasi

Untuk dapat mengetahui komposisi *syn-gas* yang mampu bakar dan mempunyai nilai kalor yang tinggi, maka perlu dilakukan uji performa gasifikasi. Dengan meninjau beberapa penelitian tentang gasifikasi biomassa yang ada, maka kita dapat menentukan biomassa apa dan metode mana yang paling tepat yang dapat digunakan untuk memproduksi *syn-gas* dan listrik secara berkelanjutan.

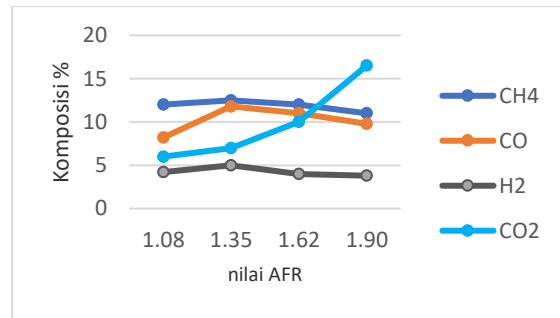
Bisa dilihat pada penelitian Diaz dkk (2014) menggunakan bahan sekam padi pada *downdraft throatless gasifier* yaitu gasifier dengan satu saluran udara masuk.



Gambar 3. Alat Uji Gasifier Tipe *Downdraft* (Nizar, 2018)

Kemudian memvariasikan AFR yang dimasukkan ke dalam reaktor dengan nilai 1,08; 1,35; 1,62, dan 1,90. Parameter yang diukur

dalam penelitian ini yaitu komposisi *syn-gas* dengan menggunakan *chromatography gas*.



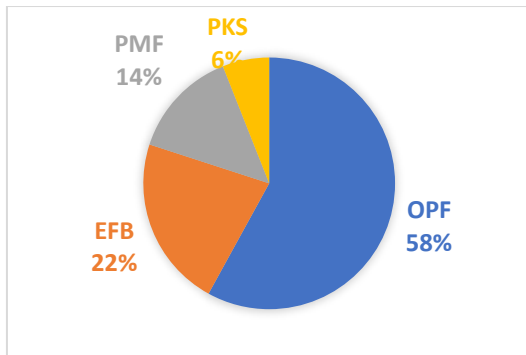
Gambar 4. Grafik Hubungan Variasi Nilai AFR Terhadap Komposisi *Syn-gas* (Diaz dkk., 2014)

Dari penelitian tersebut mendapat hasil bahwa kualitas *syn-gas* terbaik pada variasi AFR 1,35 dengan komposisi CH₄ 12,90%, CO 12,50%, H₂ 5,78%. Semakin meningkat temperatur pirolisis, maka jumlah *char* yang dihasilkan akan semakin menurun. Jumlah *char* yang dihasilkan pada pirolisis sangat berkaitan pada komposisi *flammable gas*. Pada penelitian ini nilai AFR optimal sebesar 1,35 dengan nilai LHV tertinggi yaitu 5051.244 kJ/m³. Ketika melebihi batas AFR gasifikasi maka nilai LHV *syn-gas* yang dihasilkan semakin menurun.

Penelitian yang lain tentang sekam padi juga dilakukan oleh M(2014)a'arif, Sari, dan Syamsiro (Ma'arif dkk., 2016) yang dimanfaatkan untuk merancang PLTD sistem *dual fuel* berkapasitas 50 kVA. Dalam penelitian tersebut menjelaskan bahwa ketersediaan sekam padi cukup untuk bahan bakar gasifier yang dikombinasikan dengan solar. Bahkan terdapat listrik yang tidak didistribusikan sebagai cadangan dan untuk penerangan jalan umum.

Dalam pemanfaatan kelapa sawit, tidak hanya buahnya yang dijadikan bahan bakar. Dalam penelitian Moni, Sulaiman, dan Baheta (Moni dkk., 2018) memanfaatkan daun kelapa sawit / *oil palm frond* (OPF) yang digabung dengan 3 jenis limbah sawit yang lain. Diantaranya tandan buah kosong / *empty fruit bunch* (EFB), serat mesokarp sawit / *palm mesocarp fiber* (PMF) dan cangkang inti sawit / *palm kernel shell* (PKS). Karena dalam

praktiknya limbah sawit terbagi ke dalam persentase berikut.



Gambar 5. Perbandingan Residu Biomassa dari Industri Kelapa Sawit di Malaysia (Moni dkk., 2018)

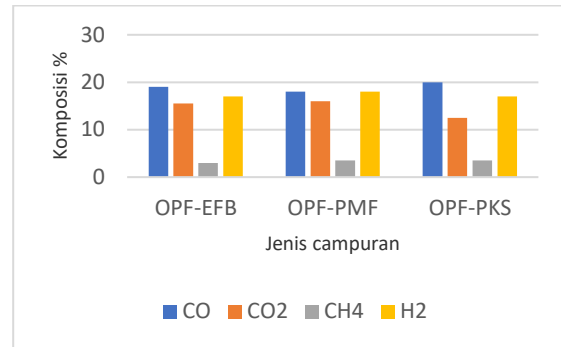
Untuk perbandingan campuran yang dimasukkan ke dalam reaktor yaitu setiap biomassa di campur dengan OPF karena OPF memiliki persentase terbesar di antara yang lainnya. Yang pertama yaitu campuran antara OPF dan EFB dengan perbandingan 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80, 0/100. Perbandingan yang sama juga di terapkan pada campuran OPF dengan PMF, begitu juga dengan campuran OPF dengan PKS. Semua bahan bakar yang akan digunakan telah dikeringkan pada suhu 105+0,1 °C selama 24 jam. Lalu digiling menggunakan granulatur menjadi ukuran 1-5 mm. Selanjutnya semua bahan bakar yang telah di campur di masukkan ke dalam reaktor gasifier tipe *downdraft*.

Kualitas *syn-gas* yang dihasilkan dapat dilihat dari komposisi *syn-gas* yang dihasilkan dan nilai kalor dari *syn-gas* tersebut. Untuk nilai kalor pada penelitian kali ini menggunakan metode nilai kalor yang lebih tinggi / *Higher Heating Value* (HHV). Komposisi *syn-gas* yang dihasilkan dari masing-masing campuran dapat dilihat pada beberapa gambar berikut ini.

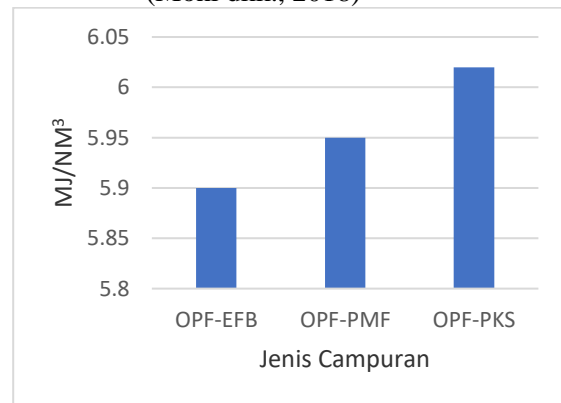
Untuk HHV dari *syn-gas* yang dihasilkan masing-masing campuran dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Untuk memenuhi standar, maka nilai HHV yang dihasilkan minimal 4,5-5,5.

Ditinjau dari komposisi dan nilai HHV *syn-gas* masing-masing campuran maka dapat disimpulkan bahwa kualitas *syn-gas* memenuhi semua persyaratan dan dapat diterima sebagai

bahan bakar gasifikasi alternatif. Perbandingan campuran tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kualitas *syn-gas* yang dihasilkan.



Gambar 6. Komposisi *Syn-gas* dari Campuran OPF-EFB, OPF-PMF, dan OPF-PKS (Moni dkk., 2018)



Gambar 7. HHV dari *Syn-gas* yang Dihasilkan Masing-Masing campuran (Moni dkk., 2018)

Biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar gasifier yaitu biomassa sampah perkotaan. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Yuda Pratama, Winaya, Suryawan (Yuda Pratama dkk., 2020) yang memanfaatkan sampah perkotaan sebagai bahan bakar gasifikasi. Gasifier yang digunakan adalah tipe *downdraft*. Variasi dari sampah kota yang dimanfaatkan yaitu dengan 3 jenis perlakuan sampah. Yang pertama yaitu menggunakan sampah kota yang telah dikeringkan, kedua yaitu sampah kota yang sudah dibentuk pelet, dan yang terakhir sampah kota yang telah dibentuk menjadi briket.

Kemudian dari beberapa variasi tersebut untuk diketahui komposisi *syn-gas* yang

dihasilkan dari masing-masing variasi dan nilai kalor (LHV) dari *syn-gas* masing-masing variasi. Sedangkan untuk nilai kalor (LHV) yang diketahui hanya pada variasi pertama saja yaitu pada sampah kota kering yaitu sebesar 592,87 kkal/m³ atau sama dengan 2.480,568 kJ/m³.

Tabel 1. Komposisi Syn-gas Masing-Masing Variasi (Yuda Pratama *dkk.*, 2020)

Variasi Bahan Bakar	CO (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)	TOTAL
Sampah kota kering Pelet	5,36	1,04	15,39	21,79
sampah kota Briket	2,75	2,54	15,41	20,70
sampah kota	6,38	1,31	14,88	22,57

IOT UNTUK PENGELOLAAN BIOMASSA DAN SAMPAH

Karakteristik dari biomassa dan sampah adalah densitasnya yang rendah dan sumbernya tersebar di area yang luas. Oleh karena itu, perlu adanya strategi pengumpulan biomassa dan sampah yang tepat dan penentuan lokasi pembangunan pembangkit listrik berbasis teknologi gasifikasi yang dapat meminimalkan biaya transportasi. Untuk itulah, penggunaan *internet of things* (IoT) menjadi sangat berguna untuk pengelolaan biomassa dan sampah ini (Roy *dkk.*, 2022). Telah melakukan kajian penggunaan IoT untuk mengintegrasikan pengumpulan sampah dengan pengukuran level tong sampah dengan penentuan rute transportasi truk sampahnya (Roy *dkk.*, 2022). Dengan sistem ini, maka sensor akan mengirimkan sinyal ketika tong sampah telah terisi penuh. Sinyal ini akan dikirimkan ke *central monitoring system* (CMS) dan kemudian CMS akan mengirimkan truk pengangkut yang tepat untuk kemudian mengambil sampah-sampah yang telah penuh.

Metode yang hampir sama juga telah dilakukan oleh Abuga dan Raghava (Abuga dan Raghava, 2021) yang telah mengembangkan tong sampah cerdas dan dapat dimonitor secara *real time* (Abuga dan Raghava, 2021). Logika *fuzzy*

telah digunakan dalam penelitian ini dengan penempatan 25 tong sampah yang akan selalu dimonitor level sampahnya. Namun demikian, metode ini membutuhkan biaya yang mahal dan menyedot anggaran pemerintah yang tidak sedikit.

KESIMPULAN

Gasifikasi merupakan teknologi untuk mengonversikan bahan bakar padat atau biomassa padat secara *thermokimia* dengan temperatur menjadi bahan bakar gas mampu bakar. Sehingga yang dicari yaitu *syn-gas* yang memiliki komposisi gas mampu bakar yang tinggi dan memiliki nilai kalor yang tinggi juga. Dari beberapa penelitian biomassa yang di gasifikasi menggunakan tipe *downdraft* tersebut maka di dapat biomassa yang paling mudah tergasifikasi yaitu gabungan antara daun kelapa sawit / *oil palm frond* (OPF) dan cangkang inti sawit / *palm kernel shell* (PKS) dengan perbandingan 20/80. Dengan perbandingan komposisi tersebut dapat menghasilkan *syn-gas* dengan komposisi 21% CO, 3% CH₄, 17% H₂. Untuk nilai kalornya sebesar 5850 kJ/m³. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis *feedstock* biomassa sangat berpengaruh terhadap komposisi dan nilai kalor *syn-gas* yang dihasilkan. Karena setiap jenis biomassa menghasilkan karakteristik *syn-gas* yang berbeda-beda. Untuk pengelolaan *feedstock* biomassa dan sampah, penggunaan IoT menjadi sangat krusial untuk ketersediaan *feedstock* di lokasi dan pilihan transportasi yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuga, D., & Raghava, N. S. 2021. Real-time smart garbage bin mechanism for solid waste management in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 75(September), 103347. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103347>
- Basu, P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>

- Dhyani, V., & Bhaskar, T. 2018. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
- Diaz, M., Ilminnafik, N., & Mulyono, T. 2014. Sekam Padi Tipe Downdraft (Effect of Air Fuel Ratio (AFR) on the Syn-gas Quality of Rice Husk Gasification Downdraft Type). *Jurnal Teknik Mesin*, 9(1), 2–5.
- Guan, G., Kaewpanha, M., Hao, X., & Abudula, A. 2016. Catalytic steam reforming of biomass tar: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.316>
- Hadi, S., & Darsopuspito, S. 2013. Pengaruh Variasi Perbandingan Udara-Bahan Reaktor Downdraft Dengan Suplai Biomass Serabut Kelapa Secara Kontinyu. *Teknik POMITS*, 2(3), 3–6.
- Herlambang, S., Rina, S., Santoso, P., & Sutiono, H. T. 2017. Biomassa sebagai Sumber Energi Masa Depan. *Buku Ajar*, 1–51.
- Ma'arif, S., Sari, R. J., & Syamsiro, M. 2016. Studi Kelayakan Ekonomi Pembangunan PLTD Sistem Dual Fuel dengan Gasifikasi Sekam Padi Kapasitas 50 kVA. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, 1(1), 26–31.
- Moni, M. N. Z., Sulaiman, S. A., & Baheta, A. T. 2018. Downdraft Co-gasification of Oil Palm Frond with Other Oil Palm Residues: Effects of Blending Ratio. *MATEC Web of Conferences*, 225. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822506018>
- Najib, L., & Darsopuspito, S. 2012. Karakterisasi Proses Gasifikasi Biomassa Tempurung Kelapa Sistem Downdraft Kontinyu dengan Variasi Perbandingan Udara-Bahan Bakar (AFR) dan Ukuran Biomassa. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1), 12–15.
- Nizar. 2018. Teknologi Termal WtE Berbasis Gasifikasi. *Modul Teknologi WtE*, 1(1), 1–38. https://bpsdm.pu.go.id/center/pelatihan/uploads/edok/2019/04/fd235_1._Modul_Kebijakan.pdf
- Nur, M. S., A., K., & Saputro, S. 2016. *Gasifikasi Limbah Biomassa*. 15(2), 1–23.
- Pambudi, N. A., Laukkanen, T., Syamsiro, M., & Gandidi, I. M. 2017. Simulation of *Jatropha curcas* shell in gasifier for synthesis gas and hydrogen production. *Journal of the Energy Institute*, 90(5), 672–679. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.07.010>
- Ramos, A., Monteiro, E., Silva, V., & Rouboa, A. 2018. Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(June 2016), 380–398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.025>
- Rivas, A. M. C. J. 2012. The effect of biomass, operating conditions, and gasifier design on the performance of an updraft biomass gasifier. *BioResources*, 10(2), 3615–3624. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3615-3624>
- Roy, A., Manna, A., Kim, J., & Moon, I. 2022. IoT-based smart bin allocation and vehicle routing in solid waste management: A case study in South Korea. *Computers and Industrial Engineering*, 171(July), 108457. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108457>
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. 2013. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>
- Sansaniwal, S. K., Pal, K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. 2017. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(December 2015), 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Shah, N.,

- Anthony, E. J., & Fennell, P. S. 2016. An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environmental Science*, 9(10), 2939–2977. <https://doi.org/10.1039/c6ee00935b>
- Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. 2020. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117(October 2019), 109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>
- Syamsiro, M. 2016. Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Padat Biomassa Dengan Proses Densifikasi Dan Torrefaksi. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, 1(1), 7–13.
- Widyawidura, W., Liestiono, M. R. P., Cahyono, M. S., Prasetya, A., & Syamsiro, M. 2017. Pengaruh Jenis Bahan terhadap Proses Gasifikasi Sampah Organik Menggunakan Updraft Fixed Bed Reactor. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 1(2), 30. <https://doi.org/10.30588/jeemm.v1i2.258>
- Yuda Pratama, I. P. A., Winaya, I. N. S., & Suryawan, I. G. P. A. 2020. Uji Reaktor Gasifikasi Downdraft Biomassa Sampah Kota. *Jurnal METTEK*, 5(2), 110. <https://doi.org/10.24843/mettek.2019.v05.i02.p08>