

## **Rancang Bangun Gasifier Tanpa Blower Berbahan Bakar Arang Limbah Perkebunan Kelapa Sawit**

*Arief Suardi Nur Chairat<sup>1</sup>; Vandy Antono<sup>2</sup>; Prayudi<sup>3</sup>; Roswati Nurhasanah<sup>4</sup>*

<sup>1, 3, 4</sup> Institut Teknologi PLN; Jln. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Jakarta Barat  
Program Studi Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Dan Bisnis Energi

<sup>2</sup> Program Studi Diploma Tiga Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Dan Bisnis Energi

<sup>1</sup> arief.suardi@itpln.ac.id

### **ABSTRACT**

*Known as one of the countries with the largest oil palm plantations, there is a great opportunity for Indonesia to use the potential of renewable energy resources to produce electricity, especially for rural areas or remote areas. Palm oil waste can be used as a fuel source in the gasification process to produce syntetic gas (syngas) which will be used to produce electricity. The gasification process is strongly influenced by the gasifier reactor so that the gas produced has a high heating value and is capable of combustion. This study aims to design and make an updraft type gasifier reactor without a blower so that it does not require electrical energy in its operation, but uses engine suction power. This design is suitable for small scale power plants that are not connected to the electricity network (off-grid) in rural areas. Based on calculations, the availability of biomass energy is known to be 2113.8 MJ and the results of this gasifier design are known for the reactor cross-sectional area of 375 cm<sup>2</sup> and for a height of 100 cm with a raw material of 2.47 kg / hour and produce an output power with a capacity of 5 kW. The research uses a gasoline generator with a maximum output of 2.5 kW. In the last experiment, the gasifier was operated for 3 hours using a 1 kW load consuming 6.9 kg of charcoal. trials still need to be tried for more power and as little fuel usage as possible.*

**Keywords:** Palm oil, gasifier, electricity

### **ABSTRAK**

*Dikenal sebagai salah satu negara yang memiliki kebun kelapa sawit terluas, terbuka peluang besar bagi Indonesia untuk menggunakan potensi sumber daya energi terbarukan untuk menghasilkan energi listrik, terutama untuk daerah-daerah pedesaan atau kawasan terpencil. Limbah kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar dalam proses gasifikasi untuk menghasilkan syntetic gas (syngas) yang akan digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Proses gasifikasi sangat dipengaruhi oleh reaktor gasifier agar gas yang dihasilkan memiliki nilai kalor tinggi dan bersifat mampu bakar. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat reaktor gasifier tipe updraft tanpa blower sehingga tidak memerlukan energi listrik dalam pengoperasiannya, akan tetapi menggunakan daya hisap mesin. Desain ini sesuai untuk pembangkit listrik skala kecil yang tidak terhubung ke jaringan listrik (off-grid) di daerah pedesaan. Berdasarkan perhitungan, ketersediaan energi biomassa diketahui 2113,8 MJ dan hasil rancang bangun gasifier ini diketahui untuk luas penampang reaktor 375 cm<sup>2</sup> dan untuk tinggi 100 cm dengan bahan baku 2.47 kg/jam serta menghasilkan daya output dengan kapasitas 5 kW. Penelitian menggunakan genset gasolin dengan output maksimal 2,5 kW. Pada percobaan terakhir, gasifier dioperasikan selama 3 jam dengan menggunakan beban 1 kW menghabiskan arang sebanyak 6.9 kg. percobaan masih perlu diusahakan untuk daya lebih besar dan penggunaan bahan bakar sesedikit mungkin.*

**Kata kunci:** Kelapa sawit, gasifier, listrik

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang besar, baik wilayah darat ataupun lautnya, yang luas wilayah lautnya mencapai tiga perempat dari luas total negaranya dan juga negara yang memiliki garis terpanjang di dunia setelah Kanada. Dengan kondisi geografis tersebut, penyediaan layanan energi listrik yang memadai, merata, dengan harga yang terjangkau menjadi tantangan khusus yang dihadapi oleh Indonesia [1, 2], karena akan membutuhkan biaya yang tidak sedikit dengan kecanggihan teknologi yang relatif tinggi serta waktu pembangunan yang panjang. Ketersediaan energi listrik juga merupakan salah satu prioritas dalam mendukung peningkatan kesejahteraan dan pertumbuhan ekonomi nasional. Indonesia juga akan menghadapi kendala pada sumber energi fosil, seperti minyak bumi dan batu bara, sebagai bahan utama dalam usaha produksi energi listrik di Indonesia, yang persediaannya semakin berkurang dan diperkirakan akan habis dalam jangka waktu 30 tahun mendatang. Salah satu dimensi dalam perencanaan sistem tenaga listrik yang juga harus menjadi pertimbangan adalah masalah pencemaran lingkungan yang tinggi. Kepedulian terhadap lingkungan hidup juga harus menjadi perhatian, karena ketergantungan terhadap energi fosil dari sektor pembangkit tenaga listrik akan menghasilkan emisi gas rumah kaca sehingga harus ada usaha-usaha pengendalian lingkungan dengan mengimplementasikan energi terbarukan [3]. Ketahanan energi merupakan masalah yang krusial dalam rangka mendukung pembangunan nasional melalui perwujudan ketersediaan energi yang cukup, aman, berkualitas dan beragam serta tersebar merata di seluruh wilayah Indonesia dengan harga yang terjangkau [4].

Selain hambatan-hambatan yang berkaitan dengan penggunaan sumber energi fosil yang telah dijelaskan di atas, maka terbuka peluang besar bagi Indonesia untuk menggunakan potensi sumber daya energi terbarukan, meliputi sumber energi surya, sumber energi air dan mikrohidro, sumber energi angin, sumber energi panas bumi, sumber energi gelombang laut, dan sumber energi biomassa. dalam menghasilkan energi listrik [5], terutama untuk daerah-daerah pedesaan atau kawasan terpencil yang belum teraliri listrik. Berdasarkan data pada tahun 2018 terdapat 2.288 desa yang belum teraliri listrik di seluruh Indonesia [6]. Sulitnya penyediaan energi listrik di daerah pedesaan disebabkan oleh kepadatan populasi yang rendah akan berdampak pada permintaan listrik yang rendah, sehingga tidak sepadan dengan investasi yang besar untuk pembangunan infrastruktur jaringan listrik [7]. Pembangkit listrik skala kecil yang tidak terhubung ke jaringan listrik (*off-grid system*) merupakan salah satu pilihan paling tepat untuk menghadapi masalah ini, baik sebagai langkah pertama proses elektrifikasi atau sebagai dasar untuk membuat rencana pengembangan jaringan listrik daerah pedesaan dan terpencil di masa depan. Salah satu komoditas lokal yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan untuk menghasilkan listrik adalah kelapa sawit [8].

Indonesia merupakan negara yang memiliki luas kebun kelapa sawit mencapai 8.774.226 hektar dan produksi *crude palm oil* (CPO) sebesar 33.500.691 ton pada tahun 2016. Lokasi kebun-kebun kelapa sawit ini dapat ditemui di 26 provinsi di Indonesia [9]. Dalam proses pengolahan tandan buah segar menjadi minyak sawit sekitar 45% bahan akan menjadi limbah padat berupa seresah, serbuk, serabut, tempurung, dan tandan kosong. Sekitar 50% dari limbah padat tersebut adalah tandan kosong [10]. Pemanfaatan limbah tandan kosong sebagai bahan bakar sampai saat ini masih sangat terbatas. Tandan kosong tersebut akan memiliki nilai tambah sebagai sumber energi terbarukan dengan proses gasifikasi.

Gasifikasi adalah salah satu proses konversi termal biomassa dan batubara menjadi gas mempan bakar (*combustable gases*). *Carbonaceous solid fuels* tersebut direaksikan dengan oksigen, udara, steam, atau campurannya menjadi terutama: karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), karbondioksida (CO<sub>2</sub>), sedikit hidrokarbon (etena, etana) yang dikenal sebagai *syntetic gas* atau *syngas* [11]. Proses gasifikasi tersebut dilakukan dalam sebuah gasifier yang merupakan alat

atau reaktor tempat berlangsungnya empat reaksi termal dan kimia yang berbeda-beda, yaitu pembakaran, oksidasi, pirolisis, dan pengeringan. Gas hasil proses gasifikasi mengandung kotoran seperti tar, partikel, nitrogen, dan sulfur ( $H_2S$ ,  $CO_S$ ) [12]. Salah satu upaya untuk mengurangi kadar tar dalam proses gasifikasi adalah pemilihan tipe reaktor.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan reaktor gasifier maupun pembangkit listrik berbahan limbah kelapa sawit. Adjar (2010) merancang tungku gasifier untuk tandan kosong jenis updraft dengan parameter yang digunakan dalam perancangan antara adalah nilai kalor bahan bakar biomassa, energi yang dibutuhkan untuk suatu keperluan tertentu, dan lama operasi tungku [6]. Rinovianto (2012) menguji sistem gasifikasi *updraft* dengan memodifikasinya menjadi suatu sistem dengan dua daerah keluaran yaitu di daerah atas *gasifier* seperti daerah konvensional dan di daerah bawah *gasifier* dalam upaya untuk mengurangi kandungan tar pada gas mampu bakarnya [13]. Siregar (2015) membuat sistem gasifier dengan gas mampu bakar terbesar pada gas CO dengan jumlah tar yang sedikit. Hasilnya dapat membangkitkan daya 40 kW dengan kapasitas terpasang gas engine 50 kW atau efisiensi 80 % dan mampu beroperasi selama 6 jam [14]. Wetar (2018) memanfaatkan limbah cair kelapa sawit untuk diolah sebagai sumber energi terbarukan pada pembangkit listrik tenaga biogas [15]. Sanjaya (2018) membuat perencanaan proses gasifikasi tipe *downdraft* dengan tandan kosong sebagai sumber energi sehingga dapat menghasilkan daya output gasifikasi ( $P_o$ ) adalah sebesar 50,96 kWh [16]. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, belum dilakukan perancangan gasifier tanpa blower yang memanfaatkan daya hisap mesin dalam mengoperasikannya.

Berdasarkan kondisi kelistrikan, komoditas kelapa sawit di Indonesia, dan studi literatur maka tujuan penelitian ini adalah merealisasikan unit pembangkit listrik energi terbarukan dengan memanfaatkan potensi lokal yaitu biomassa yang berupa sisa/limbah padat kelapa sawit. Limbah padat tersebut akan diproses menggunakan gasifier untuk menghasilkan *syngas* untuk digunakan sebagai campuran atau bahkan pengganti Bahan Bakar Minyak (BBM) sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Desain reaktor gasifier menggunakan teknologi gasifikasi tanpa blower sehingga tidak membutuhkan daya listrik untuk mengoperasikannya.

## 2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

Kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi perancangan desain gasifier. Kemudian dilakukan uji coba prototipe tersebut dengan menggunakan variasi jenis limbah kelapa sawit. Hasil akhir penelitian ini, maka Prototipe sudah dapat dimanfaatkan oleh warga daerah di sekitar perkebunan kelapa sawit untuk memenuhi kebutuhan listrik untuk penerangan. Dalam metode penelitian ini terdapat beberapa metode riset yang digunakan dalam penelitian, yaitu :

- 1) Studi Literatur, dilakukan untuk memberikan dasar teori untuk selanjutnya dikembangkan dan diaplikasikan dalam riset ini. Studi literature diperoleh dari buku-buku, jurnal ilmiah, dan browsing internet khususnya tentang perkembangan paten teknologi pembangkit listrik skala kecil khususnya metode gasifikasi dengan bahan bakar biomassa.
- 2) Pemilihan Material Gasifier, pada tahap ini akan dilakukan pencarian material pembuat gasifier yang tepat untuk bahan bakar biomassa.
- 3) Pembuatan Prototipe Gasifier, yang dimulai dari membuat desain gasifier, sistem pendingin dan sistem penyaringan gas, kemudian dilakukan pengujian terhadap hasil prototype tersebut untuk bisa memanfaatkan gas yang dihasilkan untuk digunakan sebagai bahan bakar generator/genset.

- 4) Pengujian Prototype Gasifier, dilakukan pengujian terhadap prototype untuk memanfaatkan gas yang dihasilkan untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar genset yang akan menghasilkan listrik.

Pada penelitian ini, aliran udara dan gas dibuat dengan sedikit lekukan, dengan harapan aliran gas lebih mudah. Sehingga gasifier ini nanti tidak memerlukan energi listrik dalam operasinya untuk menggerakkan blower, akan tetapi menggunakan daya isap engine. Sebelum residu kita proses gasifikasi, kita arangkan dahulu, dengan harapan tar dan pengotor lainnya dalam gas sudah minim. Sehingga hanya menyisakan *producer gas* yang mengandung  $H_2$ ,  $CO$ , dan  $CH_4$  yang dikenal sebagai *syngas*. *Producer gas* yang kaya akan gas mampu bakar, selanjutnya digunakan sebagai bahan bakar motor penggerak generator untuk membangkitkan energi listrik.

Dalam sebuah perencanaan gasifikasi untuk membangun gasifikasi dalam tahap pengerjaannya diperlukan suatu perancangan untuk menentukan ukuran diameter (D) tungku gasifier dan tinggi gasifier (H). salah satu dalam tahap pemrosesan awal menghitung atau menentukan jumlah limbah yang akan digunakan sebagai bahan baku gasifikasi maka diketahui untuk penentuan tungku diameter dan tinggi tungku gasifier tipe downdraft yang akan digunakan dalam proses gasifikasi.

Sesuai rencana penelitian, gasifier akan menghasilkan daya output ( $P_0$ ) sebesar 5 kw. Pada penelitian Sanjaya (2018), nilai HHV sebesar 15.22 MJ/kg dan efisiensi gasifikasi sebesar 48.22%. Dari nilai-nilai tersebut kita bisa mendapatkan nilai supply kebutuhan energi dengan menggunakan persamaan:

$$P_0 = \frac{FCR \times HHV \times \eta}{3.6}$$

$$FCR = \frac{P_0 \times 3.6}{HHV \times \eta} = \frac{5 \text{ kw} \times 3.6}{15.22 \frac{\text{Mj}}{\text{kg}} \times 48.22\%} = 2.47 \text{ kg/jam}$$

Dari perhitungan di atas didapat nilai laju konsumsi bahan bakar sebesar 2.47 kg/jam.

Dimensi utama dari tungku gasifier tipe updraft adalah dimensi tabung reaktor gasifikasi. Spesifikasi teknis yang disampaikan pada bagian sebelumnya digunakan untuk menentukan dimensi dan tinggi reaktor gasifikasi tipe updraft. Penampang reaktor dapat dibuat dengan berbagai geometri. Pada umumnya penampang silindrik yang banyak digunakan, akan tetapi pada penelitian kali ini akan mencoba membuat gasifier dengan penampang persegi Panjang. Semakin besar diameter akan memberikan keluaran daya yang semakin besar pula. Dimensi penampang reaktor tungku ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$D = \sqrt{\frac{1.27 \times FCR}{SGR}}$$

Dalam penelitian Pranoto (2010), menggunakan nilai Laju gasifikasi spesifik (specific gasification rate),  $SGR = 80 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{jam}$ . Sehingga dapat kita mencari luas penampang reaktor dari:

$$D = \sqrt{\frac{1.27 \times FCR}{SGR}} = \sqrt{\frac{1.27 \times 2.47 \text{ kg/jam}}{80 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{jam}}} = 0.198 \text{ m}$$

Dari perhitungan di atas jika penampang berbentuk silindris, kita mendapatkan nilai diameter reactor sebesar 0.198 m = 19.8 cm, atau jari-jari sebesar  $r = 10$  cm. Atau luas penampang reactor sebesar  $A = \pi r^2 = \pi \times 10^2 = 314 \text{ cm}^2$ . Karena penelitian ini menggunakan bentuk penampang persegi Panjang sehingga dicari panjang dan lebarnya dengan menggunakan acuan nilai luas penampang diatas. Pada penelitian ini menggunakan panjang 25 cm dan lebar 15 cm, sehingga didapat luas  $375 \text{ cm}^2$ .

Disamping luas penampang, perlu dicari juga ketinggian reactor (h), dengan menggunakan persamaan:

$$h = \frac{t.SGR}{\rho}$$

Diketahui nilai SGR yaitu  $80 \text{ kg/m}^2.\text{jam}$ . Dan nilai Densitas curah bahan bakar,  $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ . Waktu operasi gasifier (t) 1 jam. Sehingga bisa dicari ketinggian dari reactor, sebagai berikut:

$$h = \frac{t.SGR}{\rho} = \frac{1 \text{ jam} \times 80 \text{ kg/m}^2.\text{jam}}{100 \text{ kg/m}^3} = 0.8 \text{ m} = 80 \text{ cm}$$

Dari perhitungan diatas, didapatkan ketinggian reactor gasifier adalah 80 cm, dengan ditambah ruang untuk peletakan pipa output sebesar 20 cm, sehingga tinggi total reaktor yaitu 100 cm.



**Gambar 1. Rancangan Gasifier Tanpa Blower**

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pembuatan dan pengujian *gasifier* dilakukan secara mandiri menggunakan bahan dan alat seperti plat stainless steel tebal 1 mm, elektroda ss 3.2 mm, pipa ss seamless od 14 mm tebal 1 mm, dan pompa air kecil. Bahan bakar yang digunakan pada proses pengujian adalah limbah tandan kosong sawit (TKS), yang merupakan salah satu limbah padat dari industri minyak kelapa sawit. Hasil analisis proximate dan ultimate menunjukkan bahwa tandan kosong sawit memiliki kandungan energi 17,08 MJ/kg sehingga dapat dikonversi menjadi sumber energi gas melalui proses gasifikasi. Kinerja gasifikasi sangat tergantung pada karakteristik bahan tandan kosong sawit antara lain ukuran bahan, kadar air dan pengaturan kapasitas udara serta kepadatan bahan. Sebagai bahan organik, tandan kosong sawit berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan organik, bahan baku serat, serta konversi menjadi bioenergi. Proses konversi menjadi bioenergi dapat dilakukan melalui gasifikasi dan pembakaran serta produksi bahan bakar cair seperti bioethanol. *Syngas* yang dihasilkan secara langsung dimanfaatkan untuk mengoperasikan sebuah genset gasolin yang diberi beban. Sistem kerja gasifier untuk proses pengujian adalah sebagai berikut:

1. Memberi air pada tutup reaktor sebagai isolator dan pengaman pembakaran.
2. Memastikan pipa pada cooler sudah terendam air.

3. *Valve* pada filter dipastikan terbuka, untuk pengaman pembakaran dan *valve* yang menuju ke genset dipastikan tertutup, untuk menghindari gas yang belum sempurna masuk ke ruang bakar genset.
4. Membuat api/baru di reaktor sebelum bahan arang limbah kelapa sawit dimasukkan dan masukkan bahan arang limbah kelapa sawit ke dalam reaktor sedikit demi sedikit, sampai batas yang ditentukan, yaitu sekitar 5 cm di bawah pipa gas keluar.
5. Tutup reaktor pembakaran dan periksa secara berkala suhu di ruang bakar dengan menggunakan alat termogun. Temperature ruang bakar dipastikan sudah mencapai  $>800^{\circ}\text{C}$  dan *syngas* sudah mulai terbentuk dengan baik. Untuk mengetahui bisa dengan menyalakan *syngas* yang dihasilkan dari pipa di bagian atas filter, seperti pada gambar di bawah. Jika *syngas* sudah bisa dibakar dengan sempurna, menandakan *syngas* sudah siap dipakai di genset.
6. Menyalakan genset dengan bahan bakar bensin sampai rpm stabil. Setelah itu, diatur 3 *valve* di pipa yang masuk ke genset, dengan perlahan membuka *valve syngas* dan menutup *valve* yang berasal dari karburator. Sampai rpm genset stabil seperti waktu menggunakan bensin.



Gambar 2. Gasifier Tanpa Blower, Air Isolator pada Reaktor, dan Pipa Cooler



Gambar 3. Proses Pengujian Gasifier



**Gambar 4. Prototipe Pembangkit Listrik Energi Terbarukan**

Dalam pengujian ini, beban listrik yang digunakan adalah 20 bola lampu pijar dengan kapasitas masing-masing 100 watt. Reaktor yang dibuat mampu digunakan untuk arang sebanyak 15 kg. Pada percobaan terakhir kita mencoba menggunakan arang sebanyak 12 kg dan kita operasikan selama 3 jam dengan menyambungkan lampu pijar sebanyak 20 unit, dengan kapasitas daya masing-masing 100 watt. Hasil pengujian menunjukkan genset mampu menyalakan lampu sebesar 1000 watt.

#### **4. KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada penelitian ini gasifier yang dirancang tanpa menggunakan blower untuk mengurangi daya listrik sehingga hanya memanfaatkan daya hisap mesin. Hasil rancang bangun gasifier ini diketahui untuk luas penampang reaktor 375 cm<sup>2</sup> dan untuk tinggi reaktor 100 cm dengan bahan baku 2.47 kg/jam serta menghasilkan daya output dengan kapasitas 5 kw. Penelitian menggunakan genset gasolin merk yamakoyo gfh4500 dengan output maksimal 2,5 kw. Pada percobaan terakhir, gasifier dioperasikan selama 3 jam dengan menggunakan beban 1 kw menghabiskan arang sebanyak 6.9 kg. percobaan masih perlu diusahakan untuk daya lebih besar dan penggunaan bahan bakar sesedikit mungkin.

Pada tahapan berikutnya masih dibutuhkan pengujian terhadap kinerja gasifier agar listrik dihasilkan mampu mencapai 5 kW dan kadar tar semakin rendah. Beberapa saran untuk pengujian tahap berikutnya adalah:

1. Pengujian akan menggunakan genset dengan kapasitas yang lebih besar dan berbahan bakar diesel,
2. Bahan bakar akan menggunakan limbah padat kelapa sawit sawit yang diarsangkan dengan tungku rorojonggrang. Pengujian tahap pertama masih menggunakan arang jenis kayu, sehingga kualitas tidak bisa dipastikan dan nilai kalori beragam.
3. Masih terdapat beberapa kebocoran disaluran yang teridentifikasi pada pengujian tahap pertama sehingga perlu untuk diperbaiki.
4. Pada komponen filter, masih terdapat uap air dari arang yang masih basah masuk ke dalam saluran sehingga pada tahap berikutnya hal ini harus dihindari.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi PLN yang telah memberi dukungan dana dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat yang telah memberi dukungan teknis dalam membantu pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel ilmiah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Kunaifi, A. J. Veldhuis dan A. H. M. E. Reinders, *The Electricity Grid in Indonesia The Experiences of End-Users and Their Attitudes Toward Solar Photovoltaics*, Switzerland: Springer, 2020.
- [2] Z. Yurnaidi, "Opportunities and Challenges of Renewable Energy and Distributed Generation Promotion for Rural Electrification in Indonesia," dalam *Zero-Carbon Energy Kyoto 2009*, Tokyo, Springer, 2010, pp. 102-107.
- [3] R. H. van Els, J. N. de Souza Vianna dan A. C. P. Brasil Jr., "The Brazilian experience of rural electrification in the Amazon with decentralized generation – The need to change the paradigm from electrification to development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 1450-1461, 2012.
- [4] F. H. Prima, "Potensi Biomassa dan Produksi Energi Tanaman Gamal (*Gliricidia Sepium*) Sebagai Bahan Baku Energi Alternatif Di Kabupaten Timor Tengah Utara Provinsi Nusa Tenggara Timur," Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2017.
- [5] Institute for Essential Services Reform, "Energi Terbarukan: Energi untuk Kini dan Nanti," 31 May 2017. [Online]. Available: <http://iesr.or.id/pustaka/seri10p-energi-kini-dan-nanti/>. [Diakses 6 June 2020].
- [6] A. Pratoto, A. Sutanto, E. H. Praja dan D. Armenda, "Rancang Bangun Tungku Gasifier Untuk Pemanfaatan Tandan Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi," dalam *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9*, Palembang, 2010.
- [7] A. J. Veldhuis dan A. H. M. E. Reinders, "Reviewing the potential and cost-effectiveness of off-grid PV systems in Indonesia on a provincial level," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 757-769, 2015.
- [8] P. Papilo, M. E. Hambali dan I. S. Sitanggang, "Sustainability index assessment of palm oil-based bioenergy in Indonesia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 808-820, 2018.
- [9] Direktorat Jenderal Perkebunan, "www.pertanian.go.id," [Online]. Available: <https://www.pertanian.go.id/home/index.php?show=repo&fileNum=214>. [Diakses 6 June 2020].
- [10] B. Purwantana dan B. Prastowo, "Gasifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit: Konversi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan," dalam *Seminar Nasional Inovasi Perkebunan*, Jakarta, 2011.
- [11] H. Susanto, "Fakultas Teknologi Industri ITB," 24 November 2018. [Online]. Available: <https://www.fti.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/9/2016/03/Materi-Orasi-Ilmiah-Prof.-Herri-Susanto-IPM.pdf>. [Diakses 7 June 2020].
- [12] A. Molino, S. Chianese dan D. Musmarra, "Biomass gasification technology: The state of the art overview," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25, no. 1, pp. 10-25, 2016.
- [13] G. Rinovianto, "Karakteristik Gasifikasi pada Updraft Double Gas Outlet Gasifier Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet," Universitas Indonesia, Jakarta, 2012.
- [14] K. Siregar, "Rancang Bangun Gasifier Downdraft dan Aplikasi PLT-Biomassa Kapasitas 50 kW Untuk Daerah Terisolasi Dari Jaringan Listrik PLN," dalam *Seminar Nasional FTIP UNPAD PERTETA HIPI*, Bandung, 2014.

- [15] W. Pramita, “Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Berbahan Limbah Cair Kelapa Sawit,” Universitas Sultan Syarif Kasim, Riau, 2018.
- [16] D. Sanjaya , D. Notosudjono dan D. B. Fiddiansyah, “Perencanaan Gasifikasi Limbah Kelapa Sawit Sebagai Energi Alternatif Di PTPN VIII Cikasungka Kabupaten Bogor,” Jurnal Online Mahasiswa Bidang Teknik Elektro, vol. 1, no. 1, pp. 1-14, 2018.
- [17] C. Scaramuzzino, G. Garegnani dan P. Zambelli, “Integrated approach for the identification of spatial patterns related to renewably energy potential in European Territories,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 101, pp. 1-13, 2019.