

ANALISIS PEMBAKARAN BOILER BIOMASSA MENGGUNAKAN BIOGAS POME

Ahmad Romadhoni¹, Nanang Ruhyat²

Universitas Mercu Buana^{1,2}

ahmadndon91@gmail.com¹, nanang.ruhyat@mercubuana.ac.id²

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan biogas dari *Palm Oil Mill Effluent* (POME) sebagai bahan bakar alternatif pada sistem boiler biomassa di pabrik kelapa sawit. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental melalui pengujian langsung pada unit boiler eksisting dengan skenario pembakaran biomassa dan pembakaran hibrida menggunakan biomassa serta biogas. Tahapan penelitian meliputi karakterisasi biogas POME, perancangan dan pengujian prototipe burner, integrasi burner dengan boiler, serta evaluasi kestabilan pembakaran dan substitusi bahan bakar padat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biogas POME dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar substitusi parsial pada sistem boiler biomassa. Penggunaan biogas mampu mempertahankan kestabilan pembakaran serta menurunkan konsumsi serat dan cangkang sawit tanpa mengganggu kontinuitas pembangkitan uap. Meskipun nilai kalor dan pasokan biogas berfluktuasi, sistem pembakaran tetap dapat dioperasikan melalui pengaturan laju alir biogas yang sesuai. Berdasarkan hasil tersebut, integrasi sistem biogas-burner-boiler layak secara teknis diterapkan sebagai salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi, mengoptimalkan pemanfaatan limbah POME, dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar biomassa padat pada industri kelapa sawit.

Kata Kunci: Biogas, Boiler, Efisiensi Termal, *Palm Oil Mill Effluent*, Substitusi Bahan Bakar

ABSTRACT

This study aimed to analyze the utilization of biogas derived from Palm Oil Mill Effluent (POME) as an alternative fuel in a biomass boiler system at a palm oil mill. This study employed a quantitative experimental approach through direct testing on an existing boiler unit using biomass combustion and hybrid combustion involving biomass and biogas. The research stages included POME biogas characterization, burner prototype design and testing, burner integration with the boiler, and evaluation of combustion stability and solid fuel substitution. The results showed that POME biogas could be utilized as a partial substitute fuel in the biomass boiler system. The use of biogas maintained combustion stability and reduced palm fiber and shell consumption without disrupting the continuity of steam generation. Although the heating value and supply of biogas fluctuated, the

combustion system remained operational through appropriate adjustment of the biogas flow rate. Based on these findings, the integrated biogas-burner-boiler system is technically feasible as a solution to improve energy utilization efficiency, optimize POME waste utilization, and reduce dependence on solid biomass fuels in the palm oil industry.

Keywords: *Biogas, Boiler, Fuel Substitution, Palm Oil Mill Effluent, Thermal Efficiency*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dalam sektor agroindustri di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan kegiatan industri (Azrien et al., 2022). Hingga saat ini, sebagian kebutuhan energi industri masih dipenuhi menggunakan bahan bakar fosil, termasuk solar sebagai bahan bakar generator listrik (Rimkus & Zaglinkis, 2024). Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil mendorong perlunya pengembangan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan dan tersedia di lingkungan industri.

Industri kelapa sawit memiliki potensi energi dari biomassa berupa serat sawit (*fiber*) dan cangkang kelapa sawit (*shell*). Kedua jenis biomassa tersebut umumnya digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk memenuhi kebutuhan energi termal dan menghasilkan uap. Akan tetapi, perubahan kebijakan dan meningkatnya perhatian terhadap energi hijau telah membuka peluang pemanfaatan serat dan cangkang sebagai komoditas sampingan yang memiliki nilai ekonomi (Sarkar & Wang, 2020).

Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan sumber energi lain yang dapat dimanfaatkan dari proses pengolahan kelapa sawit (Budiman et al., 2021; Hakim & Valentino, 2019; Sucahyo et al., 2019). Salah satu sumber energi yang berpotensi dikembangkan adalah limbah cair pabrik kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Pemanfaatan POME sebagai sumber energi dapat mendukung efisiensi proses, optimalisasi pemanfaatan limbah, dan pengembangan industri kelapa sawit yang lebih berkelanjutan (Nasution et al., 2018; Sodri & Septriana, 2022).

POME memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dan dapat diolah melalui proses fermentasi anaerobik untuk menghasilkan biogas. Biogas yang dihasilkan umumnya mengandung metana sebagai komponen utama yang menentukan nilai kalornya. Pemanfaatan biogas dari POME telah banyak dikaji sebagai alternatif untuk menurunkan beban pencemaran lingkungan sekaligus menghasilkan nilai tambah berupa energi (Aziz et al., 2019; Hakim & Valentino, 2020; Yoesgiantoro, 2020).

Biogas POME dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan energi, termasuk sebagai bahan bakar pada sistem boiler. Dibandingkan bahan bakar biomassa padat, biogas memiliki karakteristik suplai yang lebih mudah diatur dan

proses pencampuran dengan udara yang lebih homogen. Penggunaan burner yang sesuai memungkinkan energi biogas dimanfaatkan untuk mendukung pembakaran dan mengurangi sebagian kebutuhan bahan bakar padat (Harsi, 2022; Saidur et al., 2019).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biogas pada sistem energi industri dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dan menurunkan emisi gas rumah kaca yang berasal dari pelepasan metana ke atmosfer (Budiman et al., 2021; Sodri & Septriana, 2022). Namun, biogas POME memiliki nilai kalor yang lebih rendah daripada bahan bakar fosil. Kandungan metana dan laju produksinya juga dapat berfluktuasi akibat perubahan kondisi proses anaerobik.

Karakteristik tersebut menyebabkan penggunaan biogas POME pada boiler membutuhkan sistem burner yang mampu menjaga kestabilan nyala dan mengatur pencampuran udara dengan bahan bakar. Integrasi dengan boiler eksisting juga perlu memperhatikan kapasitas pembangkitan uap, kestabilan temperatur ruang bakar, kebutuhan energi, serta kontinuitas pasokan biogas.

Kajian eksperimental yang membandingkan atau mengevaluasi secara langsung operasi pembakaran biogas dan biomassa padat pada unit boiler yang sama, khususnya dalam kondisi operasional industri kelapa sawit di Indonesia, masih relatif terbatas (Harsi, 2022; Nasution et al., 2018). Sebagian penelitian terdahulu lebih berfokus pada produksi dan karakterisasi biogas, sedangkan evaluasi integrasi sistem biogas-burner-boiler pada kondisi operasional aktual masih perlu dikembangkan (Aziz et al., 2019; Hakim & Valentino, 2019; Sucahyo et al., 2019).

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian pemanfaatan biogas POME melalui burner yang diintegrasikan secara langsung dengan boiler biomassa eksisting di PT XYZ. Evaluasi dilakukan terhadap karakteristik biogas, kestabilan pembakaran, kontinuitas pembangkitan uap, dan potensi substitusi serat serta cangkang sawit.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan biogas POME sebagai bahan bakar alternatif pada sistem boiler biomassa PT XYZ. Penelitian secara khusus diarahkan untuk mengevaluasi karakteristik biogas, kinerja sistem biogas-burner-boiler, kestabilan pembakaran, dan pengurangan konsumsi bahan bakar biomassa padat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dan rekayasa sistem. Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang mencakup karakterisasi biogas POME, perancangan prototipe burner, pengujian burner, integrasi burner dengan boiler eksisting, dan evaluasi kinerja sistem pada kondisi operasional pabrik.

Tahap pertama dilakukan melalui karakterisasi biogas yang dihasilkan dari unit pengolahan POME. Karakterisasi mencakup komposisi gas, nilai kalor, dan

laju produksi biogas. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi potensi energi biogas dan menentukan kebutuhan pengaturan laju alir bahan bakar menuju burner (Hakim & Valentino, 2020; Yoesgiantoro, 2020).

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem burner berbahan bakar biogas. Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik biogas POME yang memiliki nilai kalor relatif rendah dan komposisi yang dapat berfluktuasi. Aspek yang diperhatikan meliputi kestabilan nyala api, pencampuran udara dan bahan bakar, efisiensi pembakaran, keamanan pengoperasian, serta kompatibilitas burner dengan boiler eksisting.

Simulasi aliran dan pembakaran dilakukan untuk memprediksi kinerja awal sistem sebelum prototipe burner dibuat. Simulasi digunakan untuk memperkirakan distribusi aliran, pencampuran udara dengan biogas, dan karakteristik nyala api pada kondisi operasi yang direncanakan (Saidur et al., 2019; Hakim & Valentino, 2019; Sucahyo et al., 2019).

Prototipe burner yang telah dibuat kemudian diuji dan diintegrasikan dengan unit boiler PT XYZ. Berdasarkan data operasional, boiler memiliki kapasitas produksi uap sebesar 65 ton/jam dan memerlukan bahan bakar padat berupa serat serta cangkang sawit dengan laju konsumsi gabungan minimum sebesar 13,65 ton/jam.

Pengujian dilakukan pada skenario pembakaran menggunakan biomassa dan pembakaran hibrida dengan penambahan biogas. Parameter yang diamati mencakup kestabilan nyala, kontinuitas pembangkitan uap, konsumsi bahan bakar biomassa padat, dan kestabilan operasi boiler. Pengamatan juga dilakukan untuk mengetahui kemungkinan munculnya gangguan pembakaran, seperti nyala padam dan *flashback*.

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi potensi energi biogas dan pengurangan konsumsi bahan bakar padat. Analisis nilai kalor dan kandungan karbon bahan bakar biomassa juga dilakukan untuk mendukung evaluasi kinerja energi sistem.

Hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk menyusun rekomendasi teknis mengenai penerapan sistem burner biogas terintegrasi pada boiler biomassa di pabrik kelapa sawit. Integrasi tersebut dievaluasi berdasarkan kestabilan operasi, kemampuan substitusi bahan bakar padat, dan kompatibilitasnya dengan sistem boiler eksisting.

HASIL PENELITIAN

Karakteristik Biogas POME sebagai Bahan Bakar Boiler

Berdasarkan analisis data operasional dari unit pengolahan *Palm Oil Mill Effluent* (POME) di pabrik kelapa sawit, biogas yang dihasilkan menunjukkan variasi komposisi yang dipengaruhi oleh kondisi proses anaerobik, laju beban organik limbah cair, dan kestabilan operasi digester. Kandungan metana sebagai

komponen utama penentu nilai kalor biogas cenderung berfluktuasi sehingga nilai kalor biogas yang disuplai ke burner tidak selalu konstan selama periode operasi.

Meskipun demikian, hasil evaluasi data lapangan menunjukkan bahwa nilai kalor biogas POME secara umum masih berada dalam rentang yang memungkinkan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi termal pada sistem boiler. Karakteristik tersebut menjadikan biogas POME lebih sesuai digunakan sebagai bahan bakar tambahan atau substitusi parsial dibandingkan sebagai pengganti penuh bahan bakar biomassa padat.

Selain nilai kalor, kontinuitas pasokan biogas menjadi faktor penting dalam pemanfaatannya sebagai bahan bakar boiler. Berdasarkan hasil pengamatan operasional, produksi biogas POME relatif stabil dalam jangka menengah, meskipun masih dipengaruhi oleh variasi laju pembentukan limbah cair. Oleh karena itu, integrasi biogas ke dalam sistem boiler perlu disertai pengaturan laju alir bahan bakar untuk menjaga kestabilan pembakaran dan kontinuitas pembangkitan uap.

Kinerja Sistem Terintegrasi Biogas-Burner-Boiler

Hasil implementasi dan pengujian lapangan menunjukkan bahwa burner berbahan bakar biogas mampu beroperasi secara andal ketika diintegrasikan dengan sistem boiler eksisting. Selama periode pengujian, burner biogas dapat dinyalakan dan dioperasikan tanpa memerlukan modifikasi besar pada struktur utama boiler. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem burner memiliki kompatibilitas yang baik dengan boiler yang telah tersedia.

Ditinjau dari kestabilan pembakaran, nyala api yang dihasilkan oleh biogas relatif stabil dalam rentang operasi normal boiler. Selama pengujian, tidak ditemukan gangguan signifikan berupa padamnya nyala api secara tiba-tiba maupun fenomena *flashback*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa rancangan sistem pencampuran udara dan bahan bakar mampu mengakomodasi karakteristik biogas POME yang memiliki nilai kalor relatif rendah dan densitas energi yang lebih kecil dibandingkan bahan bakar fosil.

Penggunaan biogas sebagai bahan bakar gas membantu menghasilkan pencampuran udara dan bahan bakar yang lebih homogen. Pembakaran biogas juga menghasilkan distribusi panas yang lebih merata di dalam ruang bakar dibandingkan pembakaran biomassa padat. Kondisi tersebut membantu mengurangi fluktuasi temperatur di dalam tungku selama periode pengujian. Secara keseluruhan, sistem terintegrasi biogas-burner-boiler dapat dioperasikan sebagai sistem pembakaran hibrida. Pemanfaatan biogas tidak mengganggu keandalan operasi boiler maupun kontinuitas uap yang dihasilkan selama pengujian.

Substitusi Bahan Bakar Padat

Analisis substitusi bahan bakar padat dilakukan berdasarkan data konsumsi bahan bakar boiler pada kondisi operasional aktual pabrik kelapa sawit. Pada

kondisi yang dianalisis, produksi serat sawit mencapai sekitar 9,10 ton/jam, sedangkan produksi cangkang sawit mencapai sekitar 4,55 ton/jam. Dengan demikian, serat dan cangkang sawit menghasilkan bahan bakar biomassa padat dengan jumlah gabungan sekitar 13,65 ton/jam.

Setelah biogas POME diintegrasikan ke dalam sistem pembakaran, sebagian kebutuhan energi termal yang sebelumnya dipenuhi oleh biomassa padat dapat disubstitusi menggunakan energi dari biogas. Kontribusi biogas tersebut mampu menurunkan konsumsi serat dan cangkang sawit tanpa mengganggu kontinuitas pembangkitan uap.

Besarnya pengurangan konsumsi biomassa padat dipengaruhi oleh ketersediaan biogas, kandungan metana, nilai kalor, dan laju alir biogas selama proses pembakaran. Oleh karena itu, tingkat substitusi tidak selalu konstan selama pengoperasian sistem.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa biogas POME lebih sesuai digunakan sebagai substitusi parsial daripada sebagai pengganti penuh biomassa padat. Penggunaan biogas sebagai bahan bakar tambahan memungkinkan boiler tetap menggunakan serat dan cangkang sawit sebagai bahan bakar utama ketika produksi atau nilai kalor biogas mengalami penurunan.

Implikasi Operasional Pemanfaatan Biogas

Dari sisi operasional, pengurangan konsumsi serat dan cangkang sawit dapat mengurangi beban pada sistem penanganan bahan bakar padat. Laju pembakaran biomassa yang lebih rendah juga berpotensi mengurangi jumlah abu dan residu pembakaran yang masuk ke dalam ruang bakar.

Integrasi biogas melalui burner khusus memberikan fleksibilitas dalam pengaturan suplai energi. Laju alir biogas dapat disesuaikan dengan karakteristik gas dan kebutuhan operasi boiler. Fleksibilitas tersebut penting karena kandungan metana dan nilai kalor biogas POME dapat berubah selama periode operasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem biogas-burner-boiler layak secara teknis diterapkan pada kondisi pengujian. Sistem tersebut mampu memanfaatkan energi dari limbah POME, mengurangi konsumsi biomassa padat, dan mempertahankan kontinuitas pembangkitan uap.

PEMBAHASAN

Pemanfaatan Biogas POME sebagai Bahan Bakar Substitusi Parsial

Hasil penelitian menunjukkan bahwa biogas POME dapat digunakan sebagai bahan bakar substitusi parsial pada boiler biomassa. Pemanfaatan secara parsial lebih sesuai dibandingkan penggantian penuh karena nilai kalor biogas relatif rendah dan komposisinya dapat berfluktuasi. Selain itu, boiler eksisting pada pabrik kelapa sawit pada dasarnya dirancang untuk menggunakan serat dan cangkang sawit sebagai bahan bakar utama.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa POME berpotensi menghasilkan biogas melalui fermentasi anaerobik dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif (Aziz et al., 2019; Hakim & Valentino, 2020; Yoesgiantoro, 2020). Penggunaan biogas sebagai bahan bakar tambahan memungkinkan industri memanfaatkan limbah cair sekaligus mengurangi sebagian kebutuhan bahan bakar biomassa padat.

Fluktuasi kandungan metana menjadi salah satu faktor yang membatasi penggunaan biogas sebagai bahan bakar tunggal. Kandungan metana menentukan nilai kalor dan energi yang dapat dihasilkan selama pembakaran. Ketika kandungan metana menurun, suplai energi dari biogas juga berkurang. Oleh karena itu, pengoperasian sistem memerlukan pengaturan laju alir biogas dan udara secara fleksibel.

Kinerja Sistem Biogas-Burner-Boiler

Kestabilan nyala selama pengujian menunjukkan bahwa rancangan burner mampu mengakomodasi karakteristik biogas POME. Tidak ditemukannya gangguan signifikan berupa nyala padam dan *flashback* menunjukkan bahwa pencampuran udara dengan biogas berlangsung secara fungsional pada rentang operasi yang diuji.

Temuan tersebut mendukung kajian yang menyatakan bahwa pembakaran biogas bernilai kalor rendah dapat berlangsung secara stabil apabila menggunakan rancangan burner dan pengaturan rasio udara-bahan bakar yang sesuai (Saidur et al., 2019; Hakim & Valentino, 2019; Sucahyo et al., 2019). Dengan demikian, keberhasilan pemanfaatan biogas tidak hanya ditentukan oleh kualitas gas, tetapi juga oleh rancangan burner dan sistem pengendaliannya.

Pencampuran biogas dengan udara yang lebih homogen membantu menghasilkan distribusi panas yang lebih merata di dalam ruang bakar. Kestabilan temperatur tersebut berpotensi mendukung perpindahan panas pada boiler. Namun, pengaruhnya terhadap efisiensi termal perlu didukung oleh data numerik mengenai energi masuk, produksi uap, temperatur gas buang, dan kehilangan panas.

Pengurangan konsumsi biomassa padat juga berpotensi menurunkan pembentukan abu, *slagging*, dan *fouling*. Meskipun demikian, manfaat tersebut belum dapat dinyatakan secara pasti tanpa data pengukuran abu, pemeriksaan permukaan perpindahan panas, dan evaluasi operasi dalam jangka panjang.

Pengurangan Konsumsi Biomassa Padat

Pemanfaatan energi biogas menurunkan sebagian kebutuhan serat dan cangkang sawit selama pengoperasian sistem pembakaran hibrida. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa biogas dapat berfungsi sebagai sumber energi tambahan tanpa mengganggu pembangkitan uap.

Pengurangan konsumsi biomassa padat memberikan manfaat bagi pengelolaan energi internal pabrik. Serat dan cangkang yang tidak seluruhnya

digunakan sebagai bahan bakar dapat dialokasikan untuk keperluan lain atau dimanfaatkan sebagai komoditas sampingan. Namun, manfaat ekonominya perlu dianalisis lebih lanjut dengan mempertimbangkan biaya pembangunan, pengoperasian, dan perawatan sistem pengolahan biogas serta burner.

Besarnya substitusi biomassa dipengaruhi oleh produksi dan kualitas biogas. Oleh karena itu, operasi sistem pembakaran hibrida memerlukan pemantauan kandungan metana, tekanan, laju alir, dan nilai kalor biogas. Hasil pemantauan tersebut dapat digunakan untuk menyesuaikan suplai biomassa agar produksi uap tetap stabil.

Efisiensi Energi dan Pemanfaatan Limbah

Pemanfaatan biogas POME memberikan nilai tambah terhadap limbah cair pabrik kelapa sawit. POME yang sebelumnya menjadi beban pengolahan dapat digunakan untuk menghasilkan energi termal. Pendekatan tersebut mendukung efisiensi penggunaan sumber daya dan pengembangan sistem produksi yang lebih berkelanjutan.

Integrasi sistem biogas-burner-boiler juga dapat mengurangi pelepasan metana hasil pengolahan anaerobik ke atmosfer apabila biogas ditangkap dan dimanfaatkan secara efektif. Namun, pengurangan emisi perlu ditentukan melalui analisis kuantitatif yang mencakup volume biogas, kandungan metana, efisiensi pembakaran, dan kemungkinan kebocoran pada sistem.

Secara keseluruhan, hasil penelitian memperkuat potensi pemanfaatan biogas POME dalam sistem pembakaran hibrida. Sistem tersebut dapat menjadi alternatif untuk mengoptimalkan energi dari limbah dan mengurangi ketergantungan terhadap serat serta cangkang sawit. Meskipun demikian, efektivitas penerapan pada skala yang lebih luas perlu dikaji berdasarkan kestabilan pasokan biogas, efisiensi termal, biaya investasi, biaya operasional, keselamatan sistem, dan dampak lingkungan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, biogas yang dihasilkan dari pengolahan *Palm Oil Mill Effluent* memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada boiler biomassa di pabrik kelapa sawit. Meskipun nilai kalor dan komposisinya berfluktuasi, biogas POME tetap dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar substitusi parsial terhadap serat dan cangkang sawit.

Integrasi sistem biogas-burner-boiler mampu beroperasi secara stabil pada kondisi pengujian tanpa memerlukan modifikasi besar terhadap struktur utama boiler eksisting. Pemanfaatan biogas tidak mengganggu kestabilan pembakaran maupun kontinuitas pembangkitan uap.

Pada kondisi operasional yang dianalisis, serat dan cangkang sawit tersedia masing-masing sekitar 9,10 ton/jam dan 4,55 ton/jam. Kontribusi energi dari biogas dapat mengurangi sebagian kebutuhan terhadap kedua bahan bakar biomassa padat

tersebut. Besarnya substitusi bergantung pada ketersediaan, kandungan metana, nilai kalor, dan laju alir biogas.

Dengan demikian, sistem biogas-burner-boiler layak secara teknis diterapkan sebagai solusi untuk mengoptimalkan pemanfaatan limbah POME, meningkatkan efisiensi penggunaan energi internal, dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar biomassa padat. Evaluasi lanjutan diperlukan untuk menentukan efisiensi termal, kelayakan ekonomi, pengurangan emisi, dan keandalan sistem dalam pengoperasian jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT XYZ atas dukungan fasilitas dan data operasional yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana atas bimbingan akademik serta dukungan sarana dan prasarana yang menunjang kelancaran penelitian. Penulis juga menyampaikan penghargaan kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- A Aziz, M. M., Kassim, K. A., ElSergany, M., Anuar, S., Jorat, M. E., Yaacob, H., Ahsan, A., Imteaz, M. A., & Arifuzzaman. (2020). Recent advances on palm oil mill effluent pretreatment and anaerobic reactor for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, Article 109603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109603>
- Chusna, F. M. A., Mellyanawaty, M., & Nofiyanti, E. (2020). Peningkatan produksi biogas dari *palm oil mill effluent* (POME) dengan fluidisasi media zeolit termodifikasi pada sistem *batch*. *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(1), 31–40. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.56133>
- Hakim, D. L., & Valentino, N. (2019). Tekno ekonomi pemanfaatan biogas berbasis POME untuk pembangkit listrik, bahan bakar boiler, dan Bio-CNG. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 18(2), 73–81.
- Harsi, D. R. (2022). *Analisis penggunaan biogas sebagai bahan bakar alternatif pada boiler* [Skripsi, Universitas Medan Area]. Repositori Universitas Medan Area. <https://repository.uma.ac.id/handle/123456789/18919>
- Hoo, R., Lee, L. F., & Low, M. (2020). *Producing biogas from palm oil mill effluent in Southeast Asia: The green elephant in the room?* Energy Studies Institute, National University of Singapore.
- Laksono, A. (2024). *Pemanfaatan gas metana berlebih dari POME untuk bahan bakar boiler di PKS Rama-Rama* [Skripsi, Institut Teknologi Sains Bandung]. Repositori Institut Teknologi Sains Bandung. <https://repository.itsb.ac.id/id/eprint/471>
- Rajani, A., Kusnadi, Santosa, A., Saepudin, A., Gobikrishnan, S., & Andriani, D. (2019). Review on biogas from palm oil mill effluent (POME): Challenges and opportunities in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 293, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/293/1/012004>

- Ramana, S. S., Noor, Z. Z., Narolhisa, S. S. S., Chong, C. S., & Stringer, L. C. (2019). Energy generation from palm oil mill effluent: The environmental impact perspective. *Chemical Engineering Transactions*, 72, 25–30. <https://doi.org/10.3303/CET1972005>
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Sari, D. A. P., Fadiilah, D., & Azizi, A. (2019). Utilization of palm oil mill effluent for biogas power plant: Its economic value and emission reduction. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 11(7), 357–363. <https://repository.bakrie.ac.id/3185/>
- Sodri, A., & Septriana, F. E. (2022). Biogas power generation from palm oil mill effluent (POME): Techno-economic and environmental impact evaluation. *Energies*, 15(19), Article 7265. <https://doi.org/10.3390/en15197265>
- Sucahyo, B., Hakim, D. L., Ridlo, R., Rini, T. P., & Sari, E. R. (2019). Kajian teknologi pemanfaatan biogas POME (*Palm Oil Mill Effluent*) ke boiler. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 13(1), 43–54.
- Susilowati, Putri, S. A., & Farwah, Z. A. (2023). Pra-rancang pabrik biogas dari *palm oil mill effluent* (POME) dengan kapasitas 12.000 ton/tahun. *Jurnal Tugas Akhir Teknik Kimia*, 6(2), 116–122.
- Valentino, N., Hakim, D. L., Anindita, H. N., & Hastuti, Z. D. (2018). Perencanaan produksi biogas dari *palm oil mill effluent* untuk pembangkit listrik: Studi kasus Pabrik Kelapa Sawit Sei Pagar. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 14(2), 43–50.