

OPTIMASI INJEKSI OKSIGEN TERHADAP PERFORMA SISTEM BIO-SCRUBBER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BIOGAS (PLTBG) MENGGUNAKAN *LINEAR PROGRAMMING*

Fahrur Riza Priyana^{*}, Muhammad Fikri², M. Rizky Ismail³, Ubaidah⁴

^{1,2,4}Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung; Jl. Prof. Dr. Ir. Soemantri Brojonegoro No. 1, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, 35141

³Program Studi Teknik Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung; Jl. Prof. Dr. Ir. Soemantri Brojonegoro No. 1, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, 35141

Keywords:

Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg);
Linear Programming;
Injeksi Oksigen; Hidrogen Sulfida (H₂S), Bio-Scrubber

Correspondent Email:

fahrurizap@eng.unila.ac.id^{*}

Abstrak. Konversi biogas menjadi energi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) melalui beberapa tahap, salah satunya proses desulfurisasi biogas didalam Bio-Scrubber, yaitu mekanisme injeksi oksigen untuk mereduksi Hidrogen Sulfida (H₂S) dengan menggunakan mikroorganisme pengoksidasi sulfur. Namun injeksi oksigen tanpa porsi yang tepat akan memicu campuran eksplosif yang membahayakan bagi operasional Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Risiko korosif juga akan memberikan dampak buruk bagi seluruh komponen mesin gas apabila proses desulfurisasi biogas tidak dilakukan secara tepat. Namun injeksi oksigen yang berlebih juga akan berdampak pada pengurangan ekstrem terhadap konsentrasi metana dalam biogas. Penelitian ini memodelkan optimasi pengaturan injeksi oksigen yang tepat dengan setiap kendala dan syarat yang berlaku pada operasional Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) menggunakan *Linear Programming*. Simulasi optimasi diujicobakan dengan menggunakan data parameter operasional Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) 1.5MW yang berlokasi di Lampung Tengah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaturan injeksi oksigen sebesar 1.94% mampu mencapai reduksi Hidrogen Sulfida (H₂S) sebesar 100ppmv dan memenuhi syarat operasional proses pengolahan biogas menjadi bahan bakar dalam Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg).



JITET is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Abstract. The conversion of biogas into electricity in Biogas Power Plant goes through several stages, one of which is the biogas desulfurization process in the Bio-Scrubber, which is an oxygen injection mechanism to reduce Hydrogen Sulphide (H₂S) using sulphur-oxidizing microorganism. However, oxygen injection without the right portion will trigger an explosive mixture that is dangerous for the operation of the Biogas Power Plant. The risk of corrosion will also have a negative impact on all gas engine components if the biogas desulfurization process is not carried out properly. However, excessive oxygen injection will also have an impact on the extreme reduction of methane concentration in biogas. This study models the optimization of appropriate oxygen injection settings with every constraint and condition that applies to the operation of Biogas Power Plant using *Linear Programming*. The simulation was tested using parameter data from Biogas Power Plant 1.5MW located in Central Lampung. The simulation results show that an oxygen injection setting of 1.94% can achieve a reduction of Hydrogen Sulphide (H₂S) of 100ppmv and meets the operational requirements for the process of processing biogas into fuel in Biogas Power Plant.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan energi global yang disebabkan perkembangan dunia industrialisasi memberikan dampak terhadap krisis iklim dan lingkungan. Selain itu permintaan energi yang eksponensial tersebut mengakibatkan dunia industrialisasi ketergantungan pada bahan bakar fosil [1]. Sehingga pengembangan dan optimasi teknologi berbasis energi baru terbarukan menjadi solusi alternatif dalam mengatasi masalah tersebut. Salah satu teknologi berbasis energi terbarukan yang efektif dikembangkan pada sektor agroindustri adalah biogas. Pemanfaatan biogas menawarkan solusi ganda bagi pelaku usaha dibidang agroindustri, yaitu menghasilkan energi dan memitigasi masalah limbah [2]. Potensi bioenergi di Indonesia sangat besar mencapai 32.6GW mencakup biogas, biomass dan biofuel [3]. Berdasarkan data tersebut menunjukkan bahwa biogas memiliki peran strategis dalam diversifikasi bauran energi nasional. Selain itu, data tersebut juga menunjukkan bahwa pada sektor energi sangat berpeluang sebagai sasaran dalam transisi energi mengurangi emisi karbon akibat bahan bakar fosil [4].

Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) merupakan pembangkit yang memanfaatkan gas metana pada biogas untuk menghasilkan energi mekanik dalam menghasilkan energi listrik. Proses konversi biogas dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, yaitu kualitas kandungan biogas salah satunya Hidrogen Sulfida (H_2S) [5]. Hidrogen Sulfida yang tinggi akan berdampak pada keandalan mesin gas (*gas engine*), dikarenakan H_2S bersifat korosif terhadap komponen mesin [6].

Oleh karena itu proses desulfurisasi merupakan tahapan yang sangat penting pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Salah satu metode biologis yang dinilai efektif untuk proses desulfurisasi adalah dengan injeksi udara berupa oksigen dalam jumlah kecil [7]. Mekanisme injeksi udara dilakukan didalam Bio-Scrubber, yaitu sistem berupa tangki yang berfungsi untuk mereduksi Hidrogen Sulfida (H_2S) dengan menggunakan mikroorganisme pengoksidasi sulfur. Namun injeksi oksigen tanpa porsi yang tepat akan memicu campuran eksplosif yang membahayakan bagi operasional Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Berdasarkan standar keamanan NFPA 820, konsentrasi

oksigen dalam biogas yang telah diolah harus dibatasi hingga 2% volume untuk mencegah pembentukan campuran eksplosif dengan metana[8].

Penelitian ini memodelkan optimasi linear untuk menyeimbangkan pemenuhan beban listrik yang fluktuatif terhadap ketersediaan biogas dengan memperhitungkan injeksi oksigen yang minimal agar desulfurisasi dapat dicapai secara optimal. Sehingga pemodelan pada penelitian ini dapat menjadi salah satu solusi pengambilan keputusan yang inovatif bagi operator Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) untuk mencapai operasional yang efisien dan andal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) menggunakan biogas sebagai bahan bakar utama dalam proses pembakaran di dalam *combustion chamber* untuk menghasilkan energi mekanik guna menggerakkan generator. PLTBg memiliki sistem komponen utama dalam proses pengolahan biogas menjadi energi listrik, yaitu (a) *Biological process system*, (b) *Biogas purification system*, (c) *Biogas handling system*, dan (d) *Power generation system* [9]. *Lower Heating Value* metana merupakan parameter utama sebagai potensi energi biogas, yang kemudian dapat dikonversi menjadi energi listrik [10].

Hidrogen Sulfida (H_2S) merupakan bagian unsur yang terdapat di dalam biogas. Namun sifat korosif H_2S memberikan dampak negatif terhadap kondisi mesin gas (*gas engine*). Biogas yang dihasilkan dari Digester masih memiliki konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) yang relatif tinggi yaitu sekitar 1000-2000 ppm [11]. Konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) yang bernilai tinggi akan mengakibatkan korosi pada komponen didalam pembangkit mesin gas (*gas engine*) sehingga akan mengurangi masa umurnya (*machine lifetime*) [12]. Hal ini dapat mengakibatkan penurunan efisiensi, peningkatan biaya operasional, dan risiko kerusakan sistem [13]. Oleh karena itu, konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) perlu direduksi (desulfurisasi) untuk memenuhi standar operasional mesin gas (*gas engine*). Salah satu metode desulfurisasi yang efektif adalah desulfurisasi secara biologis, yaitu diperlukan injeksi oksigen untuk mendukung

proses oksidasi H_2S menjadi sulfur elemental oleh mikroorganisme. Rasio stoikiometri oksigen terhadap H_2S merupakan parameter penting dalam proses desulfurisasi biologis sesuai dengan reaksi $2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O$ [14]. Namun injeksi oksigen yang terlalu banyak akan mengakibatkan konsentrasi metana berkurang [9], sehingga hal tersebut akan berdampak pada penurunan kinerja mesin gas (*gas engine*).

Linear Programming merupakan teknik optimasi yang digunakan untuk menemukan solusi dari suatu fungsi objektif linier dengan berdasarkan serangkaian kendala linier [15]. Penggunaan metode *Linear Programming* untuk menentukan nilai injeksi oksigen minimum yang sesuai merupakan upaya strategis dalam mengoptimalkan laju alir biogas, daya listrik yang dibangkitkan dan Hidrogen Sulfida (H_2S) yang direduksi.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pemodelan Optimasi Matematis

Penelitian ini fokus pada pemodelan dan optimasi matematis, dimana model *Linier Programming* dikembangkan untuk merepresentasikan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Model optimasi matematis ini memiliki fungsi objektif untuk meminimalkan laju injeksi oksigen ($O_{2,inj}$) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1).

$$\text{Min. } Z = O_{2,inj} \quad (1)$$

Variabel Z adalah nilai laju injeksi oksigen $O_{2,inj}$ optimal yang merupakan target dari model optimasi yang didasarkan pada kendala persamaan (2).

$$P_{gen} = Q_{bg} \times H \times \eta_{el} \quad (2)$$

Variabel P_{gen} adalah daya listrik yang dibangkitkan oleh generator (kW), Q_{bg} adalah laju alir biogas (m^3/h), η_{el} adalah efisiensi generator dan H merupakan nilai konstanta *Lower Heating Value* ($9.94 \text{ kWh}/m^3$). Proses desulfurisasi mengakibatkan adanya pengurangan konsentrasi metana yang disebut sebagai *methane oxidation factor* (F_{ox}), sehingga akan berdampak pada daya listrik yang dibangkitkan oleh generator. Adanya proses desulfurisasi, mengakibatkan adanya penyesuaian pada persamaan (2) menjadi persamaan (3) [16][17].

$$P_{gen} = (Q_{bg} \cdot \alpha) \times H \times \eta_{el} \quad (3), \text{ dimana}$$

$$\alpha = C_{CH_4,in} - V_{CH_4,lost} \quad (4)$$

$C_{CH_4,in}$ merupakan fraksi volume metana (%) dalam biogas dan $V_{CH_4,lost}$ merupakan volume metana (m^3/jam) yang berkurang akibat oksidasi sebagaimana pada persamaan (5) [18].

$$V_{CH_4,lost} = O_{2,inj} \cdot F_{ox} \quad (5)$$

Model optimasi juga didasarkan pada kendala volume Hidrogen Sulfida (H_2S) yang dihilangkan tidak dapat melebihi total Hidrogen Sulfida (H_2S) yang masuk ke dalam sistem Bio-Scrubber seperti yang ditunjukkan pada pertidaksamaan (6) [19].

$$V_{H_2S,rem} \leq Q_{bg} \cdot C_{H_2S,in} \quad (6)$$

dimana $V_{H_2S,rem}$ merupakan volume Hidrogen Sulfida (H_2S) yang dapat dihilangkan dalam satuan per jam (m^3/jam) dan variabel $C_{H_2S,in}$ adalah konsentrasi fraksi H_2S yang masuk ke dalam sistem Bio-Scrubber. Kendala lain yang digunakan pada model optimasi ini bahwa konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) yang dihilangkan perlu dibatasi oleh jumlah oksigen yang diinjeksikan dan efisiensi sistem Bio-Scrubber sesuai dengan pertidaksamaan (7).

$$V_{H_2S,rem} \leq O_{2,inj} \cdot R \cdot \eta_{scr} \quad (7)$$

dimana R merupakan rasio stoikiometri empiris antara O_2 dan H_2S , sedangkan η_{scr} efisiensi sistem Bio-Scrubber. Konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) *outlet* sistem Bio-Scrubber harus lebih rendah dari atau sama dengan target yang ditetapkan seperti yang ditunjukkan pada pertidaksamaan (8).

$$(Q_{bg} \cdot C_{H_2S,in}) - V_{H_2S,rem} \leq Q_{bg} \cdot C_{H_2S,out} \quad (8)$$

dimana $C_{H_2S,out}$ merupakan konsentrasi fraksi volume Hidrogen Sulfida (H_2S) target di *outlet* sistem Bio-Scrubber. Kendala berupa batasan oksigen juga diakomodir dalam model optimasi ini agar pengaturan injeksi oksigen tidak boleh menyebabkan konsentrasi oksigen pada *outlet* sistem Bio-Scrubber melebihi batas aman ($C_{O_2,max}$) yaitu 2% sesuai standar NFPA 820, batasan ini dituangkan pada pertidaksamaan (9).

$$O_{2,inj} \leq Q_{bg} \cdot C_{O_2,max} \quad (9)$$

Volume metana yang tereduksi ($V_{CH_4,lost}$) akibat proses desulfurisasi, tidak diizinkan melebihi total metana yang masuk ke sistem, batasan tersebut sebagaimana dituangkan pada pertidaksamaan (10).

$$V_{CH_4,lost} \leq Q_{bg} \cdot C_{CH_4,in} \quad (10)$$

$$Q_{bg}, O_{2,inj}, P_{gen}, V_{H_2S,rem}, V_{CH_4,lost} \geq 0 \quad (11)$$

Semua variabel pada setiap persamaan dan pertidaksamaan harus bernilai positif atau nol, maka pertidaksamaan (11) mengakomodir syarat tersebut.

3.2. Data dan Skenario Simulasi Optimasi

Data parameter berupa $C_{CH_4,in}$, R , F_{ox} , η_{el} , $V_{H_2S,rem}$, dan $C_{H_2S,in}$ yang digunakan sebagai referensi dalam perhitungan simulasi ini berdasarkan data operasional Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) 1.5MW yang berlokasi di Lampung Tengah sebagaimana yang ditunjukkan pada tabel 1.

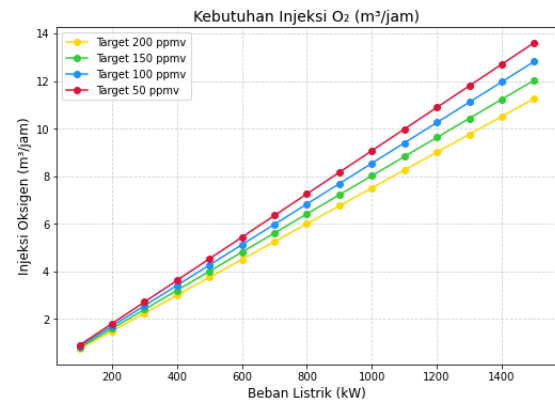
Tabel 1. Data Parameter Simulasi Optimasi

Parameter	Nilai
$C_{CH_4,in}$	60%
R	21.07
F_{ox}	2.98
η_{el}	42%
$V_{H_2S,rem}$	98%
$C_{H_2S,in}$	1000 ppmv
$C_{H_2S,outlet}$ (target)	≤ 200 ppmv

Simulasi ini mengoptimalkan operasi pembangkit dengan menguji empat skenario target Hidrogen Sulfida (H_2S) pada *outlet* sistem Bio-Scrubber, yaitu 200 ppmv, 150 ppmv, 100 ppmv, dan 50 ppmv. Tujuan dari simulasi optimasi ini adalah untuk membandingkan hasil setiap skenario guna mendapatkan pengaturan injeksi oksigen yang tepat pada sistem Bio-Scrubber. Sehingga dapat ditentukan rasio pembangkitan daya listrik yang optimal dengan mempertimbangkan perubahan daya listrik yang dibangkitkan oleh generator dan Hidrogen Sulfida (H_2S) yang dikontrol pada Bio-Scrubber.

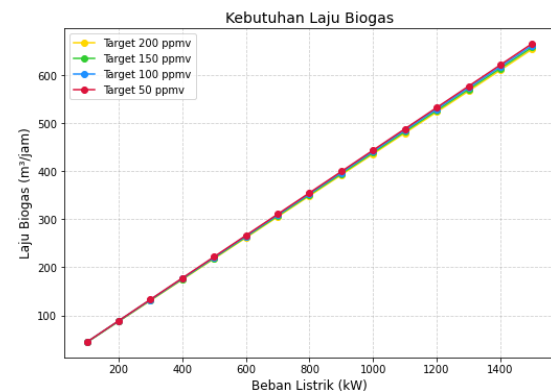
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil simulasi menunjukan bahwa injeksi oksigen sangat berpengaruh pada proses desulfurisasi dalam mereduksi konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) di dalam biogas. Semakin tinggi nilai oksigen yang diinjeksikan ke dalam sistem Bio-Scrubber maka konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) *outlet* di dalam biogas akan semakin rendah, hal ini sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.



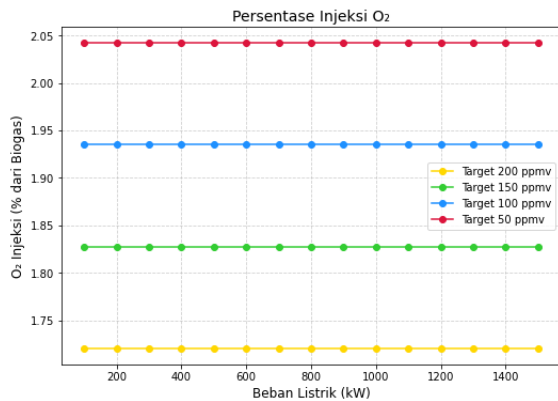
Gambar 1. Kebutuhan injeksi oksigen terhadap proses desulfurisasi pada PLTBg.

Meningkatnya injeksi oksigen pada proses desulfurisasi pada PLTBg juga berdampak pada meningkatnya laju biogas yang diperlukan dalam pembangkitan daya listrik. Hal ini sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2 bahwa laju biogas yang diperlukan lebih besar untuk mencapai Hidrogen Sulfida (H_2S) 5 ppmv dibandingkan untuk mencapai Hidrogen Sulfida (H_2S) 200 ppmv, 150ppmv dan 100ppmv pada pembangkitan daya listrik.



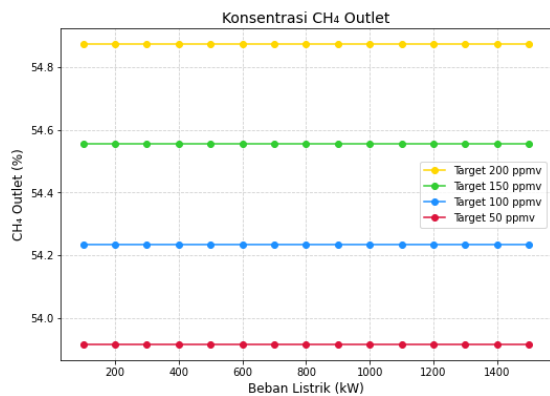
Gambar 2. Hubungan kebutuhan laju biogas terhadap proses desulfurisasi pada PLTBg.

Pengaturan injeksi oksigen dalam proses desulfurisasi pada sistem Bio-Scrubber berdampak pada menurunnya konsentrasi metana dalam biogas, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Persentase injeksi oksigen terhadap proses desulfurisasi pada PLTBg.

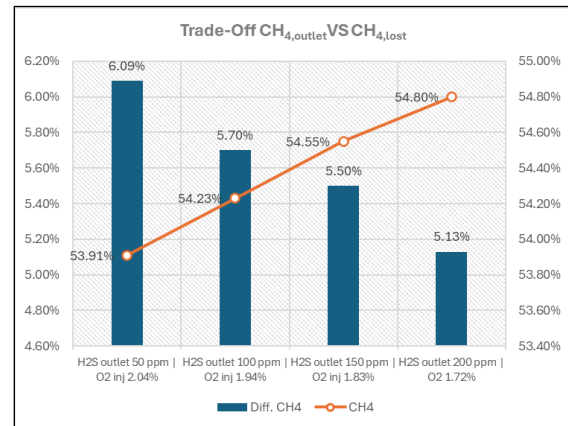
Namun nilai injeksi oksigen pada skenario 4 untuk mencapai Hidrogen Sulfida (H_2S) outlet 50ppmv adalah 2.04%. Nilai tersebut telah melampaui batas aman untuk mencegah terbentuknya campuran eksplosif dengan metana di dalam Bio-Scrubber.



Gambar 4. Dampak proses desulfurisasi terhadap penurunan konsentrasi metana pada PLTBg

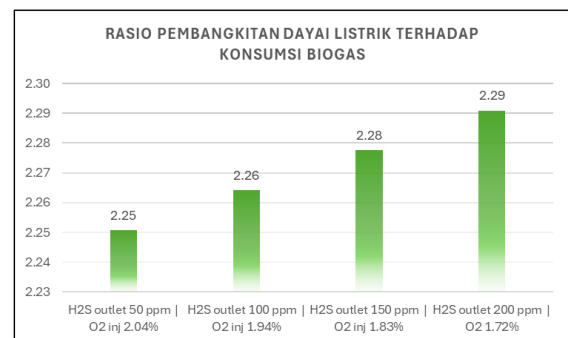
Skenario untuk mencapai target Hidrogen Sulfida (H_2S) outlet 50 ppmv dengan injeksi oksigen 2.04% memberikan dampak penurunan metana lebih besar yaitu konsentrasi metana turun dari 60% menjadi 53.91% dibandingkan dampak penurunan konsentrasi metana dari skenario 1 (injeksi oksigen 1.72%), skenario 2 (injeksi oksigen 1.83% dan skenario 3 (injeksi oksigen 1.94%). Penurunan konsentrasi metana terjadi seiring rendahnya nilai Hidrogen Sulfida (H_2S) outlet yang ingin dicapai sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 5. Pada skenario 4, konsentrasi metana mengalami penurunan hingga nilai 53.91% ketika injeksi oksigen diatur 2.04% untuk mencapai Hidrogen Sulfida

(H_2S) outlet 50 ppmv. Sementara pada skenario 1 ketika injeksi oksigen diatur 1.72% untuk mencapai Hidrogen Sulfida (H_2S) outlet 200 ppmv, metana hanya mengalami penurunan dari 60% menjadi 54.80%.



Gambar 5. Trade-Off penurunan metana terhadap H_2S outlet yang ingin dicapai.

Konsentrasi metana sangat berpengaruh pada pembangkitan daya listrik pada PLTBg. Injeksi oksigen dalam proses desulfurisasi pada Bio-Scrubber mengakibatkan konsentrasi mengalami penurunan sehingga berdampak pada rasio pembangkitan daya listrik terhadap konsumsi biogas yang merupakan *Electricity ratio* sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar. 6.



Gambar 6. Rasio pembangkitan daya listrik terhadap konsumsi biogas

Berdasarkan rangkuman data hasil simulasi yang ditunjukkan pada tabel 2 dan mempertimbangkan standar NFPA 820 bahwa konsentrasi oksigen dalam biogas yang telah diolah harus dibatasi tidak melebihi 2% volume untuk mencegah potensi pembentukan campuran eksplosif dengan metana. Skenario 4

memiliki resiko rentan dekat dengan potensi tersebut.

Tabel 2. Perbandingan Nilai H_2S outlet terhadap injeksi oksigen

Skenario	$O_{2,inj}$	$C_{H_2S,in}$	$C_{H_2S,out}$
1	1.72%	1000ppmv	200ppmv
2	1.83%	1000ppmv	150ppmv
3	1.94%	1000ppmv	100ppmv
4	2.04%	1000ppmv	50 ppmv

Oleh karena itu, skenario 3 yaitu dengan injeksi oksigen 1.94% dengan target Hidrogen Sulfida (H_2S) outlet 100ppmv merupakan pengaturan yang tepat dengan pertimbangan faktor keamanan.

Tabel 3. Perbandingan Nilai CH_4 outlet dan r terhadap injeksi oksigen

Skenario	$O_{2,inj}$	$C_{CH_4,in}$	$C_{CH_4,out}$	r
1	1.72%	60%	54.80%	2.29
2	1.83%	60%	54.55%	2.28
3	1.94%	60%	54.23%	2.26
4	2.04%	60%	53.91%	2.25

Berdasarkan data CH_4 outlet dan rasio pembangkitan daya listrik terhadap konsumsi biogas (r) sebagaimana yang ditunjukkan pada tabel 3, skenario 3 memiliki nilai CH_4 outlet di 54.23% dan menghasilkan rasio pembangkitan daya listrik sebesar 2.26 merupakan pilihan pengaturan yang dinilai tepat dan aman.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data, pengaturan nilai injeksi oksigen yang optimal adalah sebesar 1.94% untuk mencapai target konsentrasi Hidrogen Sulfida (H_2S) di outlet sebesar 100 ppmv (skenario 3). Keputusan ini didasarkan pada temuan bahwa perbedaan *electricity ratio* antar skenario pengaturan injeksi oksigen yang tidak signifikan. Maka dari itu, pengaturan injeksi oksigen sebesar 1.94% dipilih sebagai langkah strategis untuk mencapai target H_2S dan sekaligus mencegah potensi korosi pada *gas engine*.

Namun, jika skenario 4 dipilih, meskipun menunjukkan nilai Hidrogen Sulfida (H_2S)

outlet yang rendah 50ppmv dan nilai *electricity ratio* yang hanya sedikit berbeda dibandingkan skenario 3 & skenario 4, namun memiliki risiko terhadap potensi pembentukan campuran eksplosif dengan metana lebih rentan terjadi. Dengan demikian, hasil optimasi ini tidak hanya memberikan rekomendasi teknis terhadap pengaturan injeksi oksigen dalam proses desulfurisasi pada Bio-Scrubber, tetapi juga mempertimbangkan aspek keberlanjutan aset, terutama dalam menjaga keandalan (*reliability*) dan memperpanjang umur pakai (*Remaining Useful Life/RUL*) dari peralatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen PLTBg 1.5MW Lampung Tengah yang telah berkenan memberikan data parameter operasional untuk keperluan analisis dalam penelitian ini. Ucapan terimakasih juga penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah berpartisipasi dan berkontribusi hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Appels, J. Baeyens, and J. Degreè, "Principles and Parameters of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 755–781, 2008.
- [2] P. Weiland, "Biogas Production: Current State and Future Trends," IEA Bioenergy, Task 37, Report, 2010.
- [3] A. R. T. D. Putra et al., "A Comprehensive Review of Renewable Energy Sources in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, Art. no. 2342, 2023.
- [4] H. Gusmedi, R. P. Putra, and A. S. Samosir, "Desain Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) On-Grid 60 kWp," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 13, 2025.
- [5] A. Wellinger, J. Lund Pedersen, and T. Holm-Nielsen, Eds., *Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2013.
- [6] P. G. Kougiass and I. Angelidaki, "Biohydrogen and Biogas," in *Bioprocessing for Value-Added Products*. Cambridge, MA: Academic Press, 2018, pp. 417–434.
- [7] J. M. Ramos-Ruiz, M. B. A. Varesche, and E. Foresti, "Biological Desulfurization of

- Biogas in Bioreactors: A Review," *J. Clean. Prod.*, vol. 213, pp. 297–310, 2019.
- [8] NFPA 820: Standard for Fire Protection in Wastewater Treatment and Collection Facilities, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2020.
- [9] F. R. Priyana et al., "Perancangan Sistem Informasi dan Akuisisi Data Operasional Berbasis Internet of Thing pada Pembangkit Listrik Tenaga Biogas," *Jurnal Bisantara Informatika*, vol. 8, no. 2, 2024.
- [10] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [11] N. Abatzoglou and S. Boivin, "A Review of Biogas Purification Processes," *Biofuels*, *Bioprod. Biorefin.*, vol. 3, no. 1, pp. 42–71, 2009.
- [12] P. B. Cherosky, "Anaerobic Digestion of Yard Waste and Biogas Purification by Removal of Hydrogen Sulfide," M.S. thesis, Dept. Food, Agric. Biol. Eng., The Ohio State University, Columbus, OH, 2012.
- [13] M. F. Rahman, I. Hasan, and R. Yusuf, "Sistem Pemantauan Operasional Berbasis IoT pada Pembangkit Energi Terbarukan," *Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 10, no. 1, pp. 45–52, 2021.
- [14] G. Soreanu, V. Beldean-Galea, C. Bumbac, and M. Popescu, "Biological Desulfurization of Biogas: A Review," *Process Biochem.*, vol. 59, Part A, pp. 1–10, Aug. 2017.
- [15] W. L. Winston, *Operations Research: Applications and Algorithms*, 4th ed. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole, 2004.
- [16] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, 11th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2021.
- [17] L. T. Biegler, I. E. Grossmann, and A. W. Westerberg, *Systematic Methods of Chemical Process Design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [18] M. Fortuny, X. Gamisans, M. A. Deshusses, and J. Lafuente, "Biological Sweetening of Biogas in a Biotrickling Filter: A Study of the Optimal Oxygen to Hydrogen Sulfide Ratio and the Methane Losses," *Water Sci. Technol.*, vol. 57, no. 2, pp. 263–270, 2008.
- [19] I. Ramos, R. Pérez, and M. Fdz-Polanco, "Model-Based Evaluation of Control Strategies for Biotrickling Filters for Biogas Desulphurisation: Optimal O₂/H₂S Ratio," *Chem. Eng. J.*, vol. 255, pp. 590–597, 2014.