

Evaluasi Akurasi Simulasi Superpro Designer Pada Produksi Biogas Biodigester Beton Tipe *Lay-Down* Skala Domestik dengan Sistem Resirkulasi

Riski Gunawan Nasution^{1*}, Ryoshi Meijisa Reigi Putra¹, Khairul Akli¹, Dedy Rahmad²

¹ Program Studi Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Departemen Teknik Kimia, Politeknik ATI Padang

² Program Studi Teknik Kimia Bahan Nabati, Departemen Teknik Kimia, Politeknik ATI Padang
Jalan Bungo Pasang, Tabing - Padang 25171

*Corresponding Email: mhdriski200408@gmail.com

Abstrak

Simulasi proses menggunakan perangkat lunak telah banyak dimanfaatkan untuk memprediksi kinerja biodigester anaerobik, namun validasi terhadap data eksperimen pada biodigester beton skala domestik masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi akurasi perangkat lunak SuperPro Designer dalam memprediksi produksi dan komposisi biogas pada biodigester beton tipe lay-down skala domestik yang dilengkapi sistem resirkulasi menggunakan pompa sentrifugal. Biodigester beton dengan volume kerja 170 L dioperasikan menggunakan umpan kotoran sapi dan air dengan perbandingan 1:3 selama 22 hari pada suhu lingkungan 27–32 °C. Simulasi dilakukan menggunakan SuperPro Designer versi 13.0 dengan parameter literatur pada kondisi mesofilik (37 °C), menghasilkan prediksi produksi biogas sebesar 10,8765 m³/batch dengan komposisi metana 59,81%, CO₂ 31,66%, H₂ 4,59%, dan H₂S 22,34 ppm. Hasil eksperimen duplo menunjukkan produksi biogas total sebesar 0,78366–0,88956 m³ dengan kandungan metana 71–73%, CO₂ 25%, H₂ 1%, dan H₂S 8,2–9,4 ppm. Evaluasi akurasi menunjukkan deviasi yang sangat signifikan dengan nilai RMSE sebesar 10,04 m³ dan Relative RMSE sebesar 1.200,08%, di mana simulasi menghasilkan overestimation hingga lebih dari 12 kali lipat dibandingkan hasil eksperimen. Deviasi ekstrem ini terutama disebabkan oleh perbedaan suhu operasi antara simulasi (37 °C) dan eksperimen (27–32 °C), keterbatasan parameter kinetika default, serta potensi ketidaksesuaian satuan dan basis perhitungan dalam simulasi. Penelitian ini menegaskan bahwa SuperPro Designer tidak akurat untuk prediksi kuantitatif produksi biogas pada biodigester beton skala domestik tanpa kalibrasi parameter yang ekstensif berbasis data eksperimen

Kata kunci: anaerobic digestion, biodigester beton, SuperPro Designer, simulasi proses, biogas.

Abstract

Process simulation software has been widely used to predict anaerobic biodigester performance; however, validation against experimental data from domestic-scale concrete biodigesters remains limited. This study evaluated the accuracy of SuperPro Designer in predicting biogas production and composition in a domestic-scale, lay-down concrete biodigester equipped with a centrifugal-pump recirculation system. The biodigester, with a working volume of 170 L, was operated for 22 days at an ambient temperature of 27–32 °C using cow manure and water at a 1:3 ratio. Simulation using SuperPro Designer version 13.0 and literature-derived parameters under mesophilic conditions (37 °C) predicted 10.8765 m³/batch of biogas containing 59.81% methane, 31.66% CO₂, 4.59% H₂, and 22.34 ppm H₂S. Duplicate experiments yielded only 0.78366–0.88956 m³ of biogas, containing 71–73% methane, 25% CO₂, 1% H₂, and 8.2–9.4 ppm H₂S. The RMSE and relative RMSE were 10.04 m³ and 1,200.08%, respectively, indicating an overestimation exceeding twelvefold. This substantial deviation resulted primarily from differences in operating temperature, limitations in default kinetic parameters, and possible inconsistencies in simulation units and calculation bases. Therefore, SuperPro Designer cannot accurately predict biogas production in domestic-scale concrete biodigesters without extensive calibration using experimental data.

Keywords: anaerobic digestion; concrete biodigester; SuperPro Designer; process simulation; biogas

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim global akibat peningkatan emisi gas rumah kaca dari penggunaan bahan bakar fosil mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Sektor energi merupakan kontributor utama emisi CO₂ antropogenik, sehingga transisi menuju sistem energi rendah karbon menjadi kebutuhan mendesak untuk menekan dampak perubahan iklim terhadap

lingkungan dan kehidupan manusia (Awe *et al.*, 2017).

Dalam konteks transisi energi, biomassa dan limbah organik memiliki peran strategis karena dapat dimanfaatkan secara kontinu serta berkontribusi terhadap pengelolaan limbah berkelanjutan. Pemanfaatan limbah organik sebagai sumber energi juga berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca

dari sistem pengelolaan limbah konvensional (Tufvesson *et al.*, 2013).

Salah satu teknologi utama dalam pemanfaatan biomassa adalah *anaerobic digestion* (AD), yaitu proses biologis bertahap yang melibatkan hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis untuk mengonversi bahan organik menjadi biogas dan digestat. Biogas umumnya mengandung 50–70% metana (CH₄) dan 30–50% karbon dioksida (CO₂), dengan kandungan minor berupa hidrogen sulfida (H₂S), hidrogen (H₂), dan uap air (Pilarski dan Pilarska, 2023).

Pengembangan biodigester skala domestik, khususnya di negara berkembang, menjadi penting karena mampu menyediakan energi terbarukan berbasis lokal sekaligus meningkatkan efisiensi pengelolaan limbah organik. Biodigester beton banyak diaplikasikan pada skala ini karena ketahanan material, biaya konstruksi relatif rendah, serta kemudahan implementasi. Salah satu konfigurasi yang berkembang adalah biodigester beton tipe *lay-down*, yang menawarkan stabilitas struktural dan kemudahan perawatan dibandingkan dengan konfigurasi konvensional (Winrock International, 2015). Selain desain reaktor, sistem pencampuran dan resirkulasi umpan juga berperan penting dalam menjaga homogenitas substrat dan stabilitas proses AD, terutama pada skala kecil (Pilarski dan Pilarska, 2023).

Seiring perkembangan teknologi digital, simulasi proses banyak digunakan untuk memprediksi kinerja AD tanpa membangun prototipe fisik. SuperPro Designer merupakan salah satu perangkat lunak yang luas digunakan untuk memodelkan produksi biogas dan telah dilaporkan mampu menghasilkan prediksi yang mendekati data eksperimen atau industri, khususnya pada sistem skala menengah hingga besar dengan kondisi operasi terkontrol (Esmacili-Faraj *et al.*, 2023; Heriyanti *et al.*, 2024; Abdalnmern *et al.*, 2024). Bahkan, dengan optimasi dan kalibrasi parameter, tingkat kesalahan simulasi pada sistem industri dapat ditekan hingga di bawah 3% (Kan *et al.*, 2023).

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada biodigester skala industri atau pilot dengan asumsi kondisi ideal, seperti suhu mesofilik konstan dan pencampuran sempurna. Studi yang mengevaluasi akurasi simulasi SuperPro Designer terhadap data eksperimen biodigester

beton skala domestik dengan operasi pada suhu lingkungan dan sistem resirkulasi masih sangat terbatas, meskipun kondisi aktual skala domestik sering kali jauh dari asumsi ideal simulasi (Winrock International, 2015). Perbedaan antara suhu mesofilik standar simulasi (37 °C) dan suhu operasi aktual biodigester domestik di iklim tropis (27–32 °C) secara kinetika dapat menurunkan laju pertumbuhan mikroorganisme metanogenik secara signifikan, namun implikasi kuantitatifnya belum pernah dikaji secara eksplisit dalam konteks validasi SuperPro Designer pada skala ini.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara kritis akurasi SuperPro Designer dalam memprediksi produksi dan komposisi biogas pada biodigester beton tipe *lay-down* skala domestik dengan sistem resirkulasi pompa sentrifugal. Studi ini secara eksplisit membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen aktual untuk mengidentifikasi tingkat deviasi dan keterbatasan model. Kontribusi utama penelitian ini adalah mengkuantifikasi secara sistematis besaran dan sumber deviasi SuperPro Designer pada kondisi sub-mesofilik skala domestik, sehingga memberikan acuan praktis bagi peneliti dan praktisi mengenai syarat kalibrasi minimal yang diperlukan sebelum perangkat lunak ini dapat digunakan secara andal pada aplikasi serupa.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Baku Umpan

Bahan baku utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kotoran sapi segar yang diperoleh dari Rumah Potong Hewan (RPH) Aie Pacah, Kota Padang, Sumatera Barat. Kotoran sapi diambil maksimal 2 jam setelah dikeluarkan dari ternak untuk menjaga aktivitas mikroorganisme anaerob. Air yang digunakan sebagai bahan pencampur berasal dari air sumur di lokasi penelitian dan diendapkan selama 24 jam sebelum digunakan. Karakteristik awal kotoran sapi yang dianalisis meliputi pH dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Analisis dilakukan di Laboratorium Pendidikan PT Wiwiadi Bintang Sains, Universitas Andalas.

2.2 Inokulum

Inokulum berupa rumen sapi segar diperoleh dari RPH yang sama dengan sumber kotoran sapi. Rumen sapi diambil segera setelah pemotongan ternak untuk memastikan populasi mikroorganisme metanogenik yang tinggi.

Inokulum disaring menggunakan ayakan 20 mesh untuk memisahkan partikel kasar dan ditambahkan sebanyak 1 L ke dalam biodigester pada tahap *start-up*.

2.3 Material Konstruksi Biodigester

Biodigester beton tipe *lay-down* dikonstruksi menggunakan cincin sumur beton pracetak yang diperoleh dari produsen lokal dan disambung menggunakan semen Portland. Sambungan pipa inlet, outlet, dan resirkulasi menggunakan pipa PVC berdiameter ½ inci yang direkatkan dengan lem PVC dan dilapisi sealant silikon untuk mencegah kebocoran.

2.4 Sistem Resirkulasi

Sistem resirkulasi menggunakan pompa sentrifugal Shimizu PS-128 BIT dengan daya listrik 0,125 kW. Pompa dihubungkan ke pipa resirkulasi dari outlet menuju inlet biodigester dan dilengkapi dengan *timer* otomatis untuk mengatur interval operasi.

2.5 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan perancangan dan konstruksi biodigester, pelaksanaan eksperimen produksi biogas, simulasi proses menggunakan SuperPro Designer, serta evaluasi akurasi simulasi terhadap data eksperimen.

2.5.1 Perancangan dan Konstruksi Biodigester

Biodigester dirancang dalam konfigurasi *lay-down* horizontal dengan volume total 254 L dan volume kerja 170 L. Volume kerja ditetapkan sebesar 67% dari volume total untuk menyediakan ruang kepala (*head space*) bagi akumulasi biogas. Biodigester berbentuk silinder horizontal dengan ujung setengah bola dan dinding beton bertulang setebal ±6 cm. Setelah konstruksi selesai, biodigester diuji kebocorannya dengan cara diisi air penuh dan didiamkan selama 24 jam. Tidak ditemukan kebocoran yang signifikan selama pengujian.

2.5.2 Persiapan Umpa

Kotoran sapi segar ditimbang dan dicampur dengan air bersih menggunakan perbandingan 1:5 (berdasarkan berat) hingga diperoleh volume total umpa sebesar 170 L sesuai volume kerja biodigester. Campuran diaduk secara manual selama ±15 menit hingga homogen sebelum dimasukkan ke dalam biodigester.

2.5.3 Pengoperasian Biodigester

Biodigester dioperasikan selama 22 hari dengan kondisi operasi sebagai berikut:

- Sistem operasi: *batch* dengan pengisian awal, dilanjutkan *semi-continuous* pada hari ke-7 hingga hari ke-20
- Suhu operasi: suhu lingkungan (27–32 °C)
- Volume kerja: 170 L
- Sistem resirkulasi: pompa sentrifugal dioperasikan selama 15 menit setiap 6 jam (4 kali per hari)

2.5.4 Pengukuran Produksi dan Komposisi Biogas

Produksi biogas diukur secara kumulatif setiap hari menggunakan metode pengukuran volume gas. Data volume harian digunakan untuk analisis kinerja eksperimen, sementara total produksi biogas di akhir periode (hari ke-22) digunakan untuk evaluasi akurasi simulasi. Komposisi biogas dianalisis menggunakan *Combustible Gas Detector* MESTEK CGD02 tipe B untuk mengukur gas mudah terbakar (CH₄ dan H₂) serta H₂S. Alat dikalibrasi menggunakan gas standar sebelum pengukuran. Konsentrasi CO₂ diperoleh melalui perhitungan selisih dari total komposisi gas.

2.6 Simulasi Proses Menggunakan SuperPro Designer

Simulasi proses *anaerobic digestion* dilakukan menggunakan perangkat lunak SuperPro Designer versi 13.0 (Intelligen Inc., USA). Simulasi dirancang untuk merepresentasikan kondisi eksperimen secara umum, namun terdapat perbedaan kondisi yang perlu dicatat: suhu simulasi ditetapkan pada 37 °C (kondisi mesofilik standar dalam perangkat lunak) sementara eksperimen berlangsung pada suhu lingkungan 27–32 °C. Selain itu, keluaran simulasi hanya berupa hasil akhir produksi biogas dan tidak menyediakan data produksi harian.

Parameter utama simulasi meliputi:

- Volume reaktor: 254 L
- Volume kerja: 170 L
- Suhu operasi: 37 °C (mesofilik)
- Tekanan operasi: 1 atm
- Waktu batch: 22 hari
- Yield metana: 0,35 L CH₄/g COD terdegradasi

Komposisi umpa dimodelkan sebagai *stock mixture* berdasarkan data literatur komposisi kotoran sapi pada basis kering. Perlu dicatat bahwa nilai *yield* metana sebesar 0,35 L CH₄/g COD merupakan parameter literatur yang belum diverifikasi terhadap data COD aktual umpa dalam penelitian ini, sehingga

berpotensi menjadi sumber ketidaksesuaian basis perhitungan antara simulasi dan eksperimen. Seluruh data hasil simulasi diekspor dalam format Microsoft Excel untuk analisis lebih lanjut.

2.7 Evaluasi Akurasi Simulasi

Akurasi simulasi dievaluasi dengan membandingkan hasil akhir simulasi dengan data eksperimen menggunakan parameter berikut:

1. Persentase kesalahan (Error Percentage) pada produksi biogas total dan komposisi biogas.
2. Root Mean Square Error (RMSE), dihitung berdasarkan perbedaan antara hasil simulasi dan dua pengulangan eksperimen pada total produksi biogas.
3. Relative RMSE (RRMSE) digunakan untuk menilai tingkat kesalahan relatif terhadap nilai rata-rata produksi biogas eksperimen.

Karena simulasi SuperPro Designer hanya menghasilkan keluaran akhir tanpa data produksi harian, evaluasi RMSE dilakukan menggunakan data total produksi biogas pada akhir periode fermentasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi Produksi dan Komposisi Biogas

Simulasi proses *anaerobic digestion* menggunakan SuperPro Designer versi 13.0 menghasilkan prediksi produksi biogas total sebesar 10,8765 m³ selama periode fermentasi 22 hari pada suhu mesofilik 37 °C. Simulasi ini hanya menghasilkan keluaran akhir produksi biogas tanpa data produksi harian, yang merupakan keterbatasan bawaan perangkat lunak pada mode *batch* tanpa integrasi kinetika dinamis.

Sebelum membahas komposisi, perlu ditegaskan terlebih dahulu dua perbedaan mendasar antara konfigurasi simulasi dan eksperimen: (1) suhu operasi: simulasi menggunakan suhu mesofilik standar 37 °C, sedangkan eksperimen berlangsung pada suhu lingkungan 27–32 °C; dan (2) sistem operasi: simulasi dikonfigurasi sebagai *batch* penuh selama 22 hari, sedangkan eksperimen menggunakan sistem *batch* pada tujuh hari pertama yang kemudian beralih ke *semi-continuous* pada hari ke-7 hingga ke-20. Perbedaan ini bukan merupakan kesalahan desain, melainkan konsekuensi keterbatasan SuperPro Designer yang tidak mendukung

pemodelan mode operasi hibrid *batch-semi-continuous* secara langsung. Kedua perbedaan tersebut perlu dipahami sebagai latar belakang dalam menafsirkan seluruh deviasi yang dibahas pada subbab berikutnya.

Komposisi biogas hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 1. Simulasi memprediksi kandungan metana sebesar 59,81%, karbon dioksida 31,66%, hidrogen 4,59%, dan hidrogen sulfida 22,34 ppm. Prediksi metana sebesar 59,81% masih berada dalam rentang umum biogas (50–70% CH₄) sebagaimana dilaporkan oleh Pilarski dan Pilarska (2023), namun berada di batas bawah rentang tersebut. Prediksi hidrogen sebesar 4,59% jauh melampaui nilai tipikal biogas yang umumnya di bawah 1% (Bouallagui *et al.*, 2009), mengindikasikan ketidakseimbangan pemodelan jalur metabolisme pada kondisi mesofilik yang diterapkan.

Tabel 1. Komposisi Biogas Hasil Simulasi SuperPro Designer

Komponen	Konsentrasi (%)
CH ₄	59,81 %
CO ₂	31,66 %
H ₂	4,59 %
H ₂ S	22,34 ppm

Mengenai kewajaran volume produksi, prediksi 10,8765 m³ dari biodigester 170 L setara dengan rasio produksi spesifik sekitar 64,0 L biogas/L reaktor. Sebagai pembanding, Abdalnmem *et al.* (2024) melaporkan produksi biogas dari simulasi SuperPro Designer pada skala yang lebih besar dengan umpan kotoran sapi menghasilkan sekitar 0,3–0,5 m³ biogas per kg VS (*volatile solids*) yang ditambahkan, sedangkan nilai empiris umum untuk kotoran sapi berada pada kisaran 0,2–0,3 m³/kg VS (Chuenchart *et al.*, 2024).

Dengan mempertimbangkan bahwa volume kerja 170 L dan umpan kotoran sapi pada perbandingan 1:3, kandungan VS dalam reaktor diperkirakan jauh di bawah nilai yang dibutuhkan untuk menghasilkan 10,8765 m³ biogas secara realistis. Hal ini mengonfirmasi bahwa nilai prediksi tersebut tidak wajar secara empiris dan kuat mengindikasikan adanya ketidaksesuaian basis perhitungan input pada simulasi, kemungkinan terkait interpretasi satuan antara m³ dan L, atau antara basis kering dan basah pada input COD dan VS.

3.2 Hasil Eksperimen Produksi dan Komposisi Biogas

Eksperimen produksi biogas dilakukan selama 22 hari menggunakan biodigester beton tipe *lay-down* dengan volume kerja 170 L dalam dua ulangan (duplo). Sistem operasi eksperimen menggunakan mode *batch* pada tujuh hari pertama untuk membangun populasi mikroorganisme, kemudian beralih ke *semi-continuous* dengan penambahan umpan berkala pada hari ke-7 hingga ke-20. Pilihan sistem *semi-continuous* ini dilakukan untuk mendekati kondisi operasi praktis biodigester domestik yang umum digunakan di lapangan, di mana pengguna secara rutin menambahkan limbah segar setiap beberapa hari (Winrock International, 2015).

Total produksi biogas berada pada rentang 0,78366 m³ (ulangan 1) hingga 0,88956 m³ (ulangan 2), dengan rata-rata 0,83661 m³ dan variabilitas antar ulangan sebesar $\pm 6,3\%$. Variabilitas ini berada dalam batas yang dapat diterima untuk skala domestik dan mencerminkan fluktuasi alami suhu lingkungan serta variasi kualitas umpan antar batch (Thamsiriroy dan Murphy, 2011). Kandungan metana relatif tinggi, yaitu 71–73%, karbon dioksida 25%, hidrogen 1%, dan hidrogen sulfida 8,2–9,4 ppm (Tabel 2). Kandungan metana tersebut berada pada batas atas rentang literatur (50–75%), konsisten dengan hasil yang dilaporkan Park *et al.* (2016) pada biodigester skala kecil dengan umpan limbah organik yang menunjukkan kandungan CH₄ hingga 70–75% pada kondisi operasi yang baik.

Tabel 2. Komposisi Biogas Hasil Eksperimen

Komponen	Eksperimen 1	Eksperimen 2
CH ₄	71 %	73 %
CO ₂	25 %	25 %
H ₂	1 %	1 %
H ₂ S	8,2 ppm	9,4 ppm

Tingginya kadar metana pada suhu 27–32 °C menunjukkan bahwa komunitas mikroorganisme yang terdapat secara alami dalam rumen sapi bersifat psikrotoleran dan mampu beradaptasi pada rentang suhu sub-mesofilik, sebagaimana dilaporkan oleh Tsegaye dan Leta (2023) yang menemukan bahwa proses metanogenesis dari limbah ternak masih berlangsung efektif pada suhu 28–33 °C dengan inokulasi rumen. Sistem resirkulasi pompa sentrifugal berkontribusi dalam menjaga homogenitas substrat dan distribusi

mikroorganisme di dalam reaktor, yang pada gilirannya mendukung efisiensi transfer massa dan stabilitas proses (Pilarski dan Pilarska, 2023).

3.3 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen

Perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan adanya perbedaan yang sangat signifikan baik pada produksi biogas total maupun pada komposisi gas (Tabel 3). Perbedaan ini tidak dapat diinterpretasikan secara sederhana sebagai "kesalahan simulasi," melainkan sebagai akumulasi deviasi yang bersumber dari perbedaan kondisi operasi (suhu dan mode operasi), keterbatasan parameter kinetika default, serta potensi ketidaksesuaian basis perhitungan input—sebagaimana akan diuraikan secara mekanistik pada subbab 3.4 hingga 3.6.

Tabel 3. Perbandingan Error Simulasi dengan Eksperimen 1 dan 2

Komponen	Error Eksperimen 1	Error Eksperimen 2
CH ₄	-18,71	-22,05
CO ₂	21,04	21,04
H ₂	78,21	78,21
H ₂ S	63,29	57,92

Simulasi cenderung meng-*underestimate* kadar metana dan meng-*overestimate* kadar hidrogen, karbon dioksida, serta hidrogen sulfida. Pola deviasi ini secara mekanistik konsisten dan dapat ditelusuri ke satu akar permasalahan yang sama: lemahnya pemodelan *interspecies hydrogen transfer* dalam kondisi parameter default SuperPro Designer, yang diperparah oleh perbedaan suhu operasi antara simulasi dan eksperimen. Studi evaluasi serupa oleh Heriyanti *et al.* (2024) pada simulasi SuperPro Designer untuk sistem biogas dari *palm oil mill effluent* juga melaporkan pola deviasi komposisi yang serupa ketika parameter kinetika tidak dikalibrasi terhadap kondisi aktual, meskipun dengan besaran deviasi yang lebih kecil karena kondisi operasi yang lebih mendekati asumsi mesofilik.

3.4 Analisis Deviasi: Pengaruh Perbedaan Suhu dan Sistem Operasi

Sebelum membahas deviasi per komponen, perlu ditekankan bahwa dua perbedaan kondisi operasi antara simulasi dan eksperimen yaitu suhu (37 °C vs. 27–32 °C) dan sistem operasi (*batch* penuh vs. *batch-semi-continuous*)—merupakan sumber deviasi yang

paling fundamental dan harus dipahami sebagai konteks untuk seluruh analisis berikutnya.

Pengaruh perbedaan suhu. Laju pertumbuhan mikroorganisme metanogenik mengikuti ketergantungan suhu yang dapat didekati dengan persamaan Arrhenius atau model empiris van't Hoff: untuk setiap penurunan 10 °C dari kondisi optimum mesofilik, konstanta laju reaksi biologis menurun sekitar 50–70% (Mokraoui *et al.*, 2023). Dengan demikian, perbedaan suhu 5–10 °C antara simulasi (37 °C) dan eksperimen (27–32 °C) secara inheren menghasilkan prediksi aktivitas biologis dan produksi biogas yang jauh lebih tinggi pada simulasi, bahkan sebelum mempertimbangkan faktor lainnya. Hal ini merupakan penyebab utama *overestimation* produksi biogas total yang sangat ekstrem (>12 kali lipat).

Pengaruh perbedaan sistem operasi. Simulasi dikonfigurasi sebagai *batch* penuh selama 22 hari, sehingga seluruh substrat dianggap tersedia sejak awal dan dikonversi secara kontinu tanpa penambahan atau pengambilan. Sebaliknya, eksperimen menggunakan transisi ke *semi-continuous* pada hari ke-7, yang berarti terjadi penambahan substrat segar secara berkala, namun juga terjadi dilusi mikroorganisme dan produk antara. Pada sistem *semi-continuous*, produktivitas volumetrik biogas per satuan waktu dapat berbeda dari *batch*, bergantung pada *organic loading rate* dan *hydraulic retention time* efektif (Thamsirirot dan Murphy, 2011). Perbedaan mode operasi ini berkontribusi pada ketidakseimbangan langsung antara prediksi *batch* penuh simulasi dengan hasil eksperimen *semi-continuous*, dan menjadi salah satu alasan mengapa perbandingan kuantitatif langsung antara keduanya harus dilakukan dengan kehati-hatian.

3.5 Analisis Deviasi Prediksi Komposisi Biogas

3.5.1 Deviasi Prediksi Metana

Prediksi metana oleh SuperPro Designer (59,81%) lebih rendah dibandingkan dengan hasil eksperimen (71–73%). Secara mekanistik, meskipun suhu simulasi lebih tinggi (37 °C) dan diharapkan mendorong aktivitas metanogenik yang lebih intensif, model mengalokasikan lebih banyak fluks karbon ke jalur asidogenesis dan asetogenesis yang tidak terkonversi secara optimal menjadi metana. Hal ini mengakibatkan fraksi metana dalam biogas

total menjadi lebih rendah secara proporsional, meskipun volume totalnya jauh lebih besar. Ketidakseimbangan ini mengindikasikan bahwa parameter kinetika default SuperPro Designer tidak mencerminkan efisiensi jalur metanogenesis pada kondisi spesifik umpan kotoran sapi skala domestik. Sebagai pembanding, Abdalmonem *et al.* (2024) melaporkan bahwa simulasi SuperPro Designer pada umpan kotoran sapi skala industri menghasilkan prediksi CH₄ yang mendekati aktual (selisih <10%) hanya setelah parameter *yield* dan kinetika dikalibrasi terhadap data pilot, menegaskan bahwa kalibrasi merupakan syarat mutlak.

3.5.2 Deviasi Prediksi Hidrogen

Kandungan hidrogen hasil simulasi (4,59%) jauh melampaui hasil eksperimen (1%) dan nilai tipikal biogas yang umumnya di bawah 1% (Bouallagui *et al.*, 2009). Secara termodinamika, tekanan parsial hidrogen dalam sistem anaerobik yang sehat harus dijaga sangat rendah (umumnya di bawah 10⁻⁴ atm) agar reaksi oksidasi senyawa antara (*syntrophic oxidation*) berlangsung secara menguntungkan.

Akumulasi H₂ dalam prediksi simulasi mengindikasikan bahwa *interspecies hydrogen transfer*—mekanisme transfer H₂ dari bakteri asetonogenik ke archaea hidrogenotrofik—tidak dimodelkan secara memadai dalam parameter default pada kondisi suhu 37 °C yang diterapkan. Pada kondisi eksperimen aktual (27–32 °C), komunitas sintrofik yang terbentuk mungkin justru lebih efisien dalam menjaga tekanan parsial H₂ rendah karena seleksi alami terhadap spesies yang toleran terhadap kondisi submesofilik (Tsegaye dan Leta, 2023).

3.5.3 Deviasi Prediksi Hidrogen Sulfida

Prediksi hidrogen sulfida simulasi (22,34 ppm) secara signifikan melebihi hasil eksperimen (8,2–9,4 ppm). Secara mekanistik, hal ini dapat dijelaskan melalui kompetisi antara bakteri pereduksi sulfat (*sulfate-reducing bacteria*, SRB) dan archaea metanogenik dalam memperebutkan substrat elektron berupa H₂ dan asetat. Pada kondisi eksperimen aktual dengan suhu sub-mesofilik dan H₂ rendah, jalur reduksi sulfat tidak dominan karena SRB bersaing kalah dalam perebutan H₂ melawan archaea metanogenik yang lebih efisien pada kondisi tersebut (Pilarski dan Pilarska, 2023). Model default SuperPro Designer kemungkinan mengasumsikan kandungan sulfur dalam substrat yang lebih tinggi dari kondisi aktual,

sekaligus tidak memperhitungkan kompetisi dinamis antara SRB dan metanogen secara memadai pada suhu 37 °C.

3.5.4 Deviasi Prediksi Karbon Dioksida

Prediksi karbon dioksida yang lebih tinggi pada simulasi berkaitan langsung dengan rendahnya prediksi metana. Dalam reaksi metanogenesis hidrogenotrofik, karbon dioksida seharusnya dikonsumsi untuk menghasilkan metana. Karena konsumsi hidrogen dalam simulasi tidak optimal, maka konsumsi CO₂ juga berkurang, sehingga CO₂ terakumulasi dalam hasil simulasi.

3.6 Evaluasi Akurasi Produksi Biogas Menggunakan RMSE

Nilai RRMSE yang sangat tinggi ini menempatkan simulasi dalam kategori akurasi yang buruk (*poor*) berdasarkan kriteria Jamieson *et al.* (1991), di mana RRMSE > 30% sudah dianggap tidak dapat diterima untuk keperluan prediksi kuantitatif. Sebagai pembanding, Kan *et al.* (2023) berhasil menurunkan kesalahan prediksi SuperPro Designer pada sistem *palm oil mill effluent* skala industri hingga di bawah 3% melalui kalibrasi parameter kinetika berbasis data pilot, sedangkan Mokraoui *et al.* (2023) melaporkan RRMSE di bawah 15% pada simulasi biodigester skala menengah setelah kalibrasi suhu dan *yield* COD. Perbandingan ini menegaskan bahwa deviasi ekstrem yang ditemukan dalam penelitian ini bukan merupakan kelemahan inheren SuperPro Designer secara umum, melainkan konsekuensi langsung dari penggunaan parameter default tanpa kalibrasi pada kondisi yang sangat berbeda dari asumsi mesofilik standar.

Penyebab deviasi ekstrem ini dapat dirangkum dalam tiga lapisan *compound error* yang saling memperkuat: (1) perbedaan suhu operasi (37 °C vs. 27–32 °C) sebagai faktor dominan yang secara Arrhenius menurunkan laju reaksi biologis aktual hingga 50–70% per 10 °C penurunan suhu; (2) perbedaan mode operasi (*batch* penuh simulasi vs. *batch-semi-continuous* eksperimen) yang membuat perbandingan langsung kuantitatif tidak setara; dan (3) potensi ketidaksesuaian basis perhitungan input—nilai *yield* metana default 0,35 L CH₄/g COD digunakan tanpa verifikasi terhadap COD aktual umpan, yang berpotensi menghasilkan *overestimation* akumulatif apabila terdapat perbedaan interpretasi satuan antara m³ dan L, atau antara basis kering dan

basah. Kombinasi ketiga faktor ini menjadikan kalibrasi parsial pada satu faktor saja tidak cukup untuk membawa simulasi ke tingkat akurasi yang dapat diterima.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi akurasi simulasi *anaerobic digestion* menggunakan SuperPro Designer versi 13.0 pada biodigester beton tipe *lay-down* skala domestik dengan volume kerja 170 L yang dilengkapi sistem resirkulasi pompa sentrifugal, melalui perbandingan langsung antara hasil simulasi dan data eksperimen duplo selama 22 hari.

Hasil eksperimen menunjukkan produksi biogas total sebesar 0,78366–0,88956 m³ (rata-rata 0,83661 m³; variabilitas antar ulangan ±6,3%) dengan kandungan metana tinggi sebesar 71–73%, yang mengindikasikan bahwa proses *anaerobic digestion* berlangsung efektif meskipun biodigester dioperasikan pada suhu lingkungan 27–32 °C dengan sistem operasi *batch-semi-continuous*. Tingginya kadar metana ini konsisten dengan literatur pada biodigester skala kecil berumpan kotoran sapi dengan inokulasi rumen, yang menunjukkan bahwa komunitas mikroorganisme psikrotoleran dalam rumen tetap aktif pada rentang suhu submesofilik.

Sebaliknya, simulasi SuperPro Designer memprediksi produksi biogas sebesar 10,8765 m³ pada suhu mesofilik 37 °C dalam mode *batch* penuh, dengan kandungan metana 59,81%. Evaluasi akurasi menghasilkan nilai RMSE sebesar 10,04 m³ dan *Relative RMSE* sebesar 1.200,08%, menempatkan simulasi dalam kategori akurasi buruk (*poor*) berdasarkan kriteria Jamieson *et al.* (1991), dengan *overestimation* produksi biogas total lebih dari 12 kali lipat dan *underestimation* kadar metana secara bersamaan.

Analisis mekanistik menunjukkan bahwa deviasi ekstrem ini bersumber dari tiga lapisan *compound error* yang saling memperkuat: (1) perbedaan suhu operasi antara simulasi (37 °C) dan eksperimen (27–32 °C) sebagai faktor dominan, yang secara kinetika Arrhenius menghasilkan prediksi laju reaksi biologis jauh lebih tinggi dari kondisi aktual; (2) ketidaksesuaian mode operasi antara *batch* penuh pada simulasi dan *batch-semi-continuous* pada eksperimen, yang membuat perbandingan kuantitatif langsung tidak setara; dan (3) potensi ketidaksesuaian basis perhitungan input, di mana nilai *yield* metana default (0,35 L

CH₄/g COD) digunakan tanpa verifikasi terhadap COD aktual umpan. Pola deviasi komposisi biogas—berupa *underestimation* CH₄ yang disertai *overestimation* H₂, CO₂, dan H₂S secara bersamaan—secara konsisten menunjuk pada satu ketidakseimbangan mekanistik yang sama, yaitu lemahnya pemodelan jalur metanogenesis hidrogenotrofik dan *interspecies hydrogen transfer* dalam parameter default SuperPro Designer pada kondisi sub-mesofilik.

Dengan demikian, SuperPro Designer tidak akurat tanpa kalibrasi untuk prediksi kuantitatif produksi biogas pada biodigester beton skala domestik yang beroperasi pada suhu lingkungan. Penggunaan yang andal mensyaratkan setidaknya: (a) penyesuaian suhu operasi simulasi sesuai kondisi aktual lapangan; (b) kalibrasi parameter kinetika berbasis data eksperimen lokal, khususnya konstanta laju metanogenesis dan *yield* COD; dan (c) verifikasi konsistensi satuan dan basis perhitungan input sebelum simulasi dijalankan. Temuan ini memberikan acuan praktis bagi peneliti dan praktisi bahwa validasi berbasis data eksperimen merupakan prasyarat mutlak sebelum SuperPro Designer dapat digunakan secara andal pada aplikasi biodigester skala domestik di iklim tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalmnem, E., Abdalla, B.K., Hago, E.E., Elhesaina, M.H.A., Widatalla, M.M. dan Ali, E.H.M., (2025), Simulation and scale-up of anaerobic digestion of cow dung for biogas production using SuperPro Designer, *Open Access Research Journal of Engineering and Technology*, 9(2), pp. 047–055. <https://doi.org/10.53022/oarjet.2025.9.2.0095>
- Awe, O.W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D.P. dan Lyczko, N., (2017), A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies, *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), pp. 267–283. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4>
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B. dan Hamdi, M., (2009), Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, *Journal of Environmental Management*, 90(5), pp. 1844–1849. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.002>
- Chuenchart, W., Timilsina, A.P., Ge, J. dan Shah, A., (2024), Advances in biorefinery of cattle manure for value-added products, *Fermentation*, 10(11), 568. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110568>
- Esmaceli-Faraj, S.H., Rezazadeh, M. dan Abdi, J., (2023), Simulation of biosynthesis gas process from palm oil mill effluent sewage by Aspen HYSYS and SuperPro Designer, *Journal of Water and Wastewater*, 33(6), pp. 34–43. <https://doi.org/10.22093/wwj.2022.369440.3301>
- Heriyanti, Cahyani, A.L., Pertiwinigrum, A., Hidayatullah, I.M. dan Gozan, M., (2024), Simulating biogas production process from palm oil mill effluent for power generation, *E3S Web of Conferences*, 503, 04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450304002>
- Jamieson, P.D., Porter, J.R. dan Wilson, D.R., (1991), A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand, *Field Crops Research*, 27(4), pp. 337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Kan, K.W., Chan, Y.J., Tiong, T.J. dan Lim, J.W., (2024), Maximizing biogas yield from palm oil mill effluent (POME) through advanced simulation and optimisation techniques on an industrial scale, *Chemical Engineering Science*, 285, 119644. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119644>
- Mokraoui, S., Halilu, A., Hashim, M.A. dan Hadj-Kali, M.K., (2023), Modeling and simulation of biomass anaerobic digestion for high biogas yield and CO₂ mineralization, *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 12(2), pp. 105–116. <https://doi.org/10.1007/s40243-023-00233-8>
- Park, J., Tian, D., Lee, B. dan Jun, H., (2016), The methane production from organic waste on single anaerobic digester equipped with microbial electrochemical technology, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 38(4), pp.

201–209.

<https://doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.4.201>

Pilarski, G. dan Pilarska, A.A., (2023), Anaerobic digestion of food waste: A review of process stability, kinetics, and production of biogas, *Energies*, 16(4), 1657.

<https://doi.org/10.3390/en16041657>

Thamsiroj, T. dan Murphy, J.D., (2011), The difficulties associated with mono-digestion of grass as demonstrated by a pilot-scale digester, *Bioresource Technology*, 102(3), pp. 3234–3241.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.112>

Tsegaye, D. dan Leta, S., (2022), Optimization of operating parameters for biogas production using two-phase bench-scale anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater: Focus on methanogenic step, *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1), 125. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00611-6>

Tufvesson, L.M., Lantz, M. dan Börjesson, P., (2013), Environmental performance of biogas produced from industrial residues including energy crop digestion – a life cycle assessment, *Journal of Cleaner Production*, 40, pp. 101–109.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.005>

Winrock International, (2015), *Biogas Commercialization: A Handbook for Developing Countries*, Winrock International, Arlington, VA.