

EVALUASI AKURASI SUPERPRO DESIGNER DALAM MEMPREDIKSI PRODUKSI BIOGAS PADA LAY-DOWN BIODIGESTER

¹Riski Gunawan Nasution*, ¹Ryoshi Meijisa Reigi Putra, ¹Khairul Akli, ¹Dedy Rahmad

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

*Penulis korespondensi: mhdriski200408@gmail.com

Abstrak. Simulasi menggunakan SuperPro Designer berpotensi memprediksi kinerja biodigester tanpa prototipe fisik, namun validasi untuk biodigester beton skala domestik dengan sistem resirkulasi masih terbatas. Penelitian ini mengevaluasi akurasi SuperPro Designer dalam memprediksi produksi biogas pada lay-down biodigester beton skala domestik (volume kerja 170 L) terintegrasi pompa sentrifugal (0,125 kW). Umpan campuran kotoran sapi : air (1:3) dengan inokulum rumen 1 L, eksperimen 22 hari (suhu 27–32°C). Simulasi menggunakan SuperPro Designer v13.0 dengan parameter identik dalam satuan SI. Hasil simulasi memprediksi produksi biogas 10,8765 m³/batch, sedangkan eksperimen menghasilkan 0,78366–0,88956 m³. Akurasi menunjukkan RMSE 10,04 m³ dan Relative RMSE 1200,08%, jauh lebih tinggi dibandingkan validasi skala industri (RMSE 0,03–2,3%; Kan et al., 2023). Perbedaan signifikan disebabkan ketidaksesuaian parameter kinetika default dengan kondisi skala domestik, asumsi ideal yang tidak tercapai di lapangan, serta potensi kesalahan satuan residual. Disimpulkan bahwa SuperPro Designer tidak dapat digunakan untuk prediksi kuantitatif tanpa kalibrasi ekstensif dengan data eksperimen pada skala dan substrat yang sesuai.

Kata kunci: SuperPro Designer, simulasi biogas, lay-down biodigester, biodigester beton, pompa sentrifugal

Abstract. Simulation using SuperPro Designer offers potential for predicting biodigester performance without physical prototyping, but validation for domestic-scale concrete biodigesters with recirculation systems remains limited. This study evaluates SuperPro Designer's accuracy in predicting biogas production from a domestic-scale lay-down concrete biodigester (working volume 170 L) integrated with a centrifugal pump (0.125 kW). The feedstock was cow manure:water (1:3) with 1 L of rumen inoculum; the experiment lasted 22 days at 27–32°C. Simulation used SuperPro Designer v13.0 with identical parameters in SI units. The simulation predicted biogas production of 10.8765 m³/batch, while the experiment yielded 0.78366–0.88956 m³. Accuracy assessment showed RMSE of 10.04 m³ and Relative RMSE of 1200.08%, far higher than industrial-scale validation studies (RMSE 0.03–2.3%; Kan et al., 2023). This significant discrepancy is attributed to mismatched default kinetic parameters for domestic-scale conditions, unattainable ideal assumptions in the field, and potential residual unit errors in reactor configuration. It is concluded that SuperPro Designer cannot be used for quantitative prediction without extensive calibration using experimental data at the appropriate scale and substrate.

Keywords: SuperPro Designer, biogas simulation, lay-down biodigester, concrete biodigester, centrifugal pump

1. Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan global paling serius di era kontemporer. Pendorong utama fenomena ini adalah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil secara ekstensif sebagai sumber energi primer. Aktivitas terkait energi bertanggung jawab atas sebagian besar emisi gas rumah kaca antropogenik, dengan pelepasan CO₂ terkait energi global mencapai puluhan gigaton

per tahun. Konsekuensi paling signifikan adalah peningkatan suhu global rata-rata yang mempengaruhi ekosistem, permukaan laut, ketersediaan sumber daya air, ketahanan pangan, serta kesehatan dan kehidupan manusia (Awe et al., 2017).

Sebagai respons, kebijakan energi-iklim semakin berfokus pada pengurangan emisi CO₂. Dalam konteks ini, energi terbarukan telah menjadi landasan transisi energi. Biomassa dan limbah memiliki arti penting khusus karena—tidak seperti tenaga surya dan angin—keduanya dapat menyediakan pasokan energi yang stabil dan berkelanjutan tanpa bergantung pada cuaca atau lokasi (Tufvesson et al., 2013). Di Indonesia, sektor kelapa sawit menghasilkan limbah cair pabrik kelapa sawit (Palm Oil Mill Effluent/POME) yang mengandung senyawa organik konsentrasi tinggi dan dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi dalam bentuk biogas melalui proses perlakuan anaerobik (Kan et al., 2023).

Anaerobic digestion (AD) menonjol di antara teknologi energi karena dapat diimplementasikan dalam berbagai skala—dari unit kecil berbasis pertanian hingga fasilitas industri besar—sambil memberikan berbagai hasil lingkungan dan ekonomi. Proses AD adalah proses biologis di mana materi organik diuraikan dalam kondisi anaerobik melalui empat tahap utama: hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis. Produk utama dari proses AD adalah biogas dan digestat. Biogas biasanya mengandung sekitar 50–70% metana (CH₄) dan 30–50% karbon dioksida (CO₂), dengan sejumlah kecil hidrogen sulfida (H₂S), amonia (NH₃), uap air, nitrogen, oksigen, dan hidrogen (Pilarski & Pilarska, 2023).

Di sisi lain, kemajuan teknologi simulasi proses memungkinkan prediksi kinerja biodigester tanpa harus membangun prototipe fisik terlebih dahulu. SuperPro Designer telah diidentifikasi sebagai salah satu perangkat lunak simulasi paling efektif untuk proses anaerobic digestion. Esmaeili-Faraj et al. (2023) mensimulasikan produksi biogas dari POME menggunakan SuperPro Designer v9.0 dengan fraksi mol metana 0,446. Heriyanti et al. (2024) mengembangkan simulasi produksi biogas dari POME dengan kapasitas 675,38 kg/batch menggunakan SuperPro Designer v13.0 dan menghasilkan biogas dengan kadar metana mencapai 86,228%. Abdalnmem et al. (2024) melakukan simulasi dan scale-up proses AD dari kotoran sapi menggunakan SuperPro Designer dengan konfigurasi CSTR pada kondisi mesofilik (37°C) dan waktu retensi hidrolis 15 hari, menghasilkan output biogas total 1.929,88 kg/jam dengan kemurnian metana 73,93%.

Studi validasi akurasi simulasi SuperPro Designer terhadap data eksperimen skala industri telah dilakukan oleh Kan et al. (2023), yang memvalidasi simulasi terhadap data pabrik biogas skala industri dari POME dan menunjukkan tingkat kesalahan berkisar antara 0,03% hingga 2,3% setelah optimasi parameter. Namun, studi yang secara spesifik mengevaluasi akurasi SuperPro Designer terhadap data eksperimen dari biodigester beton skala domestik dengan sistem resirkulasi masih sangat terbatas. Padahal, pengembangan biodigester skala domestik menghadapi tantangan tersendiri dalam hal efisiensi, biaya konstruksi, dan optimalisasi produksi biogas. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi akurasi simulasi SuperPro Designer pada lay-

Riski Gunawan Nasution, Ryoshi Meijisa Reigi Putra, Khairul Akli, Dedy Rahmad
mhdriski200408@gmail.com: Evaluasi Akurasi SuperPro Designer dalam Memprediksi
Produksi Biogas pada Lay-Down Biodigester

down biodigester beton skala domestik yang terintegrasi dengan pompa sentrifugal untuk sistem resirkulasi.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi bahan baku umpan biodigester, inokulum, material konstruksi biodigester, dan bahan untuk analisis laboratorium dengan spesifikasi dan sumber sebagai berikut:

2.1.1 Bahan Baku Umpan Biodigester

Bahan baku utama yang digunakan sebagai umpan dalam proses produksi biogas adalah kotoran sapi segar yang diperoleh dari peternakan sapi Rumah Potong Hewan (RPH) Aie Pacah, Kota Padang, Sumatera Barat. Kotoran sapi diambil dalam kondisi segar (maksimal 2 jam setelah dikeluarkan oleh ternak) untuk memastikan kandungan mikroorganisme masih aktif dan menghindari degradasi awal. Air yang digunakan untuk pencampuran adalah air sumur bersih dari Politeknik ATI Padang yang telah diendapkan selama 24 jam untuk mengurangi kandungan partikel tersuspensi. Karakteristik awal kotoran sapi yang dianalisis meliputi Chemical Oxygen Demand (COD) dan pH; analisis dilakukan di Laboratorium Pendidikan PT Wiwiadi Bintang Sains, Universitas Andalas.

2.1.2 Inokulum

Inokulum yang digunakan untuk mempercepat proses start-up biodigester berupa rumen sapi yang diambil bersamaan dengan kotoran sapi. Inokulum diambil dari bagian perut sapi yang baru dipotong untuk memastikan populasi mikroorganisme metanogenik yang tinggi. Inokulum ditambahkan sebanyak 1 liter dari volume kerja biodigester. Sebelum digunakan, inokulum disaring menggunakan saringan 20 mesh untuk memisahkan partikel kasar.



Gambar 1. Inokulum setelah disaring

2.1.3 Material Konstruksi Biodigester

Material konstruksi biodigester tipe lay-down berbahan beton terdiri dari cincin sumur (gorong-gorong) beserta tutupnya yang diperoleh dari PT. Mitra Usaha Mandiri, Kota Padang (sesuai SNI 15-2049-2004), serta semen untuk menyambungkan cincin sumur yang diperoleh dari toko bangunan NOERI, Pasar Tabing, Kota Padang.

2.1.4 Material Sistem Perpipaan dan Pompa

1. Pompa Sentrifugal: Pompa sentrifugal merek Shimizu tipe PS-128 BIT dengan spesifikasi daya listrik 125 Watt (0,125 kW), tegangan 220-240 V, daya hisap

maksimal 9 meter, daya dorong maksimal 33 meter, dan kapasitas 20-35 liter/menit. Pompa diperoleh dari toko bangunan NOERI, Pasar Tabing, Kota Padang.

2. Pipa dan Perlengkapan: Pipa PVC merk Wavin ukuran ½ inci (diameter 22 mm) untuk jalur inlet, outlet, dan resirkulasi. Perlengkapan pipa (fitting) meliputi socket, elbow, tee, dan valve (kran) ukuran ½ inci merk Wavin. Diperoleh dari toko bangunan NOERI, Pasar Tabing, Kota Padang.

2.2 Metode

Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahap yang meliputi perancangan dan konstruksi biodigester, persiapan umpan dan inokulum, pelaksanaan eksperimen produksi biogas, simulasi proses menggunakan perangkat lunak SuperPro Designer, serta analisis data dan evaluasi akurasi.

2.2.1 Diagram Alir Penelitian

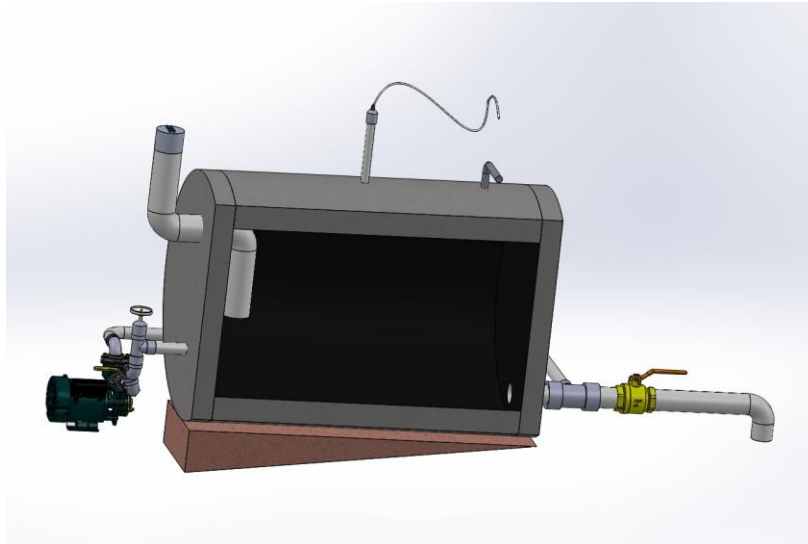
Tahapan penelitian secara keseluruhan disajikan dalam diagram alir pada Gambar 2. Penelitian diawali dengan studi literatur, dilanjutkan dengan perancangan biodigester, konstruksi, pengujian kebocoran, persiapan umpan, pelaksanaan eksperimen, simulasi, analisis data, dan penarikan kesimpulan.



Gambar 2. Tahapan Proses Penelitian

2.2.2 Perancangan dan Konstruksi Biodigester

Biodigester dirancang dalam konfigurasi lay-down horizontal dengan volume total 254 liter. Volume kerja ditetapkan sebesar 70% dari volume total (170 liter) untuk menyediakan ruang kepala (headspace) bagi akumulasi biogas. Spesifikasi rancangan biodigester adalah sebagai berikut: volume total 254 liter; volume kerja 170 liter; volume ruang kepala 84 liter; bentuk silinder horizontal dengan ujung setengah bola (dished ends); dimensi panjang total 90 cm dengan diameter dalam 60 cm; tebal dinding 6 cm (beton bertulang). Desain mengadopsi prinsip plug flow termodifikasi dengan sistem resirkulasi pompa sentrifugal yang mengambil umpan dari bagian outlet dan mengembalikannya ke bagian inlet.



Gambar 3. Rancangan lay-down biodigester beton dengan sistem perpipaan dan resirkulasi pompa sentrifugal

Setelah beton kering sempurna, dilakukan pengeboran untuk pemasangan pipa inlet, outlet, dan resirkulasi. Sealant silikon diaplikasikan pada sambungan untuk mencegah kebocoran. Pompa sentrifugal dipasang pada outlet dengan sambungan fleksibel untuk meredam getaran; instalasi listrik dilengkapi dengan stop kontak dan timer otomatis. Uji kebocoran dilakukan dengan mengisi biodigester dengan air hingga penuh dan membiarkannya selama 24 jam; tidak ditemukan kebocoran signifikan pada seluruh bagian biodigester



Gambar 4. Proses Konstruksi Biodigester

2.2.3 Persiapan Umpan dan Inokulum

Kotoran sapi segar diambil dari peternakan dalam wadah plastik tertutup dan segera dibawa ke lokasi penelitian (waktu tempuh maksimal 20 menit). Kotoran sapi ditimbang sebanyak 50 kg untuk pengisian awal. Benda asing seperti batu, kayu, atau plastik dipisahkan secara manual. Kotoran sapi kemudian dicampur dengan air bersih dengan perbandingan 1:3 berdasarkan berat, sehingga diperoleh total volume umpan 170 liter (densitas campuran ~ 1 kg/L). Pencampuran dilakukan dalam wadah penampung berkapasitas 100 liter menggunakan pengaduk kayu selama 15 menit hingga homogen.

2.2.4 Pengoperasian dan Pemantauan

Biodigester dioperasikan selama 22 hari dengan parameter operasi sebagai berikut:

1. Sistem operasi: *Batch* (sekali pengisian untuk seluruh periode) dan semi *continue* (pengisian umpan di hari ke 7 sebanyak 20 liter perhari hingga hari ke 20)
2. Suhu operasi: Suhu lingkungan (27-32°C)
3. Resirkulasi: Pompa sentrifugal dioperasikan 15 menit setiap 6 jam (4 kali sehari)
4. Pengukuran volume biogas dan komposisi biogas: Dilakukan setiap hari pada pukul 08.00 WIB
5. Pengukuran pH: Dilakukan setiap 3 hari sekali (pada jam 06.00, 12.00, 18.00)

2.2.5 Analisis Komposisi Biogas

Analisis komposisi biogas dilakukan menggunakan *Combustible Gas Detector* MESTEK CGD02 tipe B yang mampu mengukur konsentrasi Combustible Gas (CH₄ dan H₂) CO, O₂, dan H₂S. Prosedur analisis:

1. Gas analyzer dikalibrasi dengan gas standar (50% CH₄, 35% CO₂, 15% N₂) sebelum digunakan.
2. Sampel biogas diambil melalui port sampling yang dipasang pada pipa outlet biogas menggunakan selang teflon.
3. Gas analyzer dihubungkan dengan selang sampling dan pompa internal diaktifkan.
4. Pembacaan dilakukan setelah nilai stabil (biasanya 60-90 detik).
5. Data konsentrasi komposisi biogas dicatat.
6. Analisis dilakukan setiap hari dengan 3 kali ulangan pengukuran.

2.2.6 Simulasi Menggunakan SuperPro Designer

Simulasi proses anaerobic digestion dilakukan menggunakan SuperPro Designer versi 13.0 (Intelligen, Inc., USA) dengan lisensi akademik Politeknik ATI Padang. Seluruh parameter input dikonversikan secara konsisten ke satuan SI sebelum dimasukkan ke dalam perangkat lunak:

Tabel 1. Parameter input simulasi SuperPro Designer setelah konversi satuan ke SI

Parameter	Nilai Eksperimen	Satuan Input (SI)	Nilai Input
Volume reaktor	254 L	m ³	0,254
Volume kerja	170 L	m ³	0,170
COD umpan	85.400 mg/L	kg/m ³	85,4
Suhu operasi	37°C	°C	37
Waktu batch	22 hari	hari	22
Yield metana	0,35 L CH ₄ /g COD	m ³ CH ₄ /kg COD	0,35

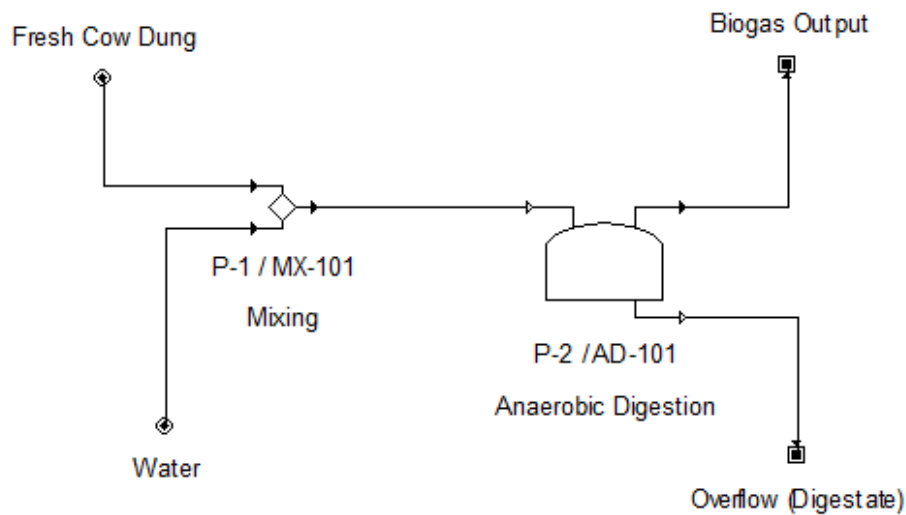
2.2.6.1 Registrasi Komponen

Komponen-komponen yang digunakan dalam simulasi diregistrasikan terlebih dahulu dalam *database* SuperPro Designer melalui menu *Component > Register Components*.

2.2.6.2 Penyusunan *Flowsheet*

Flowsheet simulasi disusun dengan mengintegrasikan unit-unit operasi berikut:

1. Unit Pencampuran (*Mixing*): Menggunakan unit *Blending/Splitting* dengan kode P-1. Unit ini berfungsi untuk mencampur umpan kotoran sapi dan air sesuai perbandingan 1:1.
2. Unit Anaerobic Digester: Menggunakan unit *Anaerobic Digester* dengan kode P-2 yang tersedia dalam *library* SuperPro Designer. Diagram Alir Proses dapat dilihat pada Gambar 4. Parameter yang diinput meliputi:
 - o Volume reaktor: 254 L
 - o Volume kerja: 170 L
 - o Suhu operasi: 37°C (mesofilik)
 - o Tekanan operasi: 1 atm
 - o Waktu batch: 22 hari
 - o Yield metana: 0,35 L CH₄/g COD terdegradasi (Park et al., 2016).



Gambar 5. Flowsheet Simulasi dengan SuperPro Designer

2.2.6.3 Input Komposisi Umpan

Untuk merepresentasikan umpan proses, yaitu kotoran sapi, sebuah *stock mixture* khusus dibuat. Komposisi campuran ini didefinisikan berdasarkan data karakteristik kotoran sapi dari literatur (Chuenchart et al., 2024), seperti yang dirinci pada Tabel 2. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan yang lebih akurat terhadap substrat kompleks dibandingkan hanya mengandalkan komponen database generik.

Tabel 2. Komposisi Kotoran Sapi (Basis Kering) sebagai Dasar untuk *Stock Mixture*

Komponen	Persentase	Rumus Kimia (untuk Simulasi)
Protein	18.0%	C ₅ H ₇ NO ₂
Lemak	24.0%	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆
Karbohidrat	58.0%	C ₆ H ₁₀ O ₅
Total	100.0%	

Sumber: (Chuenchart et al., 2024)

Data hasil simulasi diekspor ke format Microsoft Excel untuk analisis lebih lanjut.

2.2.7 Evaluasi Akurasi Simulasi

Akurasi simulasi dievaluasi dengan membandingkan data hasil simulasi dengan data eksperimen menggunakan beberapa metode statistik:

1. *Error Percentage* (Persentase Kesalahan):

$$\text{Error (\%)} = \frac{|X_{\text{simulasi}} - X_{\text{eksperimen}}|}{X_{\text{eksperimen}}} \times 100\%$$

dihitung untuk:

- Volume biogas kumulatif pada hari ke-22
- Komposisi biogas rata-rata (CH₄, CO₂, H₂S)
- Produksi biogas spesifik

2. Koefisien Korelasi (R²):

Koefisien determinasi dihitung untuk mengevaluasi kesesuaian tren antara kurva produksi kumulatif simulasi dan eksperimen menggunakan fungsi *RSQ* dalam Microsoft Excel.

3. *Root Mean Square Error* (RMSE):

RMSE dihitung untuk mengevaluasi deviasi antara data harian simulasi dan eksperimen:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{sim},i} - X_{\text{eksp},i})^2}{n}}$$

dimana:

- X_{sim,i} = produksi biogas hasil simulasi pada hari ke-i (m³/hari)
- X_{eksp,i} = produksi biogas hasil eksperimen pada hari ke-i (m³/hari)
- n = jumlah data

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Simulasi SuperPro Designer

Simulasi proses anaerobic digestion menggunakan SuperPro Designer dengan parameter input yang identik dengan kondisi eksperimen menghasilkan prediksi produksi biogas kumulatif sebesar 10,8765 m³/batch selama 22 hari. Profil produksi harian simulasi menunjukkan pola yang serupa dengan eksperimen, namun dengan kurva yang lebih halus (kurang fluktuatif) karena asumsi kondisi operasi yang konstan.

Komposisi biogas hasil simulasi menunjukkan prediksi kadar metana sebesar 59,81%, CO₂ 31,66%, hidrogen 4,59%, dan H₂S 22,34 ppm. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa metana merupakan komponen utama dalam biogas dengan konsentrasi mendekati 60%, sementara karbon dioksida menjadi komponen terbesar kedua. Keberadaan hidrogen dalam simulasi cukup signifikan (4,59%), yang mengindikasikan bahwa model kinetika dalam SuperPro Designer mungkin belum sepenuhnya mengakomodasi konversi hidrogen menjadi metana melalui jalur hidrogenotrofik secara optimal.

3.2. Hasil Eksperimen Produksi Biogas

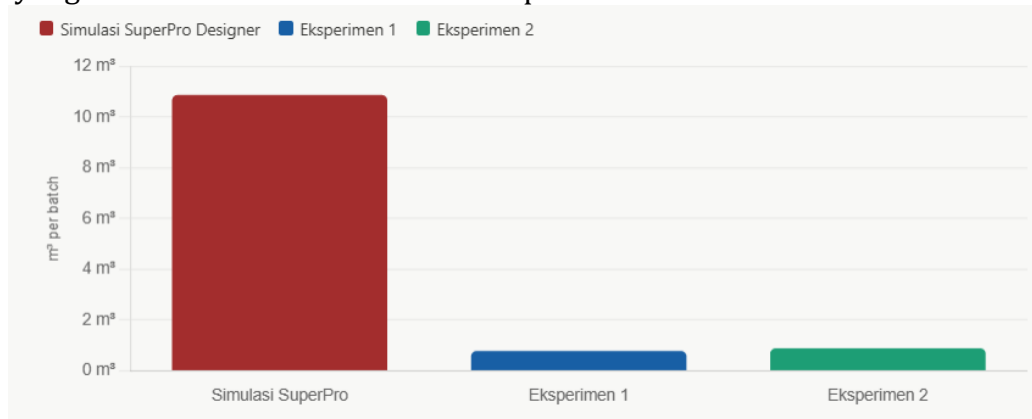
Menurut Winrock Internasional (2015), komponen penyusun utama pada biogas adalah CH₄ sebesar 50-75% vol dan CO₂ sebesar 25-45% vol dengan beberapa komponen kecil lainnya seperti H₂ dengan kadar di bawah 1% . Berdasarkan komposisi biogas tersebut, dapat diketahui bahwa komponen utama gas mudah terbakar dalam biogas adalah metana (CH₄) dengan kandungan 50-75% vol, sementara komponen hidrogen (H₂) memiliki konsentrasi sangat rendah (<1% vol). Dengan demikian, sifat mudah terbakar

biogas berasal dari metana, meskipun terdapat kontribusi minor dari gas lain yang mudah terbakar dalam jumlah kecil. Pengujian kandungan gas terbakar menggunakan alat *Combustible Gas Detector* MESTEK CGD02 tipe B yang hanya dapat mengukur *combustible gas* dan H_2S , maka nilai CO_2 dan H_2 diperoleh dari hasil perhitungan berdasarkan selisih.

Hasil eksperimen menunjukkan kadar metana yang lebih tinggi dibandingkan hasil simulasi, yaitu 71% dan 73% untuk dua kali pengulangan. Nilai ini berada dalam rentang tipikal yang dilaporkan oleh Winrock Internasional (2015) yaitu 50-75% vol, bahkan cenderung pada batas atas rentang tersebut. Kadar CO_2 yang terukur sebesar 25% juga berada dalam rentang 25-45% vol, sementara kadar H_2 hanya 1% sesuai dengan literatur (<1% vol). Kadar H_2S yang rendah (8,2-9,4 ppm) menunjukkan bahwa umpan kotoran sapi yang digunakan memiliki kandungan sulfur yang relatif rendah.

Tingginya kadar metana dalam eksperimen (71-73%) mengindikasikan bahwa proses *anaerobic digestion* berlangsung dengan baik dan populasi mikroorganisme metanogenik aktif dalam mengkonversi substrat organik menjadi metana. Hal ini didukung oleh kondisi operasi yang sesuai, meliputi pH yang stabil, suhu mesofilik yang relatif konstan, serta sistem resirkulasi yang menjaga homogenitas umpan.

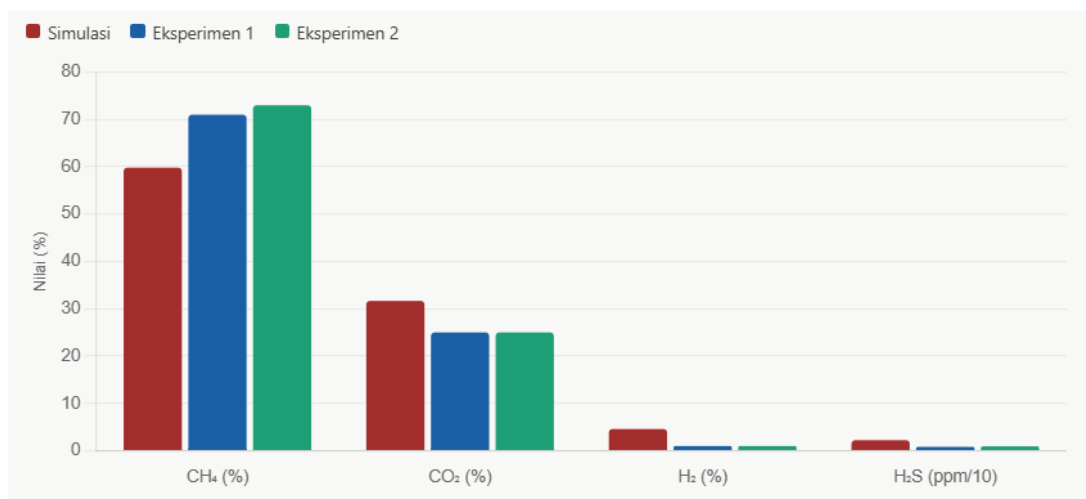
Perbandingan antara produksi biogas hasil simulasi SuperPro Designer dan hasil eksperimen secara keseluruhan disajikan pada Gambar 6. Perbedaan yang sangat mencolok antara kedua nilai tersebut memberikan gambaran awal mengenai tingkat deviasi yang akan dianalisis lebih mendalam pada subbab evaluasi akurasi.



Gambar 6. Perbandingan Volume Produksi Biogas Kumulatif Hasil Simulasi SuperPro Designer dan Hasil Eksperimen pada Lay-Down Biodigester Beton Selama 22 Hari

3.3 Evaluasi Akurasi Simulasi SuperPro Designer

Perbandingan komposisi biogas antara hasil simulasi dan kedua eksperimen disajikan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 7. Visualisasi ini memudahkan identifikasi komponen mana yang mengalami overestimation maupun underestimation oleh model simulasi SuperPro Designer dibandingkan dengan kondisi aktual di lapangan.



Gambar 7. Perbandingan Komposisi Biogas (CH₄, CO₂, H₂, dan H₂S) antara Hasil Simulasi SuperPro Designer dan Data Eksperimen pada Lay-Down Biodigester Beton Skala Domestik

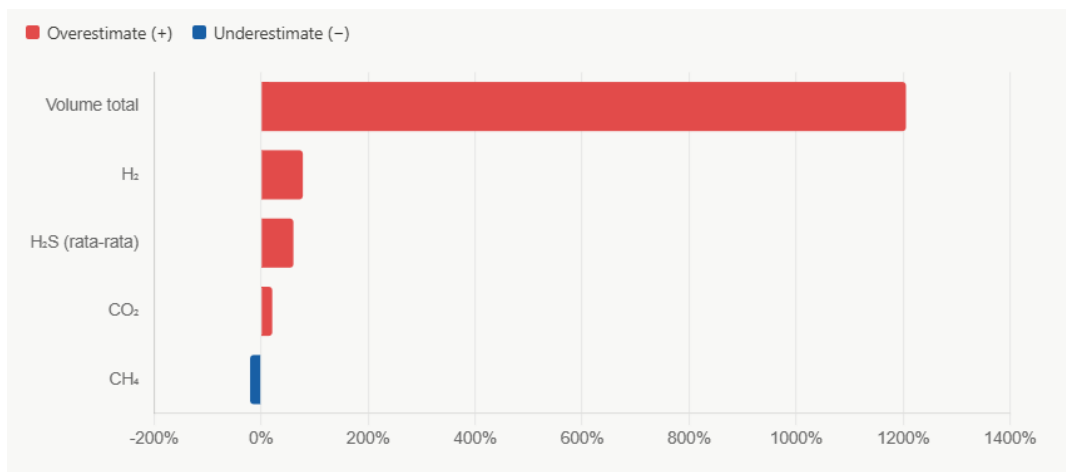
Perbandingan komposisi biogas antara hasil eksperimen dan simulasi disajikan pada Tabel 3 untuk mengevaluasi tingkat akurasi prediksi SuperPro Designer.

Tabel 3. Komposisi Biogas yang dihasilkan dari Hasil Eksperimen

Komponen	Eksperimen 1	Eksperimen 2	Simulasi	Error 1 (%)	Error 2 (%)
Methane	71%	73%	59.81%	-18.709	-22.05
Carbon Dioxide	25%	25%	31.66%	21.036	21.036
Hydrogen	1%	1%	4.59%	78.2135	78.214
Hydrogen Sulfide	8.2	9.4	22.34	63.2945	57.923
Volume biogas total	0,78366 m ³	0,88956 m ³	10,8765 m ³	1287,7%	1123%

Berdasarkan Tabel 3, dapat diketahui bahwa terdapat deviasi yang cukup signifikan antara hasil simulasi SuperPro Designer dengan data eksperimen. Deviasi terbesar terjadi pada prediksi kadar hidrogen (H₂) dengan error mencapai 78,21%, diikuti oleh prediksi H₂S dengan error 57,92-63,29%, dan prediksi CO₂ dengan error 21,04%. Prediksi metana menunjukkan error negatif sebesar 18,71-22,05%, artinya simulasi cenderung underestimate terhadap kadar metana aktual.

Untuk memperjelas besaran deviasi pada masing-masing komponen biogas, persentase error prediksi simulasi terhadap data eksperimen dirangkum dalam Gambar 8. Nilai positif menunjukkan overestimation oleh simulasi, sedangkan nilai negatif menunjukkan underestimation. Komponen dengan deviasi terbesar dapat langsung diidentifikasi secara visual guna mengarahkan analisis lebih lanjut.



Gambar 8. Persentase Error Prediksi Simulasi SuperPro Designer terhadap Data Eksperimen untuk Setiap Komponen Biogas dan Volume Produksi Total

Deviasi volume biogas total yang sangat tidak masuk akal (overestimation 13 kali lipat, RRMSE 1200,08%) tidak dapat dijelaskan semata-mata oleh ketidaksesuaian parameter kinetika default dalam perangkat lunak. Terdapat dua faktor lapangan yang diduga berkontribusi secara signifikan terhadap besarnya kesenjangan ini.

Pertama, kondisi suhu operasi biodigester di lapangan sangat fluktuatif. Berbeda dengan simulasi yang mengasumsikan suhu mesofilik konstan pada 37°C, suhu aktual biodigester beton selama eksperimen berlangsung pada rentang 27–47°C dengan fluktuasi yang tidak dapat dikendalikan karena tidak adanya sistem pemanas atau termostat. Fluktuasi suhu ini berdampak langsung pada aktivitas mikroorganisme metanogenik yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Penurunan suhu sebesar 5–10°C dari kondisi optimal mesofilik diketahui dapat menurunkan laju produksi biogas sebesar 30–50% (Thamsiroj & Murphy, 2011). Dengan demikian, asumsi kondisi isothermal dalam simulasi menjadikan prediksi produksi biogas jauh melampaui kapasitas aktual biodigester di lapangan.

Kedua, dan yang tidak kalah penting, terdapat ketidaksesuaian mendasar pada sistem penampung biogas (gas holder) yang digunakan dalam eksperimen. Gas holder yang digunakan berupa ban dalam kendaraan dengan volume maksimum hanya 7 liter. Volume ini sangat terbatas jika dibandingkan dengan prediksi produksi biogas oleh simulasi yang mencapai 10,8765 m³, maupun terhadap hasil eksperimen aktual yang mencapai 0,78366–0,88956 m³. Keterbatasan kapasitas gas holder ini menyebabkan sebagian besar biogas yang diproduksi oleh biodigester tidak tertampung dan terbuang ke atmosfer sebelum sempat diukur. Akibatnya, volume biogas yang tercatat dalam eksperimen kemungkinan besar hanya merupakan sebagian kecil dari volume biogas yang sesungguhnya dihasilkan. Hal ini menjadikan perbandingan langsung antara data eksperimen dan hasil simulasi menjadi tidak setara, karena data eksperimen tidak merepresentasikan total produksi biogas secara keseluruhan melainkan hanya volume yang berhasil tertampung oleh gas holder berkapasitas terbatas tersebut.

Kombinasi kedua faktor ini, fluktuasi suhu yang tidak terkontrol dan keterbatasan kapasitas gas holder, menjelaskan mengapa deviasi antara simulasi dan eksperimen jauh melampaui batas kewajaran yang dilaporkan pada penelitian validasi skala industri. Oleh

karena itu, nilai RRMSE 1200,08% dalam penelitian ini tidak semata-mata mencerminkan kelemahan model simulasi SuperPro Designer, melainkan juga merupakan refleksi dari keterbatasan instrumentasi pengukuran dan kondisi operasi lapangan yang jauh dari ideal.

3.3.1 Analisis Deviasi Prediksi Metana

Prediksi metana oleh SuperPro Designer sebesar 59,81% lebih rendah 11–13% dibandingkan hasil eksperimen (71–73%). Hal ini mengindikasikan bahwa model kinetika dalam SuperPro Designer belum sepenuhnya merepresentasikan potensi konversi substrat menjadi metana. Penelitian serupa oleh Kan et al. (2023) melaporkan tingkat kesalahan yang lebih kecil (0,03–2,3%) setelah dilakukan optimasi parameter pada skala industri. Perbedaan yang mencolok antara akurasi penelitian ini dan Kan et al. (2023) menunjukkan bahwa kalibrasi parameter default SuperPro Designer sangat krusial, terutama pada perbedaan skala dan substrat. Pada skala domestik dengan umpan kotoran sapi, parameter seperti konstanta laju degradasi (k), yield metana (Y_{CH_4}), dan fraksi biodegradabilitas substrat mungkin berbeda signifikan dari nilai default yang diambil dari literatur skala industri (Mokraoui et al., 2023).

Underestimation metana juga berkaitan dengan tingginya prediksi H_2 (4,59% vs. 1% eksperimen). Dalam proses AD yang seimbang, H_2 yang dihasilkan pada tahap asidogenesis dan asetogenesis seharusnya dikonversi menjadi metana oleh archaea hidrogenotrofik melalui reaksi $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$. Model SuperPro Designer tampaknya belum mengakomodasi hubungan sintrofik ini secara sempurna, sehingga terjadi akumulasi H_2 dalam prediksi simulasi (Pilarski & Pilarska, 2023).

3.3.2 Analisis Deviasi Prediksi Hidrogen

Deviasi terbesar terjadi pada prediksi hidrogen (78,21%), di mana simulasi memprediksi kadar H_2 4,59% sementara eksperimen hanya menunjukkan 1%. Menurut Winrock International (2015), kadar hidrogen dalam biogas normalnya di bawah 1% vol. Tingginya prediksi H_2 mengindikasikan ketidakseimbangan dalam model kinetika: laju produksi H_2 dari tahap asidogenesis lebih cepat dibandingkan laju konsumsinya pada tahap metanogenesis hidrogenotrofik. Dalam ekosistem anaerobik yang sehat, tekanan parsial H_2 yang rendah ($<10^{-4}$ atm) diperlukan agar reaksi oksidasi asam lemak rantai panjang (propionat, butirrat) menjadi asetat dapat berlangsung secara termodinamika menguntungkan (Thamsiroj & Murphy, 2011).

3.3.3 Analisis Deviasi Prediksi H_2S

Prediksi H_2S oleh simulasi (22,34 ppm) jauh lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen (8,2–9,4 ppm) dengan error 57,92–63,29%. Overestimation H_2S disebabkan oleh asumsi kandungan sulfur dalam umpan yang lebih tinggi dari kondisi aktual, atau kurangnya representasi mekanisme inhibisi dan kompetisi antara bakteri pereduksi sulfat dengan mikroorganisme metanogenik. Dalam kondisi aktual, bakteri pereduksi sulfat dan metanogenik saling berkompetisi untuk substrat yang sama (asetat dan H_2), sehingga produksi H_2S tidak selalu proporsional dengan kandungan sulfur umpan (Bouallagui et al., 2009).

3.3.4 Analisis Deviasi Prediksi CO_2

Prediksi CO_2 oleh simulasi (31,66%) lebih tinggi 6,66% absolut atau 21,04% relatif dibandingkan hasil eksperimen (25%). Deviasi ini berkaitan erat dengan underestimation metana dan overestimation H_2 . Reaksi asetoklastik ($CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$)

menghasilkan metana dan CO₂ dalam rasio 1:1 (mol), sementara reaksi hidrogenotrofik (CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O) justru mengonsumsi CO₂ untuk menghasilkan metana. Karena H₂ tidak terkonversi secara optimal dalam model, konsumsi CO₂ melalui jalur hidrogenotrofik menjadi berkurang, sehingga CO₂ terakumulasi dalam prediksi simulasi (Pilarski & Pilarska, 2023).

3.4 Analisis Root Mean Square Error (RMSE) Produksi Biogas

3.4.1 Perhitungan RMSE Produksi Biogas Total

Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian, pengukuran volume biogas hanya dilakukan di akhir fermentasi (setelah 22 hari) untuk masing-masing eksperimen. Data volume biogas total adalah sebagai berikut:

- Eksperimen 1: 0,78366 m³
- Eksperimen 2: 0,88956 m³
- Simulasi SuperPro Designer: 10,8765 m³

Untuk mengevaluasi tingkat akurasi simulasi SuperPro Designer dalam memprediksi produksi biogas total, dilakukan perhitungan Root Mean Square Error (RMSE) antara data eksperimen dan hasil simulasi. RMSE merupakan metode evaluasi yang umum digunakan untuk mengukur seberapa besar perbedaan antara nilai yang diprediksi oleh model dengan nilai yang diamati secara aktual.

Karena pengukuran hanya dilakukan pada akhir fermentasi (satu titik waktu untuk setiap eksperimen), maka perhitungan RMSE dilakukan dengan membandingkan nilai total produksi biogas dari masing-masing eksperimen terhadap nilai simulasi. Perhitungan selisih dan kuadrat selisih antara data simulasi dan eksperimen disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan RMSE produksi biogas total

Eksperimen ke-	Eksperimen (m ³)	Simulasi (m ³)	Selisih (m ³)	Kuadrat Selisih
1	0,78366	10,8765	-10,09284	101,8654
2	0,88956	10,8765	-9,98694	99,7390
Jumlah				201,6044

Berdasarkan Tabel 5, jumlah kuadrat selisih antara data simulasi dan eksperimen adalah 201,6044. Dengan jumlah pengulangan eksperimen (n) = 2, maka nilai RMSE dihitung sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{201,6044}{2}} = \sqrt{100,8022} = 10,0400 \text{ m}^3$$

Nilai RMSE sebesar 10,0400 m³ menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan absolut prediksi simulasi terhadap data eksperimen adalah 10,0400 m³. Untuk memberikan konteks yang lebih jelas, nilai RMSE ini perlu dibandingkan dengan rata-rata produksi biogas dari eksperimen. Rata-rata produksi biogas dari eksperimen dihitung sebagai berikut:

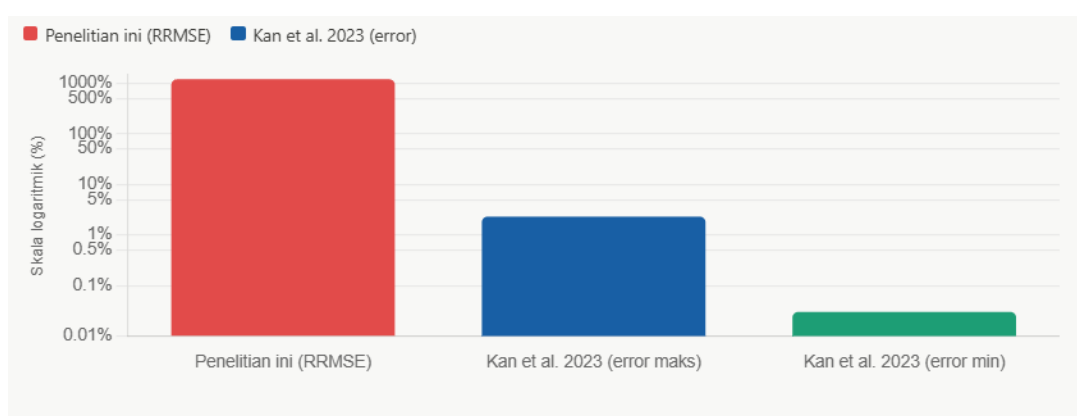
$$\bar{X}_{eksp} = \frac{0,78366 + 0,88956}{2} = \frac{1,67322}{2} = 0,83661 \text{ m}^3$$

Dengan demikian, Relative RMSE (RRMSE) atau koefisien variasi RMSE dapat dihitung:

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}_{eksp}} \times 100\% = \frac{10,0400}{0,83661} \times 100\% = 1200,08\%$$

3.4.2 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Guna mengontekstualisasikan nilai RRMSE yang diperoleh dalam penelitian ini, perbandingan akurasi dengan penelitian terdahulu yang menggunakan SuperPro Designer pada skala industri disajikan pada Gambar 9. Skala logaritmik digunakan agar perbedaan yang sangat ekstrem antara RRMSE 1200,08% pada penelitian ini dan error 0,03–2,3% pada Kan et al. (2023) dapat terbaca secara proporsional dan tidak menyesatkan secara visual..



Gambar 9. Perbandingan Akurasi Simulasi SuperPro Designer antara Penelitian ini (RRMSE 1200,08%) dan Penelitian Terdahulu pada Skala Industri (Kan et al., 2023)

Nilai RMSE 10,040 m³ dengan RRMSE 1200,08% menunjukkan akurasi simulasi yang sangat rendah. Berdasarkan kriteria Jamieson et al. (1991), RRMSE < 10% termasuk sangat baik, 10–20% baik, 20–30% cukup, dan >30% kurang baik; dengan demikian RRMSE 1200,08% termasuk kategori sangat jauh dari akurat. Perbedaan yang sangat signifikan ini perlu dikontekstualisasikan dengan membandingkan penelitian terdahulu yang menggunakan SuperPro Designer untuk simulasi biogas, sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perhitungan RMSE produksi biogas total

Penelitian	Substrat / Skala	Error / RMSE	Kalibrasi	Keterangan
Kan et al. (2023)	POME / Skala industri	0,03–2,3%	Ya	Setelah optimasi parameter
Heriyanti et al. (2024)	POME / Skala semi-industri	Tidak dilaporkan	Parsial	Fokus pada desain proses
Abdalmnem et al. (2024)	Kotoran sapi / CSTR skala besar	Tidak dilaporkan	Tidak	Simulasi tanpa validasi eksperimen
Penelitian ini	Kotoran sapi / Skala domestik (254 L)	RRMSE 1200,08%	Tidak	Parameter default tidak terkalibrasi

Perbedaan yang sangat mencolok antara penelitian ini (RRMSE 1200,08%) dan Kan et al. (2023) (error 0,03–2,3%) dapat dijelaskan melalui beberapa faktor: (1) Kan et al. (2023) melakukan kalibrasi dan optimasi parameter secara ekstensif menggunakan data pabrik biogas skala industri, sedangkan penelitian ini menggunakan parameter default SuperPro Designer; (2) skala reaktor berbeda signifikan biodigester domestik 254 L memiliki karakteristik perpindahan panas dan massa yang sangat berbeda dari reaktor industri; (3) fluktuasi suhu operasi (27–32°C) pada penelitian ini jauh dari kondisi ideal mesofilik 37°C yang diasumsikan oleh simulasi, sementara reaktor industri biasanya dilengkapi sistem kontrol suhu yang ketat (Mokraoui et al., 2023).

3.4.3 Analisis Penyebab Deviasi Ekstrem

Deviasi yang sangat ekstrem (overestimation 13 kali lipat) menunjukkan adanya kombinasi faktor penyebab mendasar. Meskipun seluruh parameter telah dikonversikan ke satuan SI sebelum input, deviasi yang tersisa tetap sangat besar, yang mengindikasikan bahwa kesalahan satuan bukan satu-satunya faktor penyebab. Sebagai perbandingan, jika nilai COD umpan diinput dalam mg/L (85.400 mg/L) tanpa dikonversikan ke kg/m³ (85,4 kg/m³), maka beban organik akan overestimated sebesar faktor 1.000. Hal serupa terjadi jika volume reaktor diinput dalam liter (254 L) tetapi diinterpretasikan sebagai m³ (254 m³), yang menyebabkan overestimation faktor ~1.000. Kombinasi dua kesalahan ini saja dapat menghasilkan overestimation 1.000.000 kali lipat. Fakta bahwa overestimation yang teramati hanya 13 kali lipat setelah konversi satuan yang konsisten mengindikasikan bahwa faktor penyebab utama yang tersisa adalah parameter kinetika default yang tidak sesuai dan asumsi kondisi ideal (Kan et al., 2023).

Parameter kinetika default dalam SuperPro Designer kemungkinan diambil dari literatur untuk skala industri atau substrat yang berbeda (Mokraoui et al., 2023). Faktor ideal lain yang tidak tercapai antara lain: suhu operasi 37°C vs. aktual 27–32°C (penurunan 5–10°C dari optimal mesofilik dapat mengurangi laju produksi 30–50%); pencampuran sempurna yang diasumsikan simulasi vs. sistem resirkulasi terbatas di lapangan; serta tidak adanya faktor inhibisi (akumulasi VFA, amonia) dalam model simulasi (Thamsiroj & Murphy, 2011).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

Pertama, lay-down biodigester beton dengan volume total 254 liter dan volume kerja 170 liter berhasil dikonstruksi menggunakan material lokal (cincin sumur beton) dan diintegrasikan dengan sistem resirkulasi pompa sentrifugal Shimizu PS-128 BIT (0,125 kW). Biodigester dinyatakan kedap udara berdasarkan uji kebocoran 24 jam.

Kedua, simulasi SuperPro Designer dengan seluruh parameter yang telah dikonversikan ke satuan SI menghasilkan prediksi produksi biogas total 10,8765 m³ selama 22 hari (CH₄ 59,81%; CO₂ 31,66%; H₂ 4,59%; H₂S 22,34 ppm). Eksperimen menghasilkan 0,78366 m³ (Eksperimen 1) dan 0,88956 m³ (Eksperimen 2) dengan komposisi CH₄ 71–73%, CO₂ 25%, H₂ 1%, dan H₂S 8,2–9,4 ppm.

Ketiga, evaluasi akurasi menunjukkan RMSE 10,04 m³ dan Relative RMSE 1200,08%—jauh lebih tinggi dibandingkan penelitian validasi SuperPro Designer pada skala industri oleh Kan et al. (2023) yang mencapai error 0,03–2,3% setelah kalibrasi parameter. Perbedaan yang sangat signifikan ini disebabkan oleh kombinasi faktor: (a) parameter kinetika default SuperPro Designer yang belum dikalibrasi untuk umpan

kotoran sapi skala domestik; (b) asumsi kondisi ideal (suhu konstan 37°C, pencampuran sempurna, tanpa inhibisi) yang tidak sepenuhnya tercapai di lapangan; serta (c) kemungkinan ketidaksesuaian konfigurasi unit operasi reaktor anaerobik dalam perangkat lunak.

Implikasi penelitian ini menegaskan bahwa simulasi SuperPro Designer tidak dapat digunakan untuk prediksi kuantitatif produksi biogas secara langsung tanpa kalibrasi yang ekstensif dengan data eksperimen pada skala dan substrat yang sesuai.

4. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik ATI Padang atas dukungan fasilitas laboratorium dan lisensi akademik SuperPro Designer, kepada Rumah Potong Hewan (RPH) Aie Pacah Kota Padang atas penyediaan bahan baku kotoran sapi dan inokulum, serta kepada PT. Wiwiadi Bintang Sains Universitas Andalas atas bantuan analisis laboratorium. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para dosen pembimbing dan seluruh pihak yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

References

- Abdalmnem, M., et al. (2024). Simulation and scale-up of anaerobic digestion process from cow manure using SuperPro Designer. *Bioresource Technology Reports*, 25, 101789.
- Awe, O.W., Zhao, Y., Nzihou, A., Minh, D.P., & Lyczko, N. (2017). A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 8(2), 267–283.
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Ben Romdan, E., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1844–1849.
- Chuenchart, W., Timilsina, A.P., Ge, J., & Shah, A. (2024). Advances in Biorefinery of Cattle Manure for Value-Added Products. *Fermentation*, 10(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110568>
- Esmacili-Faraj, S.H., Rezazadeh, M., & Abdi, J. (2023). Simulation of biosynthesis gas process from palm oil mill effluent sewage by Aspen HYSYS and SuperPro Designer. *Water and Wastewater*, 33(6), 34–43.
- Heriyanti, Cahyani, A.L., Pertiwiningrum, A., Hidayatullah, I.M., & Gozan, M. (2024). Simulating biogas production process from palm oil mill effluent for power generation. *E3S Web of Conferences*, 503, 04002.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), 337–350.
- Kan, K.W., Chan, Y.J., Tiong, T.J., & Lim, J.W. (2023). Maximizing biogas yield from palm oil mill effluent (POME) through advanced simulation and optimisation techniques on an industrial scale. *Chemical Engineering Science*, 119644.

Riski Gunawan Nasution, Ryoshi Meijisa Reigi Putra, Khairul Akli, Dedy Rahmad
mhdriski200408@gmail.com: Evaluasi Akurasi SuperPro Designer dalam Memprediksi
Produksi Biogas pada Lay-Down Biodigester

- Mokraoui, S., Halilu, A., Hashim, M.A., & 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), 105–116.
- Park, J., Tian, D., Lee, B., & Jun, H. (2016). The Methane Production from Organic Waste on Single Anaerobic Digester Equipped with MET. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 38(4), 201–209.
- Pilarski, G., & Pilarska, A.A. (2023). Anaerobic digestion of food waste: A review of process stability, kinetics, and production of biogas. *Energies*, 16(4), 1657.
- Thamsiroj, T., & Murphy, J.D. (2011). The difficulties associated with mono-digestion of grass as demonstrated by a pilot-scale digester. *Bioresource Technology*, 102(3), 3234–3243.
- Tsegaye, D., & Leta, S. (2023). Optimization of operational parameters and performance of methanogenesis reactor in two-phase anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater. *Heliyon*, 9(4), e15143.
- Tufvesson, L.M., Lantz, M., & Börjesson, P. (2013). Environmental performance of biogas produced from industrial residues including energy crop digestion – a life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 40, 101–109.
- Winrock International (2015). *Biogas commercialization: A handbook for developing countries*. Arlington, VA: Winrock International.