

PEMODELAN DAN ANALISIS PROSES PRODUKSI BIOGAS DARI KOTORAN SAPI: STUDI SIMULASI MENGGUNAKAN SUPERPRO DESIGNER DAN EVALUASI KINERJA

¹Riski Gunawan Nasution, ²Yoga Fernanda Syaputra

¹Teknik Kimia, Teknologi Rekayasa Bioproses Energi Terbarukan, Politeknik ATI Padang, Padang 25171

²Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Padang 25586

*Penulis korespondensi: mhdriski200408@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini mengembangkan sebuah model simulasi keadaan-tunak untuk produksi biogas berbahan baku kotoran sapi dengan memanfaatkan perangkat lunak SuperPro Designer. Tujuannya adalah mengevaluasi performa proses pada kondisi operasi tertentu, yaitu suhu mesofilik (37°C), pH 7, dan waktu tinggal hidrolis (HRT) 30 hari. Komposisi kotoran sapi yang digunakan adalah 8,7% karbohidrat, 2,7% protein, 3,6% lemak, dan 85% air. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa dari umpan 1000 kg/jam dihasilkan biogas 25,42 kg/jam dengan komposisi metana (76,45%), karbon dioksida (22,19%), hidrogen sulfida (0,6%), dan hidrogen (0,74%). Yield metana yang dicapai sebesar 0,388 Nm³ CH₄/kg VS dengan tingkat degradasi VS 45,2%. Hasil ini menunjukkan kesesuaian dengan data literatur yang ada, meskipun perbandingan tersebut tidak dapat menggantikan validasi eksperimental yang ketat. Model ini dapat menjadi dasar konseptual dalam perancangan awal proses biogas, dengan catatan bahwa validasi eksperimen dan analisis ketidakpastian lebih lanjut tetap diperlukan sebelum penerapan praktis.

Kata kunci: Biogas; Kotoran Sapi; SuperPro Designer; Simulasi Steady-State; Metana; Digestasi Anaerobik

Abstract. This study develops a steady-state simulation model for biogas production using cow manure as feedstock through SuperPro Designer software. The aim is to assess process performance under specific operational parameters: mesophilic temperature (37°C), pH 7, and hydraulic retention time (HRT) of 30 days. The manure composition used was 8.7% carbohydrates, 2.7% protein, 3.6% fat, and 85% water. Simulation results indicated biogas production of 25.42 kg/h from a feed rate of 1000 kg/h, consisting of methane (76.45%), carbon dioxide (22.19%), hydrogen sulfide (0.6%), and hydrogen (0.74%). The methane yield obtained was 0.388 Nm³ CH₄/kg VS with a VS destruction rate of 45.2%. These outcomes align with existing literature data, although such comparison does not substitute rigorous experimental validation. The model serves as a conceptual foundation for preliminary biogas process design, emphasizing the necessity for further experimental validation and uncertainty analysis prior to practical implementation.

Keywords: Biogas; Cow Dung; SuperPro Designer; Steady-State Simulation; Methane; Anaerobic Digestion

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Biogas dihasilkan dari dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerobik. Komponen utamanya adalah metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), di mana kandungan CH₄ di atas 50% menjadikannya mudah terbakar dan bernilai energi tinggi. Rasio C/N yang optimal untuk produksi biogas berkisar antara 20:1 hingga 40:1 (Kartono, 2020).

Sebagai sumber energi terbarukan, biogas menawarkan solusi terhadap krisis energi dan perubahan iklim. Kotoran sapi merupakan bahan baku yang menjanjikan karena ketersediaannya melimpah dan kandungan organik yang tinggi. Penggunaannya tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga menyediakan energi alternatif untuk kebutuhan rumah tangga, industri, dan pembangkit listrik (Kartono, 2020).

Proses pembentukan biogas meliputi empat tahapan: hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis. Parameter seperti suhu (37°C), pH netral, HRT (30 hari), dan rasio C/N yang sesuai sangat menentukan efisiensi proses.

Eksperimen langsung untuk menguji berbagai skenario operasi seringkali memerlukan biaya dan waktu yang besar. Simulasi komputer dengan perangkat lunak seperti SuperPro Designer memungkinkan pemodelan virtual proses biogas, pengujian parameter, dan prediksi hasil sebagai langkah awal sebelum penelitian eksperimental. Simulasi semacam ini dapat menghemat sumber daya dan membantu mengidentifikasi kondisi yang layak untuk dikaji lebih lanjut.

SuperPro Designer telah diaplikasikan dalam berbagai pemodelan proses bioteknologi, termasuk produksi biogas. Zhang et al. (2020) menunjukkan bahwa simulasi perangkat lunak dapat menganalisis variabel operasional seperti suhu, pH, dan HRT dalam konteks produksi metana. Namun, validasi hasil simulasi dengan data eksperimen tetap diperlukan untuk memastikan keakuratan model.

1.2 Research Gap dan Tujuan Penelitian

Meskipun banyak studi yang melakukan simulasi produksi biogas, masih terdapat keterbatasan dalam pemodelan berbasis kotoran sapi dengan karakteristik lokal yang memperhitungkan neraca massa dan stoikiometri reaksi secara komprehensif. Penelitian terdahulu sering kali mengabaikan konsistensi unsur dalam reaksi atau menggunakan asumsi konversi yang terlalu disederhanakan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model simulasi keadaan-tunak yang detail dan konsisten secara stoikiometri untuk produksi biogas dari kotoran sapi, dengan fokus pada penutupan neraca massa dan analisis sensitivitas. Model ini kemudian dibandingkan dengan data literatur untuk mengevaluasi konsistensinya, dengan penekanan bahwa hal ini bukan pengganti validasi eksperimental.

Melalui simulasi ini, diharapkan penelitian dapat menjadi landasan konseptual untuk analisis teknis lebih lanjut, terutama di daerah dengan potensi peternakan tinggi. Hasilnya dapat menjadi referensi awal bagi peneliti dalam merancang proses biogas, dengan catatan bahwa implementasi praktis memerlukan studi lebih lanjut termasuk validasi eksperimental, analisis ekonomi, dan kajian daur hidup.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan dan Data Input

Simulasi ini menggunakan kotoran sapi sebagai umpan utama. Data komposisi kotoran sapi, yaitu protein (18.0%), lemak (24.0%), dan karbohidrat (58.0%) pada basis kering, mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Chuenchart dan rekannya pada tahun 2024. Dalam simulasi, protein dimodelkan sebagai senyawa $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$, lemak

sebagai $C_{57}H_{104}O_6$, dan karbohidrat sebagai $C_6H_{10}O_5$ untuk memudahkan perhitungan stoikiometri dan kinetika reaksi.

Kondisi operasi yang ditetapkan adalah suhu mesofilik $37^{\circ}C$ pada tekanan atmosfer (1 atm). Proses berlangsung dengan Waktu Retensi Hidrolik (HRT) selama 30 hari. Umpan berupa slurry dengan rasio pengenceran 1:1 antara kotoran sapi dan air. Laju alir umpan dasar untuk perhitungan simulasi adalah 1000 kg/jam. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak SuperPro Designer versi 10. Metode termodinamika yang digunakan adalah NRTL untuk fasa cair dan persamaan Gas Ideal untuk fasa gas. Simulasi dijalankan dalam kondisi *steady-state* untuk mendapatkan hasil yang stabil dan konsisten.

2.2. Pelaksanaan Simulasi

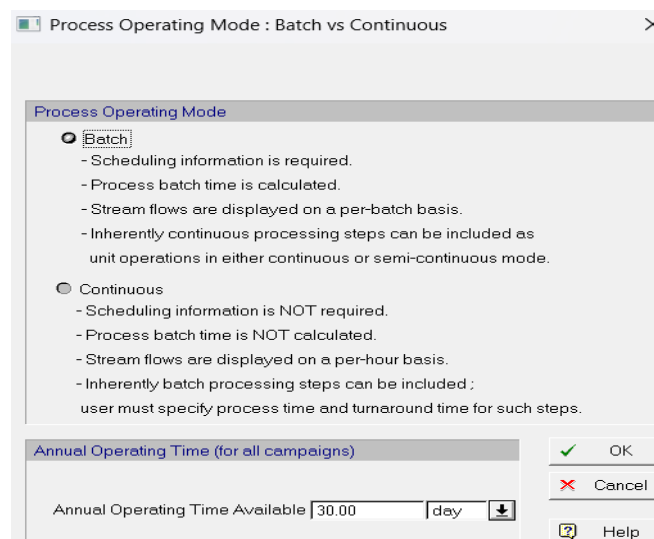
Pelaksanaan simulasi dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap yang dijalankan pada perangkat lunak SuperPro Designer. Tahap pertama adalah pembuatan model proses, di mana aliran produksi biogas direpresentasikan menggunakan unit-unit operasi standar seperti *feed tank*, *mixer*, dan reaktor anaerob digester yang menjadi inti proses. Tahap selanjutnya adalah input data, di mana seluruh parameter yang telah ditentukan pada bagian 2.1 dimasukkan ke dalam model. Data ini mencakup komposisi spesifik bahan baku (kotoran sapi), laju alir umpan (1000 kg/jam slurry), serta kondisi operasi seperti suhu ($37^{\circ}C$) dan Waktu Retensi Hidrolik (30 hari).

Setelah model dan data siap, simulasi proses dijalankan. Simulasi *steady-state* ini menghasilkan neraca massa dan energi yang lengkap. Keluaran utama dari simulasi adalah perkiraan volume dan komposisi biogas (terutama kandungan metana), serta berbagai metrik kinerja proses lainnya. Hasil simulasi kemudian memasuki tahap analisis data. Pada tahap ini, data output dianalisis untuk mengidentifikasi parameter operasi yang memberikan pengaruh paling signifikan terhadap yield dan kualitas biogas yang dihasilkan.

Tahap akhir adalah verifikasi model, di mana hasil simulasi dari model yang telah dibuat dibandingkan dengan data empiris atau hasil penelitian serupa dari literatur. Perbandingan ini dilakukan untuk menguji validitas dan konsistensi model simulasi yang dikembangkan sebelum digunakan untuk analisis lebih lanjut.

2.3 Pemilihan Proses

Proses simulasi dilakukan dalam mode operasi kontinu (continuous), sesuai dengan karakteristik operasional digester anaerobik skala komersial yang umumnya berjalan secara berkelanjutan. Dalam mode ini, aliran massa dan energi diasumsikan stabil sepanjang waktu (*steady-state*), sehingga perhitungan penjadwalan (*scheduling*) antar unit operasi tidak diperlukan. Pemilihan mode ini dilakukan pada tahap awal pemodelan di lingkungan SuperPro Designer v10. Pemilihan dapat dilakukan di awal setelah membuka *software* dan memilih *new sheet* atau juga dapat dilakukan selama melakukan simulasi dengan tahapan *tasks* -> *set mode of operation* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Antarmuka pemilihan mode operasi (*Batch* vs. *Continuous*) dalam SuperPro Designer v10.

2.4 Mendefinisikan Komponen

Komponen kimia dan campuran yang terlibat dalam proses didefinisikan dalam dua kategori di dalam SuperPro Designer: *pure components* (komponen murni) dan *stock mixtures* (campuran stok). Database bawaan perangkat lunak (v10) menyediakan pustaka yang luas untuk kedua kategori ini. Dalam simulasi ini, beberapa senyawa spesifik yang diperlukan untuk memodelkan degradasi kotoran sapi seperti *Cystine* sebagai representasi produk hidrolisis protein tidak tersedia dalam database standar. Oleh karena itu, komponen-komponen tersebut ditambahkan secara manual sebagai *pure components* dengan mendefinisikan properti fisik-kimianya (seperti rumus molekul, berat molekul, dan densitas) berdasarkan data dari sumber literatur terpercaya (mis., PubChem, SciFinder).

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 1. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan yang lebih akurat terhadap substrat kompleks dibandingkan hanya mengandalkan komponen database generik.

Tabel 1. Komposisi Kotoran Sapi (Basis Kering) sebagai Dasar untuk *Stock Mixture*

Komponen	Persentase	Rumus Kimia (untuk Simulasi)
Protein	18.0%	$C_5H_7NO_2$
Lemak	24.0%	$C_{57}H_{104}O_6$
Karbohidrat	58.0%	$C_6H_{10}O_5$
Total	100.0%	

Sumber: (Chuenchart et al. 2024)

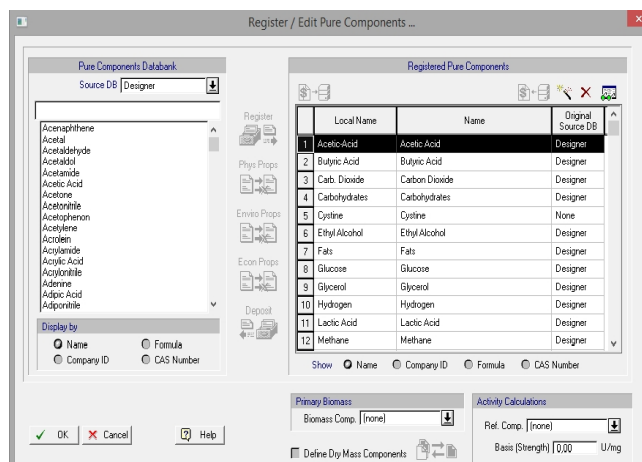
Dalam penelitian ini, beberapa senyawa seperti *Cystine* tidak tersedia di dalam basis data bawaan SuperPro Designer. Oleh karena itu, senyawa-senyawa tersebut ditambahkan secara manual sebagai *pure components* dengan mendefinisikan properti fisik masing-masing, termasuk rumus kimia, *molecular weights*, *density*, dan *boiling point*.

Riski Gunawan Nasution, Yoga Fernanda Syaputra

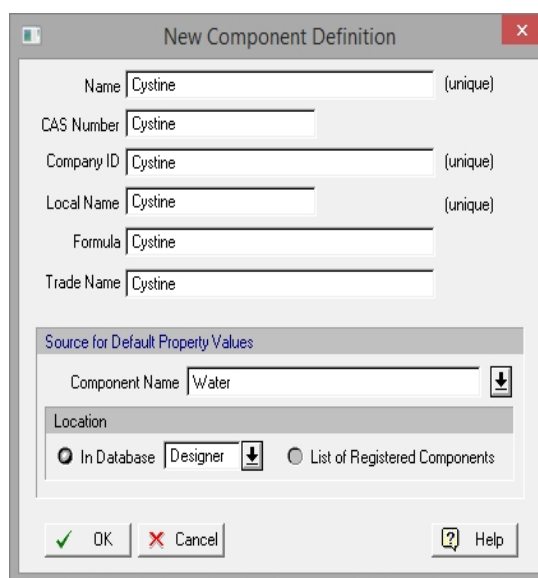
Corr Author: yogafernanda131@gmail.com

Pemodelan Dan Analisis Proses Produksi Biogas Dari Kotoran Sapi: Studi Simulasi Menggunakan Superpro Designer Dan Evaluasi Kinerja

Datasheet properti fisik tersebut diperoleh dari *website* (*sciencelab*, *wolframalpha* dan *pubchem*). Pengaturan *input* komponen yang cantumkan ke dalam simulasi seperti yang terlihat pada Gambar 2 dan properti fisik terlihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Pengaturan *input* Komponen pada SuperPro Designer.



Gambar 3. Pengaturan Properti Fisik Komponen Baru

2.5 Penentuan Unit Prosedur

Setelah komponen didefinisikan, langkah pemodelan berikutnya adalah memilih dan mengkonfigurasi unit operasi berdasarkan fungsi yang diperlukan dalam proses produksi biogas. Dalam SuperPro Designer, pemodelan dilakukan dengan menyusun *unit procedure* yang tersedia pada *toolbox* perangkat lunak ke dalam *worksheet*. Setiap *unit procedure* mewakili sebuah langkah operasi (seperti pencampuran, reaksi, atau pemisahan) dan berisi parameter teknis yang harus didefinisikan.

Untuk simulasi *steady-state* ini, mode operasi kontinu (*continuous*) digunakan, mengingat karakteristik operasi digester anaerobik yang berkelanjutan. Setelah unit-unit ditempatkan, aliran massa (*streams*) dihubungkan untuk membentuk rangkaian proses

dari umpan hingga produk. Kondisi operasi untuk setiap unit (seperti suhu, tekanan, dan waktu tinggal) ditentukan berdasarkan literatur terkait produksi biogas dari kotoran sapi. Spesifikasi peralatan dihitung secara otomatis oleh perangkat lunak dalam *Design Mode* berdasarkan laju alir dan kondisi proses yang ditetapkan. Konfigurasi unit operasi yang digunakan dalam simulasi ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Unit Operasi yang Digunakan dalam Simulasi

Nama Alat	Kode Alat	Fungsi
Anaerobic Digestion	AD-101	Reaktor utama tempat berlangsungnya reaksi anaerobik (13 reaksi stoikiometri)
Mixer	MX-101	Mencampur kotoran sapi dengan air pada rasio 1:1
Feed Tank (Liquid Drum)	LD-101	Menyimpan slurry campuran dan melakukan pra-pemanasan hingga 37°C
Centrifugal Pump	PM-101	Mengalirkan slurry dari feed tank ke reaktor anaerobik

2.6 Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif untuk mengevaluasi performa model yang dikembangkan. Produksi gas metana menjadi parameter utama dalam menilai hasil simulasi, di mana kisaran target produksi metana adalah antara 50% hingga 80% dari total volume biogas yang dihasilkan. Jika hasil simulasi tidak sesuai dengan rentang tersebut, maka dilakukan peninjauan kembali terhadap model yang dibangun, termasuk pemeriksaan definisi operasi dan input spesifikasi.

Kesalahan-kesalahan tersebut akan terdeteksi secara otomatis dan ditampilkan melalui panel output setelah simulasi dijalankan. indikator tersebut berupa pesan yang memiliki 2 bagian yaitu:

1. Indikator tingkat kesalahan

a. Internal Warning() dan Internal Error()

Merupakan jenis peringatan yang muncul akibat ketidaksesuaian dalam perhitungan material dan energi (M&E) balance. Namun, kesalahan ini tergolong minor dan biasanya tidak berdampak signifikan terhadap keseluruhan proses, sehingga sering kali diabaikan oleh pengguna.

b. Warning()

Indikator ini menunjukkan adanya nilai atau kondisi yang tidak sesuai ekspektasi. Meskipun simulasi tetap dapat dijalankan, validitas hasil menjadi diragukan. Oleh karena itu, keputusan untuk mengabaikan atau menyelidiki peringatan ini bergantung pada kebijakan pengguna.

c. Non-Severe Error()

Jenis kesalahan ini terjadi ketika sistem mengalami gangguan, namun berhasil kembali ke proses semula tanpa terhenti. Meski demikian, jika tidak segera ditangani,

kesalahan ini berpotensi menghasilkan keluaran yang tidak akurat atau tidak lengkap.

d. Severe Error(✖)

Merupakan kondisi kritis yang menyebabkan aplikasi gagal menjalankan perintah utama. Masalah ini harus diselesaikan terlebih dahulu oleh pengguna sebelum proses simulasi dapat dilanjutkan.

2. Penjelasan ringkas mengenai sumber *error*.

Jika hasil simulasi tidak memenuhi target yang telah ditetapkan, maka proses iteratif akan dilakukan dengan meninjau kembali model yang dibangun, sehingga memungkinkan dilakukannya evaluasi dari segi teknis dan ekonomis (Intelligen, 2021).

2.7 Asumsi dan Keterbatasan Model

Untuk memungkinkan pemodelan dan perhitungan, simulasi ini dibangun berdasarkan beberapa asumsi utama. Pertama, proses diasumsikan beroperasi dalam kondisi *steady-state*, yang berarti tidak ada perubahan parameter terhadap waktu selama simulasi berjalan. Kedua, reaksi biokimia anaerob dimodelkan menggunakan pendekatan stoikiometri dengan konversi tetap berdasarkan data literatur. Pendekatan ini mengabaikan kinetika reaksi yang sebenarnya dan dinamika kompleks populasi mikroba di dalam digester.

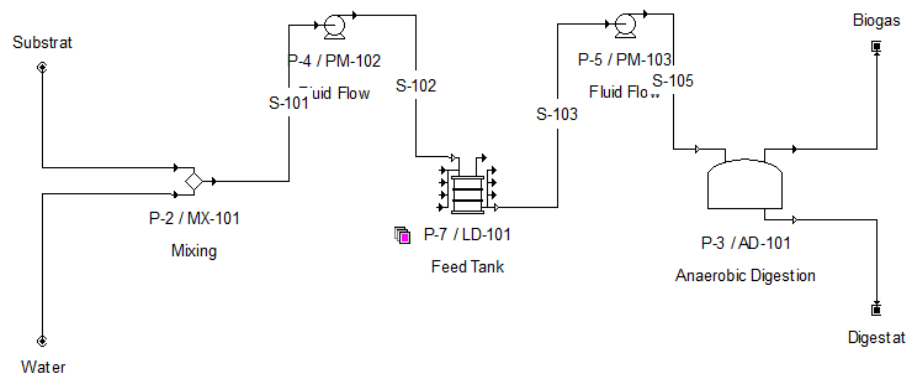
Ketiga, untuk kesetimbangan fasa, kelarutan komponen gas seperti CO_2 , H_2S , dan CH_4 dalam fasa cair diperkirakan menggunakan koefisien empiris, bukan model kesetimbangan termodinamika yang lebih rigor. Keempat, model tidak memasukkan mekanisme inhibisi proses, seperti efek yang dapat ditimbulkan oleh akumulasi amonia, asam lemak volatil (VFA), atau logam berat. Kelima, komposisi umpan (kotoran sapi) diasumsikan konstan dan homogen, sehingga variasi alami yang biasa terjadi pada bahan baku nyata tidak diperhitungkan.

Kumpulan asumsi ini mengimplikasikan bahwa model yang dikembangkan berfungsi terutama sebagai alat estimasi konseptual dan perbandingan. Model memberikan gambaran umum dan tren dari proses produksi biogas, namun memiliki keterbatasan untuk digunakan sebagai simulator prediktif yang akurat bagi operasi nyata di lapangan, yang melibatkan dinamika dan variabilitas yang lebih kompleks.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Pembentukan metana dalam reaktor biogas merupakan hasil dari serangkaian proses biokimia kompleks yang dilakukan oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerobik (tanpa oksigen). Adapun Diagram Alir Proses dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Proses untuk Simulasi Digesti Anaerobik Kotoran Sapi (Sistem Dasar)

Aliran input pertama berisi bahan baku kotoran sapi yang berupa karbohidrat, protein, lemak dan air dengan komposisi berat masing-masing 8.7%, 2.7%, 3.6% dan 85% air. Sebelum dialirkan ke dalam reaktor, bahan baku terlebih dahulu mengalami pra-perlakuan dengan penambahan air pada rasio 1:1 melalui aliran input sekunder, guna mencapai konsistensi yang sesuai. Substrat dimasukkan ke dalam reaktor anaerob dalam kondisi mesofilik, dengan suhu operasi 37°C dan tekanan 1 atmosfer. Reaktor ini menjalankan 13 reaksi kimia dan biokimia utama yang berlangsung dalam kondisi tersebut. Digester mengeluarkan dua aliran di mana aliran atas mengeluarkan gas (biogas) dan aliran bawah mengeluarkan digestat. Rincian reaksi beserta koefisien massa yang digunakan dalam simulasi reaktor disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Reaksi-Reaksi dalam Proses Anaerobik dengan Verifikasi Keseimbangan Massa

No	Reaksi	Reaktan		Produk	
		Komponen	Mass-Koef	Komponen	Mass- Koef
1	Hidrolisis <i>Carbohydrates</i>	<i>Carbohydrates</i>	147,6	<i>Glucose</i>	295,2
		<i>Water</i>	147,6		
2	Hidrolisis Fats	<i>Fats</i>	147,6	<i>Glycerol</i>	36,85
				<i>Oleic Acid</i>	110,75
3	Hidrolisis Proteins	<i>Protein</i>	147,6	<i>Crystine</i>	147,6
4	Asidogenesis <i>Cystine</i>	<i>Cystine</i>	164,16	<i>Lactic Acid</i>	90,08
				<i>Propionic Acid</i>	74,08
5	Asidogenesis <i>Oleic Acid</i>	<i>Oleic Acid</i>	194,2	<i>Acetic Acid</i>	60,04
				<i>Butyric Acid</i>	88,11
				<i>Ethyl Alcohol</i>	46,05
6	Asidogenesis <i>Glucose</i>	<i>Glucose</i>	106,122	<i>Acetic Acid</i>	60,053
				<i>Ethyl Alcohol</i>	46,069
7	Asidogenesis <i>Glycerol</i>	<i>Glycerol</i>	74,08	<i>Propionic Acid</i>	74,08
8	Asetogenesis <i>Ethil Alcohol</i>	<i>Ethyl Alcohol</i>	62,072	<i>Acetic Acid</i>	60,053
				<i>Hydrogen</i>	2,019
				<i>Acetic Acid</i>	60,053

No	Reaksi	Reaktan		Produk	
		Komponen	Mass-Koef	Komponen	Mass- Koef
9	<i>Lactic Acid</i>	<i>Lactic Acid</i>	90,078	<i>Carbon Dioxide</i>	28,009
				<i>Hydrogen</i>	2,016
10	<i>Asetogenesis Butyric Acid</i>	<i>Butyric Acid</i>	88,106	<i>Acetic Acid</i>	60,053
				<i>Carbon Dioxide</i>	28,053
11	<i>Asetogenesis Propionic Acid</i>	<i>Propionic Acid</i>	74,08	<i>Acetic Acid</i>	60,053
				<i>Carbon Dioxide</i>	12,011
				<i>Hydrogen</i>	2,016
12	<i>Metanogenesis Acetic Acid</i>	<i>Acetic Acid</i>	60,052	<i>Carbon Dioxide</i>	30
				<i>Metana</i>	30,053
	<i>Metanogenesis Carbon Dioxide</i>	<i>Carbon Dioxide</i>	44,01	<i>Metana</i>	28,011
13		<i>Hydrogen</i>	2,106	<i>Water</i>	18,015

Sumber: (Wahyudi dan Jelita, 2024)

Pada proses simulasi yang dilakukan, umpan yang telah tercampur di Mixer akan dialirkan menuju tangka umpan dan temperatur yang digunakan yaitu 37°C yang dimana suhu yang diperlukan dalam proses pembuatan biogas dapat terbentuk karena keberadaan bakteri *Methanobacterium* yang berkembang secara optimal pada suhu mesofilik selama proses fermentasi anaerobik.. Adapun hasil yang didapat pada simulasi pada Tabel 4.

Tabel 4. Neraca Massa Lengkap untuk Kondisi Operasi Dasar

Stream	Komponen	Laju Alir (kg/jam)	Fraksi Massa	Catatan
Input	Kotoran Sapi	500	0.5	
	Air	500	0.5	
	Total	1000	1	
Output Biogas	Metana (CH ₄)	19.43	0.7645	76.45%
	Karbon Dioksida (CO ₂)	5.64	0.2219	22.19%
	Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	0.15	0.006	0.60%
	Hidrogen (H ₂)	0.19	0.0074	0.74%
	Total	25.42	0.0254	
Output Digestat	Air	920.15	0.9443	
	Padatan	54.43	0.0557	
	Total	974.58	0.9746	

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak SuperPro Designer dengan basis perhitungan 1000 kg/jam slurry umpan. Seperti ditunjukkan pada Tabel 4, neraca massa menunjukkan konsistensi dengan total input 1000 kg/jam dan total output 1000 kg/jam (25.42 kg/jam biogas + 974.58 kg/jam digestat). Komposisi slurry umpan terdiri dari kotoran sapi dan air dengan rasio 1:1, menghasilkan kandungan organik sebesar 1.35% protein, 1.8% lemak, 4.35% karbohidrat, dan 92.5% air.

Dari hasil simulasi, diperoleh beberapa metrik kinerja kunci:

1. Methane Yield: $0.388 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS added}$
2. VS Destruction: 45.2%
3. Biogas Production Rate: $0.508 \text{ Nm}^3/\text{kg VS added}$

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metana (CH_4) mendominasi komposisi biogas dengan persentase 76.45%, disertai karbon dioksida (22.19%), hidrogen sulfida (0.60%), dan hidrogen (0.74%). Yield metana sebesar $0.388 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ menunjukkan efisiensi konversi yang berada dalam rentang yang diharapkan untuk digesti anaerobik kotoran sapi pada kondisi mesofilik.

Komposisi biogas hasil simulasi menunjukkan kandungan metana >70%, yang secara teoritis mendekati spesifikasi untuk aplikasi energi. Namun, keberadaan hidrogen sulfida pada level 0,60% mengindikasikan kebutuhan kritis akan unit desulfurisasi dalam. Namun, keberadaan hidrogen sulfida pada level 0.60% mengindikasikan kebutuhan unit desulfurisasi dalam sistem yang sebenarnya, mengingat H_2S bersifat korosif dan berbahaya bagi peralatan serta lingkungan.

Nilai VS destruction sebesar 45.2% menunjukkan bahwa hampir setengah dari volatile solids dalam umpan terkonversi menjadi biogas, sedangkan sisanya tetap dalam digestat. Tingkat konversi ini konsisten dengan karakteristik kotoran sapi yang mengandung fraksi lignoselulosa yang sulit terdegradasi.

SuperPro Designer memungkinkan evaluasi berbagai skenario proses, termasuk variasi parameter seperti suhu, pH, dan rasio substrat-air. Namun, penting untuk dicatat bahwa hasil simulasi ini merupakan prediksi berdasarkan asumsi steady-state dan memerlukan validasi eksperimental untuk konfirmasi akurasi, terutama terkait dengan interaksi mikrobial kompleks dan dinamika proses biologis dalam sistem sesungguhnya.

3.2. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji ketahanan model terhadap variasi parameter input utama. Variasi $\pm 20\%$ diterapkan pada parameter berikut:

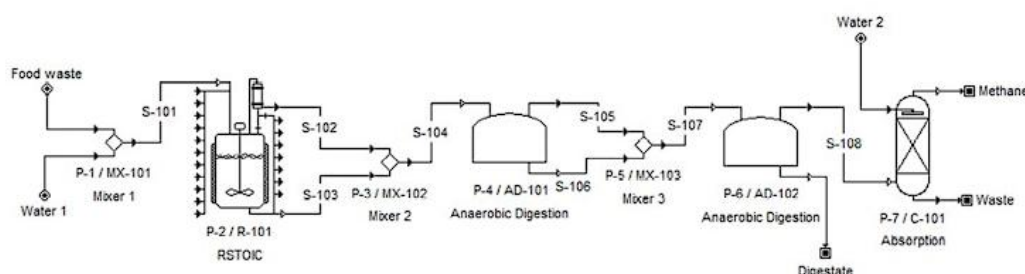
1. Organic Loading Rate (OLR): Variasi $1.2\text{-}1.8 \text{ kg VS}/\text{m}^3 \cdot \text{hari}$
 - o Produksi metana: $0.365\text{-}0.410 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$
 - o Efek: Linear positif dengan OLR hingga batas inhibisi
2. Rasio Pengenceran: 1:0.8 hingga 1:1.2
 - o Konsentrasi VS inlet: 5.0-7.0%
 - o Efek: Pengenceran berlebih mengurangi produktivitas volumetrik
3. Konversi Karbohidrat: 85-95%

- Yield metana: 0.372-0.404 Nm³/kg VS
- Efek: Parameter paling sensitif

3.3 Perbandingan dengan Studi Literatur

Perbandingan dengan studi literatur dilakukan untuk memeriksa konsistensi (*consistency check*) hasil simulasi dengan data yang dipublikasikan. Penting untuk ditekankan bahwa pendekatan ini bukan merupakan validasi eksperimental yang ketat, mengingat terdapat perbedaan mendasar dalam bahan baku, kondisi operasi, dan struktur model antara berbagai studi.

Sebagai contoh, penelitian Harun et al. (2019) memodelkan produksi biogas dari sampah makanan menggunakan SuperPro Designer. Pada studi tersebut, substrat dengan komposisi 55% karbohidrat, 26% protein, dan 19% lemak diencerkan dengan air pada rasio 1:2 dan diumpungkan ke sistem pada suhu termofilik (55°C). Konfigurasi prosesnya melibatkan dua reaktor anaerobik serial untuk memisahkan tahapan degradasi. Diagram alir proses studi tersebut disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Simulasi Harun dkk (2019)

Sumber: (Harun dkk., 2019)

Perbedaan yang mencolok antara kedua studi terletak pada jenis substrat (sampah makanan vs. kotoran sapi) dan rezim suhu operasi (termofilik vs. mesofilik). Dalam proses anaerobik, suhu merupakan parameter kritis yang mempengaruhi kinetika reaksi, keseimbangan metabolik, dan komunitas mikroba yang aktif. Operasi pada suhu yang berbeda (55°C vs. 37°C) dapat menyebabkan variasi dalam jalur degradasi dan distribusi produk akhir, termasuk rasio CH₄/CO₂. Oleh karena itu, perbedaan hasil yang teramati seperti kadar CO₂ yang lebih rendah pada simulasi ini lebih tepat dikaitkan dengan kombinasi faktor substrat dan suhu yang berbeda, daripada atribut unggul dari model tertentu.

Perbandingan kualitatif parameter utama antara kedua studi disajikan pada Tabel 5. Tabel ini berfungsi untuk mengkontekstualisasikan hasil simulasi dalam spektrum literatur yang ada dan menyoroti pengaruh pilihan pemodelan dan kondisi input, bukan untuk menarik kesimpulan kuantitatif tentang kinerja relatif. Perbandingan Simulasi dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Simulasi dengan Harun et al. (2019)

No	Parameter	Penelitian Harun dkk, (2019)	Validasi
----	-----------	---------------------------------	----------

No	Parameter	Penelitian Harun dkk, (2019)	Validasi
1	Bahan Baku	Sampah Organik	Sampah Organik
2	Komposisi	Karbohidrat 55%, Protein 26%, Lemak 19%	Karbohidrat 55%, Protein 26%, Lemak 19%
3	Rasio Bahan Baku dengan air	1:2	1:2
4	Komposisi Biogas	Metana 56.78%, Karbon Dioksida 24.54%, Hidrogen 0%, Hidrogen Sulfida 5.64%	Metana 78.73%, Karbon Dioksida 10.16%, Hidrogen 9.27%, Hidrogen Sulfida 1.82%

Tabel 5 membandingkan hasil simulasi antara studi ini dengan Harun et al. (2019), yang mensimulasikan produksi biogas dari sampah makanan. Terdapat perbedaan mendasar dalam beberapa aspek. Studi ini memasukkan unit mixer dan feed tank terpisah, sedangkan Harun et al. menggunakan reaktor CSTR tunggal. Perbedaan yang teramati dalam komposisi biogas, terutama kadar metana (78,78% vs 56,78%) dapat dijelaskan oleh kombinasi faktor-faktor di atas. Secara khusus, perbedaan suhu (mesofilik vs. termofilik) diketahui mempengaruhi jalur metabolik dan komposisi akhir gas dalam digesti anaerobik. Namun, penting untuk dicatat bahwa perbandingan antara substrat dan kondisi operasi yang berbeda ini tidak memungkinkan isolasi efek dari konfigurasi unit proses tertentu. Sebagai pembanding tambahan, Wahyudi dan Jelita (2022) mensimulasikan produksi biogas dari rumen sapi pada kondisi mesofilik dengan rasio pengenceran 1:1 (Tabel 6). Meskipun sama-sama menggunakan suhu mesofilik, substrat rumen sapi memiliki profil komposisi yang berbeda dengan kotoran sapi, khususnya dalam kandungan lemak dan serat.

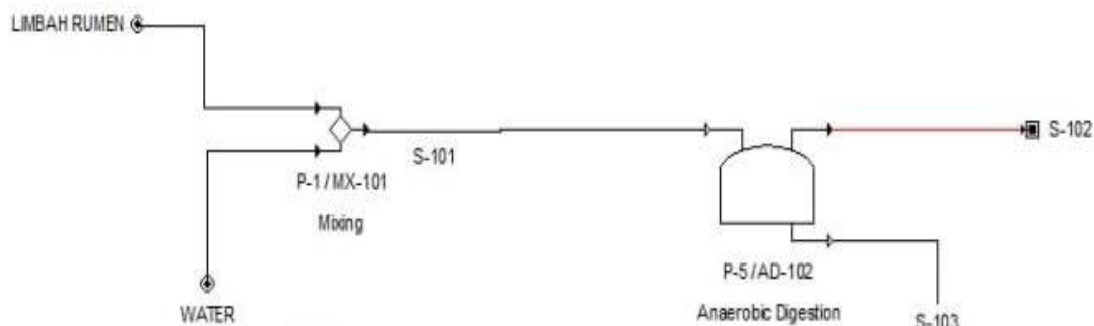
Perbandingan dengan studi literatur ini berfungsi sebagai pemeriksaan konsistensi (consistency check) untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh berada dalam rentang yang masuk akal dibandingkan dengan studi-studi terdahulu. Ini bukan validasi eksperimental, dan tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan keunggulan suatu konfigurasi proses tertentu, karena banyak variabel yang tidak terkontrol (substrat, suhu, asumsi model). Validasi kuantitatif memerlukan perbandingan dengan data eksperimen yang menggunakan substrat dan kondisi operasi yang sama. Komposisi lengkap dari rumen sapi yang digunakan dalam studi tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Kandungan Limbah Rumen Sapi

No	Senyawa	Kadar
1	Protein	8,42%
2	Lemak	2,60%
3	Serat	28,20%
4	Kalsium	0,53%
5	Fosfor	0,55%
6	BETN	30,24%
7	Abu	18,54%
8	Air	10,92%
Total		100,00%

Sumber: (Wahyudi dan Jelita 2022)

Wahyudi dan Jelita (2022) mensimulasikan produksi biogas dari rumen sapi pada kondisi mesofilik (37°C) dengan rasio pengenceran 1:1. Terdapat perbedaan mendasar dalam substrat (rumen sapi vs. kotoran sapi dalam studi ini) yang mempengaruhi komposisi input, khususnya kandungan lemak yang lebih tinggi pada rumen sapi (24% vs 3,6% pada studi ini).. Diagram proses pada penelitian Wahyudi dan Jelita (2022) dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Process Flow Diagram Simulasi Wahyudi dan Jelita (2022)

Sumber: (Wayudi dan Jelita 2022))

Perbandingan hasil simulasi (Tabel 7) menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dalam penelitian ini menghasilkan komposisi biogas dengan kadar metana 82,69%, sedangkan Wahyudi dan Jelita (2022) melaporkan 78,65%. Perbedaan sebesar 4,04% ini kemungkinan berasal dari variasi dalam: (1) komposisi substrat awal, (2) asumsi konversi stoikiometri untuk masing-masing fraksi organik, dan (3) konfigurasi unit proses yang dimodelkan.

Penting untuk dicatat bahwa perbedaan rasio pengenceran (1:1 vs 1:2 pada studi lain) dan karakteristik substrat yang berbeda membatasi interpretasi langsung tentang keunggulan suatu model. Perbandingan ini berfungsi sebagai pemeriksaan konsistensi (*consistency check*) bahwa hasil simulasi berada dalam rentang yang masuk akal dibandingkan studi serupa, bukan sebagai bukti validasi atau keunggulan model.

Tabel 7. Hasil Simulasi Wahyudi dan Jelita (2022)

No	Parameter	Penelitian (Wahyudi dan Jelita 2022)	Validasi
1	Bahan Baku	Rumen Sapi	Rumen Sapi
2	Komposisi	Protein 8,42%, Serat 28,2%, Lemak 2,6%, Kalsium 0,53%, Fosfor 0,55%, BETN 30,24%, Abu 18,54%, Air 10,92%	Protein 8,42%, Serat 28,2%, Lemak 2,6%, Kalsium 0,53%, Fosfor 0,55%, BETN 30,24%, Abu 18,54%, Air 10,92%
3	Rasio Bahan Baku dengan air	1:1	1:1
4	Kadar Biogas	Metana 78,65%, Karbon Dioksida 21,35%,	Metana 82,69%, Karbon Dioksida 17,31%,

Hasil simulasi pada kondisi operasi yang diteliti menunjukkan kadar metana sebesar 82,69%, sementara Wahyudi dan Jelita (2022) melaporkan 78,65% untuk substrat rumen sapi. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi dalam asumsi komposisi substrat, parameter konversi reaksi, dan konfigurasi unit proses dalam simulasi, bukan semata-mata indikasi keunggulan model. Dalam studi ini, dimasukkan tahap pemanasan awal di *feed tank* (37°C), yang dalam simulasi diasumsikan dapat meningkatkan homogenitas umpan. Namun, asumsi ini perlu verifikasi eksperimental karena pemanasan pada suhu mesofilik tidak secara otomatis menjamin peningkatan degradasi senyawa resisten seperti yang diklaim.

Penting untuk ditekankan bahwa perbandingan dengan studi Harun et al. (2019) dan Wahyudi & Jelita (2022) merupakan uji konsistensi (consistency check), bukan validasi eksperimental. Perbedaan substrat (kotoran sapi vs. sampah makanan vs. rumen), kondisi suhu (mesofilik vs. termofilik), dan konfigurasi proses yang mendasar membatasi interpretasi langsung. Kesamaan dalam *order-of-magnitude* hasil dapat mendukung kelayakan model konseptual, tetapi tidak membuktikan keakuratannya untuk prediksi kuantitatif. Validasi terhadap data eksperimen spesifik kotoran sapi tetap diperlukan.

4. Kesimpulan

Studi simulasi *steady-state* ini berhasil mengembangkan model konseptual untuk produksi biogas dari kotoran sapi menggunakan SuperPro Designer. Hasil dan implikasi utama adalah:

1. Model menghasilkan komposisi biogas simulasi dengan metana 76,45%, CO₂ 22,19%, H₂S 0,60%, dan H₂ 0,74% pada kondisi operasi dasar (37°C, pH 7, HRT 30 hari).
2. Yield metana yang diperoleh adalah 0,388 Nm³ CH₄/kg VS dengan *VS destruction* 45,2%. Analisis sensitivitas mengidentifikasi konversi karbohidrat sebagai parameter paling kritis.
3. Perbandingan dengan studi literatur menunjukkan konsistensi dalam rentang yang dapat diterima, yang mendukung model sebagai kerangka konseptual yang masuk akal. Namun, perbandingan lintas substrat dan kondisi operasi ini tidak dapat disamakan dengan validasi eksperimental.
4. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan model neraca massa yang konsisten dan analisis sensitivitasnya, yang dapat digunakan sebagai langkah awal dalam desain proses dan identifikasi parameter kritis untuk penelitian eksperimental selanjutnya.
5. Keterbatasan utama terletak pada asumsi steady-state, konversi stoikiometri tetap, dan tidak adanya mekanisme inhibisi. Oleh karena itu, penerapan praktis memerlukan validasi eksperimental yang ketat, analisis ketidakpastian, serta integrasi dengan kajian ekonomi dan lingkungan.

Rekomendasi untuk penelitian lanjutan meliputi: (1) validasi eksperimental menggunakan digester skala laboratorium dengan kotoran sapi lokal, (2) integrasi analisis tekno-ekonomi (TEA) dan analisis daur hidup (LCA), serta (3) pengembangan model dinamis atau semi-mekanistik yang memasukkan unsur kinetika dan inhibisi.

4. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Ellyta Sari, ST, MT selaku pembimbing atas bimbingan, arahan, dan dukungannya selama penyusunan jurnal penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah meluangkan waktu dan berpartisipasi dalam penelitian. Penulis berharap hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dan dasar bagi pengembang penelitian lebih lanjut di masa mendatang.

References

- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J. and Dewil, R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), pp.755-781.
- Astals, S., Nolla-Ardèvol, V. and Mata-Alvarez, J. 2013. Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: biogas and digestate. *Bioresource Technology*, 110, pp.63-70.
- Chuenchart, W., Timilsina, A.P., Ge, J. and Shah, A. 2024. Advances in Biorefinery of Cattle Manure for Value-Added Products. *Fermentation*, 10(11), p.568.
- Gerardi, M.H. 2003. *The microbiology of anaerobic digesters*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Harun, N., Othman, N.A., Zaki, N.A., Mat Rasul, N.A., Samah, R.A. and Hashim, H. 2019. Simulation of Anaerobic Digestion for Biogas Production from Food Waste Using SuperPro Designer. *Materials Today: Proceedings*, 19, pp.1315-1320.
- Intelligen, Inc. 2021. *SuperPro Designer User Guide (Version 12.0)*. Scotch Plains, NJ: Intelligen, Inc.
- Kartono. 2020. *Energi Terbarukan: Biogas dan Teknologi Pengolahannya*. Jakarta: Penerbit Teknik Energi.
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T. and Dawson, L. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), pp.1737-1744.
- Kurniawan, D. 2021. *Analisis Teknis Dan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) Dari Sampah Organik Kabupaten Bengkalis*. Tesis Tugas Akhir Teknik Elektro. UIN SUSKA Riau.
- Li, Y., Chen, Y. and Wu, J. 2019. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: a review. *Applied Energy*, 240, pp.120-137.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M. and Astals, S. 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, pp.412-427.
- Parawira, W. 2012. Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32(2), pp.172-186.
- Rajasulochana, P. and Preethy, V. 2016. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies*, 2(4), pp.175-184.

Riski Gunawan Nasution, Yoga Fernanda Syaputra

Corr Author: yogafernanda131@gmail.com

Pemodelan Dan Analisis Proses Produksi Biogas Dari Kotoran Sapi: Studi Simulasi Menggunakan Superpro Designer Dan Evaluasi Kinerja

Wahyudi, A. and Jelita, M. 2022. Analisis Potensi Energi Listrik Dan Biaya Limbah Rumen Sapi Rumah Potong Hewan Kota Pekanbaru. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 8(2), p.263.

Zhang, H., Li, J. and Liu, C. 2020. Process optimization of biogas production from agricultural waste using SuperPro Designer. *Journal of Cleaner Production*, 258, p.120777.