

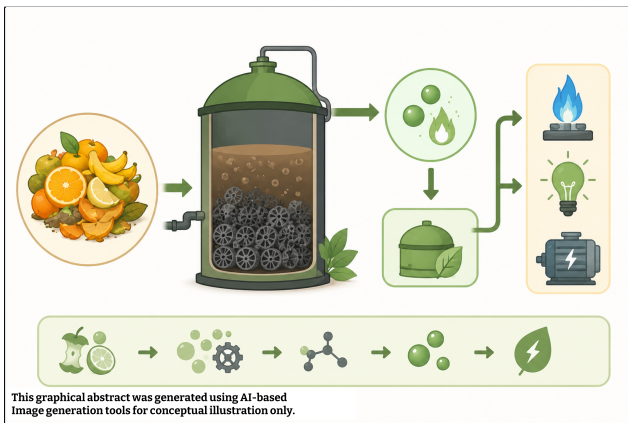


## ARTIKEL PENELITIAN

# Optimalisasi kinerja energi reaktor anaerobik biofilm skala pilot melalui pengendalian komposisi umpan limbah buah mengandung limonen

Fajar Marendra<sup>1,\*</sup> and Imas Dwi Dewanti Putri<sup>2</sup><sup>1</sup>Program Studi Pengolahan Limbah Industri, Politeknik AKA Bogor, Jl. Pangeran Sogiri No.283, Bogor, 16154, Indonesia<sup>2</sup>Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada Bulaksumur, Sendowo, Caturtunggal, Depok, Sleman, 55281, Indonesia

Disubmit 03 December 2025; direvisi 16 March 2026; diterima 12 Mei 2026



**OBJECTIVES** Fruit waste containing citrus fractions with high limonene content poses challenges for anaerobic digestion (AD) due to its potential inhibitory effect on methanogenic microorganisms. This study evaluates the performance of a pilot-scale biofilm anaerobic reaktor treating mixed fruit waste with varying proportions of citrus residues, focusing on biogas production, methane content, process stability, and energy output. **METHODS** A 1,167 L fiberglass reaktor equipped with K1 biofilm carriers was operated under mesophilic conditions and fed with six substrate formulations differing in citrus proportion. Results show that substrate composition, particularly the citrus fraction, influenced process stability and energy performance. **RESULTS** Average biogas production ranged from 75–107 L/day, with methane content of 44–68%, resulting in net energy of  $\pm 0.11$ – $0.25$  kWh/day and specific energy of  $0.06$ – $0.13$  kWh/kg VS. Statistical analysis indicated a moderate positive correlation between COD removal efficiency and biogas production ( $r \approx 0.37$ ), while VS showed no significant correlation, suggesting that COD is a more representative indicator of organic degradation in this system. A strong negative correlation between VFA and pH ( $r \approx -0.91$ ) highlighted the role of VFA accumulation in influencing process stability. Multivariate regression showed that variations in biogas production were explained by a combination of process parameters ( $R^2 \approx 0.78$ ), with methane fraction and COD as dominant predictors. Non-linear trends observed during operation indicate an initial decline in per-

formance at higher citrus fractions, followed by a recovery phase, which may reflect microbial adaptation to inhibitory conditions. Although no statistically significant differences were observed among substrate variations ( $p > 0.05$ ), reaktor performance remained relatively stable across all conditions. **CONCLUSIONS** Within the investigated range, substrate compositions with citrus fractions  $\leq 15\%$  tended to show more stable performance in terms of biogas production and process indicators.

**KEYWORDS** anaerobic digestion; biofilm reaktor; citrus residues; energy optimization; limonen inhibition; methane yield; process stability.

**TUJUAN** Limbah buah yang mengandung fraksi sitrus dengan kandungan limonen tinggi berpotensi menimbulkan tantangan dalam proses anaerobik digesti (AD) akibat efek inhibisinya terhadap mikroorganisme metanogen. Penelitian ini mengevaluasi kinerja reaktor anaerobik biofilm skala pilot dalam mengolah limbah buah campuran dengan variasi proporsi residu sitrus, dengan fokus pada produksi biogas, kandungan metana, stabilitas proses, dan keluaran energi. **METODE** Reaktor fiberglass berkapasitas 1.167 L yang dilengkapi media biofilm K1 dioperasikan pada kondisi mesofilik dan diberi enam formulasi substrat dengan proporsi sitrus yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi substrat, khususnya fraksi sitrus, memengaruhi stabilitas proses dan kinerja energi. **HASIL** Rata-rata produksi biogas berkisar antara 75–107 L/hari, dengan kandungan metana sebesar 44–68%, menghasilkan energi bersih sekitar  $\pm 0,11$ – $0,25$  kWh/hari dan energi spesifik sebesar  $0,06$ – $0,13$  kWh/kg VS. Analisis statistik menunjukkan adanya korelasi positif moderat antara efisiensi penyisihan COD dan produksi biogas ( $r \approx 0,37$ ), sedangkan VS tidak menunjukkan korelasi yang signifikan, sehingga COD lebih representatif sebagai indikator degradasi bahan organik dalam sistem ini. Korelasi negatif yang kuat antara VFA dan pH ( $r \approx -0,91$ ) menunjukkan bahwa akumulasi VFA berperan penting dalam memengaruhi stabilitas proses. Analisis regresi multivariat menunjukkan bahwa variasi produksi biogas dapat dijelaskan oleh kombinasi parameter proses ( $R^2 \approx 0,78$ ), dengan fraksi metana dan COD sebagai prediktor dominan. Tren non-linear se-

lama operasi menunjukkan adanya penurunan kinerja pada fraksi sitrus yang lebih tinggi pada tahap awal, yang kemudian diikuti oleh fase pemulihan, yang kemungkinan mencerminkan adanya proses adaptasi mikroorganisme terhadap kondisi yang bersifat inhibitori. Meskipun tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antar variasi substrat ( $p > 0,05$ ), kinerja reaktor relatif stabil pada seluruh kondisi yang diuji. Dalam rentang yang diteliti, komposisi substrat dengan fraksi sitrus  $\leq 15\%$  cenderung menunjukkan kinerja yang lebih stabil ditinjau dari produksi biogas dan indikator proses. **KESIMPULAN** Temuan ini menunjukkan bahwa kinerja AD tidak hanya dipengaruhi oleh beban organik, tetapi juga oleh komposisi substrat dan ketahanan sistem, khususnya pada reaktor berbasis biofilm, dalam menghadapi kondisi yang berpotensi inhibitori.

**KATA KUNCI** digesti anaerob; energi optimasi; inhibitor limonen; produksi metana; reaktor biofilm; residu sitrus; stabilitas proses

## 1. PENDAHULUAN

Krisis energi global dan meningkatnya tekanan terhadap lingkungan akibat emisi gas rumah kaca menuntut adanya transformasi mendasar dalam sistem produksi dan konsumsi energi. Ketergantungan dunia terhadap bahan bakar fosil tidak hanya mempercepat penipisan sumber daya alam, tetapi juga memperparah perubahan iklim melalui peningkatan emisi karbon dioksida dan metana. Sektor energi menyumbang lebih dari dua pertiga total emisi karbon global, sementara sektor limbah berkontribusi secara signifikan melalui emisi metana dari degradasi bahan organik di tempat pembuangan akhir (Purwasih dkk. 2025). Kondisi ini mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan yang tidak hanya berfokus pada sumber energi baru, tetapi juga mengintegrasikan prinsip efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah, salah satunya melalui proses *anaerobic digestion* (AD) (Marendra 2025; Mohamed Moffit dkk. 2025; Rahmada dkk. 2021)

Limbah buah merupakan salah satu jenis limbah organik yang dihasilkan dalam jumlah besar dari industri pengolahan makanan, pasar tradisional, dan kegiatan rumah tangga. Di Indonesia, jumlah limbah buah yang terbuang mencapai jutaan ton per tahun dan sebagian besar berakhir di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) tanpa pengolahan lebih lanjut (Soeprijanto dkk. 2020). Penumpukan limbah organik yang tidak tertangani dengan baik dapat memicu berbagai dampak lingkungan, termasuk emisi gas rumah kaca, pencemaran air tanah, dan proliferasi mikroorganisme patogen (Alvarado-Vallejo dkk. 2024; Plazzotta dkk. 2020). Limbah buah memiliki kandungan organik tinggi, terutama karbohidrat, gula sederhana, dan serat selulosa, yang menjadikannya bahan baku potensial untuk konversi biologis menjadi energi. Beberapa studi menunjukkan bahwa kadar *volatile solids* (VS) limbah buah mencapai 85–95%, menjadikannya sangat sesuai untuk proses AD dalam menghasilkan biogas (Banarase dan Phirke 2024; Gebresilasie dkk. 2025).

Pemanfaatan limbah buah melalui proses AD menawarkan dua keuntungan sekaligus: mitigasi limbah dan konservasi energi. Proses ini melibatkan aktivitas mikroorganisme yang menguraikan bahan organik dalam kondisi anaerobik menjadi campuran gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon diok-

sida ( $\text{CO}_2$ ) (Chin dkk. 2013; Pambudi dkk. 2023; Qamar dkk. 2025; Renggaman dkk. 2024). Biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi bersih untuk kebutuhan rumah tangga, industri kecil, maupun pembangkit listrik skala komunitas (Jameel dkk. 2024). Beberapa penelitian melaporkan bahwa potensi produksi biogas dari limbah buah dapat mencapai 350–450 mL  $\text{CH}_4/\text{g VS}$ , tergantung pada rasio C/N dan komposisi substrat (Banarase dan Phirke 2024; Budiyo dkk. 2018; Marendra dkk. 2020; Soeprijanto dkk. 2020). Selain itu, residu padat hasil digesti (digestat) mengandung unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dapat digunakan kembali sebagai pupuk organik, mendukung prinsip pertanian berkelanjutan (Prahastika dkk. 2023; Rouhollahi dkk. 2020). Dengan demikian, sistem AD tidak hanya berperan dalam penyediaan energi terbarukan, tetapi juga berkontribusi terhadap konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah sebagai sumber daya bernilai.

Meskipun demikian, tantangan utama pada pengolahan limbah buah, beberapa jenis limbah buah, terutama dari kelompok sitrus dan sitrus lainnya, mengandung senyawa terpenoid seperti limonen, yang diketahui bersifat toksik terhadap mikroorganisme metanogenik sehingga bisa menghambat waktu pembentukan gas metana hingga 50% (Battista dkk. 2020). Kandungan limonen dalam kulit buah sitrus dapat mencapai 1–2% dari massa kering dan berpotensi menyebabkan inhibisi proses AD, yang pada gilirannya menurunkan produksi metana dan efisiensi energi sistem (Battista dkk. 2020; Rokaya dkk. 2019; Wikandari dkk. 2015). Limonen, monoterpena utama yang terdapat pada kulit buah sitrus, telah dilaporkan memiliki efek inhibisi terhadap proses *anaerobic digestion*, terutama terhadap aktivitas metanogen. Penelitian batch menunjukkan bahwa limonen dapat menghambat produksi metana, dengan nilai *half maximal inhibitory concentration* ( $\text{IC}_{50}$ ) sekitar 423 mg  $\text{kg}^{-1}$  pada percobaan *anaerobic digestion* selulosa, meskipun nilai ini dapat meningkat sampai 669 mg  $\text{kg}^{-1}$  pada pengujian kedua yang menunjukkan beberapa adaptasi biomassa terhadap inhibitor tersebut (Ruiz dan Flotats 2016). Selain itu, studi lain menjelaskan bahwa terjadi kegagalan proses ketika konsentrasi limonen mencapai 400  $\mu\text{L/L}$  di reaktor anaerobik mesofilik (Wikandari dkk. 2015). Kondisi ini menunjukkan bahwa efek limonen tidak hanya bergantung pada keberadaannya, tetapi juga pada konsentrasi relatifnya terhadap biomassa dan substrat di sistem anaerobik, yang menjadi parameter penting dalam memahami mekanisme inhibisi dalam produksi biogas dari substrat kaya limonen.

Senyawa ini dapat merusak membran sel mikroorganisme dan mengganggu aktivitas enzimatis metanogen, sehingga menurunkan efisiensi degradasi dan produksi metana (Rahmanta 2025). Selain itu, kandungan karbohidrat yang tinggi pada limbah buah menyebabkan akumulasi cepat asam lemak volatil (VFA), yang dapat menurunkan pH sistem dan memperburuk efek toksisitas limonen (Atasoy dan Cetecioglu 2022; Yin dkk. 2021). Ketidakseimbangan rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) yang umumnya rendah pada limbah buah juga menimbulkan ketidakstabilan reaktor dan perlu dilakukan optimasi untuk memulihkan kinerja reaktor (Al-Zoubi dkk. 2024). Oleh karena itu, strategi pengendalian komposisi umpan menjadi kunci untuk menjaga stabilitas dan efisiensi proses AD pada bahan baku yang meng-

andung senyawa inhibitor.

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk mengatasi inhibisi limonen, di antaranya melalui ko-digesti dengan bahan kaya nitrogen seperti limbah sayur atau kotoran ternak (Azevedo dkk. 2025; Banarase dan Phirke 2024; Rengaman dkk. 2024), pra-perlakuan fisik atau kimia untuk menurunkan kadar minyak esensial (Rokaya dkk. 2019; Wikandari dkk. 2015), serta pengaturan *hydraulic retention time* (HRT). Pengaturan HRT dilakukan untuk memberi waktu cukup bagi mikroorganisme menyesuaikan diri terhadap senyawa inhibitor, memungkinkan degradasi limonen yang lebih efektif, dan menjaga stabilitas proses serta produksi metana. Dengan kombinasi strategi ini, sistem AD dapat mempertahankan efisiensi metanogenesis sekaligus meminimalkan energi yang terbuang akibat ketidakstabilan akibat senyawa inhibitor. Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan reaktor biofilm anaerobik menjadi solusi potensial untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap stres biologis dan fluktuasi beban organik. Pada sistem ini, mikroorganisme tumbuh melekat pada media penyangga, membentuk lapisan biofilm yang berfungsi sebagai pelindung sekaligus penyangga aktivitas biologis. Lapisan biofilm memungkinkan akumulasi biomassa yang lebih tinggi dan meningkatkan efisiensi kontak antara substrat dan mikroba. Studi oleh Wu dkk. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan reaktor biofilm aerasi membran ganda mampu meningkatkan kandungan metana hingga  $96,4 \pm 0,3\%$  dibanding sistem konvensional tanpa media penempelan. Selain itu, biofilm juga mampu meningkatkan toleransi terhadap senyawa inhibitor seperti limonen, karena mikroorganisme yang terlindung di dalam lapisan biofilm tidak langsung terpapar senyawa toksik (Olaimat dkk. 2024; Sun dkk. 2018; Uruén dkk. 2020).

Namun demikian, penelitian tentang reaktor biofilm anaerobik skala pilot untuk limbah buah masih relatif terbatas, terutama yang menyoroti interaksi antara komposisi umpan yang mengandung limonen, dan efisiensi energi reaktor. Sebagian besar studi terdahulu hanya menyoroti pengaruh rasio C/N terhadap produksi biogas di skala laboratorium tanpa mempertimbangkan dinamika multivariat antara pH, konsentrasi VFA, dan efisiensi metanogenesis. Padahal, interaksi antarparameter tersebut sangat penting untuk memahami bagaimana strategi pengendalian umpan dapat digunakan sebagai mekanisme mitigasi inhibisi sekaligus optimalisasi energi (Rahmanta 2025).

Penelitian ini menargetkan optimalisasi kinerja energi reaktor biofilm anaerobik skala pilot melalui pengendalian komposisi umpan limbah buah yang mengandung limonen. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi adaptif terhadap variasi kandungan limonen, pemantauan produksi biogas, kandungan metana, pH, dan konsentrasi VFA secara bersamaan. Dengan demikian, penelitian ini membedakan diri dari studi sebelumnya dengan: 1. Menggunakan reaktor biofilm skala pilot, bukan laboratorium, untuk meningkatkan relevansi aplikasi praktis, 2. Menilai interaksi kompleks antarparameter operasional untuk mitigasi limonen sekaligus optimalisasi energi 3. Menghasilkan model pengendalian umpan adaptif yang presisi untuk menjaga stabilitas reaktor dan efisiensi energi secara bersamaan.

Dengan menutup gap ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi ilmiah signifikan dalam pengembangan teknologi bioenergi berkelanjutan dan mendukung ekonomi sir-

kular melalui pengelolaan limbah organik yang adaptif dan efisien energi.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Bahan baku substrat dan inokulum

Bahan limbah buah yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh secara langsung dari pedagang buah di Pasar Jambu Dua Kota Bogor. Komposisi limbah buah meliputi semangka, melon dan sitrus. Ketiga jenis buah yang akan digunakan sebagai substrat disimpan terlebih dahulu dalam wadah penyimpanan khusus untuk menghindari kontaminasi oleh bahan lain selain limbah buah, seperti sampah organik atau kotoran. Prosedur ini memastikan bahwa hanya limbah buah murni yang digunakan dalam proses *anaerobic digestion*. Untuk memperoleh substrat yang homogen maka limbah buah yang telah dikumpulkan kemudian digiling hingga memiliki ukuran partikel antara 4 hingga 10 mm menggunakan blender sebagaimana direkomendasikan oleh (Mohamed Moffit dkk. 2025). Volume umpan disesuaikan dengan HRT. HRT yang digunakan adalah 30 hari. Limbah buah hasil gilingan dicampur dengan air keran hingga diperoleh konsentrasi total padatan sekitar 8%, sebagaimana yang dilakukan oleh Mohamed Moffit dkk. (2025).

Sebagai inokulum, penelitian ini menggunakan kotoran sapi yang diambil dari Peternakan sapi di daerah Puncak Bogor. Proses pencernaan anaerobik dijalankan dalam kondisi mesofilik. Karakteristik dari kotoran sapi disajikan pada Tabel 1.

Variasi komposisi substrat dilakukan dengan memodifikasi proporsi limbah sitrus dalam campuran limbah buah, yang dibagi ke dalam enam variasi (V0–V5). Variasi komposisi sitrus yang digunakan adalah sebagai berikut: sitrus 0% (V0), sitrus 10% (V1), sitrus 15% (V2), sitrus 20% (V3), sitrus 25% (V4), dan sitrus 35% (V5). Variasi ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh sitrus yang mengandung senyawa inhibitor alami, seperti limonen, terhadap stabilitas proses dan produksi biogas. Penelitian ini tidak mengevaluasi pengaruh limonen terhadap produksi biogas secara langsung. Setiap variasi dioperasikan pada kondisi yang sama, sehingga perbedaan performa yang diamati dapat dikaitkan langsung dengan komposisi substrat yang digunakan. Komposisi masing-masing variasi substrat disajikan pada Tabel 2, yang menunjukkan proporsi relatif limbah sitrus dan limbah buah lainnya pada setiap kondisi eksperimen.

Karakterisasi substrat dilakukan untuk memahami sifat kimia dan potensi inhibisi terhadap proses anaerobik. Parameter yang diukur meliputi kandungan total padatan (TS), total padatan tersuspensi (TSS), COD, dan pH. Parameter tambahan yang biasa digunakan untuk evaluasi inhibisi, seperti rasio C/N, konsentrasi limonen, dan indeks biodegradabilitas, tidak tersedia dalam penelitian ini. Oleh karena itu, interpretasi mekanisme inhibisi didasarkan pada parameter yang ada dan pengamatan produksi biogas, dengan keterbatasan ini dicatat sebagai catatan penting untuk penelitian selanjutnya. Tabel 3 menunjukkan rerata karakteristik limbah buah yang digunakan sebagai bahan baku selama penelitian ini berlangsung

TABEL 1. Karakteristik campuran air + kotoran sapi (1:1) sebagai inokulum.

Parameter	Nilai
pH	6,85
COD (mg/L)	36986
TS (mg/L)	15973
VS (mg/L)	17593
SS (mg/L)	15877
VSS (mg/L)	17487

## 2.2 Desain ekeperimen

Penelitian ini menggunakan sistem AD *single-stage* berbahan fiberglass dengan kapasitas total 1.557 liter dan volume kerja efektif 1.167,65 liter, dilengkapi 1.500 unit media HD-PE tipe K-1 sebagai tempat tumbuh biofilm untuk mendukung degradasi bahan organik. Sistem dioperasikan pada suhu alami tropis Indonesia (25–35°C) tanpa penukar panas eksternal dan dilengkapi saluran aliran balik untuk menjaga sirkulasi lumpur. Pencampuran dilakukan dengan pompa sentrifugal DWO200M 1,5 kW yang beroperasi 15 menit tiap jam untuk resirkulasi lumpur, menjaga homogenitas substrat dan distribusi mikroorganisme; pipa backwash otomatis membersihkan jalur resirkulasi dari padatan, mencegah sumbatan, dan menjaga kontinuitas aliran. Eksperimen melibatkan enam perlakuan substrat (V0–V5) yang dijalankan secara sekuensial selama 30 hari masing-masing, dengan V0 sebagai kontrol baseline. Data dianalisis dari pengukuran harian tiap perlakuan, dengan urutan waktu sebagai faktor tambahan.

Desain eksperimen dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan operasi sekuensial dalam satu reaktor, di mana variasi substrat (V0–V5) diterapkan secara bertahap dari waktu ke waktu, bukan secara paralel. Setiap fase dijalankan hingga mencapai kondisi mendekati tunak (quasi steady-state) sebelum dilakukan transisi ke komposisi substrat berikutnya. Pendekatan ini dipilih untuk mensimulasikan kondisi operasional nyata pada sistem anaerobic digestion skala pilot, di mana komposisi umpan dapat berubah secara bertahap dalam satu unit reaktor. Namun demikian, perlu dicatat bahwa desain ini tidak mencakup replikasi eksperimen secara independen. Oleh karena itu, interpretasi hasil, khususnya yang berkaitan dengan perbandingan antar variasi substrat, dilakukan secara hati-hati dengan menekankan pada analisis tren, stabilitas proses, dan konsistensi kinerja pada masing-masing kondisi operasi.

## 2.3 Operasi dan pemantauan digester

Setiap hari reaktor diberi umpan dengan nilai *organic loading rate* (OLR) 3.794 kg/m<sup>3</sup>.hari. OLR pada penelitian ini dihitung berdasarkan kandungan VS dari influent, yang merepresentasikan fraksi organik yang dapat terdegradasi secara biologis. Nilai OLR sebesar 3,794 kg VS/m<sup>3</sup>.hari diperoleh dari konsentrasi VS harian influent dan volume umpan yang diberikan, kemudian dinormalisasi terhadap volume kerja reaktor.

Secara umum, OLR dihitung menggunakan persamaan 1.

$$OLR = (Q \times VS_{in})/V \quad (1)$$

di mana Q adalah laju alir umpan (m<sup>3</sup>/hari), VS<sub>in</sub> adalah konsentrasi volatile solids influent (kg/m<sup>3</sup>), dan V adalah volume kerja reaktor (m<sup>3</sup>).

Pendekatan berbasis VS digunakan karena parameter ini lebih representatif dalam menggambarkan beban organik yang berkontribusi langsung terhadap produksi biogas dibandingkan TS atau COD dalam sistem anaerobic digestion berbasis substrat kompleks.

Setelah proses pemberian umpan, efluen dari reaktor *anaerobic digestion* dikeluarkan melalui saluran pelimpah. Parameter pH dan suhu diukur secara langsung menggunakan alat uji portabel. Gas biometana yang dihasilkan dikumpulkan di dalam kantong penampung khusus berbahan multilapis inert (Supelco™, Jerman), sedangkan komposisi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dianalisis menggunakan *gas analyzer* tipe Geotech Biogas 5000 (UK).

Analisis kadar total padatan (TS), padatan mudah menguap (VS), dan total nitrogen Kjeldahl (TKN) dilakukan dengan mengikuti prosedur baku dari *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Untuk pengujian kadar asam lemak volatil (VFA), digunakan metode esterifikasi dengan *spectrophotometer* DR 6000 (HACH, Jerman) sesuai metode 8196. Sementara itu, konsentrasi *chemical oxygen demand* (COD) total dianalisis menggunakan metode pencernaan reaktor (*reaktor digestion method*) de-

TABEL 2. Komposisi limbah buah yang digunakan dalam penelitian ini.

Jenis limbah	Persentasi (%)					
	V0	V1	V2	V3	V4	V5
Limbah sitrus	0	10	15	20	25	35
Limbah semangka	50	45	42,5	40	37,5	32,5
Limbah melon	50	45	42,5	40	37,5	32,5

**TABEL 3.** Karakteristik rerata limbah buah yang dikumpulkan sebagai bahan baku substrat.

Parameter	Nilai
pH	6,52
Temperatur (0C)	30,39
Alkalinitas (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	114,38
TKN (mg/L N)	26,04
COD (mg/L)	143697
VFA (mg/L HOAc)	992,70
PO <sub>4</sub> (mg/L)	236,92
TS (mg/L)	22614
VS (mg/L)	20898
Abu total (g/100g)	0,19
Kelembaban (g/100g)	94,74
Protein (g/100g)	0,29
Lemak total (g/100g)	0,77
Karbohidrat (g/100g)	0,58
Energi total (kcal/100g)	11

ngan peralatan yang sama (HACH DR 6000, High Range COD). Seluruh analisis laboratorium dilaksanakan pada kondisi suhu ruang, yaitu sekitar 25°C.

#### 2.4 Metode analisis

Data yang diperoleh dari pengujian skala pilot pada reaktor anaerobik biofilm dianalisis menggunakan metode statistik korelasi Pearson untuk mengevaluasi hubungan linear antar variabel kunci. Parameter yang dianalisis meliputi rasio limbah buah terhadap ko-substrat, produksi biogas (L/hari), kandungan metana (%), pH, dan konsentrasi VFA (mg/L). Analisis regresi linier berganda juga diterapkan untuk membangun model prediksi produksi biogas berdasarkan kombinasi parameter. Selain itu untuk memvisualisasikan aklimatisasi mikroba maka digunakan model regresi polynomial orde dua guna memperkuat hipotesis adanya hubungan non-linear antara waktu, dan produksi biogas harian selama fase adaptasi.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Kondisi awal operasi dan stabilisasi sistem

Pada tahap awal pengoperasian, reaktor anaerobik menunjukkan dinamika transien yang ditandai oleh fluktuasi parameter proses sebelum mencapai kondisi operasi yang lebih stabil. Selama periode start-up, sistem mengalami fase adaptasi mikroorganisme terhadap substrat yang ditandai dengan variasi pada pH, pembentukan asam volatil, serta perkembangan kapasitas buffer. Seiring berjalannya waktu, parameter kunci seperti pH dan alkalinitas mulai menunjukkan kecenderungan stabil, yang mengindikasikan terbentuknya keseimbangan antara tahap asidogenesis dan metanogenesis. Kondisi ini mencerminkan bahwa komunitas mikroorganisme telah beradaptasi terhadap lingkungan reaktor dan substrat yang diberikan. Kondisi operasional yang relatif stabil ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja degradasi bahan organik, produksi biogas, serta analisis stabilitas proses pada subbab berikutnya

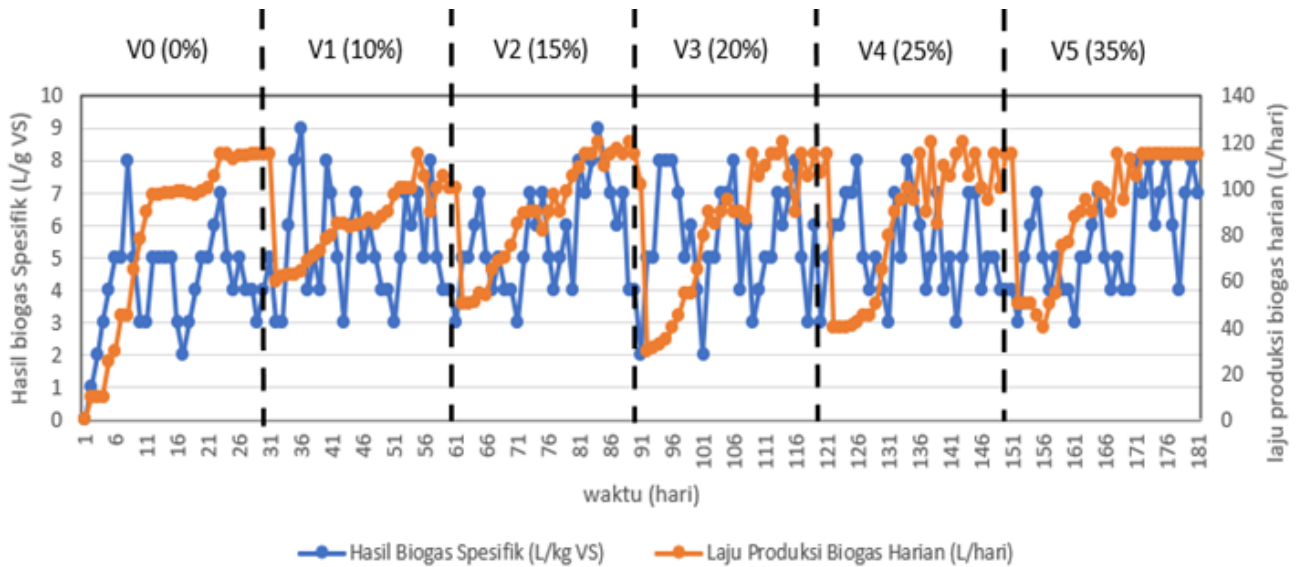
#### 3.2 Kinerja reaktor terhadap variasi komposisi umpan

##### 3.2.1 Produksi dan komposisi biogas

Selama pengoperasian reaktor, temperatur tercatat berada pada kisaran 25–35°C, dengan fluktuasi yang lebih signifikan terjadi pada fase awal (V0–V1). Secara teoritis, perubahan temperatur sebesar 10°C dapat meningkatkan konstanta laju reaksi hingga sekitar 1,5 kali lipat berdasarkan pendekatan Arrhenius (Ge dkk. 2011), sehingga fluktuasi temperatur berpotensi memengaruhi aktivitas mikrobiologis dalam sistem. Menariknya, fluktuasi temperatur pada fase V0–V1 terjadi meskipun komposisi substrat relatif konstan, yang menunjukkan bahwa variasi temperatur tidak semata-mata disebabkan oleh perubahan kadar limonen. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh faktor lain, seperti aktivitas metabolisme mikroorganisme yang bersifat eksotermis selama fase start-up, distribusi panas yang belum merata, perkembangan biofilm, serta pengaruh kondisi lingkungan eksternal dan operasional reaktor.

Fluktuasi temperatur tersebut berkorelasi dengan dinamika produksi biogas yang menunjukkan pola fluktuatif (naik-turun), bahkan setelah periode awal operasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem belum sepenuhnya mencapai kondisi stabil absolut, melainkan berada pada kondisi kuasi-stabil, di mana komunitas mikroorganisme terus beradaptasi terhadap kondisi operasional. Meskipun demikian, tidak teramati adanya indikasi kegagalan proses, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem memiliki ketahanan yang baik terhadap variasi temperatur dalam rentang operasional tersebut. Fluktuasi suhu yang terekam masih berada dalam batas aman bagi aktivitas mikroorganisme metanogenik, yang umumnya optimum pada rentang 30–37°C (Bouallagui dkk. 2004). Stabilitas suhu ini menunjukkan bahwa reaktor mampu beradaptasi terhadap kondisi tropis tanpa bantuan sistem pemanas eksternal, sehingga mendukung efisiensi energi proses secara keseluruhan.

Produksi biogas dalam penelitian ini disajikan dalam dua parameter, yaitu laju produksi biogas harian (L/hari) dan hasil biogas spesifik (L/g VS) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Laju produksi biogas harian digunakan untuk menggambarkan performa aktual reaktor dalam mengha-

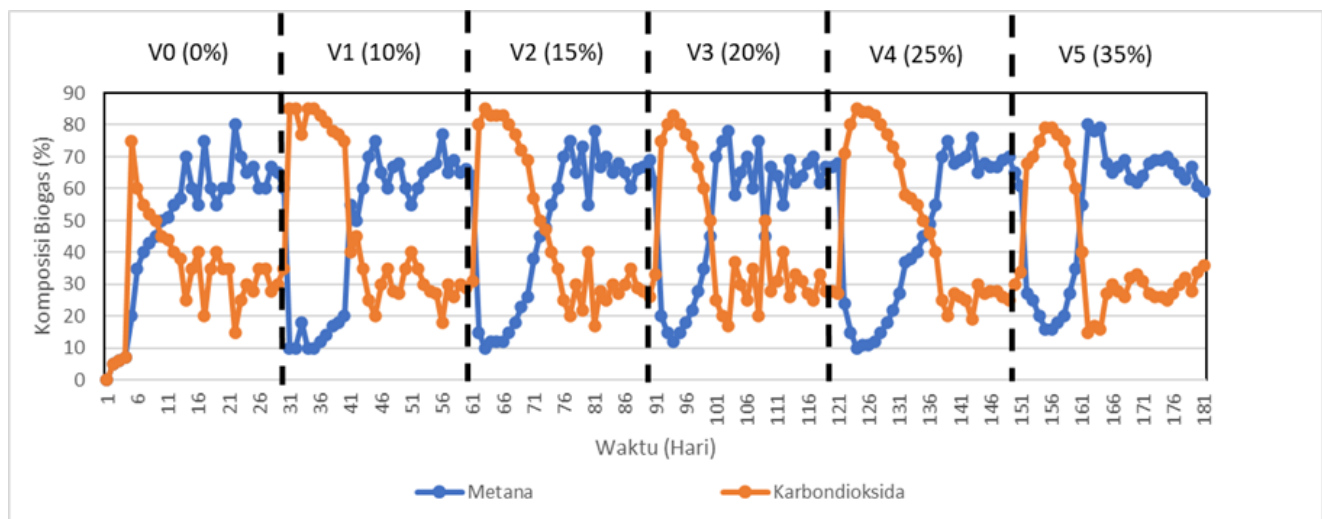


GAMBAR 1. Produksi biogas dalam variasi campuran limbah citrus dan buah lainnya.

silkan gas, sedangkan hasil biogas spesifik mencerminkan efisiensi konversi substrat organik berdasarkan jumlah VS yang dimasukkan. Perlu dicatat bahwa parameter L/g VS bukan merupakan laju, melainkan indikator *yield*, sehingga interpretasinya berbeda dengan laju produksi biogas. Penyajian kedua parameter ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja proses, baik dari aspek kapasitas produksi maupun efisiensi konversi substrat. Peningkatan produksi biogas pada kondisi tersebut mengindikasikan bahwa campuran substrat non-sitrus kemungkinan menyediakan kondisi yang lebih mendukung bagi aktivitas mikroorganisme anaerobik. Namun demikian, dalam penelitian ini tidak dilakukan pengukuran langsung terhadap rasio C/N, sehingga hubungan antara peningkatan produksi biogas dengan keseimbangan nutrisi tidak dapat disimpulkan secara langsung. Oleh karena itu, interpretasi ini bersifat indikatif dan memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui analisis karakteristik substrat yang lebih komprehensif.

Untuk memperoleh interpretasi yang lebih objektif, produksi biogas dianalisis berdasarkan tren umum dan kondisi operasi stabil (*steady-state*) pada setiap fase, dengan

memperhatikan adanya periode transisi setelah perubahan komposisi substrat. Pada tahap awal (V0, 0% limbah citrus), produksi biogas menunjukkan peningkatan pada fase awal operasi, yang kemudian diikuti oleh pola fluktuatif sebelum mencapai kondisi kuasi-stabil. Hasil biogas spesifik pada fase ini berada dalam rentang sekitar 4–8 L/g VS, dengan variasi yang cukup dinamis seiring proses adaptasi mikroorganisme terhadap kondisi reaktor. Ketika limbah citrus mulai ditambahkan sebesar 10–20% (V1–V3), pola produksi biogas secara umum masih berada dalam kisaran yang serupa, namun dengan fluktuasi yang lebih jelas, terutama setelah setiap perpindahan fase. Fenomena ini kemungkinan berkaitan dengan keberadaan senyawa limonen dan asam organik dari kulit citrus yang bersifat inhibitor dan dapat memengaruhi aktivitas metanogenik (Battista dkk. 2020; Lotito dkk. 2018). Meskipun demikian, sistem menunjukkan kemampuan adaptasi yang baik, di mana setelah periode transisi, produksi biogas kembali mencapai kondisi yang relatif stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa reaktor berbasis biofilm mampu mempertahankan aktivitas mikroba meskipun terdapat tekanan dari senyawa inhibitor (Mohamed Moffit



GAMBAR 2. Komposisi biogas dalam variasi campuran limbah citrus dan buah lainnya.

dkk. 2025; Wu dkk. 2024).

Pada tahap berikutnya, ketika proporsi limbah citrus dinaikkan hingga 25–35% (V4–V5), tidak teramati penurunan drastis yang konsisten pada kondisi stabil, namun fluktuasi produksi biogas cenderung menjadi lebih besar dibandingkan fase sebelumnya. Hasil biogas spesifik tetap berada dalam rentang yang relatif serupa (sekitar 4–6 L/g VS), yang mengindikasikan adanya tekanan proses (process stress) akibat peningkatan konsentrasi senyawa inhibitor seperti limonen dan asam sitrat yang muncul dari penambahan buah citrus. Senyawa ini diketahui dapat menghambat aktivitas mikroorganisme metanogen, terutama kelompok *Methanosaeta* dan *Methanosarcina* yang sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan (Ruiz dan Flotats 2016). Walaupun demikian, sistem masih menunjukkan kemampuan pemulihan setelah periode adaptasi, yang mengindikasikan adanya mekanisme toleransi atau adaptasi mikroba dalam sistem biofilm.

Komposisi gas yang dihasilkan selama seluruh tahapan ditampilkan pada Gambar 2. Secara umum, setelah periode adaptasi, kandungan metana relatif stabil pada kisaran 60–70% di hampir seluruh fase operasi, dengan fluktuasi sesekali yang tidak menunjukkan tren penurunan yang konsisten. Penurunan hingga sekitar 50% hanya terjadi pada kondisi tertentu secara temporer dan tidak merepresentasikan kondisi umum sistem. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara tahap asidogenesis dan metanogenesis secara umum masih dapat dipertahankan, meskipun terdapat variasi komposisi substrat. Temuan ini sejalan dengan Patin-voh dkk. (2017) yang melaporkan bahwa fluktuasi sementara dalam sistem AD dapat terjadi akibat dinamika akumulasi asam lemak volatil tanpa selalu menyebabkan kegagalan proses.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi komposisi limbah citrus dalam rentang yang diteliti tidak menghasilkan perbedaan yang sangat signifikan terhadap kinerja produksi biogas pada kondisi stabil, namun memengaruhi dinamika fluktuasi dan respons sistem terhadap perubahan umpan. Sistem biofilm menunjukkan ketahanan yang baik terhadap keberadaan buah citrus, yang ditunjukkan oleh kemampuan sistem untuk kembali mencapai kondisi kuasi-stabil setelah setiap perubahan penambahan komposisi citrus.

Dengan demikian, integrasi limbah citrus dalam jumlah

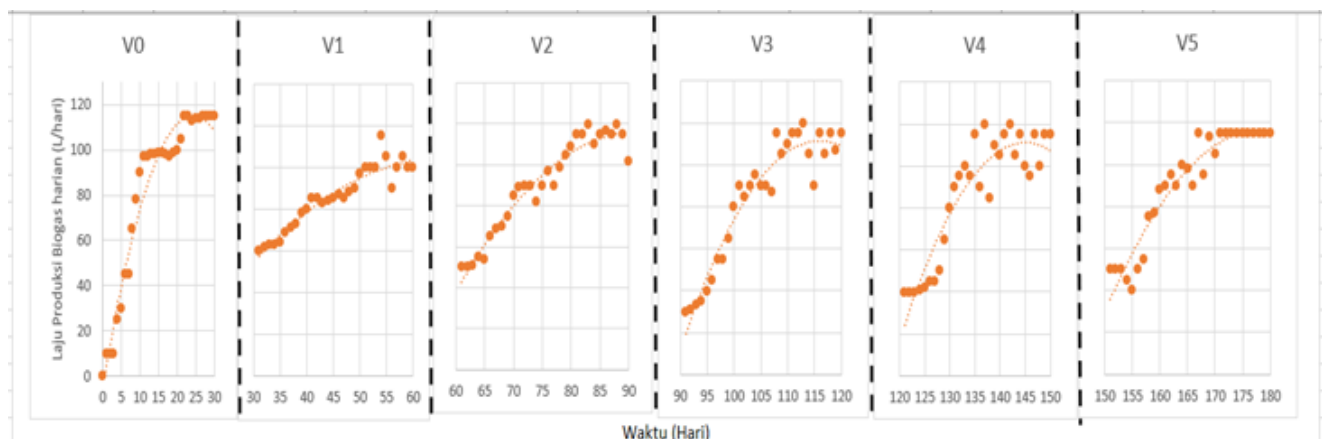
terbatas dapat diterapkan tanpa menyebabkan penurunan kinerja yang signifikan, meskipun peningkatan proporsi cenderung meningkatkan kompleksitas dinamika proses. Konsentrasi metana yang tetap berada pada kisaran  $\geq 60\%$  dalam kondisi stabil menunjukkan bahwa sistem masih layak untuk aplikasi energi sederhana, seperti pemanfaatan biogas untuk kebutuhan rumah tangga. Selain itu, keberadaan biofilm berperan penting dalam meningkatkan ketahanan mikroorganisme terhadap variasi kondisi substrat, sehingga menjadi strategi yang potensial dalam pengolahan campuran limbah buah secara berkelanjutan.

Untuk memperkuat interpretasi terkait proses adaptasi mikroorganisme, data produksi biogas harian selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan regresi polinomial orde dua. Hasil analisis menunjukkan bahwa pola produksi biogas pada masing-masing fase operasi mengikuti tren non-linear yang khas, terutama berbentuk kurva parabola (U-shape) pada beberapa fase transisi sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3.

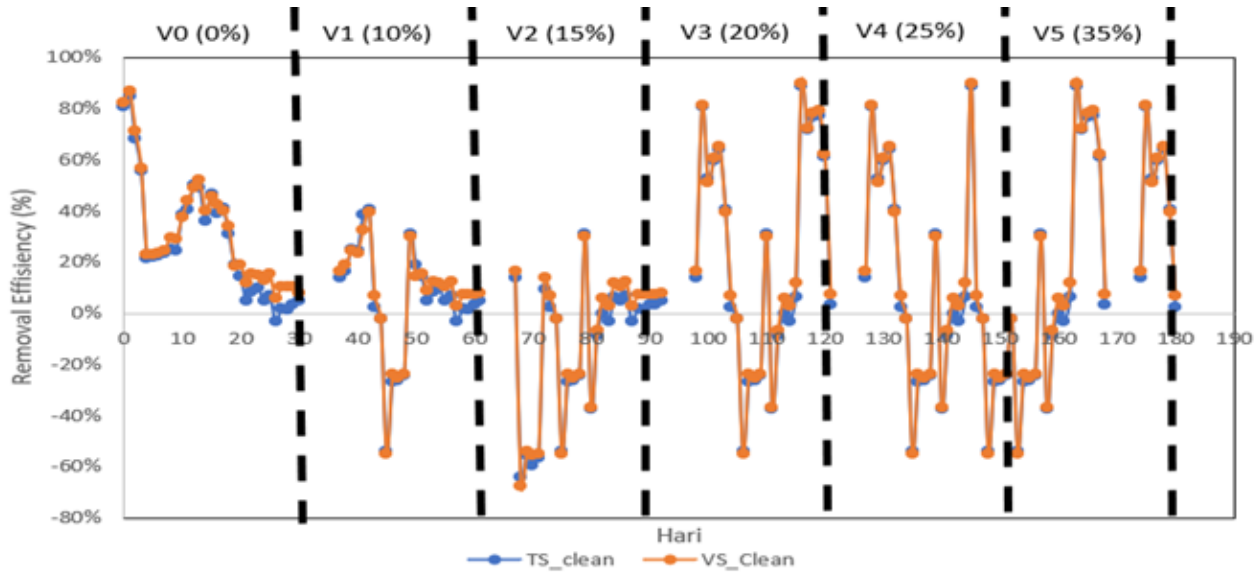
Pada fase awal (V0), kurva menunjukkan kecenderungan meningkat ( $a > 0$ ), yang mengindikasikan fase pertumbuhan awal dan aklimatisasi mikroorganisme terhadap substrat. Memasuki fase V1 dan V2, pola kurva berubah menjadi fluktuatif dengan kecenderungan penurunan di awal yang kemudian diikuti oleh peningkatan kembali, membentuk pola U-shape. Fenomena ini mencerminkan adanya tekanan awal akibat perubahan komposisi substrat, yang kemudian diikuti oleh proses adaptasi mikroba.

Pola yang lebih jelas terlihat pada fase lanjut, khususnya V5 (hari 150–180), di mana terjadi penurunan produksi biogas pada awal fase (sekitar 40–50 L/hari) yang kemudian meningkat kembali hingga mencapai lebih dari 100 L/hari. Hasil regresi polinomial pada fase ini menunjukkan kurva berbentuk U yang lebih tajam, yang mengindikasikan adanya fase inhibisi awal akibat peningkatan kandungan limbah citrus, diikuti oleh proses adaptasi dan pemulihan aktivitas mikroorganisme.

Secara keseluruhan, hasil ini mengkonfirmasi bahwa dinamika produksi biogas dalam sistem tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola adaptasi biologis yang kompleks. Pendekatan regresi polinomial ini memperkuat dugaan bahwa komunitas mikroorganisme dalam reaktor biofilm mengalami proses aklimatisasi bertahap terhadap perubahan kondisi substrat dan keberadaan senyawa inhibitor, sehingga



GAMBAR 3. Pola produksi biogas pada masing-masing fase operasi.



GAMBAR 4. Removal Efficiency dari TS dan VS.

mampu mempertahankan kinerja sistem dalam jangka panjang.

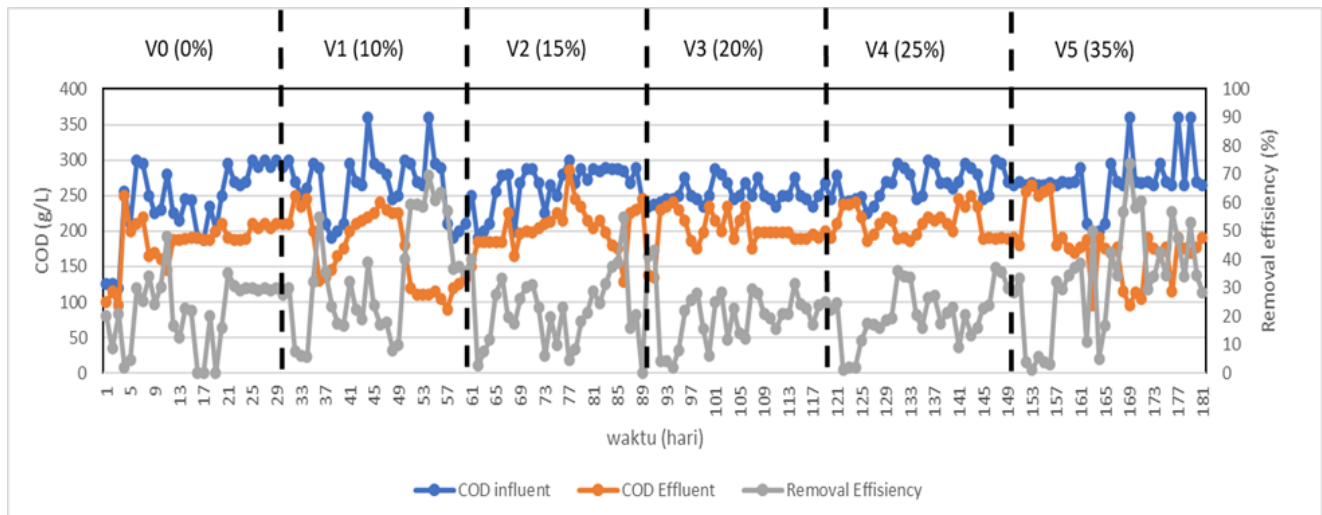
3.2.2 Efisiensi degradasi bahan organik (VS/COD removal)

Kinerja degradasi bahan organik dievaluasi menggunakan parameter TS, VS, COD sebagai indikator dalam proses AD. Untuk meningkatkan kejelasan visual, nilai removal TS dan VS di luar rentang ±100% tidak ditampilkan pada Gambar 4, namun tetap dipertimbangkan dalam interpretasi sebagai bagian dari dinamika sistem. Nilai-nilai ekstrem tersebut kemungkinan berkaitan dengan pelepasan biomassa (*biofilm sloughing*), akumulasi padatan tersuspensi, serta variabilitas sampling dan homogenisasi yang umum terjadi pada sistem biofilm skala pilot. Oleh karena itu, interpretasi data TS dan VS dalam penelitian ini difokuskan pada tren umum dan nilai rata-rata pada kondisi operasi stabil (*steady-state*), bukan pada nilai harian individual.

Variasi TS dan VS influent mencerminkan heterogenitas limbah buah sebagai substrat, sehingga fluktuasi nilai influent tidak secara langsung merepresentasikan perubahan komposisi limbah citrus. Efisiensi removal TS dan VS (Gam-

bar 4) menunjukkan pola fluktuatif dengan rentang nilai dari negatif moderat hingga positif (sekitar -50% hingga 80%). Nilai removal negatif yang teramati sesekali tidak mengindikasikan kegagalan proses, melainkan mengindikasikan dinamika sistem biofilm, termasuk pelepasan partikel dan biomassa (Mishra dkk. 2022). Kesesuaian pola antara TS dan VS menguatkan bahwa fluktuasi tersebut bersifat sistemik. Dengan mempertimbangkan variabilitas ini, parameter TS dan VS dalam penelitian ini digunakan sebagai indikator pendukung untuk memahami dinamika padatan dalam sistem, bukan sebagai satu-satunya dasar evaluasi kinerja degradasi.

Dibandingkan parameter TS dan VS, COD menunjukkan pola yang lebih konsisten dalam merepresentasikan degradasi organik (Gambar 5). Pada fase awal peningkatan fraksi limbah citrus, efisiensi penyisihan COD cenderung menurun, yang kemungkinan berkaitan dengan keberadaan senyawa inhibitor dalam limbah citrus (misalnya limonen), meskipun tidak diukur secara langsung dalam penelitian ini (Battista dkk. 2020; Lotito dkk. 2018; Rokaya dkk. 2019; Ruiz dan Flotats 2016; Wikandari dkk. 2015). Namun, pada fase



GAMBAR 5. Input COD, output COD dan removal efficiency dalam variasi campuran limbah citrus dan buah lainnya.

TABEL 4. Rata-rata dan deviasi standar efisiensi removal.

Variasi	Efisiensi removal (VS)	Efisiensi removal (COD)
V0	32% ± 22%	22% ± 12%
V1	7% ± 21%	34% ± 20%
V2	10% ± 28%	23% ± 13%
V3	24% ± 42%	19% ± 8%
V4	8% ± 39%	21% ± 10%
V5	23% ± 43%	33% ± 20%

lanjut (V5), khususnya pada hari ke-150 hingga 180, efisiensi COD meningkat kembali (±30–70%), yang mengindikasikan kemungkinan terjadinya proses adaptasi mikroorganisme terhadap tekanan inhibitor. Hal ini menunjukkan bahwa respons sistem bersifat non-linear, dengan fase inhibisi awal yang diikuti oleh pemulihan kinerja.

Analisis statistik (Tabel 4) menunjukkan bahwa efisiensi removal VS bervariasi dari 32% ± 22% (V0) hingga 10% ± 28% (V2), kemudian meningkat kembali pada fase berikutnya (V3–V5), dengan deviasi standar yang tinggi (hingga ±43%) yang mencerminkan dinamika sistem yang kompleks. Sementara itu, efisiensi removal COD relatif lebih stabil (19–34%), dengan nilai tertinggi pada V1 (34% ± 20%) dan V5 (33% ± 20%). Uji ANOVA satu arah menunjukkan bahwa perbedaan antar variasi tidak signifikan secara statistik ( $p > 0,05$ ), yang mengindikasikan bahwa sistem masih mempertahankan kinerja degradasi dalam rentang variasi substrat yang diuji. Dalam konteks ini, COD dipertimbangkan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi efisiensi degradasi organik karena menunjukkan konsistensi yang lebih baik dibandingkan TS dan VS.

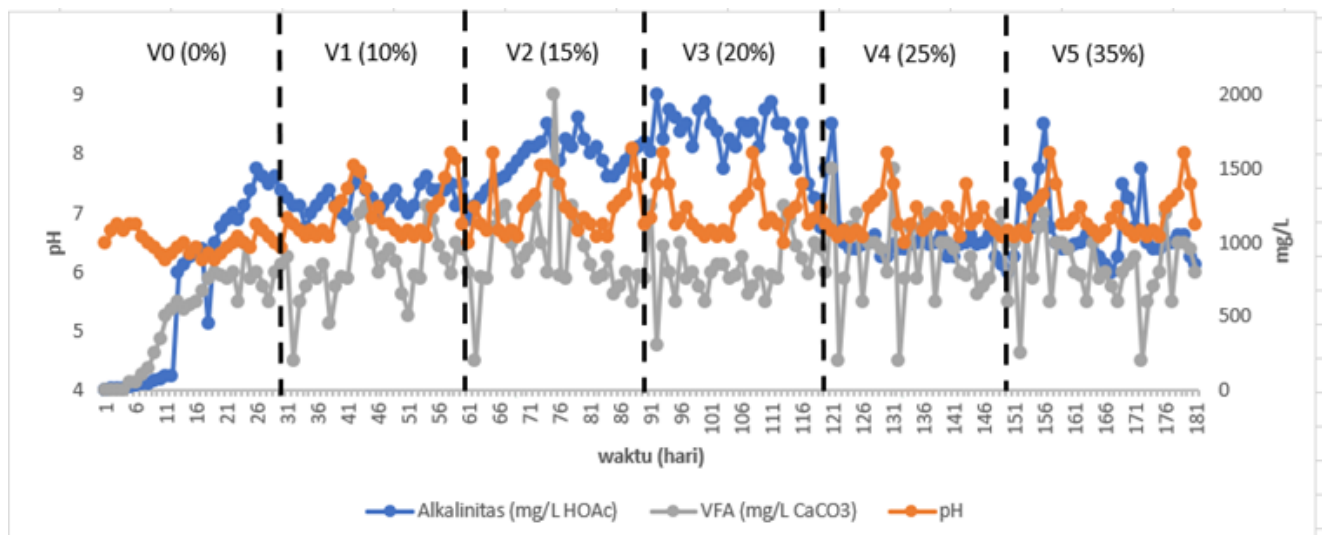
Keterkaitan antara degradasi organik dan produksi biogas dianalisis menggunakan korelasi Pearson. Efisiensi penyisihan COD menunjukkan korelasi positif moderat terhadap produksi biogas ( $r = 0,41$  pada data mentah dan  $r = 0,37$  setelah filtrasi), sedangkan VS menunjukkan korelasi lemah hingga tidak signifikan ( $r = 0,30$  menjadi  $r = -0,08$ ). Hal ini menunjukkan bahwa COD merupakan indikator yang lebih representatif terhadap konversi substrat menjadi biogas dibandingkan VS, yang dapat dipengaruhi oleh dinamika bio-

massa dalam sistem biofilm. Meskipun secara umum VS sering digunakan sebagai indikator beban organik pada sistem anaerobic digestion berbasis substrat kompleks, hasil pada penelitian ini menunjukkan bahwa COD memiliki hubungan yang lebih konsisten dengan produksi biogas. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik sistem biofilm, di mana dinamika biomassa seperti biofilm sloughing dan distribusi padatan tersuspensi dapat memengaruhi nilai VS tanpa secara langsung merefleksikan proses degradasi. Sebaliknya, COD, khususnya fraksi terlarut, lebih merepresentasikan substrat yang tersedia untuk dikonversi menjadi biogas, sehingga menunjukkan korelasi yang lebih stabil terhadap produksi gas pada kondisi operasional yang dinamis.

Konsistensi antara dinamika COD dan produksi biogas Gambar 1 menunjukkan bahwa fase dengan efisiensi degradasi yang lebih tinggi cenderung diikuti oleh stabilisasi produksi gas. Sebaliknya, pada fase awal hingga menengah, fluktuasi efisiensi degradasi diikuti oleh ketidakstabilan produksi biogas. Pola ini diperkuat oleh pendekatan regresi polinomial orde dua, yang mengindikasikan tren non-linear berupa penurunan awal dan peningkatan kembali, konsisten dengan kemungkinan proses adaptasi mikroorganisme terhadap tekanan inhibitor.

### 3.2.3 Stabilitas proses anaerobic digestion

Gambar 6 menunjukkan rofil temporal pH, volatile fatty acids (VFA), dan alkalinitas selama proses AD pada berbagai komposisi substrat limbah buah. Seluruh parameter disajikan dalam satu grafik terintegrasi untuk memudahkan interpretasi hubungan antara produksi asam dan kapasitas penyangga



GAMBAR 6. pH, Alkalinitas dan VFA anaerobic digestion dalam variasi campuran limbah citrus dan buah lainnya .

sistem. VFA dan alkalinitas dinyatakan dalam satuan yang sedikit berbeda VFA dalam mg/ L HOAc sedangkan alkalinitas dalam mg/L CaCO<sub>3</sub>, (sumbu kanan) sedangkan pH ditampilkan pada sumbu kiri.

Data menunjukkan pola fluktuatif VFA yang mengikuti siklus pengumpulan, diimbangi oleh alkalinitas yang relatif stabil pada fase operasi lanjut. Kondisi ini memungkinkan pH tetap berada atau kembali ke kisaran optimal metanogenesis setelah fase awal, sehingga mencerminkan kestabilan proses dan kapasitas buffer yang memadai dalam sistem.

Sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 6, Stabilitas proses anaerobic digestion dievaluasi melalui keterkaitan antara pH, konsentrasi VFA, dan alkalinitas sebagai indikator utama keseimbangan antara tahap asidogenesis dan metanogenesis. Ketiga parameter ini dianalisis secara terintegrasi untuk menghindari bias interpretasi akibat penyajian terpisah.

Secara umum, data menunjukkan bahwa pH relatif stabil pada kisaran 6,5–7,5 setelah fase awal operasi, dengan penurunan tajam pada periode start-up (hari 0–10) hingga mendekati pH ~6,2–6,3 yang berasosiasi dengan peningkatan cepat VFA (hingga ~500–600 mg/ L HOAc). Kondisi ini mencerminkan dominasi fase asidogenesis akibat dekomposisi cepat substrat mudah terurai. Seiring waktu, peningkatan alkalinitas dari <500 mg/L CaCO<sub>3</sub> menjadi kisaran stabil ~1000–1800 mg/L CaCO<sub>3</sub> berperan dalam menstabilkan pH kembali ke rentang optimal metanogenesis (Appels dkk. 2008).

Dinamika VFA menunjukkan pola fluktuatif yang konsisten dengan siklus *feeding*, dengan rentang dominan sekitar 600–1200 mg/L HOAc, meskipun pada beberapa titik terjadi lonjakan hingga ~2000 mg/L HOAc. Namun, lonjakan ini tidak diikuti oleh penurunan pH yang drastis maupun gangguan berkelanjutan pada alkalinitas, yang mengindikasikan bahwa kapasitas buffer sistem cukup kuat untuk menahan akumulasi asam. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi beban organik tinggi, sistem tetap berada dalam kondisi operasional yang stabil tanpa indikasi asidifikasi permanen.

Interpretasi stabilitas tidak didasarkan pada nilai rasio tunggal, tetapi pada konsistensi hubungan antara pH yang terjaga, alkalinitas yang memadai, dan kemampuan sistem dalam meredam lonjakan VFA. Pendekatan ini dinilai lebih representatif untuk sistem skala pilot yang bersifat dinamis.

Keterkaitan antara stabilitas proses dan kinerja produksi biogas (Gambar 1) menunjukkan pola yang konsisten. Fase dengan pH stabil (~6,8–7,5) dan alkalinitas tinggi umumnya berasosiasi dengan produksi biogas yang lebih stabil, sedangkan periode dengan lonjakan VFA yang tajam (misalnya pada awal fase transisi) cenderung berkorespondensi dengan penurunan sementara produksi biogas. Namun demi-

kian, sistem menunjukkan kemampuan pemulihan yang cepat, yang menegaskan adanya mekanisme adaptasi mikroorganisme terhadap fluktuasi beban organik.

Temuan ini konsisten dengan hasil pada Subbab sebelumnya, di mana degradasi COD dan produksi biogas menunjukkan pola non-linear dengan fase inhibisi awal yang diikuti oleh recovery. Dalam konteks ini, kestabilan pH dan alkalinitas berperan sebagai faktor kunci yang memungkinkan proses adaptasi berlangsung tanpa menyebabkan kegagalan sistem.

Secara keseluruhan, integrasi parameter pH, VFA, dan alkalinitas menunjukkan bahwa reaktor biofilm anaerobik mampu mempertahankan stabilitas proses meskipun mengalami fluktuasi beban organik dan potensi inhibitor dari limbah citrus. Ketahanan ini memperkuat indikasi bahwa sistem memiliki kapasitas buffering dan adaptasi biologis yang memadai, sehingga mampu menjaga kinerja produksi biogas secara berkelanjutan pada kondisi operasional skala pilot.

### 3.3 Implikasi terhadap konservasi energi dan efisiensi sistem

Produksi biogas yang dihasilkan selanjutnya dikonversi menjadi potensi energi untuk mengevaluasi implikasi terhadap konservasi energi dan efisiensi sistem. Perhitungan energi dilakukan berdasarkan kandungan metana sebagai komponen utama biogas dengan menggunakan nilai kalor metana sebesar 35,8 MJ/m<sup>3</sup> (lower heating value), yang ekuivalen dengan 9,94 kWh/m<sup>3</sup> (Deublein dan Steinauser 2011; Metcalf & Eddy dkk. 2003). Pendekatan ini umum digunakan dalam evaluasi sistem AD karena fraksi metana secara langsung menentukan nilai energi biogas (Appels dkk. 2008).

Berdasarkan data pada Tabel 5, produksi biogas harian berada pada kisaran 81,48–107,05 L/hari dengan fraksi metana 44–68%. Hasil konversi menunjukkan bahwa energi teoritis yang dihasilkan berada pada rentang 0,39–0,72 kWh/hari. Dengan mempertimbangkan efisiensi konversi energi sebesar 35%, energi aktual yang dapat dimanfaatkan diperkirakan berkisar antara 0,14–0,25 kWh/hari. Nilai ini berada dalam rentang yang realistis untuk sistem anaerobic digestion skala pilot dengan kapasitas kecil hingga menengah.

Jika dinormalisasi terhadap beban organik, energi spesifik yang dihasilkan menunjukkan variasi antar fase operasi, yang mencerminkan pengaruh komposisi substrat terhadap efisiensi konversi. Pada variasi dengan fraksi limbah citrus rendah hingga menengah (V0–V2), energi aktual relatif stabil seiring dengan fraksi metana yang konstan (~49%), menunjukkan bahwa proses degradasi berlangsung dalam kon-

TABEL 5. Komposisi limbah buah yang digunakan dalam penelitian ini.

Variasi	Rerata laju produksi Biogas (L/hari)	rerata produksi CH <sub>4</sub> (%)	Rerata Energy teoritis (kWh/hari)	Rerata Energy aktual (kWh/hari)	Rerata Energi spesifik teoritis (kWh/kg VS)	Rerata energi spesifik aktual (kWh/kg VS)
V0	81.48	49%	0.40	0.14	0.21	0.07
V1	85.57	49%	0.42	0.15	0.23	0.08
V2	90.30	49%	0.44	0.15	0.23	0.08
V3	75.40	44%	0.33	0.12	0.19	0.07
V4	89.33	49%	0.44	0.15	0.22	0.08
V5	107.05	68%	0.72	0.25	0.40	0.14

disi yang cukup seimbang. Temuan ini sejalan dengan laporan Gebresilasie dkk. (2025) dan Purwasih dkk. (2025) yang menunjukkan bahwa sistem *co-digestion* limbah buah pada beban organik moderat mampu menghasilkan energi secara konsisten pada skala pilot.

Sebaliknya, pada fase V3 terjadi penurunan energi yang diikuti oleh penurunan fraksi metana (44%), yang mengindikasikan adanya gangguan sementara pada jalur metanogenesis. Kondisi ini konsisten dengan adanya penambahan sitrus yang mengandung senyawa bioaktif seperti limonen yang dapat menghambat aktivitas metanogen (Battista dkk. 2020; Ruiz dan Flotats 2016). Namun demikian, pada fase selanjutnya (V4–V5), sistem menunjukkan pemulihan yang ditandai dengan peningkatan energi hingga mencapai nilai tertinggi pada V5. Peningkatan ini terutama dipengaruhi oleh kenaikan fraksi metana hingga 68%, yang menunjukkan bahwa komunitas mikroorganisme telah beradaptasi terhadap kondisi substrat yang lebih kompleks.

Pola ini sejalan dengan hasil pada Subbab sebelumnya, di mana degradasi COD dan produksi biogas menunjukkan tren non-linear dengan fase inhibisi awal yang diikuti oleh fase pemulihan. Dalam konteks ini, peningkatan energi tidak hanya dipengaruhi oleh volume biogas, tetapi juga oleh kualitas biogas yang dihasilkan, khususnya kandungan metana. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi dalam sistem anaerobik sangat dipengaruhi oleh stabilitas proses biologis, termasuk keseimbangan antara asidogenesis dan metanogenesis.

Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa evaluasi dalam penelitian ini difokuskan pada potensi energi yang dihasilkan (*energy recovery*) dan tidak mencakup secara eksplisit konsumsi energi operasional seperti pencampuran, kontrol pH, atau sistem monitoring. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh tidak diinterpretasikan sebagai efisiensi energi total sistem. Pendekatan ini digunakan untuk menghindari overestimasi kinerja energi, sebagaimana telah dilaporkan pada studi sebelumnya bahwa peningkatan kompleksitas kontrol proses dapat meningkatkan konsumsi energi operasional (Czekala dkk. 2022; Nabati dkk. 2022).

Dalam perspektif konservasi energi, hasil ini menunjukkan bahwa sistem AD berbasis biofilm memiliki kapasitas untuk menghasilkan energi secara stabil meskipun terjadi fluktuasi komposisi substrat. Kondisi operasi yang stabil, terutama yang ditandai oleh keseimbangan pH, alkalinitas, dan VFA (Suarez dkk. 2022), berkontribusi langsung terhadap peningkatan kualitas biogas dan efisiensi pemulihan energi. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian komposisi substrat merupakan faktor kunci dalam mengoptimalkan performa energi sistem anaerobik, khususnya pada pengolahan limbah buah yang bersifat heterogen.

Sebagai sintesis dari analisis kinerja energi, dilakukan pemodelan regresi linier berganda untuk mengidentifikasi parameter dominan yang memengaruhi produksi energi pada sistem AD. Model yang dihasilkan menunjukkan bahwa energi aktual dapat diprediksi sebagai fungsi dari kombinasi parameter proses, dengan kontribusi yang tidak merata antar variabel. Hasil analisis mengindikasikan bahwa %Metana ( $\beta = 92,18$ ;  $p < 0,001$ ) dan COD Removal ( $\beta = 26,15$ ;  $p < 0,001$ ) merupakan faktor paling dominan yang secara signifikan meningkatkan produksi energi.

Sebaliknya, parameter VS dan pH tidak menunjukkan pe-

ngaruh signifikan ( $p > 0,05$ ), mengindikasikan bahwa dalam sistem berbasis biofilm, kedua parameter tersebut tidak secara langsung merefleksikan efisiensi pembentukan biogas. Menariknya, VFA menunjukkan pengaruh positif yang signifikan ( $\beta = 0,0148$ ;  $p < 0,001$ ), yang mengindikasikan bahwa dalam rentang operasional penelitian ini, VFA lebih berperan sebagai intermediate aktif dalam jalur metanogenesis dibandingkan sebagai indikator inhibisi.

Temuan ini memperkuat hasil pada subbab sebelumnya, di mana kualitas biogas—khususnya yang berkaitan dengan fraksi metana dan efisiensi degradasi organik muncul sebagai faktor kunci yang mengendalikan kinerja energi sistem. Dalam konteks ini, peningkatan produksi energi tidak semata-mata ditentukan oleh volume biogas, tetapi lebih dipengaruhi oleh kualitas gas dan efektivitas konversi substrat. Selain itu, parameter stabilitas seperti pH dan VFA berperan secara tidak langsung dengan menjaga kondisi optimum bagi aktivitas metanogenik, sebagaimana telah dibahas pada Subbab sebelumnya.

Secara keseluruhan, integrasi antara analisis energi, dinamika produksi biogas, serta pendekatan statistik menunjukkan bahwa sistem AD berbasis biofilm memiliki karakteristik yang resilient dan adaptif terhadap variasi komposisi substrat. Meskipun terjadi fluktuasi akibat keberadaan senyawa inhibitor seperti limonen, sistem mampu mempertahankan kinerja energi melalui mekanisme adaptasi mikroorganisme yang tercermin dalam pola non-linear produksi biogas dan stabilitas parameter proses. Oleh karena itu, optimasi sistem tidak hanya bergantung pada peningkatan beban organik, tetapi juga pada pengendalian kualitas substrat dan kestabilan proses, sehingga memungkinkan tercapainya konservasi energi yang optimal pada skala pilot.

### 3.4 Analisis korelasi antar parameter dan identifikasi komposisi umpan optimal

Pemahaman hubungan antarparameter dalam AD dilakukan melalui pendekatan statistik sebagai sintesis dari hasil Subbab sebelumnya untuk mengidentifikasi faktor kunci yang mengontrol stabilitas proses dan keluaran energi sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 6.

Analisis korelasi Pearson menggunakan data operasional harian ( $n \approx 180$ ) menunjukkan bahwa hubungan antara efisiensi penyisihan COD dan produksi biogas bersifat positif moderat ( $r = 0,37$ ), sedangkan hubungan antara VS dan produksi biogas tidak signifikan ( $r = -0,08$ ). Nilai ini diperoleh setelah penyaringan data ekstrem untuk meningkatkan representativitas tren utama. Hasil ini tetap konsisten dengan analisis data mentah yang menunjukkan pola hubungan serupa, meskipun dengan nilai korelasi yang sedikit lebih tinggi akibat pengaruh fluktuasi ekstrem. Hal ini mengindikasikan bahwa COD lebih representatif dalam merefleksikan konversi substrat menjadi biogas dibandingkan VS, yang pada sistem biofilm dapat dipengaruhi oleh dinamika biomassa seperti sloughing dan akumulasi padatan (Mishra dkk. 2022).

Meskipun VS secara umum digunakan sebagai indikator utama beban organik dalam sistem AD, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan antara VS removal dan produksi biogas tidak signifikan ( $r \approx -0,08$ ). Temuan ini tidak serta-merta menegaskan peran VS, tetapi mengindikasikan bahwa pada sistem berbasis biofilm, parameter ini tidak

**TABEL 6.** Komposisi limbah buah yang digunakan dalam penelitian ini.

Pasangan Variabel	Koefisien Korelasi (r)	Kekuatan Hubungan	Arah Hubungan	Interpretasi Proses
COD – Produksi Biogas	0,37	Moderat	Positif	Peningkatan degradasi COD cenderung diikuti peningkatan produksi biogas.
VS – Produksi Biogas	-0,08	Sangat lemah	Negatif	VS tidak merepresentasikan langsung konversi menjadi biogas (dipengaruhi biomassa).
VFA – pH	-0,91	Sangat kuat	Negatif	Akumulasi VFA menurunkan pH, menjadi indikator utama potensi ketidakstabilan sistem.

**TABEL 7.** Komposisi limbah buah yang digunakan dalam penelitian ini.

Variabel	Koefisien ( $\beta$ )	Std. Error	t-stat	p-value	95% CI	Interpretasi
Intercept	46.285	18.975	2.439	0.0157	8.84 – 83.73	baseline model
CH <sub>4</sub> (%)	92.177	5.859	15.732	<0.001	80.61 – 103.74	sangat signifikan (+)
COD removal	26.149	7.631	3.427	0.00076	11.09 – 41.21	signifikan (+)
VS removal	-0.561	1.245	-0.450	0.653	-3.02 – 1.90	tidak signifikan
pH	-3.546	2.755	-1.287	0.200	-8.98 – 1.89	tidak signifikan
VFA	0.0148	0.0040	3.697	0.00029	0.0069 – 0.0227	signifikan (+)

selalu merepresentasikan secara langsung konversi substrat menjadi biogas.

Ketidaksesuaian ini dapat dijelaskan oleh dinamika biomassa dalam sistem biofilm, seperti biofilm sloughing, akumulasi padatan mikroba, serta kontribusi fraksi non-biodegradable yang tetap terukur sebagai VS. Akibatnya, fluktuasi nilai VS tidak sepenuhnya mencerminkan aktivitas degradasi biologis yang menghasilkan biogas. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh [Mishra dkk. \(2022\)](#), yang menunjukkan bahwa parameter berbasis padatan cenderung kurang sensitif dalam menangkap dinamika konversi energi pada sistem biofilm.

Sebaliknya, parameter berbasis oksidasi seperti COD menunjukkan korelasi yang lebih konsisten dengan produksi biogas ( $r \approx 0,37$ ), karena lebih merepresentasikan fraksi organik yang benar-benar terdegradasi secara biokimia. Hal ini menegaskan bahwa dalam sistem anaerobik kompleks, khususnya pada skala pilot, interpretasi kinerja proses perlu mempertimbangkan perbedaan antara indikator beban organik (input) dan indikator konversi energi (output). Dengan demikian, hasil ini tidak menunjukkan kelemahan parameter VS, melainkan menyoroti keterbatasannya dalam merepresentasikan kinerja konversi energi pada sistem dengan dinamika biomassa yang kompleks.

Pada aspek stabilitas proses, korelasi negatif yang sangat kuat antara VFA dan pH ( $r \approx -0,91$ ) menegaskan bahwa akumulasi asam volatil merupakan faktor utama yang mengontrol keseimbangan sistem anaerobik, sementara hubungan positif antara alkalinitas dan pH menunjukkan peran penting kapasitas buffer dalam mempertahankan kondisi metanogenesis. Pola ini konsisten dengan indikator stabilitas AD yang telah dilaporkan sebelumnya ([Chen dkk. 2015](#)), serta sejalan dengan hasil Subbab sebelumnya.

Untuk mengevaluasi pengaruh simultan variabel ter-

hadap produksi energi, dilakukan regresi linier berganda menggunakan data operasional harian ( $n \approx 180$ ) dengan parameter COD removal, VS removal, pH, VFA, dan fraksi metana sebagai variabel predictor dengan hasil sebagaimana ditampilkan pada Tabel 7. Persamaan model yang didapatkan adalah persamaan 2.

$$\text{Energy} = 46.285 + 92.177(\text{CH}_4) + 26.149(\text{COD}) - 0.561(\text{VS}) - 3.546(\text{pH}) + 0.0148(\text{VFA}) \quad (2)$$

Model yang dihasilkan menunjukkan kemampuan penjelasan yang tinggi ( $R^2 \approx 0,78$ ) dan signifikan secara statistik ( $p < 0,05$ ), dengan fraksi metana dan COD sebagai predictor dominan. Sementara itu, kontribusi VS dan pH relatif lebih lemah, yang mengindikasikan bahwa tidak semua parameter proses berperan secara independen dalam menentukan keluaran energi. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas gas (CH<sub>4</sub>) dan efisiensi degradasi organik merupakan faktor utama dalam menentukan performa energi sistem AD ([Ata-soy dan Cetecioglu 2022](#); [Beschkov dan Angelov 2025](#)).

Berdasarkan integrasi analisis korelasi, regresi, stabilitas proses, dan performa energi, komposisi umpan optimal diindikasikan berada pada variasi V1–V2 dengan proporsi limbah sitrus  $\leq 15\%$ . Pada kondisi ini, sistem menunjukkan kombinasi terbaik antara stabilitas biologis, efisiensi degradasi, dan keluaran energi ( $\approx 0,14$ – $0,15$  kWh/hari), sedangkan peningkatan fraksi sitrus di atas ambang tersebut cenderung menyebabkan penurunan performa akibat efek inhibitor yang terkandung di dalam buah sitrus. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa optimasi sistem AD lebih ditentukan oleh komposisi kimia substrat dan kapasitas adaptasi mikroorganisme dibandingkan semata-mata oleh beban organik.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja reaktor anaerobik biofilm skala pilot dipengaruhi oleh komposisi substrat, khususnya fraksi limbah citrus, yang berperan dalam memengaruhi stabilitas proses dan keluaran energi. Secara umum, rerata produksi biogas berada pada kisaran 75–107 L/hari dengan kandungan metana 44–68%, menghasilkan energi aktual sebesar  $\pm 0,11$ – $0,25$  kWh/hari dan energi spesifik sekitar  $0,06$ – $0,13$  kWh/kg VS.

Analisis statistik menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan COD memiliki hubungan positif moderat dengan produksi biogas ( $r \approx 0,37$ ), sedangkan parameter VS tidak menunjukkan korelasi signifikan. Selain itu, hubungan negatif yang sangat kuat antara VFA dan pH ( $r \approx -0,91$ ) menunjukkan bahwa akumulasi asam volatil berperan penting dalam memengaruhi stabilitas sistem. Model regresi linier berganda menunjukkan bahwa variasi produksi biogas dapat dijelaskan oleh kombinasi parameter proses ( $R^2 \approx 0,78$ ), dengan fraksi metana dan COD sebagai prediktor dominan. Dalam konteks ini, COD merupakan parameter yang lebih representatif dalam mengevaluasi degradasi bahan organik dibandingkan TS dan VS.

Dari aspek dinamika proses, pola non-linear menunjukkan adanya penurunan kinerja pada fase awal seiring peningkatan fraksi limbah citrus, yang kemudian diikuti oleh fase pemulihan kinerja sistem. Pola ini mengindikasikan kemungkinan adanya proses adaptasi mikroorganisme terhadap kondisi yang bersifat inhibitori, meskipun tidak diukur secara langsung dalam penelitian ini. Secara umum, sistem biofilm menunjukkan ketahanan (*resilience*) terhadap variasi komposisi substrat tanpa mengalami kegagalan proses yang signifikan.

Berdasarkan integrasi analisis proses, statistik, dan energi, komposisi umpan dengan fraksi limbah citrus  $\leq 15\%$  cenderung menunjukkan kinerja yang lebih stabil dalam hal stabilitas proses, efisiensi degradasi, dan keluaran energi. Namun demikian, perbedaan antar variasi tidak signifikan secara statistik ( $p > 0,05$ ), sehingga temuan ini perlu dikonfirmasi lebih lanjut melalui desain eksperimen dengan replikasi yang lebih terkontrol.

Temuan ini menunjukkan bahwa kinerja AD tidak hanya dipengaruhi oleh beban organik, tetapi juga oleh komposisi substrat dan ketahanan sistem, khususnya pada reaktor berbasis biofilm dalam menghadapi kondisi yang berpotensi inhibitori.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak atas dukungan penuh untuk penelitian ini. Penghargaan khusus disampaikan kepada para teknisi dan asisten penelitian atas bantuannya dalam pengoperasian reaktor dan pengambilan data, serta rekan-rekan akademisi yang memberikan masukan metodologis selama penyusunan manuskrip.

#### DAFTAR PUSTAKA

Al-Zoubi AI, Alkhamis TM, Alzoubi HA. 2024. Optimized biogas production from poultry manure with respect to pH, C/N, and temperature. *Results in Engineering*. 22:102040. doi:10.1016/j.rineng.2024.102040.

- Alvarado-Vallejo A, Marín-Peña O, Rosas-Mendoza ES, Méndez-Contreras JM, Alvarado-Lassman A. 2024. The valorization of fruit and vegetable wastes using an anaerobic fixed biofilm reactor: A Case of discarded tomatoes from a traditional market. *Processes*. 12(9):1923. doi:10.3390/pr12091923.
- Appels L, Baeyens J, Degrève J, Dewil R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34(6):755–781. doi:10.1016/j.peccs.2008.06.002.
- Atasoy M, Cetecioglu Z. 2022. The effects of pH on the production of volatile fatty acids and microbial dynamics in long-term reactor operation. *Journal of Environmental Management*. 319:115700. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115700.
- Azevedo A, Lapa N, Moldão M, Gominho J, Duarte E. 2025. Fruit and vegetable wastes as co-substrates in anaerobic co-digestion: Effect of storage temperature on physicochemical properties and biogas production. *Energy Nexus*. 17:100354. doi:10.1016/j.nexus.2024.100354.
- Banarase SE, Pirke NV. 2024. Enhancing biogas production from vegetables and fruits wastes by applying effective strategies. *Ecology, Environment and Conservation*. 30(02):930–935. doi:10.53550/eec.2024.v30i02.084.
- Battista F, Remelli G, Zanzoni S, Bolzonella D. 2020. Valorization of residual orange peels: Limonene recovery, volatile fatty acids, and biogas production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 8(17):6834–6843. doi:10.1021/acssuschemeng.0c01735.
- Beschkov VN, Angelov IK. 2025. Volatile fatty acid production vs. Methane and hydrogen in anaerobic digestion. *Fermentation*. 11(4):172. doi:10.3390/fermentation11040172.
- Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, Ben Cheikh R, Marouani L, Hamdi M. 2004. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. *Process Biochemistry*. 39(12):2143–2148. doi:10.1016/j.procbio.2003.11.022.
- Budiyono, Manthia F, Amalin N, Hawali Abdul Matin H, Sumardiono S. 2018. Production of biogas from organic fruit waste in anaerobic digester using ruminant as the inoculum. *MATEC Web of Conferences*. 156:3053. doi:10.1051/matecconf/201815603053.
- Chen H, Zheng Z, Shi W. 2015. Investigation on the kinetics of iron ore fines reduction by CO in a micro-fluidized bed. *Procedia Engineering*. 102:1726–1735. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.308>.
- Chin MJ, Poh PE, Tey BT, Chan ES, Chin KL. 2013. Biogas from palm oil mill effluent (POME): Opportunities and challenges from Malaysia's perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26:717–726. doi:10.1016/j.rser.2013.06.008.
- Czekała W, Jasiński T, Grzelak M, Witaszek K, Dach J. 2022. Biogas plant operation: Digestate as the valuable product. *Energies*. 15(21):8275. doi:10.3390/en15218275.
- Deublein D, Steinhauser A. 2011. *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. 2 edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/9783527632794.
- Ge H, Jensen PD, Batstone DJ. 2011. Relative kinetics of anaerobic digestion under thermophilic and mesophilic con-

- ditions. *Water Science and Technology*. 64(4):848–853. doi:10.2166/wst.2011.571.
- Gebresilasie GG, Gebreslassie MG, Gebresemati M. 2025. Comparative potential of biogas production from the distillery, fruit and vegetable waste and their mixtures (digestion). *Heliyon*. 11(2):e42068. doi:10.1016/j.heliyon.2025.e42068.
- Jameel MK, Mustafa MA, Ahmed HS, Jassim Mohammed A, Ghazy H, Shakir MN, Lawas AM, Khudhur Mohammed S, Idan AH, Mahmoud ZH, Sayadi H, Kianfar E. 2024. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*. 7:101549. doi:10.1016/j.rechem.2024.101549.
- Lotito AM, De Sanctis M, Pastore C, Di Iaconi C. 2018. Biomechanization of citrus waste: Effect of waste characteristics and of storage on treatability and evaluation of limonene degradation. *Journal of Environmental Management*. 215:366–376. doi:10.1016/j.jenvman.2018.03.057.
- Marendra F. 2025. *Green energy circulation: The role of anaerobic digestion in a circular economy*. 1 edition. Sleman, DIY: Penamuda Media. <https://penamudamedia.com/index.php/publisher/article/view/526>.
- Marendra F, Pramudikto DA, Rahmada A, Rimbawan HJ, Cahyono RB, Ariyanto T. 2020. Biogas production for electricity from fruit waste: a case study of Gemah Ripah biogas plant, Yogyakarta. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 736(2):22058. doi:10.1088/1757-899x/736/2/022058.
- Metcalf & Eddy I, Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. 2003. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. 4 edition. McGraw-Hill series in civil and environmental engineering. Boston: McGraw-Hill.
- Mishra S, Huang Y, Li J, Wu X, Zhou Z, Lei Q, Bhatt P, Chen S. 2022. Biofilm-mediated bioremediation is a powerful tool for the removal of environmental pollutants. *Chemosphere*. 294:133609. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133609.
- Mohamed Moffit MA, Suja' F, Kabir Ahmad I, Bhaskaran AN. 2025. Biogas production and reactor performance of a pilot scale anaerobic biofilm digester treating food waste. *Renewable Energy*. 243:122414. doi:10.1016/j.renene.2025.122414.
- Nabati EG, Alvela Nieto MT, Bode D, Schindler TF, Decker A, Thoben KD. 2022. Challenges of manufacturing for energy efficiency: towards a systematic approach through applications of machine learning. *Production*. 32. doi:10.1590/0103-6513.20210147.
- Olaimat AN, Ababneh AM, Al-Holy M, Al-Nabulsi A, Osaili T, Abughoush M, Ayyash M, Holley RA. 2024. A review of bacterial biofilm components and formation, detection methods, and their prevention and control on food contact surfaces. *Microbiology Research*. 15(4):1973–1992. doi:10.3390/microbiolres15040132.
- Pambudi NA, Firdaus RA, Rizkiana R, Ulfa DK, Salsabila MS, Suharno, Sukatiman. 2023. Renewable energy in Indonesia: Current status, potential, and future development. *Sustainability*. 15(3):2342. doi:10.3390/su15032342.
- Patinvoh RJ, Osadolor OA, Sárvári Horváth I, Taherzadeh MJ. 2017. Cost effective dry anaerobic digestion in textile bioreactors: Experimental and economic evaluation. *Bioreactor Technology*. 245:549–559. doi:10.1016/j.biortech.2017.08.081.
- Plazzotta S, Cottes M, Simeoni P, Manzocco L. 2020. Evaluating the environmental and economic impact of fruit and vegetable waste valorisation: The lettuce waste study-case. *Journal of Cleaner Production*. 262:121435. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121435.
- Praharasti AS, Febrisiantosa A, Jatmiko TH, Wahono SK, Prasetyo DJ, Pratiwi D, Suryani R, Rizal WA, Hidayat N, Suwanto A. 2023. Pembuatan pupuk padat dari hasil sampling biogas di Gunungkidul. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*. 23(2):167–174. doi:10.25181/jppt.v23i2.2291.
- Purwasih R, Sutaryo S, Purnomoadi A, Purbowati E, Haryanto B. 2025. Anaerobic digestion from fruit waste for biogas production to sustainable development: A comprehensive bibliometric analysis. *Sustainable Futures*. 10:101255. doi:10.1016/j.sfr.2025.101255.
- Qamar S, Zhang Q, Ahmad M, Pinzón S, Ahmed N, Işık C. 2025. Roadmap to green future: Biodigester technology acceptance to upscale rural energy access. *Energy*. 315:134437. doi:10.1016/j.energy.2025.134437.
- Rahmada A, Marendra F, Rimbawan H, Wulandari C, Putri AE, Mustofa A, Pramudito DA, Millati R, Cahyono RB, Ariyanto T. 2021. Zero waste concept in fruit waste anaerobic digester: Case study of biogas plant Gamping, Yogyakarta. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019)*. icsb-19. Atlantis Press. doi:10.2991/aer.k.210603.044.
- Rahmanta AP. 2025. Strategi operasi biodigester dengan substrat inhibitor limonen dan tanin dari sampah buah. *Fruitset Sains: Jurnal Pertanian Agroteknologi*. 12(6):362–372. <https://repo.polteklpp.ac.id/id/eprint/1802/1/ArtikelAPR2025.pdf>.
- Renggaman A, Choi HL, Sudiarto SIA, Suresh A, Jeon YC. 2024. Biomethane potential of beef cattle slaughterhouse waste and the impact of co-digestion with cattle feces and swine slurry. *Fermentation*. 10(10):510. doi:10.3390/fermentation10100510.
- Rokaya B, Kerroum D, Hayat Z, Panico A, Ouafa A, Pirozzi F. 2019. Biogas production by an anaerobic digestion process from orange peel waste and its improvement by limonene leaching: Investigation of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pre-treatment effect. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 46(1):2704–2712. doi:10.1080/15567036.2019.1692975.
- Rouhollahi Z, Ebrahimi-Nik M, Ebrahimi SH, Abbaspour-Fard MH, Zeynali R, Bayati MR. 2020. Farm biogas plants, a sustainable waste to energy and bio-fertilizer opportunity for Iran. *Journal of Cleaner Production*. 253:119876. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119876.
- Ruiz B, Flotats X. 2016. Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. *Biochemical Engineering Journal*. 109:9–18. doi:10.1016/j.bej.2015.12.011.
- Soeprijanto S, Fatullah AR, Agustina S, Amalia DF, Kaisar AA. 2020. Biogas production from vegetables and fruit wastes using anaerobic floating bioreactor. *Eksergi*. 17(2):99. doi:10.31315/e.v17i2.3733.
- Suarez E, Tobajas M, Mohedano AF, de la Rubia MA. 2022. Energy recovery from food waste and garden and park waste: Anaerobic co-digestion versus hydrothermal tre-

- atment and anaerobic co-digestion. *Chemosphere*. 297:134223. doi:[10.1016/j.chemosphere.2022.134223](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134223).
- Sun Y, Chen S, Zhang C, Liu Y, Ma L, Zhang X. 2018. Effects of sub-minimum inhibitory concentrations of lemon essential oil on the acid tolerance and biofilm formation of *Streptococcus mutans*. *Archives of Oral Biology*. 87:235–241. doi:[10.1016/j.archoralbio.2017.12.028](https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2017.12.028).
- Uruén C, Chopo-Escuin G, Tommassen J, Mainar-Jaime RC, Arenas J. 2020. Biofilms as promoters of bacterial antibiotic resistance and tolerance. *Antibiotics*. 10(1):3. doi:[10.3390/antibiotics10010003](https://doi.org/10.3390/antibiotics10010003).
- Wikandari R, Nguyen H, Millati R, Niklasson C, Taherzadeh MJ. 2015. Improvement of biogas production from orange peel waste by leaching of limonene. *BioMed Research International*. 2015:1–6. doi:[10.1155/2015/494182](https://doi.org/10.1155/2015/494182).
- Wu KK, Zhao L, Wang ZH, Sun ZF, Wu JT, Chen C, Xing DF, Yang SS, Wang AJ, Zhang YF, Ren NQ. 2024. Simultaneous biogas upgrading and medium-chain fatty acids production using a dual membrane biofilm reactor. *Water Research*. 249:120915. doi:[10.1016/j.watres.2023.120915](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120915).
- Yin Dm, Mahboubi A, Wainaina S, Qiao W, Taherzadeh MJ. 2021. The effect of mono- and multiple fermentation parameters on volatile fatty acids (VFAs) production from chicken manure via anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 330:124992. doi:[10.1016/j.biortech.2021.124992](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124992).