

Pengaruh Kadar Senyawa Kapsaisinoid terhadap Produksi Biogas dalam Proses *Anaerobic Digestion* Limbah Sayur

Fajar Marendra^{1*}, Risa Sarnes², Sinta Ramadhania Putri Maresi¹,
Amilla Puspadahita³, Yayan Dwi Sutarni⁴, Fatimah Mustafawi Muhammadi³

¹)Program Studi Pengolahan Limbah Industri, Politeknik AKA Bogor, Bogor, 16154, Indonesia

²)Program Studi Penjaminan Mutu Industri Pangan, Politeknik AKA Bogor, Bogor, 16154, Indonesia

³)Program Studi Nanoteknologi Pangan, Politeknik AKA Bogor, Bogor, 16154, Indonesia

⁴)Program Studi Analisis Kimia, Politeknik AKA Bogor, Bogor, 16154, Indonesia

*E-mail: fajarmarendra@kemenperin.go.id

(Received : 29 Oktober 2024 ; Accepted: 5 Mei 2025 ; Published: 24 Juli 2025)

Abstrak

Limbah sayur merupakan limbah padat yang dihasilkan dari aktivitas produksi manusia. Jumlahnya semakin besar seiring dengan meningkatnya jumlah dan aktivitas produksi yang dilakukan manusia. Jumlah limbah sayur yang besar ini jika tidak dilakukan pengelolaan dan pengolahan yang tepat akan memberikan efek negatif terhadap kehidupan manusia. Limbah sayur ini dapat diolah menggunakan sistem pencernaan anaerobik atau *anaerobic digestion* (AD). Limbah sayur dengan berbagai macam jenis sayuran didalamnya disinyalir memiliki kandungan senyawa yang dapat menghambat terjadinya pembentukan biogas dalam proses AD. Salah satu senyawa itu diantaranya adalah senyawa kapsaisinoid. Senyawa kapsaisinoid, seperti kapsaisin dengan sifat antimikroba yang dimilikinya disinyalir dapat memengaruhi aktivitas mikroba dalam proses AD. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kadar senyawa kapsaisinoid terhadap produksi biogas dalam proses *anaerobic digestion* menggunakan limbah sayur. Senyawa kapsaisinoid yang berasal dari bubuk kapsaisin alami dicampur limbah sayur dan kotoran sapi dengan kadar 0 mg Cp/L; 0,005 mg Cp/L; 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L; dan 0,025 mg Cp/L. Substrat dimasukkan ke dalam *digester* untuk memproduksi biogas melalui proses *anaerobic digestion*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substrat dengan kadar 0 mg Cp/L; 0,005 mg Cp/L; 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L; dan 0,025 mg Cp/L secara berturut-turut menghasilkan biogas kumulatif sebesar 1000 ml; 880 ml; 720 ml; 640 ml; 570 ml; dan 430 ml dengan kandungan metana secara berturut-turut sebesar 759,5 ml; 599,5 ml; 470 ml; 371 ml; 302 ml; dan 220 ml. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar senyawa *kapsaisinoid* maka biogas dan metana yang dihasilkan semakin sedikit.

Kata kunci: *Kapsaisinoid; biogas; metana; anaerobic digestion; limbah sayur*

Abstract

Vegetable waste is a solid byproduct generated from human production activities. Its volume continues to increase in line with the rise in human production and consumption. If not properly managed and processed, the large volume of vegetable waste will have negative impacts on human life. This waste can be processed using an anaerobic digestion (AD) system. However, vegetable waste, which consists of various types of vegetables, is suspected to contain compounds that may inhibit biogas formation during the AD process. One such compound is capsaicinoid. Capsaicinoid compounds, such as capsaicin, possess antimicrobial properties that are believed to influence microbial activity in AD. This study aims to investigate the effect of capsaicinoid concentration on biogas production in anaerobic digestion using vegetable waste. Capsaicinoids derived from natural capsaicin powder were mixed with vegetable waste and cow manure at concentrations of 0 mg Cp/L, 0.005 mg Cp/L, 0.01 mg Cp/L, 0.015 mg Cp/L, 0.02 mg Cp/L, and 0.025 mg Cp/L. The substrate was then placed into a digester to undergo anaerobic digestion for biogas production. The results indicate that substrates with concentrations of 0 mg Cp/L, 0.005 mg Cp/L, 0.01 mg Cp/L, 0.015 mg Cp/L, 0.02 mg Cp/L, and 0.025 mg Cp/L produced cumulative biogas volumes of 1000 ml, 880 ml, 720 ml, 640 ml, 570 ml, and 430 ml, respectively. The corresponding methane yields were 759.5 ml, 599.5 ml, 470 ml, 371 ml, 302 ml, and 220 ml. It can be concluded that higher capsaicinoid concentrations lead to lower biogas and methane production.

Keyword: *capsaisinoid; biogas; methane; anaerobic digestion; vegetables waste.*

PENDAHULUAN

Limbah sayur merupakan komponen yang banyak dijumpai pada limbah rumah tangga maupun limbah dari aktivitas agrikultur, supermarket maupun pasar tradisional (Pavi et al., 2017). Jumlah limbah ini akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk serta aktivitas produksinya. Limbah sayur memiliki sifat *biodegradable* yang tinggi sehingga ketika hanya dibuang ke tempat pengolahan akhir (TPA) akan menghasilkan gas metana. Gas metana merupakan gas rumah kaca yang memiliki tingkat racun 28 kali lebih tinggi daripada karbondioksida (Everitt et al., 2022). Oleh sebab itu penanganan limbah sayur membutuhkan proses yang cocok dengan sifat yang dimilikinya. Salah satunya adalah proses *anaerobic digestion* (AD)

Sifat *biodegradable* tinggi, kaya akan kandungan bahan organik serta memiliki kadar air yang tinggi menjadikan limbah sayur bahan baku ideal bagi produksi biogas dengan proses AD (Abebe et al., 2017). Meskipun demikian limbah sayur memiliki tantangan tersendiri ketika digunakan sebagai bahan baku biogas karena mengandung beberapa senyawa yang berpotensi menghambat proses AD seperti senyawa kapsaisinoid, pH rendah dan kandungan Volatile Fatty Acid (VFA) yang tinggi (Gebresilasie et al., 2025).

Salah satu komponen limbah sayur yang menarik untuk diteliti adalah cabai. Di Indonesia, konsumsi cabai sangat tinggi, dengan empat jenis utama yang dibudidayakan: cabai rawit, paprika, cabai besar, dan cabai keriting, masing-masing dengan produksi signifikan per musim panen. Cabai banyak digunakan sebagai bumbu masakan khas Indonesia menjadikan limbah cabai menempati porsi cukup banyak pada limbah sayur di Indonesia (Zahara et al., 2021). Tidak bagusnya pemilahan sampah juga ikut andil dalam tingginya persentase cace dalam limbah sayur di Indonesia (Fahrhani et al., 2023).

Cabai mengandung senyawa kapsaisinoid yang memberikan rasa pedas dan memiliki sifat antimikroba. Senyawa ini mampu membunuh, menghambat metabolisme, pertumbuhan dan reproduksi mikroorganisme sebagaimana dilaporkan oleh (Dzigbor et al., 2024). Dengan jumlah cabai yang banyak pada limbah sayuran di Indonesia maka disinyalir akan mempengaruhi proses produksi biogas dan metana jika digunakan sebagai bahan baku biogas.

Beberapa penelitian terkait biogas telah banyak dilakukan. Penelitian yang dilakukan berfokus pada bahan yang digunakan sebagai co-digester diantaranya vinase tebu (Junior et al., 2022), kotoran kelinci (Septiariva et al., 2023), lumpur limbah anaerobik (Leite et al., 2023), limbah buah (Magama et al., 2022; Soeprijanto et al., 2020), kulit singkong, dan daun pisang (Ramadhan et al., 2023),

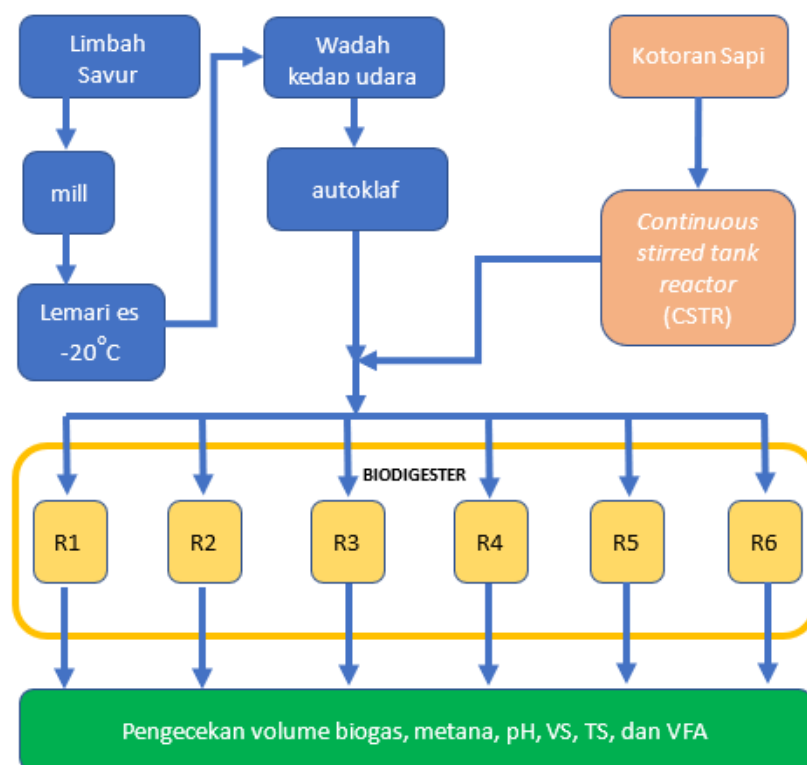
ampas tebu (Vats et al., 2019), campuran limbah buah dan kotoran unggas (Bres et al., 2018), kotoran sapi (Bernard et al., 2020; Dani, et al., 2024; D'Silva et al., 2022; Wang et al., 2018), serta pupuk mineral (Borowski et al., 2023). Penelitian lain melaporkan telah mengeksplorasi pengaruh senyawa antimikroba terhadap produksi biogas. Misalnya, Cahyari dan Sahroni (2015) meneliti pengaruh konsentrasi cabai merah dan cabai rawit dalam produksi biogas dari sampah organik, menemukan bahwa peningkatan konsentrasi cabai mengurangi yield biogas, menunjukkan efek penghambatan. Du et al., (2021), juga melaporkan bahwa keberadaan kapsaisin menginduksi apoptosis melalui pengubahan kinase kunci atau menurunkan rasion NAD⁺/NADH. Hal ini menyebabkan penghambatan signifikan terhadap produksi biogas dari limbah makanan. Selain itu, Wikandari et al., (2015) meneliti pengaruh limonen, senyawa antimikroba dalam kulit jeruk, terhadap produksi biogas, menemukan bahwa konsentrasi limonen yang lebih tinggi meningkatkan akumulasi asam asetat, yang menghambat pertumbuhan bakteri metanogen dan mengurangi produksi biogas sehingga harus dihilangkan salah satunya dengan metode *leaching*.

Namun, penelitian mengenai interaksi kapsaisinoid terhadap produksi biogas berbasis limbah sayur di Indonesia, masih terbatas dan kurang dipahami. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan mengevaluasi dampak kapsaisinoid terhadap produksi biogas dalam proses AD berbasis limbah sayur guna memahami lebih mendalam pengaruh yang ditimbulkan, dengan fokus pada parameter seperti volume biogas, volume metana, pH, dan asam lemak volatil (VFAs).

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah sayuran. Limbah sayur didominasi jenis-jenis sayuran yang mudah busuk seperti sawi, bayam, jamur kuping, kangkung, dan wortel. Limbah sayur ini didapatkan dari Pasar Induk Sayur Giwangan, Yogyakarta. Inokulum yang digunakan adalah kotoran sapi didapatkan dari peternakan Boja Farm di Magelang Jawa Tengah. Sementara untuk bubuk kapsaisin menggunakan bubuk kapsaisin dengan nama produk Capsicum Oleoresin. Untuk alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa continuous stirred tank reactor (CSTR) dengan kapasitas 40 liter untuk persiapan inoculum, mill (SS3300, Waste King in USA) untuk menggiling limbah sayur, lemari es dengan suhu -20oC, wadah kedap udara, autoklaf, serta 1 buah anaerobic digestion sistem batch dengan volume total 1 liter dan volume efektif 0,8 liter. Gambar 1 menunjukkan gambaran diagram alir dari metode penelitian yang dilakukan mulai dari penyiapan substrat dan inokulum tes dan pengujian VFAs.



Gambar 1. Diagram alir produksi biogas berbasis limbah sayur dengan variasi kadar kapsaisin

Substrat dan Inokulum

Penyiapan substrat dan inokulum umumnya melibatkan mikroorganisme, enzim, atau proses fermentasi. Metode penyiapan substrat dan inokulum pada penelitian ini merujuk pada metode yang dilakukan oleh Zhang et al. (2022). Penggunaan limbah sayur sebagai substrat dalam penelitian ini didapatkan dari Pasar Induk Sayur Giwangan, Yogyakarta. Limbah ini perlu dipilah untuk menghilangkan kontaminan seperti plastik, logam, atau bahan non-organik lainnya.

Limbah sayur yang dikumpulkan harus dalam keadaan yang masih segar atau masih memiliki kandungan air tinggi. Pastikan limbah tersebut masih layak digunakan tanpa ada bahan yang bisa menghambat proses *anaerobic digestion* (seperti bahan kimia berbahaya).

Limbah sayur yang telah dipilah secara manual digiling menjadi ukuran kecil (< 3 mm) menggunakan mill (SS3300, Waste King in USA) (Zhang et al., 2022). Limbah sayur yang sudah diolah sebelumnya disimpan di dalam lemari es dengan suhu -20°C . Sebelum Dimasukkan kedalam proses anaerobic digestion, limbah sayur dicairkan terlebih dahulu dalam wadah kedap udara pada suhu 4°C , selanjutnya dimasukkan ke dalam autoklaf pada suhu 121°C dan $0,1$ MPa selama 20 menit. Limbah sayur yang telah diproses kemudian dijadikan bahan baku proses *anaerobic digestion*. Kotoran sapi pada penelitian ini berperan sebagai inokulum. Inokulum dimasukkan ke dalam CSTR 40 liter pada suhu mesofilik 37°C selama 60 hari sebelum percobaan dilakukan (Zhang et al., 2022).

Tes Batch

Proses anaerobic digestion dari substrat limbah sayur dilakukan dalam digester anaerobic dengan total volume 1 L dan memiliki volume efektif 0,8 L. Untuk mengetahui pengaruh senyawa kapsaisinoid terhadap produksi biogas maka didesain substrat dengan kadar senyawa kapsaisinoid sebagai berikut: 0 mg Cp/L; 0,005 mg Cp/L; 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L; dan 0,025 mg Cp/L. Pemilihan kadar kapsaisin yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan hasil uji pendahuluan yang menunjukkan bahwa ketika jarak antar titik pengamatan kadar kapsaisin sebesar 0,1 mg Cp/L, performa proses AD terkait penambahan kapsaisin tidak terlalu dapat diamati dengan jelas karena perubahannya yang ditunjukkan terlalu drastis sehingga dipilihlah range kadar kapsaisin yang lebih kecil dengan harapan perubahan yang terjadi dapat termati dengan lebih baik. Merujuk metode yang dilakukan Zhang et al., (2022), Substrat, inokulum dan bubuk kapsaisin natural dicampur menjadi satu di dalam 1 liter *digester* dan nitrogen dimasukkan kedalam digester untuk membentuk lingkungan anaerobik. Untuk menutup reaktor digunakan sumbat karet agar gas yang terbentuk tidak langsung keluar ke lingkungan. Volume Biogas diukur menggunakan water displacement method. Sampel cairan dianalisis setiap hari guna pengambilan data pH dan VFA. Durasi proses anaerobik dirancang berlangsung selama 144 jam. Semua data dari tiap kelompok diambil secara dua rangkap/duplo.

Pengukuran Biogas dan VFAs

Produksi biogas setiap hari dicatat dan dikonversikan ke dalam volume kondisi standar. Sampel biogas diuji menggunakan gas chromatografi (GC, 7890B), Agilent, USA) untuk mengetahui kandungannya menggunakan *Thermal conductivity detector* (TCD). Untuk pemisahan dalam proses ini digunakan kolom baja tahan karat TDX-01 berukuran 2 m x 3 mm dengan carbon molecular sieve di dalamnya. Secara berurutan suhu pada port injection, kolom dan TCD ialah 160°C, 160°C dan 180°C. Argon dengan laju alir 30 mL/menit digunakan sebagai gas pembawa (Zhang et al., 2021). Nilai pH selama proses anaerobic digestion diukur menggunakan pH meter (PHB-1, Shanghai Sanxin).

VFAs dideteksi menggunakan gas chromatografi (GC-21010 plus, Shimadzu, Japan) yang dilengkapi dengan FID detector dan kolom kapiler (HP-INOWAX, 30 m x 0.32 mm, Agilent, USA) untuk pemisahannya. Untuk port injection dan FID detector, keduanya di atur pada suhu 280°C (Zhang et al., 2021). Suhu dinaikkan secara bertahap dimulai pada suhu 60°C lalu naikan suhu hingga

mencapai 90°C kemudian naikan menjadi 150°C setelah itu ditingkatkan suhunya menjadi 230°C dengan kecepatan 15°C/menit dan dipertahankan selama 2 menit. Untuk kecepatan laju alir nitrogen, hidrogen dan udara yang digunakan secara berturut-turut adalah 30, 40, dan 400 mL/menit (Zhang et al., 2022).

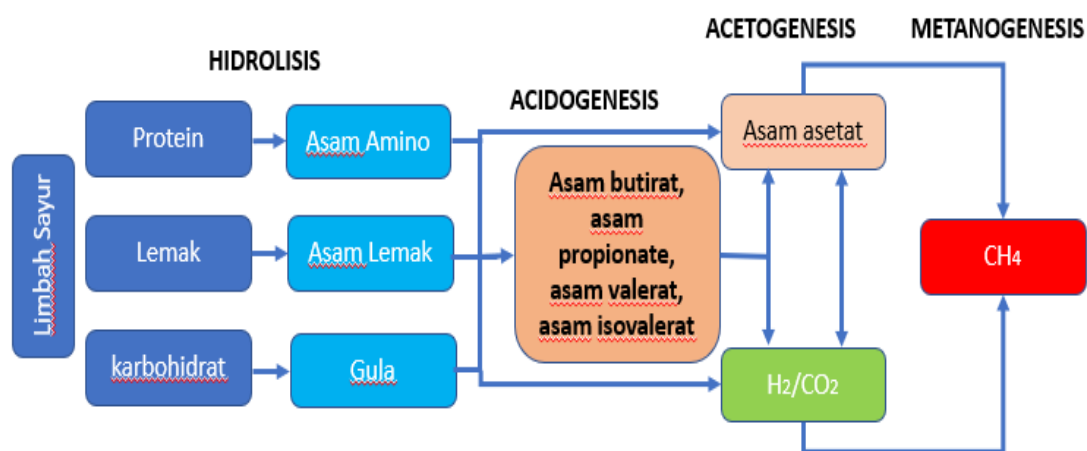
HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa AD dalam variasi konsentrasi senyawa kapsaisinoid

Proses pembentukan biogas dari limbah sayur melalui tiga empat tahapan yang dapat dilihat pada Gambar 1. Tahap pertama ialah tahap hidrolisis, tahap ini bekerja dengan tujuan untuk mengubah senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana. Tahap ini akan mengubah karbohidrat menjadi gula, lemak menjadi asam lemak dan protein menjadi asam amino. Proses ini dibantu oleh bakteri atau mikroorganisme seperti *Saccharibacteria* genera incertae sedis (Lian et al., 2020) dan *Aminicenantes* genera incertae sedis (Shi et al., 2020) dengan reaksi utama sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Reaksi utama yang terjadi selama proses AD

Reaksi	ΔG^0 (KJ)	Ref
Hidrolisis glukosa dan selulosa menjadi gula $(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$	-215,7 sd -357,9	
Acidogenesis		
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$	-206,0	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2 + 2CO_2$	-254,0	
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$	-358,0	Moffit et al., 2025;
Acetogenesis		Junior et al., 2022
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$	+76,1	
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 3HCOOH$	+72,2	
$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$	+48,1	
Metanogenesis:		
$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	-31,6	
$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-135,0	



Gambar 2. Mekanisme empat tahapan pembentukan biogas

Tahap kedua dari proses AD adalah tahap yang disebut acidogenesis. Banyak mikroorganisme yang berperan dalam proses ini. Beberapa mikroorganisme telah dilaporkan memiliki andil besar dalam tahapan ini diantaranya: *Ornatilinea* dengan peran mengubah asam amino dan sugar menjadi asam asetat, VFA lain dan hidrogen (Dong et al., 2020); *Levilinea* dengan peran yang sama dengan *Ornatilinea* (Lin et al., 2018); *Clostridium sensu stricto* dengan peran memproduksi kaproat, butirir dan hydrogen (Dong et al., 2020); *Trichococcus* dengan peran mengubah karbohidrat menjadi laktat dan asetat (Yan et al., 2020); *Syntrophomonas* dengan peran memproduksi asetat dari non-acetic VFAs (Yuan et al., 2020).

Gambar 2 menunjukkan tahap 3 dan 4 dari proses AD yaitu acetogenesis dan metanogenesis. Dalam tahapan inilah produksi metana terjadi. Produksi metana ini dilakukan oleh mikroorganisme metanogen. Beberapa mikroorganisme yang berperan dalam tahapan ini diantaranya: *Belilinea*; *Longilinea* (Ruiz-Sánchez et al., 2019); *Methanothrix* (Dong et al., 2020; Liu et al., 2019);

Syatrophobacter (Li et al., 2018). Selain mikroorganisme tersebut, Lian et al., (2020) melaporkan terdapat tiga mikroorganisme lain yang ikut andil dalam produksi metana dalam proses ini diantaranya: *Methanolinea*; *Methanobacterium*; *Methanospirillum*.

Limbah sayur dengan variasi senyawa kapsaisinoid dalam penelitian ini telah dikenai proses AD melalui empat tahapan proses guna mengetahui pengaruh senyawa kapsaisinoid terhadap performa produksi biogas dan metana. Tabel 2 menunjukkan performa AD dalam memproduksi biogas dan metana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substrat dengan kadar 0 mg Cp/L; 0,005 mg Cp/L; 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L; dan 0,025 mg Cp/L secara berturut-turut menghasilkan biogas kumulatif sebesar 1000 ml; 880 ml; 720 ml; 640 ml; 570 ml; dan 430 ml dengan kandungan metana secara berturut-turut sebesar 759,5 ml; 599,5 ml; 470 ml; 371 ml; 302 ml; dan 220 ml.

Tabel 2. Performa AD dalam berbagai variasi senyawa kapsaisinoid

Parameter	Kadar senyawa <i>Kapsaisinoid</i> (mg Cp/L)					
	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
Produksi Biogas (ml)	1000	880	720	640	570	430
Produksi Metana (ml)	759,5	599,5	470	371	302	220
Pengurangan TS (%)	65,2 ± 2,2	57,6 ± 2,5	54,7 ± 1,9	49,1 ± 1,4	38,8 ± 0,8	27,4 ± 2,1
Pengurangan VS (%)	76,8 ± 3,2	72,9 ± 1,6	65,8 ± 2,4	59,9 ± 0,8	48,7 ± 3,1	39,8 ± 1,2
pH	7 ± 0,2	6,3 ± 0,4	5,9 ± 0,4	5,9 ± 0,5	5,8 ± 0,7	5,5 ± 0,7
Asam asetat (mmol)	9,6	14,8	32,2	53,5	61,5	90,3
Asam Propionat (mmol)	4,8	4,6	9,3	12,8	17,7	24,7
Asam Butirat (mmol)	2,0	4,1	6,0	7,4	9,7	18,8
Total VFA	16,4	23,5	47,6	73,7	88,9	133,7

Pengaruh Kadar Senyawa Kapsaisinoid Terhadap Produksi Biogas

Produksi biogas yang dihasilkan oleh digester dengan kandungan senyawa kapsaisinoid berbeda ditunjukkan oleh Gambar 3. Dari Gambar 3 dapat diketahui bahwa volume biogas kumulatif yang dihasilkan oleh substrat tanpa adanya senyawa kapsaisinoid menghasilkan biogas kumulatif tertinggi yaitu sekitar 1000 mL. Substrat dengan kadar senyawa kapsaisinoid 0,025 Cp/L menghasilkan produksi kumulatif terendah dengan nilai 430 mL.

Semua grup substrat mulai membentuk biogas setelah 6 jam dan terus meningkat. Hal ini membuktikan bahwa proses anaerobic digestion berlangsung sebagaimana yang dilaporkan oleh Cahyari & Sahroni (2015). Proses penyiapan substrat inokulum di awal telah membuat

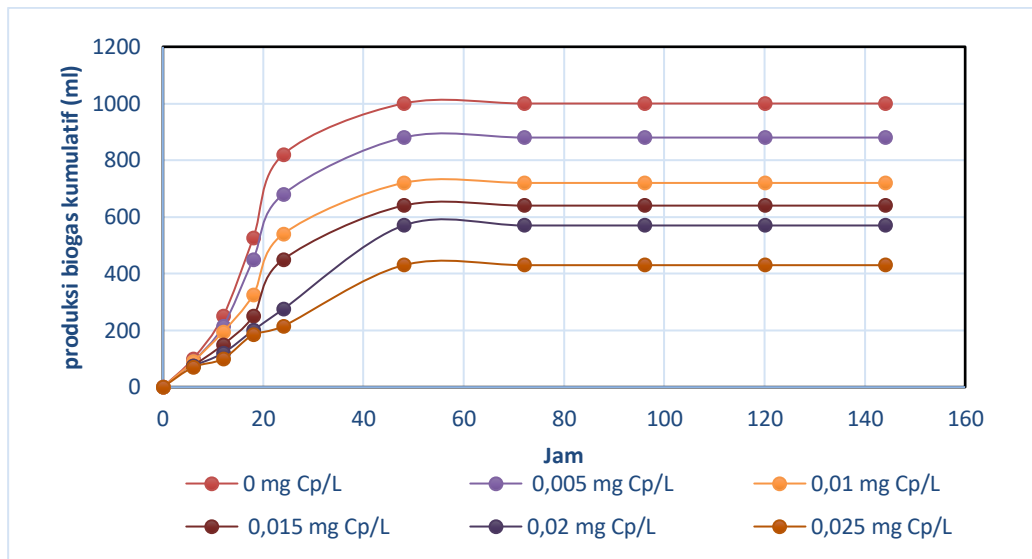
pembentukan biogas menjadi lebih cepat karena koloni bakteri atau mikrobial telah terbentuk dan siap mengubah bahan organik yang masuk menjadi biogas.

Koloni bakteri atau mikrobial mengubah bahan organik menjadi biogas dan mencapai puncaknya setelah 48 jam. Hal tersebut terlihat pada Gambar 3 yang menunjukkan produksi biogas kumulatif cenderung lurus dan stabil.

Tren produksi biogas kumulatif yang menurun pada Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin banyak kadar senyawa kapsaisinoid menyebabkan produksi biogas menurun. Menurut Dzigbor et al., (2024), penurunan produksi biogas ini dikarenakan senyawa kapsaisinoid memiliki sifat antimikrobial sehingga dapat menghambat pertumbuhan bakteri yang bekerja untuk memproduksi biogas dalam proses *anaerobic digestion*.

Ketika laju pertumbuhan bakteri tidak mampu mengimbangi proses anaerobic digestion, maka produksi biogas akan menurun dikarenakan

kurangnya bakteri atau mikrobia yang melakukan proses anaerobic digestion.



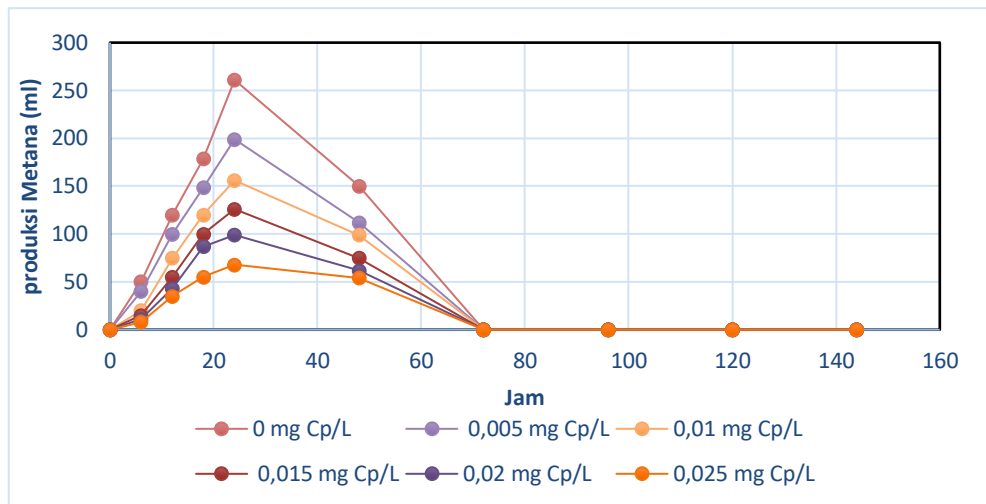
Gambar 3. Produksi biogas kumulatif dari proses *anaerobic digestion* limbah sayur dengan kadar senyawa *kapsaisinoid* berbeda.

Pengaruh Kadar Senyawa Kapsaisinoid terhadap Produksi Metana

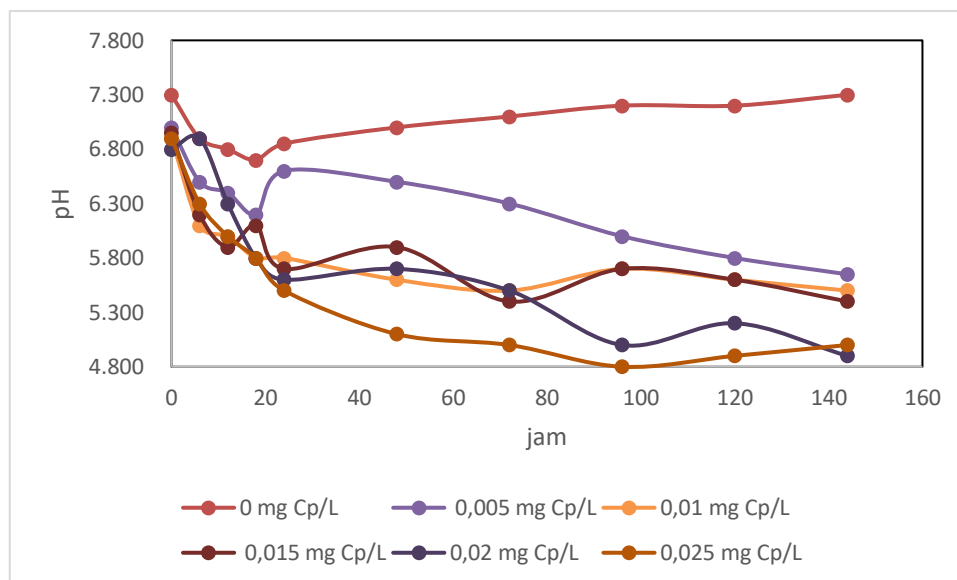
Gambar 4 menunjukkan bahwa terdapat pergeseran nilai produksi metana seiring dengan bertambahnya kadar senyawa kapsaisinoid dalam substrat. Kadar metana tertinggi dihasilkan oleh substrat 0 mg Cp/L, sedangkan kadar metana terendah dihasilkan oleh substrat 0,025 mg Cp/L. Hal ini menggambarkan bahwa penambahan kadar senyawa kapsaisinoid dalam substrat sangat mempengaruhi volume metana yang dihasilkan. Penurunan pH sistem masih dapat ditanggulangi dikarenakan kadar senyawa kapsaisinoid dalam substrat yang rendah. Hal ini berbeda jika kadar senyawa kapsaisinoid tinggi, maka tingkat pengasaman sistem anaerobik terjadi secara signifikan yang menyebabkan kinerja bakteri hidrolisis (genera *Saccharibacteria*, genera *incerta sedis* dan *Aminicenantes genera incerta sedis*) dan bakteri metanogenesis (genera *Bellilinea*, *Methanothrix*, dan *Longilinea*) menurun (Zhang et al., 2022). Taolin (2019) melaporkan bahwa senyawa kapsaisinoid merupakan salah satu antimikroba yang berperan dalam mekanisme untuk mematikan mikroba. Hal ini memberikan efek pada penurunan produksi gas metana, sehingga dapat dikatakan bahwa produksi metana menurun seiring penambahan kadar senyawa kapsaisinoid dalam substrat. Hal itu terbukti dari hasil penelitian

yang menunjukkan bahwa produksi metana tertinggi diraih oleh substrat 0 mg Cp/L dengan nilai total 759,5 ml atau sekitar 75,9%, sedangkan secara berturut turut substrat 0,005 mg Cp/L; 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L; dan 0,025 mg Cp/L menghasilkan metana sebesar 599,5 ml; 470 ml; 371 ml; 302 ml; dan 220 ml.

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 1 dapat diketahui bahwa produksi metana dilakukan oleh dua jenis kelompok mikroorganisme. Hal ini sesuai dengan pernyataan Zhang et al., (2022). Sementara itu, Junior et.al.,(2022) menyebutkan bahwa mikroorganisme pertama menggunakan asetat sebagai bahan baku untuk menghasilkan metana dan karbon dioksida, untuk mikroorganisme kelompok kedua menggunakan hidrogen dan karbon dioksida sebagai donor elektron dan penerima elektron untuk memproduksi metana. Tabel 2 menunjukkan bahwa TS dan VS yang hilang mengalami penurunan nilai seiring dengan penambahan kadar senyawa kapsaisinoid. Pada kadar senyawa *capcaisinoids* 0 mg Cp/L, TS dan VS yang hilang secara berturut-turut 65,2% dan 76,8%, sedangkan pada kadar 0,025 mg Cp/L turun drastis pada angka 27,4% dan 39,8%. Hal ini menggambarkan bahwa saat kadar senyawa kapsaisinoid semakin tinggi, maka semakin sedikit substrat yang terdekomposisi dalam sistem *anaerobic digestion*.



Gambar 4. Produksi gas metana selama proses *anaerobic digestion* limbah sayur dengan kadar senyawa kapsaisinoid berbeda.



Gambar 5. Perubahan nilai pH selama proses *anaerobic digestion* limbah sayur dengan kadar senyawa kapsaisinoid berbeda

Pengaruh Kadar Senyawa Kapsaisinoid Terhadap pH dan VFAs

Kondisi pH selama 6 hari pengamatan proses *anaerobic digestion* untuk berbagai kadar senyawa kapsaisinoid ditunjukkan oleh Gambar 5. Semakin tinggi kadar senyawa kapsaisinoid semakin rendah pH sistem yang dicapai pada jam ke-144. Pada kadar 0 mg Cp/L senyawa kapsaisinoid, pH mengalami penurunan dari 7,3 ke 6,8 pada jam ke-20 proses *anaerobic digestion*. Namun, secara perlahan pH kembali mengalami kenaikan sampai pada nilai 7,3 pada jam ke-144. Untuk kadar 0,005 mg Cp/L senyawa kapsaisinoid, penurunan pH juga terjadi dari 7,0 ke 6,3. Pada jam ke-20, pH sempat mengalami kenaikan hingga mencapai 6,7 namun pemulihan pH gagal dan pH turun hingga 5,8 pada

jam ke-144. pH sistem untuk kadar 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L dan 0,025 mg Cp/L pada jam ke-144 berturut turut menunjukkan angka 5,5; 5,4; 4,9; dan 5,0. Pemulihan pH tidak terjadi pada semua campuran dengan kadar senyawa kapsaisinoid. Fenomena ini menunjukkan bahwa penambahan senyawa kapsaisinoid menyebabkan pH sistem menjadi lebih rendah.

Telah diketahui bersama bahwa kondisi pH memberikan pengaruh terhadap kinerja mikroorganisme dalam memproduksi biogas dan metana (Zhang et al., 2022). Mikroorganisme menyukai pH pada range 6,5-7,2 untuk produksi gas metana. (Zhang, et al., 2014). Kondisi pH sistem *anaerobic digestion* yang berada di luar range ideal bakteri methanogen menyebabkan bakteri

methanogen tidak berkembang sehingga proses *methanogenesis* tidak berjalan dengan baik. Hal ini didukung oleh Gambar 6, yang menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya kadar senyawa kapsaisinoid menyebabkan asam asetat, asam butirat dan asam propionat jumlahnya semakin tinggi sebagai akibat dari tidak berlangsungnya proses *methanogenesis*.

Akumulasi dari asam asetat, asam butirat dan asam propionat atau yang biasa disebut akumulasi *Volatile Fatty Acids* (VFAs) mengalami kenaikan dari 16,4 mmol menuju 133,7 mmol ketika kadar senyawa kapsaisinoid bertambah dari 0 mg Cp/L menuju 0,025 mg Cp/L. Hal ini menunjukkan bahwa proses asidifikasi dan asetogenesis terjadi dengan baik oleh bakteri asidogenik dan asetogenik. Namun, proses metanogenesis tidak berjalan dengan baik. Hal ini dibuktikan dengan semakin sedikitnya jumlah gas metana yang dihasilkan seiring dengan penambahan kadar senyawa kapsaisinoid.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa substrat dengan kadar 0 mg Cp/L; 0,005 mg Cp/L; 0,01 mg Cp/L; 0,015 mg Cp/L; 0,02 mg Cp/L; dan 0,025 mg Cp/L secara berturut-turut menghasilkan biogas kumulatif sebesar 1000 ml; 880 ml; 720 ml; 640 ml; 570 ml; dan 430 ml dengan kandungan metana secara berturut-turut sebesar 759,5 ml; 599,5 ml; 470 ml; 371 ml; 302 ml; dan 220 ml. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar senyawa *kapsaisinoid* dalam substrat limbah sayur, maka semakin sedikit biogas dan metana yang dihasilkan selama proses *anaerobic digestion*. Hal ini disebabkan oleh sifat antimikroba kapsaisinoid, yang pada konsentrasi tinggi dapat menghambat aktivitas mikroorganisme, terutama bakteri metanogenik, sehingga mengurangi efisiensi produksi biogas dan metana. Oleh karena itu, pengelolaan kadar *kapsaisinoid* dalam substrat sangat penting untuk mengoptimalkan proses *anaerobic digestion* dan produksi energi. Salah satu metode pengelolaan yang dapat dilakukan adalah metode *leaching*. Metode *leaching* ini diharapkan akan mampu mengurangi kandungan senyawa kapsaisinoid dalam limbah sayur sehingga biogas yang dihasilkan dari limbah sayur dapat lebih banyak

DAFTAR PUSTAKA

Assnakew Abebe, M. (2017). Characterisation Peel of Fruit and Leaf of Vegetable Waste with Cow Dung for Maximizing the Biogas Yield. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 6(2), 13. <https://doi.org/10.11648/j.ijepe.20170602.12>

Borowski, S., Cieciora-Włoch, W., & Liczbiński, P. (2023). Enhancement of Biogas Production from Vegetable Waste by Application of

Mineral Fertilizers. *Bioenergy Research*, 972–982. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10700-9>

Bres, P., Beily, M. E., Young, B. J., Gasulla, J., Butti, M., Crespo, D., Komilis, D. (2018). Performance of semi-continuous anaerobic co-digestion of poultry manure with fruit and vegetable waste and analysis of digestate quality: A bench scale study. *Waste Management*, 82, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.041>

Cahyari, K., & Sahroni, A. (2015). Jurnal Bahan Alam Terbarukan. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 4(1), 14–20. <https://doi.org/10.15294/jbat.v4i1.3769>

Dong, L., Cao, G., Tian, Y., Wu, J., Zhou, C., Liu, B., Ren, N. (2020). Improvement of biogas production in plug flow reactor using biogas slurry pretreated cornstalk. *Bioresource Technology Reports*, 9(December 2019), 100378. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100378>

Du, M., Liu, X., Wang, D., Yang, Q., Duan, A., Chen, H., Ni, B. J. (2021). Understanding the fate and impact of capsaicin in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge. *Water Research*, 188, 116539. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116539>

Dzigbor, A., Neglo, D., Tettey, C. O., Nsful, F., Adzaho, F., & Botchway, E. M. (2024). Total phenolic content, antioxidant, and antimicrobial activities of ripe and unripe Ghanaian habanero pepper (*Capsicum chinense*). *Food Chemistry Advances*, 5(October), 100845. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100845>

Everitt, H., van der Werf, P., Seabrook, J. A., Wray, A., & Gilliland, J. A. (2022). The quantity and composition of household food waste during the COVID-19 pandemic: A direct measurement study in Canada. *Socio-Economic Planning Sciences*, 82(PA), 101110. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101110>

Fahriani, L., Izzah, A., Syafi, M., & Sabina, A. N. (2023). Pengolahan Cabai Merah Besar Menjadi Produk Selai (Processing Large Red Peppers in to Jam Product). *Jurnal Pengabdian Multidisiplin*, 5(April), 5–11.

Gebresilasie, G. G., Gebreslassie, M. G., & Gebresemati, M. (2025). Comparative potential of biogas production from the distillery, fruit and vegetable waste and their mixtures (digestion). *Heliyon*, 11(2), e42068. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42068>

Leite, V. D., Ramos, R. O., Silva, P. M. U., Lopes, W. S., & Sousa, J. T. (2023). Kinetic models describing the hydrolytic stage of the anaerobic co-digestion of solid vegetable waste and anaerobic sewage sludge. *Biomass Conversion*

- and Biorefinery, 13(1), 343–353. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01574-y>
- Li, Y., Sun, Y., Li, L., & Yuan, Z. (2018). Acclimation of acid-tolerant methanogenic propionate-utilizing culture and microbial community dissecting. *Bioresource Technology*, 250(2), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.034>
- Lian, S., Qu, Y., Li, S., Zhang, Z., Zhang, H., Dai, C., & Deng, Y. (2020). Interaction of graphene-family nanomaterials with microbial communities in sequential batch reactors revealed by high-throughput sequencing. *Environmental Research*, 184(February), 109392. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109392>
- Lin, R., Cheng, J., Ding, L., & Murphy, J. D. (2018). Improved efficiency of anaerobic digestion through direct interspecies electron transfer at mesophilic and thermophilic temperature ranges. *Chemical Engineering Journal*, 350(May 2018), 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.173>
- Liu, C., Sun, D., Zhao, Z., Dang, Y., & Holmes, D. E. (2019). Methanotrix enhances biogas upgrading in microbial electrolysis cell via direct electron transfer. *Bioresource Technology*, 291(May), 121877. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121877>
- Magama, P., Chianzu, I., & Mulopo, J. (2022). A systematic review of sustainable fruit and vegetable waste recycling alternatives and possibilities for anaerobic biorefinery. *Bioresource Technology Reports*, 18(February), 101031. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101031>
- Mohmed Moffit, M. A., Suja', F., Kabir Ahmad, I., & Bhaskaran, A. N. (2025). Biogas production and reactor performance of a pilot scale anaerobic biofilm digester treating food waste. *Renewable Energy*, 243(October 2024), 122414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122414>
- Nunes Ferraz Junior, A. D., Etchebehere, C., Perecin, D., Teixeira, S., & Woods, J. (2022). Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: Current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157(May 2021), 112045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112045>
- Pavi, S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., & Miranda, L. A. S. (2017). Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresource Technology*, 228, 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.003>
- Ramadhan, M., Sukma Prasettia, Juliana Ulfa, Riski Yulianto Saputra, & Fuji Hernawati Kusumah. (2023). Analysis of Biogas Yield From Organic Waste (Vegetables, Cassava Peels And Banana Leaves). *Jurnal Energi Dan Ketenagalistrikan*, 1(2), 186–191. <https://doi.org/10.33322/juke.v1i2.42>
- Ruiz-Sánchez, J., Guivernau, M., Fernández, B., Vila, J., Viñas, M., Riau, V., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). Functional biodiversity and plasticity of methanogenic biomass from a full-scale mesophilic anaerobic digester treating nitrogen-rich agricultural wastes. *Science of the Total Environment*, 649, 760–769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.165>
- Septiariva, I. Y., Suryawan, I. W. K., Suhardono, S., & Mutiara Sari, M. (2023). Evaluasi Kotoran Kelinci sebagai Bioaktivator untuk Produksi Biogas dari Sampah Sayuran. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3), 810. <https://doi.org/10.26418/jtlb.v11i3.69590>
- Shi, J., Xu, C., Han, Y., & Han, H. (2020). Enhanced anaerobic degradation of nitrogen heterocyclic compounds with methanol, sodium citrate, chlorella, spirulina, and carboxymethylcellulose as co-metabolic substances. *Journal of Hazardous Materials*, 384(October 2019), 121496. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121496>
- Soeprijanto, S., Fatullah, A. R., Agustina, S., Amalia, D. F., & Kaisar, A. A. (2020). Biogas Production from Vegetables and Fruit Wastes Using Anaerobic Floating Bioreactor. *Eksergi*, 17(2), 99. <https://doi.org/10.31315/e.v17i2.3733>
- Stephen Bernard, S., Srinivasan, T., Suresh, G., Ivon Paul, A., Mohideen Fowzan, K., & Ashwin Kishore, V. (2020). Production of biogas from anaerobic digestion of vegetable waste and cow dung. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1104–1106. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.129>
- Taolin, C. (2019). Efek Antimikroba Capsaicin. *Jurnal Ilmiah Kesehatan Sandi Husada*, 10(2), 212–216. <https://doi.org/10.35816/jiskh.v10i2.152>
- Taufik Dani, Purwanto, & Sudarno Utomo. (2024). Studi Literatur: Perbandingan Efektifitas Biogas dari Kotoran Sapi dan Sampah Sisa Sayur atau Buah. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 3(1), 19–31. <https://doi.org/10.55123/insologi.v3i1.3019>
- Vats, N., Khan, A. A., & Ahmad, K. (2019). Effect of substrate ratio on biogas yield for anaerobic co-digestion of fruit vegetable waste & sugarcane bagasse. *Environmental Technology and Innovation*, 13, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.003>

- Wikandari, R., Nguyen, H., Millati, R., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2015). Improvement of biogas production from orange peel waste by leaching of limonene. *BioMed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/494182>
- Yan, P., Zhao, Y., Zhang, H., Chen, S., Zhu, W., Yuan, X., & Cui, Z. (2020). A comparison and evaluation of the effects of biochar on the anaerobic digestion of excess and anaerobic sludge. *Science of the Total Environment*, 736, 139159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139159>
- Yuan, T., Ko, J. H., Zhou, L., Gao, X., Liu, Y., Shi, X., & Xu, Q. (2020). Iron oxide alleviates acids stress by facilitating syntrophic metabolism between *Syntrophomonas* and methanogens. *Chemosphere*, 247, 125866. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125866>
- Zahara T, A. D., Wisnujati, N. S., & Siswati, E. (2021). ANALISIS PRODUKSI DAN PRODUKTIVITAS CABAI RAWIT (*Capsicum frutescens* L) di INDONESIA. *Jurnal Ilmiah Sosio Agribis*, 21(1), 18–29. <https://doi.org/10.30742/jisa21120211345>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- Zhang, C., Sun, Y., Cao, T., Wang, W., Huo, S., & Liu, Z. H. (2022). Influence of organic load on biogas production and response of microbial community in anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77), 32849–32860. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.187>
- Zhang, C., Yang, L., Huo, S., Su, Y., & Zhang, Y. (2021). Optimization of the Cell Immobilization-Based Chain-Elongation Process for Efficient n-Caproate Production. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(11), 4014–4023. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07281>