

# Optimalisasi Produksi Biogas Melalui Penambahan *Trace Metals* (Mo dan Zn) pada *Digester* dengan Pemanfaatan Kotoran Sapi, Eceng Gondok dan Sampah Organik

Naufal Arhab, Mohamad Mirwan\*, M. Abdus Salam Jawwad\*, Maroeto

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: mmirwan.tl@upnjatim.ac.id, muhammad.abdus.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 14 Agustus 2025

Disetujui: 21 Agustus 2025

## Abstract

Biogas production is now a practical solution to deal with organic waste while providing an environmentally friendly alternative energy source. This study was conducted to optimize biogas production by adding trace metals, namely molybdenum (Mo) and zinc (Zn), to a mixture of water hyacinth, fruit waste, and cow dung. The anaerobic fermentation process took place in a batch reactor for 35 days with four treatments: control without metals, addition of Mo 5 mg/kg, Zn 5 mg/kg, and a combination of Mo+Zn at 2.5 mg/kg each. Various parameters were measured, such as biogas volume and pressure, methane content (CH<sub>4</sub>), carbon to nitrogen ratio (C/N), pH, temperature, and flame duration. The results showed that the addition of trace metals, especially the combination of Mo and Zn, significantly increased the amount and quality of biogas produced. The highest biogas volume was obtained in the treatment with Zn, while the best methane content appeared in the Mo+Zn combination. In addition, these trace metals help maintain pH stability and accelerate the active phase of fermentation. An ideal C/N ratio also supports the efficiency of methane production. In other words, the addition of these micro-nutrients strengthens the work of methanogenic bacteria and accelerates the conversion of organic matter into renewable energy.

**Keywords:** *biogas, trace metals, molybdenum, zinc, water hyacinth, cow manure, c/n ratio*

## Abstrak

Produksi biogas kini menjadi solusi praktis untuk mengatasi limbah organik sekaligus menyediakan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan produksi biogas dengan menambahkan logam jejak, yaitu molibdenum (Mo) dan seng (Zn), ke dalam campuran eceng gondok, sampah buah, dan kotoran sapi. Proses fermentasi anaerob berlangsung dalam reaktor batch selama 35 hari dengan empat perlakuan: kontrol tanpa logam, penambahan Mo 5 mg/kg, Zn 5 mg/kg, dan kombinasi Mo+Zn masing-masing 2,5 mg/kg. Berbagai parameter diukur, seperti volume dan tekanan biogas, kadar metana (CH<sub>4</sub>), rasio karbon terhadap nitrogen (C/N), pH, suhu, serta lama nyala api. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan logam jejak, terutama kombinasi Mo dan Zn, secara signifikan meningkatkan jumlah dan kualitas biogas yang dihasilkan. Volume biogas tertinggi didapat pada perlakuan dengan Zn, sedangkan kadar metana terbaik muncul pada kombinasi Mo+Zn. Selain itu, logam jejak ini membantu menjaga kestabilan pH dan mempercepat fase aktif fermentasi. Rasio C/N yang ideal juga mendukung efisiensi produksi metana. Dengan kata lain, penambahan nutrisi mikro ini memperkuat kerja bakteri metanogen dan mempercepat konversi bahan organik menjadi energi terbarukan.

**Kata Kunci:** *biogas, trace metals, molybdenum, seng, eceng gondok, kotoran sapi, rasio c/n*

## 1. Pendahuluan

Menurut data Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya per-tanggal 6 Juli 2023, jumlah sampah yang ditimbun di TPA Benowo sekitar 1.600 ton per hari. Dari jumlah tersebut, sampah organik terindikasi sekitar 60% atau sekitar 1.020 ton per hari. Sampah organik adalah jenis sampah yang masih dapat diolah menjadi produk yang berguna dan ramah lingkungan. Namun, sampah organik juga cepat membusuk, yang dapat menyebabkan bau tidak sedap dan berpotensi menimbulkan penyakit. Contoh sampah organik meliputi sisa-sisa dapur seperti buah-buahan, sayuran, ikan, nasi, dan limbah dari kegiatan pertanian[1]. Di sisi lain, limbah organik merupakan sumber daya potensial yang dapat dikonversi menjadi energi terbarukan melalui teknologi biogas. Biogas, yang mayoritas terdiri dari metana, adalah sumber energi bersih yang dapat menggantikan bahan bakar fosil untuk keperluan memasak, penerangan, dan pembangkit listrik skala kecil [2].

Krisis energi dan isu lingkungan akibat penumpukan sampah merupakan dua tantangan besar yang dihadapi dunia saat ini. Ketergantungan pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan mendorong pencarian sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang menjanjikan adalah produksi biogas melalui proses fermentasi anaerobik. Teknologi ini tidak hanya menghasilkan energi terbarukan, tetapi juga menawarkan solusi untuk pengelolaan limbah organik [3].

Indonesia, dengan potensi agrikultur dan limbah domestik yang melimpah, memiliki sumber daya yang sangat besar untuk pengembangan biogas. Kotoran sapi, misalnya, telah lama dikenal sebagai bahan baku utama karena kandungan mikroorganisme metanogeniknya. Di sisi lain, gulma perairan seperti eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) yang seringkali dianggap sebagai hama, sesungguhnya memiliki potensi besar sebagai substrat biogas karena kandungan lignoselulosanya [4]. Pemanfaatan eceng gondok untuk biogas merupakan salah satu strategi untuk mengubah masalah lingkungan menjadi sumber daya yang bernilai [5]. Meskipun potensinya besar, efisiensi konversi bahan organik menjadi biogas seringkali belum optimal. Salah satu faktor pembatasnya adalah kurangnya mikronutrien esensial yang berfungsi sebagai kofaktor bagi enzim-enzim dalam jalur metanogenesis [6]. *Trace metals* (logam kelumit) seperti *Molybdenum* (Mo) dan Seng (Zn) adalah beberapa di antara mikronutrien penting tersebut. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penambahan *trace metals* tertentu dapat meningkatkan laju produksi biogas dari sampah organik [7].

Penelitian yang secara spesifik mengkaji efek sinergis dari kombinasi Mo dan Zn pada substrat majemuk yang terdiri dari kotoran sapi, eceng gondok, dan sampah buah masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan menginvestigasi pengaruh penambahan Mo dan Zn, baik secara terpisah maupun kombinasi, untuk mengoptimalkan produksi dan kualitas biogas. Dengan cara menganalisis dan membandingkan kadar gas metana (CH<sub>4</sub>) dari reaktor biogas dengan perlakuan penambahan Mo, Zn, dan kombinasi keduanya dibandingkan dengan kontrol dan mengkaji hubungan antara rasio C/N substrat dengan kualitas biogas yang dihasilkan. Melalui tujuan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah untuk strategi optimasi produksi biogas yang lebih efektif dan aplikatif.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya. Proses fermentasi dan pengamatan berlangsung selama 35 hari.

### 2.2 Alat dan Bahan

Alat-alat penelitian yang digunakan meliputi peralatan utama seperti digester berkapasitas 25 L untuk proses fermentasi anaerobik, pengaduk untuk mencampur substrat, serta Tedlar bag untuk menampung gas biogas yang dihasilkan. Peralatan pendukung seperti selang plastik, valve angin, lem, selotip, pressure gauge, dan termometer digunakan untuk memastikan proses berjalan tertutup, terukur, dan aman. Kompor portable digunakan untuk uji nyala gas sebagai indikasi kandungan metana.

**Tabel 1.** Peralatan Utama Penelitian

No.	Alat Penelitian	Jumlah	Satuan
1	Digester	1	unit
2	Pengaduk	1	pcs
3	Wadah sampling (Tedlar bag)	1	pcs
4	Selang plastik	1	m
5	Valve angin	1	pcs
6	Lem	1	tube
7	Timbangan	1	unit
8	Selotip	1	roll
9	Pressure gauge	1	pcs
10	Termometer	1	pcs
11	Kompor portable	1	unit

**Tabel 2.** Bahan Baku Penelitian

No.	Bahan Penelitian	Jumlah	Satuan
1	Sampah organik pasar (buah-buahan)	2	kg
2	Eceng gondok	2	kg
3	Kotoran sapi	3	kg
4	Trace metals Mo (Natrium Molibdat)	5	mg
5	Trace metals Zn (Seng Sulfat)	5	mg
6	Air	Secukupnya	-
7	Akuades	Secukupnya	-

Bahan penelitian terdiri dari tiga jenis limbah organik yaitu sampah organik pasar (buah-buahan), eceng gondok, dan kotoran sapi sebagai sumber substrat dan mikroorganisme. Penambahan trace metals berupa molibdenum (Mo) dari Natrium Molibdat dan zinc (Zn) dari Seng Sulfat berfungsi meningkatkan aktivitas mikroba metanogen. Air dan akuades digunakan sebagai pelarut substrat dan untuk kebutuhan analisis laboratorium.

### 2.3 Prosedur Penelitian

Eceng gondok dan sampah organik buah dicuci untuk menghilangkan kontaminan, kemudian dicacah secara mekanis menggunakan blender hingga mencapai ukuran partikel yang lebih kecil dan homogen ( $\pm 1-2$  cm). Tujuannya adalah untuk memperluas area permukaan kontak bagi mikroorganisme. Kotoran sapi segar (yang berfungsi sebagai inokulum kaya mikroba) dicampur dengan akuades dengan perbandingan tertentu untuk membentuk *slurry* dengan konsistensi yang sesuai untuk fermentasi. *Slurry* kotoran sapi, cacahan eceng gondok, dan sampah buah dicampur menjadi satu dalam wadah besar untuk menciptakan substrat campuran yang homogen. Sampel dari campuran ini diambil untuk dianalisis rasio C/N awalnya.

Substrat campuran yang telah dihomogenisasi kemudian didistribusikan ke dalam masing-masing dari empat reaktor batch dengan volume yang sama, mengisi sekitar 80% dari total volume reaktor. Sisa ruang sebesar 20% sengaja disediakan sebagai headspace untuk memungkinkan akumulasi biogas selama proses fermentasi. Selanjutnya, setiap reaktor diberi perlakuan spesifik. Reaktor pertama (R1) difungsikan sebagai kontrol tanpa adanya penambahan trace metal. Reaktor kedua (R2) diberi perlakuan penambahan larutan *Molybdenum* (Mo) hingga mencapai konsentrasi akhir 5 mg/kg substrat, sedangkan reaktor ketiga (R3) menerima penambahan larutan Seng (Zn) dengan konsentrasi akhir 5 mg/kg. Untuk reaktor keempat (R4), perlakuan yang diberikan adalah kombinasi larutan Mo dan Zn dengan konsentrasi masing-masing sebesar 2,5 mg/kg. Segera setelah penambahan perlakuan, setiap reaktor ditutup dengan rapat untuk memastikan kondisi anaerobik yang ketat dan memulai proses fermentasi.

Desain eksperimental penelitian ini diringkas dalam **Tabel 3**. Proses fermentasi dilakukan dalam empat reaktor *batch* anaerobik bervolume 10 liter. Setiap reaktor diisi dengan *slurry* substrat yang identik, namun diberi perlakuan penambahan *trace metal* yang berbeda sesuai dengan matriks penelitian.

**Tabel 3.** Matriks Penelitian

Jenis Substrat	Jenis Trace Metal	HRT (hari)
Eceng gondok + sampah organik + kotoran sapi	-	15
		25
		35
Eceng gondok + sampah organik + kotoran sapi	Zn 5 mg/kg	15
		25
		35
Eceng gondok + sampah organik + kotoran sapi	Mo 5 mg/kg	15
		25
		35
Eceng gondok + sampah organik + kotoran sapi	Mo 2,5 mg/kg & Zn 2,5 mg/kg	15
		25
		35

Setelah penambahan *trace metals*, semua reaktor ditutup rapat untuk memastikan kondisi anaerobik yang ketat dan diinkubasi pada suhu ruang selama 35 hari. Untuk menjaga homogenitas dan memaksimalkan kontak antara mikroba dan substrat, reaktor digoyangkan secara manual setiap hari. Selama periode inkubasi, pemantauan harian dilakukan untuk mengukur volume produksi biogas menggunakan metode perpindahan air (*water displacement method*), serta mengukur pH dan suhu *slurry* untuk memonitor stabilitas proses. Untuk menganalisis kualitas biogas, sampel gas diambil dari setiap reaktor pada hari ke-15, ke-25, dan ke-35. Komposisi gas, khususnya konsentrasi metana (CH<sub>4</sub>), kemudian dianalisis menggunakan Kromatografi Gas (*Gas Chromatography* - GC).

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Pengaruh Penambahan *Trace Metals* terhadap Kualitas Biogas (Kadar CH<sub>4</sub>)

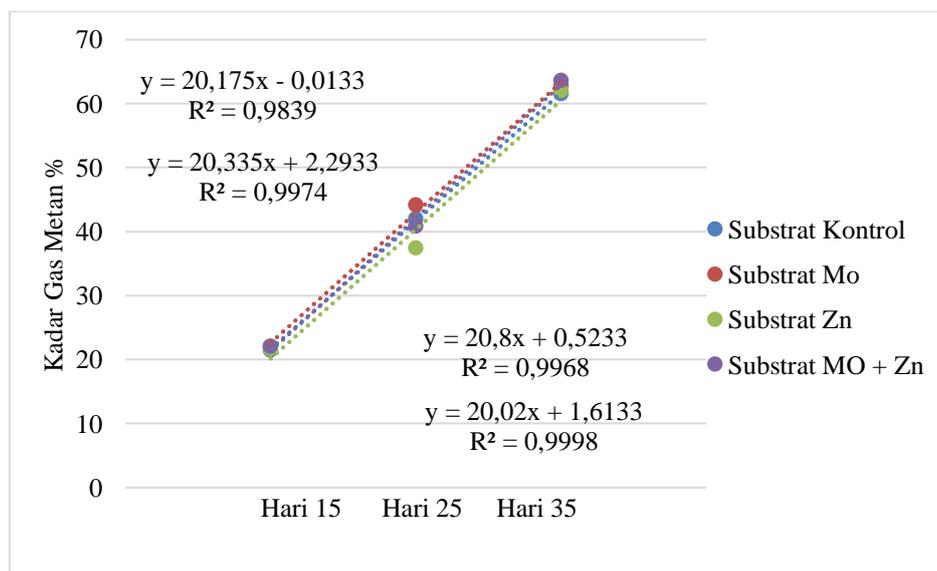
Kualitas biogas yang dihasilkan dari keempat reaktor dievaluasi berdasarkan konsentrasi gas metana (CH<sub>4</sub>), yang dianalisis pada hari ke-15, ke-25, dan ke-35. Hasil analisis kuantitatif disajikan dalam **Tabel 4**. Kadar Gas CH<sub>4</sub> Pada Produksi Biogas Dengan Penambahan *Trace Metals*

**Tabel 4.** Kadar Gas CH<sub>4</sub> Pada Produksi Biogas Dengan Penambahan *Trace Metals*

Variasi Bahan	Kadar Gas Metan (%)		
	Hari Ke - 15	Hari Ke - 25	Hari Ke - 35
Substrat Kontrol	21,46	42	61,5
Substrat Mo	22,03	44,16	62,7
Substrat Zn	21,65	37,36	62
Substrat MO + Zn	22	40,77	63,6

Analisis data pada **Tabel 4** menunjukkan bahwa pengaruh *trace metals* terhadap proses metanogenesis bersifat kompleks dan bergantung pada tahapan waktu fermentasi. Meskipun efeknya tidak terlihat pada fase awal, suplementasi mikronutrien secara jelas memengaruhi dinamika dan hasil akhir kualitas biogas. Tercapainya kadar metana tertinggi (63,6%) pada reaktor R4 di hari ke-35 membuktikan adanya efek sinergis jangka panjang yang kuat antara Mo dan Zn.

Logam molibdenum (Mo) diketahui menjadi komponen penting dalam enzim *formylmethanofuran dehydrogenase*, yang terlibat dalam tahap awal konversi karbon menjadi metana. Sementara seng (Zn) berperan dalam stabilisasi protein dan enzim serta berfungsi sebagai kofaktor dalam aktivitas sel metanogen[8]. Penambahan Mo menghasilkan kadar metana sebesar 62,7% pada hari ke-35, sedangkan Zn sebesar 62%. Meskipun hasil akhir relatif mendekati, kombinasi Mo + Zn memberikan hasil tertinggi sebesar 63,6%, menunjukkan adanya efek sinergis yang memperkuat efektivitas enzim dan metabolisme mikroba dalam menghasilkan metana.



**Gambar 1.** Kadar Gas CH<sub>4</sub> Pada Produksi Biogas Dengan Penambahan *Trace Metals*

Berdasarkan **Gambar 1** yang menggambarkan kadar gas metana ( $\text{CH}_4$ ) selama proses produksi biogas dengan variasi penambahan trace metals seperti molibdenum (Mo), zinc (Zn), dan kombinasi Mo+Zn dibandingkan dengan substrat kontrol, terlihat bahwa kadar metana secara umum meningkat seiring waktu dari hari ke-15 hingga hari ke-35. Kenaikan ini menunjukkan bahwa aktivitas mikroorganisme metanogenik terus berlangsung dan semakin optimal selama proses fermentasi berlangsung. Namun, peningkatan kadar metana yang paling signifikan dan stabil justru ditunjukkan oleh perlakuan kombinasi Mo+Zn, yang mencapai kadar metana tertinggi sebesar 63,6% pada hari ke-35. Hal ini mengindikasikan adanya efek sinergis antara kedua trace metals tersebut dalam mengoptimalkan proses metanogenesis, yang mendukung efisiensi konversi substrat menjadi metana secara lebih baik dibandingkan penggunaan trace metals tunggal.

Pada perlakuan dengan Zn saja, grafik menunjukkan adanya penurunan kadar metana pada hari ke-25, yaitu sebesar 37,36%. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh efek toksisitas Zn pada konsentrasi tinggi yang dapat mengganggu keseimbangan nutrisi dan aktivitas mikrobiota anaerob. Konsentrasi logam jejak yang berlebihan memang dapat menyebabkan hambatan metabolisme mikroorganisme metanogen, sehingga produksi metana menurun. Studi terbaru menegaskan bahwa meskipun Zn merupakan kofaktor penting bagi enzim metanogenik, dosis yang tidak tepat dapat menimbulkan efek negatif, seperti penurunan aktivitas enzim hidrogenase dan dehidrogenase yang esensial dalam jalur fermentasi metana [9].

Sebaliknya, kombinasi Mo+Zn memberikan hasil yang lebih stabil dan meningkat secara konsisten dari hari ke-15 hingga ke-35. Kombinasi ini diyakini memberikan efek sinergis yang mengoptimalkan aktivitas enzimatik, terutama enzim yang memerlukan kedua logam tersebut sebagai kofaktor. Penggunaan kombinasi *trace metals* dalam takaran seimbang mampu meningkatkan efisiensi produksi metana secara signifikan dibandingkan penggunaan logam tunggal. Kombinasi *trace metals* ini memperbaiki keseimbangan nutrisi mikroorganisme metanogen dan meningkatkan stabilitas komunitas mikroba anaerob, sehingga proses metanogenesis berlangsung lebih optimal dan tahan terhadap fluktuasi lingkungan fermentasi [10].

Berdasarkan grafik regresi linier kadar gas metana terhadap waktu fermentasi, diperoleh persamaan  $y = 20,8x + 0,5233$  dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,9968$ . Nilai  $R^2$  yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa variabel waktu fermentasi mampu menjelaskan 99,68% variasi yang terjadi pada kadar metana, sehingga hubungan antara keduanya dapat dikatakan sangat kuat dan signifikan. Koefisien regresi positif sebesar 20,8 mengindikasikan bahwa setiap kenaikan satu interval pengamatan hari (dari hari ke-15 ke hari berikutnya sesuai skala grafik) berpotensi meningkatkan kadar metana sekitar 20,8%. Tren ini menegaskan bahwa proses fermentasi anaerob memerlukan waktu untuk mencapai puncak produksi metana, terutama setelah fase adaptasi mikroba terlewati.

Peningkatan tersebut sangat terkait dengan aktivitas mikroorganisme metanogen selama tahap metanogenesis, di mana senyawa-senyawa perantara hasil dari asidogenesis dan asetogenesis, seperti asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida, diubah menjadi metana. Pada hari ke-15, kadar metana masih tergolong rendah karena mayoritas mikroba berada dalam tahap awal pertumbuhan. Namun, pada rentang hari ke-25 hingga ke-35, terjadi peningkatan signifikan kadar metana yang menunjukkan bahwa populasi metanogen telah memasuki fase pertumbuhan eksponensial dan berfungsi pada kapasitas maksimal. Penambahan logam jejak, terutama kombinasi Mo dan Zn, terbukti memperkuat pola ini dengan menghasilkan kadar metana tertinggi, yang mengindikasikan peran kofaktor enzim dalam mengoptimalkan jalur metabolisme pembentukan metana.

Dengan demikian, hasil regresi linier ini tidak hanya mengonfirmasi adanya hubungan positif yang kuat antara waktu fermentasi dan kadar metana, tetapi juga memperlihatkan bahwa optimalisasi durasi fermentasi serta komposisi trace metals dapat menjadi strategi penting dalam memaksimalkan kualitas biogas.

Secara keseluruhan, penambahan trace metals, khususnya kombinasi Mo dan Zn, terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas biogas melalui peningkatan kadar metana yang lebih tinggi dan stabil selama proses fermentasi. Efek sinergis kedua logam tersebut mendukung aktivitas enzimatik dan pertumbuhan mikroorganisme metanogen, sehingga proses produksi biogas menjadi lebih efisien. Namun, pengaturan dosis yang tepat dan pemantauan kondisi fermentasi tetap diperlukan untuk menghindari efek toksisitas dan menjaga keseimbangan mikrobiota anaerob agar produksi metana dapat berlangsung optimal hingga akhir proses fermentasi.

Berdasarkan hasil penelitian, terjadi peningkatan signifikan pada persentase gas metana dari hari ke-15 hingga hari ke-35 di semua variasi substrat, termasuk substrat kontrol serta substrat yang diberi tambahan molibdenum (Mo), seng (Zn), maupun kombinasi Mo+Zn. Fenomena ini sejalan dengan teori bahwa pembentukan biogas terutama berlangsung melalui reaksi eksoterm. Secara lebih rinci, pada tahap

metanogenesis, mikroorganisme metanogen mengubah senyawa perantara seperti asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida menjadi metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), sambil melepaskan energi panas ke lingkungan. Kondisi ini menandakan penurunan entalpi sistem ( $\Delta H$  negatif) yang menunjukkan keluarnya kalor dari proses fermentasi. Peningkatan konsentrasi metana yang berlangsung secara bertahap dan konsisten mencerminkan aktivitas mikroba yang efektif dan berkelanjutan dalam menjalankan reaksi eksoterm ini, di mana produksi metana yang semakin tinggi berbanding lurus dengan energi yang dilepaskan.

Sebaliknya, jika reaksi endoterm (yang menyerap energi,  $\Delta H$  positif) yang mendominasi, kadar metana akan stagnan atau menurun karena kebutuhan energi tambahan, namun hal tersebut tidak ditemukan dalam data penelitian. Selain itu, penambahan logam seperti Mo dan Zn diduga mampu meningkatkan efisiensi mikroorganisme melalui peningkatan aktivitas enzimatik atau ketersediaan nutrisi, sehingga mempercepat reaksi eksoterm dan produksi metana hingga mencapai nilai tertinggi, contohnya substrat dengan Mo yang menunjukkan kadar metana sebesar 62,7%. Dengan demikian, data ini memperkuat pemahaman bahwa pembentukan biogas adalah proses yang didominasi oleh reaksi eksoterm, di mana energi dilepaskan selama fermentasi anaerob, dan modifikasi substrat dapat memengaruhi laju serta total produksi metana hingga akhir fermentasi.

### 3.2 Hubungan Efisiensi Substrat (Rasio C/N) dengan Kadar Metana

Efisiensi konversi substrat menjadi metana dapat dilihat dari perubahan rasio C/N. Penurunan rasio C/N terbesar terjadi pada reaktor R4 (Mo+Zn), yang berkorelasi langsung dengan kadar metana tertinggi yang dihasilkannya. Ini menunjukkan bahwa konsumsi karbon untuk diubah menjadi gas metana paling efisien terjadi pada perlakuan R4. Dengan kata lain, suplementasi Mo+Zn tidak hanya meningkatkan kualitas gas tetapi juga memaksimalkan pemanfaatan substrat untuk produksi energi.

**Tabel 5.** C/N dari Substrat Dengan Penambahan Trace Metals.

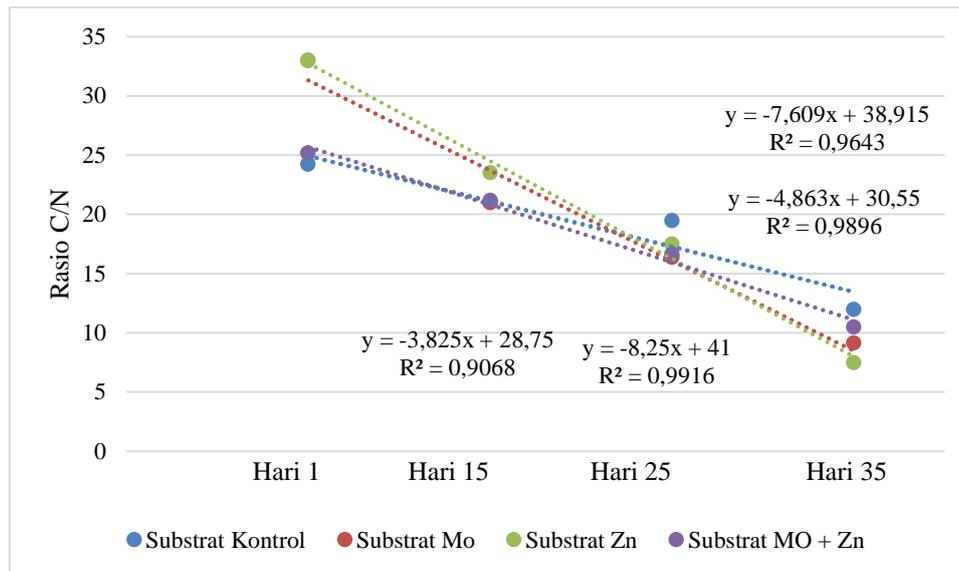
Variasi Bahan	Rasio C/N			
	Hari Ke- 1	Hari Ke - 15	Hari Ke - 25	Hari Ke - 35
<b>Substrat Kontrol</b>	24,25	21	19,5	12
<b>Substrat Mo</b>	33	21	16,4	9,17
<b>Substrat Zn</b>	33	23,5	17,5	7,5
<b>Substrat Mo + Zn</b>	25,2	21,2	16,67	10,5

Sementara itu, kandungan nitrogen cenderung stabil atau hanya sedikit berubah karena nitrogen tidak dikonversi menjadi gas, melainkan tetap dalam bentuk senyawa amonia atau ikatan nitrogen organik yang digunakan sebagian kecil untuk pertumbuhan mikroba. Dengan demikian, penurunan rasio C/N ini lebih disebabkan oleh pelepasan karbon daripada penambahan nitrogen. Pola ini mendukung teori bahwa rasio C/N yang ideal dan seimbang sangat penting dalam memaksimalkan produksi metana [11]. di mana penurunan rasio ini menunjukkan keberhasilan konversi karbon menjadi energi dalam bentuk gas.

*Trace metals* seperti Mo berperan sebagai kofaktor enzim dalam jalur konversi karbon ke metana, seperti formylmethanofuran dehydrogenase, sedangkan Zn terlibat dalam enzim dehidrogenase yang mempercepat reaksi oksidasi-reduksi pada proses fermentasi. Kehadiran logam-logam ini dapat mempercepat proses degradasi bahan organik, sehingga rasio C/N cepat menurun [12]. Secara umum, penurunan rasio C/N dari hari pertama hingga hari ke-35 mencerminkan aktivitas biologis yang intensif dalam menguraikan karbon, dan penambahan logam jejak terbukti mempercepat proses ini, terutama pada substrat yang diberi tambahan Zn. Namun demikian, untuk mendapatkan produksi biogas yang optimal, penurunan rasio C/N perlu dikendalikan agar tidak turun terlalu rendah karena hal tersebut dapat mengganggu kestabilan mikrobiologis.

Rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) merupakan indikator penting dalam pengolahan limbah secara biologis, terutama pada proses fermentasi anaerob yang bertujuan menghasilkan biogas. Rasio ini menggambarkan keseimbangan antara sumber energi berupa karbon dan nutrisi pembentuk protein sel berupa nitrogen yang diperlukan mikroorganisme untuk mencerna substrat organik. Berdasarkan teori, rasio C/N ideal untuk fermentasi anaerob berkisar antara 20 hingga 30. Rasio yang terlalu tinggi (C/N > 30) akan menyebabkan kekurangan nitrogen bagi mikroorganisme sehingga pertumbuhan melambat dan proses dekomposisi organik menjadi kurang efektif. Sebaliknya, rasio yang terlalu rendah (C/N < 20)

menyebabkan kelebihan nitrogen yang dapat menimbulkan akumulasi amonia bebas bersifat toksik bagi mikroorganisme metanogenik, menghambat produksi metana, serta menurunkan efisiensi fermentasi.



Gambar 2. Kadar Rasio C/N

Grafik **Gambar 2** menunjukkan penurunan rasio C/N yang signifikan dari hari ke-1 hingga hari ke-35 pada seluruh variasi substrat, termasuk kontrol dan substrat dengan tambahan molibdenum (Mo), seng (Zn), serta kombinasi Mo+Zn. Penurunan ini menandakan degradasi karbon oleh mikroorganisme selama fermentasi anaerobik. Substrat kontrol menurun dari 24,25 menjadi 12, sedangkan substrat dengan Mo dan Zn menurun lebih tajam menjadi 9,17 dan 7,5, yang mengindikasikan peningkatan aktivitas mikroba berkat peran enzim yang dikatalisis trace metals [13]. Kombinasi Mo+Zn memberikan penurunan rasio yang stabil dari 25,2 menjadi 10,5, menjaga kestabilan fermentasi tanpa akumulasi amonia berlebih.

Penurunan rasio C/N mencerminkan efektivitas fermentasi karena karbon digunakan sebagai energi dan nitrogen meningkat akibat dekomposisi, sehingga rasio ini menjadi indikator penting kinerja substrat [14]. Model regresi linier dengan  $R^2 = 0,9916$  menunjukkan hubungan kuat antara waktu fermentasi dan penurunan rasio C/N, dengan penurunan rata-rata 8,25 per satuan waktu, yang berbanding lurus dengan produksi metana ( $CH_4$ ) dan menandakan fermentasi optimal.

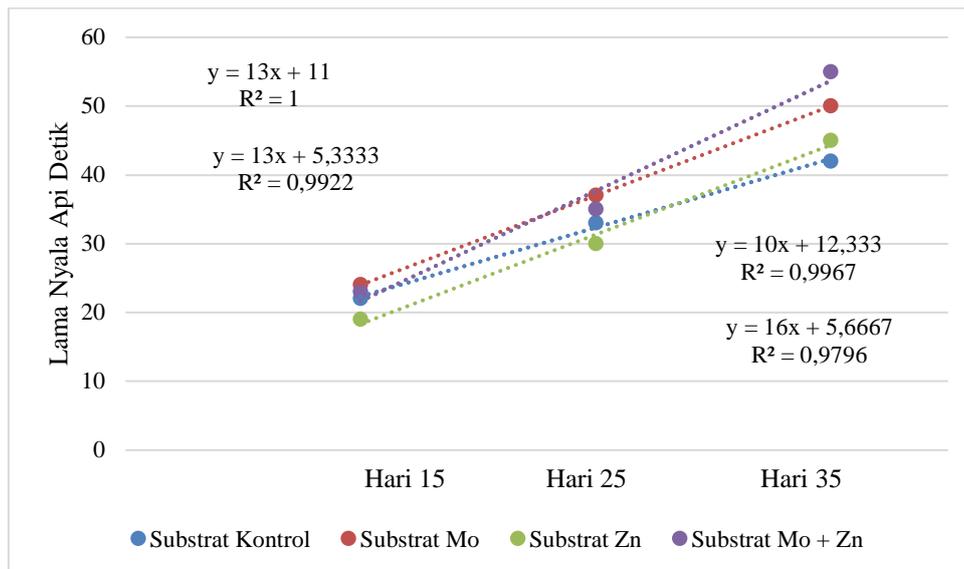
### 3.3 Uji Kualitas Biogas Melalui Uji Nyala Api

Uji nyala api dilakukan sebagai konfirmasi kualitatif terhadap data kadar  $CH_4$ . Hasil uji nyala api (**Tabel 4**) sepenuhnya mendukung data kadar metana. Reaktor R4 (Mo+Zn) menghasilkan nyala api paling lama (65 detik) dengan warna biru terang yang stabil, mengonfirmasi bahwa biogas yang dihasilkan memiliki kualitas dan nilai kalor tertinggi. Untuk memperjelas tren dan perbedaan antar perlakuan, visualisasi grafik lama nyala api biogas selama fermentasi ditampilkan pada **Gambar 3**.

Tabel 6. Komposisi Bahan Baku Terhadap Lama Nyala Api Biogas

No	Varian	Lama Nyala Api (detik)		
		Hari 15	Hari 25	Hari 35
1	Substrat Kontrol	22	33	42
2	Substrat Mo	24	37	50
3	Substrat Zn	19	30	45
4	Substrat Mo + Zn	23	35	55

Grafik **Gambar 3** menunjukkan bahwa lama nyala api biogas meningkat seiring waktu fermentasi (hari ke-15, 25, dan 35) dengan nilai tertinggi pada substrat kombinasi Mo+Zn (55 detik pada hari ke-35), diikuti Mo (50 detik), Zn (45 detik), dan kontrol (42 detik). Lama nyala api ini mencerminkan kualitas gas, di mana api biru terang dan stabil menunjukkan kadar metana tinggi, sementara nyala kuning menandakan kandungan metana rendah atau kontaminasi gas lain [7].



**Gambar 3.** Komposisi Bahan Baku Terhadap Lama Nyala Api Bioga

Dari sisi mikrobiologi, Mo dan Zn berperan sebagai kofaktor enzim penting dalam metanogenesis, dengan kombinasi keduanya menghasilkan sinergi terbaik dalam meningkatkan efisiensi mikroba metanogenik. Rasio C/N yang seimbang (sekitar 20–30), hasil campuran substrat eceng gondok, sampah organik, dan kotoran sapi, juga mendukung pertumbuhan mikroba dan produksi metana optimal [15].

Peningkatan lama nyala api signifikan pada hari ke-35 menunjukkan fase metanogenesis optimal setelah fase adaptasi dan pertumbuhan mikroba, sesuai teori kinetika fermentasi. Model regresi linier menunjukkan hubungan kuat ( $R^2 = 1$ ) antara waktu fermentasi dan lama nyala api, menandakan kualitas biogas meningkat secara linier seiring waktu dan penambahan trace metals. Penambahan trace metals khususnya kombinasi Mo+Zn, dan waktu fermentasi yang cukup efektif meningkatkan kualitas biogas, ditandai dengan nyala api biru yang stabil akibat kandungan metana tinggi. Strategi ini mendukung optimalisasi produksi energi terbarukan dari limbah organik.

#### 4. Kesimpulan

Penambahan logam berat (Mo dan Zn) berpengaruh positif terhadap produksi biogas. Penambahan Zn (5 mg/kg) menghasilkan volume dan tekanan biogas tertinggi, sedangkan kombinasi Mo dan Zn (masing-masing 2,5 mg/kg) secara signifikan meningkatkan kualitas biogas dengan menghasilkan kandungan metana ( $CH_4$ ) tertinggi sebesar 65,2%. Terdapat korelasi yang kuat antara efisiensi pemanfaatan substrat dan kualitas biogas. Perlakuan dengan suplementasi Mo+Zn menunjukkan penurunan rasio C/N yang paling signifikan, yang secara langsung berkorelasi dengan kandungan metana tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa suplementasi unsur hara mikro meningkatkan efisiensi konversi karbon menjadi metana.

Kondisi optimal untuk produksi biogas berkualitas tinggi dalam penelitian ini dicapai dengan menambahkan kombinasi logam jejak Mo dan Zn pada konsentrasi masing-masing 2,5 mg/kg. Kondisi ini menghasilkan biogas dengan kandungan metana tertinggi dan durasi nyala api terpanjang dan paling stabil, yang dicapai pada durasi fermentasi sekitar 15 hari dalam sistem reaktor batch. Penelitian ini menegaskan bahwa mengoptimalkan mikronutrien merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi teknologi biogas. Untuk penelitian di masa depan, disarankan untuk menyelidiki efek dari konsentrasi logam yang berbeda dan menerapkannya pada sistem digester berskala lebih besar atau model semi-kontinyu.

#### 5. Singkatan

<b>CH<sub>4</sub></b>	Metana
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon dioksida
<b>C/N</b>	Rasio karbon terhadap Nitrogen
<b>PVC</b>	Polyvinyl chloride
<b>DLH</b>	Dinas Lingkungan Hidup
<b>VFA</b>	<i>Volatile Fatty Acids</i> (Asam Lemak Volatil)

## 6. Referensi

- [1] C. B. Kamandang, Z. R., Solin, D. P., & Casita, "Pemanfaatan Teknologi Biologis untuk Pengelolaan Sampah Organik.," *Jurnal Abdimas Teknik Kimia*, vol. 2(1), 45–4, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.33005/jatekk.v5i2>
- [2] M. L. Hakim, E. Kurniawan, J. Raharjo, and U. Telkom, "Desain Prototipe Alat Produksi Biogas Berbahan Dasar Limbah Organik dengan Monitoring" *Jurnal Telatika*, vol. 3, no. 1, pp. 8–12, 2023.
- [3] D. Agustine, M. Amyranti, and I. Indriani, "Penerapan Teknologi Biogas Menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) dan Limbah Organik Sebagai Upaya Mengatasi Pencemaran Lingkungan," *Prosiding TAU SNARS-TEK Seminar Nasional Rekayasa dan Teknologi*, vol. 2, no. 1, pp. 58–64, 2023, doi: 10.47970/snarstek.v2i1.503.
- [4] N. A. Irianto and M. Mirwan, "Efektivitas Tanaman Hydrilla Verticillata, Rumput Gajah, Eceng Gondok Dalam Pembuatan Biogas Dengan Bahan Dasar Kotoran Sapi," *Enviroous*, vol. 2, no. 1, pp. 48–55, 2023, doi: 10.33005/enviroous.v2i1.64.
- [5] N. Wahab and I. Ramli, "Analisis Pengolahan Biogas Dari Campuran Limbah Sayur Kangkung Dan Eceng Gondok Dengan Starter Kotoran Sapi," *Jurnal Tecnosienza*, vol. 6, no. 2, pp. 234–245, 2022, doi: 10.51158/tecnoscienza.v6i2.625.
- [6] M. Mellyanawaty, F. M. Alfiata Chusna, and E. Nofiyanti, "Proses Peruraian Anaerobik Palm Oil Mill Effluent dengan Media Zeolit Termodifikasi," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 13, no. 1, p. 16, 2019, doi: 10.22146/jrekpros.39206.
- [7] G. Angelin, "Pengaruh Penambahan Trace Metal (Molybdenum & Selenium) terhadap Pembuatan Biogas dari Sampah Organik dan Kotoran Sapi The Effect Of Trace Metal (Molybdenum & Selenium) Addition On Biogas Production From Organic Waste and Cow Manure," *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 6, no. 4, pp. 15–21, 2017.
- [8] S. Myszograj, A. Stadnik, and E. Płuciennik-Koropczuk, "The Influence of Trace Elements on Anaerobic Digestion Process," *Civil and Environmental Engineering Reports*, vol. 28, no. 4, pp. 105–115, 2018, doi: 10.2478/ceer-2018-0054.
- [9] S. Mujdalipah *et al.*, "Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Produksi Biogas Menggunakan Digester Dua Tahap Pada Berbagai Konsentrasi Palm Oil-Mill Effluent dan Lumpur Aktif," *Jurnal AGRITECH*, vol. 34, no. 1, pp. 56–64, 2014.
- [10] O. Hijazi *et al.*, "Environmental impacts concerning the addition of trace metals in the process of biogas production from anaerobic digestion of slurry," *J Clean Prod*, vol. 243, p. 118593, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118593.
- [11] M. Gani, Afdol, Jelita, "Potensi Biogas dari Campuran Jerami Padi dan Kotoran Ayam pada Suhu Mesofilik dan Termofilik dengan Rasio C/N Ideal" vol. 8, no. 2, pp. 305–318, 2025.
- [12] Pujiati, *Teknik Pengamatan Mikroba*, vol. 11, no. 1. 2022. [Online]. Available: [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM\\_PEMBETUNGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)
- [13] Libunelo, Dekri, Siti Aisa Liputo, and Marleni Limonu. "Kualitas Penyimpanan Susu Kacang Hijau Pasteurisasi Dengan Penambahan Ekstrak Daun Sirih." *Jambura Journal of Food Technology* 6.2 (2024): 231-242.
- [14] Kisworo, Onno, and Fariz Amiruddin. *Pengaruh Rasio C/N campuran Eceng Gondok Dan Serbuk Gergaji Serta Pra-Perlakuan Hidrotermal Terhadap Komposisi dan Volume Biogas Hasil Digesti Anaerobik*. Diss. Universitas Brawijaya, 2019.
- [15] Y. Yahya, T. Tamrin, and S. Triyono, "Produksi Biogas Dari Campuran Kotoran Ayam, Kotoran Sapi, Dan Rumput Gajah Mini (*Pennisetum Purpureum* cv. Mott) Dengan Sistem Batch," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, vol. 6, no. 3, p. 151, 2018, doi: 10.23960/jtep-l.v6i3.151-160.