



Efektivitas Karbon Aktif dari Limbah Kulit Singkong (*Manihot utilissima*) sebagai Adsorben pada Proses Pemurnian Biogas

Effectiveness of Activated Carbon from Cassava Peel Waste (*Manihot utilissima*) as an Adsorbent in Biogas Purification

Yuliana ^{*,1}, Nur Alfina Yanti ¹, Arif Ismanto ¹, Muh. Ichsan Haris ¹, Suhardi ¹

¹ Department of Animal Science, Agriculture Faculty, Mulawarman University, Samarinda, Indonesia

*Penulis Korespondensi

Email: yuliana.official@gmail.com



Abstrak. Biogas berpotensi menjadi sumber energi terbarukan, namun kualitasnya menurun akibat tingginya kandungan CO_2 dan H_2S yang menurunkan nilai kalor dan efisiensi pembakaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan karbon aktif dari limbah kulit singkong (*Manihot utilissima*) dalam meningkatkan konsentrasi CH_4 pada biogas serta menentukan waktu pemurnian yang direkomendasikan. Biogas diproduksi pada skala laboratorium menggunakan digester anaerob berbahan drum plastik berkapasitas 120 L yang diisi campuran kotoran sapi Bali dan air dengan perbandingan 1:1, kemudian difermentasi secara anaerob selama 30 hari. Selanjutnya, biogas dimurnikan dengan kolom adsorpsi yang berisi karbon aktif hasil aktivasi NaCl 5%. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan empat taraf perlakuan waktu pemurnian (0, 10, 20, dan 30 menit) dan tiga ulangan. Parameter yang diukur meliputi suhu, pH, rasio C/N, dan konsentrasi CH_4 . Hasil penelitian menunjukkan rasio C/N sebesar 15,49, pH 6,3–7,4, dan suhu 26,77–33 °C. Pemurnian menggunakan karbon aktif kulit singkong meningkatkan konsentrasi CH_4 dari 328.973,78 ppm pada perlakuan P0 (kontrol) menjadi rata-rata 646.084,34 ppm pada biogas yang dimurnikan, atau meningkat sebesar 96,39%. Namun, analisis ragam menunjukkan bahwa variasi waktu pemurnian tidak berpengaruh nyata ($P > 0,05$) terhadap konsentrasi CH_4 . Berdasarkan pertimbangan efisiensi operasional, waktu pemurnian 10 menit direkomendasikan karena telah menghasilkan konsentrasi CH_4 yang tidak berbeda nyata dengan waktu pemurnian 20 dan 30 menit, sehingga lebih efisien dari segi waktu operasional. Karbon aktif kulit singkong berpotensi digunakan sebagai alternatif adsorben berbasis limbah pertanian untuk meningkatkan konsentrasi CH_4 dalam biogas.

Kata kunci: biogas, karbon aktif, kulit singkong, adsorpsi, metana.

Abstract. Biogas has the potential to serve as a renewable energy source; however, its quality can be compromised by high concentrations of CO_2 and H_2S , which reduce its calorific value and combustion efficiency. This study aimed to evaluate the effectiveness of activated carbon derived from cassava peel waste (*Manihot utilissima*) as an adsorbent for increasing the CH_4 concentration in biogas and to determine the optimal purification time. Biogas was produced on a laboratory scale using a 120-L plastic drum anaerobic digester containing a 1:1 mixture of Balinese cattle manure and water and was anaerobically fermented for 30 days. The biogas was subsequently purified using an adsorption column containing activated carbon prepared from cassava peel waste and activated with 5% NaCl. The study employed a completely randomized

design (CRD) with four purification-time treatments (0, 10, 20, and 30 min), each with three replicates. The parameters measured were temperature, pH, C/N ratio, and CH₄ concentration. The results showed a C/N ratio of 15.49, a pH range of 6.3–7.4, and a temperature range of 26.77–33.00 °C. Purification with cassava peel-derived activated carbon increased the CH₄ concentration from 328,973.78 ppm in the control treatment to an average of 646,084.34 ppm after purification, corresponding to a 96.39% increase. However, analysis of variance indicated that purification time had no significant effect ($P > 0.05$) on CH₄ concentration. From a practical perspective, a purification time of 10 min is recommended because it produced a CH₄ concentration that was not significantly different from those obtained at 20 and 30 min, while requiring less operational time. Therefore, activated carbon derived from cassava peel waste has potential as an alternative agricultural-waste-based adsorbent for increasing CH₄ concentration in biogas.

Keywords: *biogas, activated carbon, cassava peel, adsorption, methane.*

1. Pendahuluan

Energi merupakan salah satu *input* produksi yang sangat diperlukan dalam berbagai sektor. Minyak, gas alam, dan batu bara adalah bahan bakar fosil yang banyak digunakan dalam proses produksi (Abdullah *et al.*, 2020). Bahan bakar fosil merupakan sumber daya tidak terbarukan, sedangkan kebutuhan energi diperkirakan terus meningkat seiring dengan semakin menipisnya cadangan energi fosil (Setyono *et al.*, 2019). Peralihan ke energi terbarukan perlu dilakukan untuk menjamin keamanan dan keberlanjutan pasokan energi (Afriyanti *et al.*, 2018). Salah satu sumber energi terbarukan dan semakin mendapatkan perhatian adalah biogas. Biogas merupakan campuran gas yang dihasilkan melalui proses degradasi anaerob bahan organik oleh mikroorganisme. Biogas adalah salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan karena dapat dihasilkan dari limbah organik, seperti kotoran hewan, sisa makanan, dan limbah pertanian (Afrian *et al.*, 2017; Kurniati *et al.*, 2021).

Kotoran sapi merupakan limbah organik yang berasal dari sisa proses pencernaan sapi dan memiliki potensi sebagai bahan baku dalam pembuatan biogas karena mengandung pati dan lignoselulosa. Satu ekor sapi dapat menghasilkan limbah padat sekitar 20–30 kg dan limbah cair sekitar 100–150 L setiap harinya (Fidela *et al.*, 2024). Kotoran sapi tersusun atas 22,59% selulosa, 18,32% hemiselulosa, 10,20% lignin, 34,72% total karbon organik, dan 1,26% total nitrogen. Selain itu, kotoran sapi juga mengandung 0,37% fosfor dan 0,68% kalium. Kotoran sapi merupakan biomassa yang memiliki kandungan karbohidrat, protein, dan lemak. Secara teori, produksi metana yang dihasilkan dari karbohidrat, protein, dan lemak masing-masing sebesar 0,37; 1,00; dan 0,58 m³ CH₄ kg⁻¹ bahan kering organik. Adanya kandungan ketiga unsur bahan organik tersebut pada kotoran sapi, dinilai lebih efektif untuk dikonversi menjadi gas metana (Trisnaliani *et al.*, 2018).

Biogas terdiri dari campuran beberapa gas, gas utama ialah gas metana (CH₄) yang memiliki nilai kalor yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar, selain itu terdapat juga

kandungan karbon dioksida (CO_2) serta sejumlah kecil gas pengotor lainnya seperti nitrogen (N_2), hidrogen (H_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan Oksigen (O_2) (Suryani *et al.*, 2018). Semakin tinggi kandungan CH_4 pada suatu biogas maka, semakin besar nilai kalor pembakar pada biogas. Namun, jika kandungan CO_2 semakin tinggi akan menurunkan nilai kalor CH_4 karena CO_2 merupakan zat pengotor yang sangat berpengaruh terhadap nilai kalor pada suatu biogas (Prameswara, 2019). Memaksimalkan biogas sebagai bahan bakar dapat dilakukan dengan cara menurunkan kandungan CO_2 pada biogas dengan cara pemurnian biogas.

Pemurnian biogas adalah proses untuk meningkatkan kadar gas metana dengan menghilangkan atau mengurangi sebagian besar gas-gas pengotor yang ada pada biogas. Salah satu metode pemurnian biogas yang dapat dilakukan adalah dengan metode adsorpsi. Adsorpsi merupakan suatu peristiwa proses penjerapan molekul gas terutama CO_2 dan H_2S pada permukaan adsorben sehingga meningkatkan kandungan CH_4 dalam biogas. Proses adsorpsi dapat terjadi pada permukaan padatan yang berpori (struktur berpori) (Wibowo *et al.*, 2020). Salah satu jenis adsorben adalah karbon aktif yang merupakan padatan berpori yang mengandung 85–95% karbon, dengan luas permukaannya sekitar $300\text{--}2.000\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ (Iriani & Heryadi, 2014; Dewi *et al.*, 2020). Bahan baku pembuatan karbon aktif dapat berasal dari limbah organik atau biomassa yang memiliki kandungan karbon. Salah satu bahan organik yang dapat dijadikan karbon aktif adalah kulit singkong.

Berbagai penelitian telah memanfaatkan karbon aktif dari biomassa, salah satunya tempurung kelapa yang memiliki kemampuan adsorpsi yang baik untuk meningkatkan kualitas biogas melalui penurunan kandungan CO_2 dan H_2S . Taqiyuddin *et al.* (2025) melaporkan bahwa kombinasi karbon aktif tempurung kelapa dan zeolit mampu meningkatkan kadar CH_4 dari 45% menjadi 87%. Selain itu, pada penelitian Pangesti *et al.* (2022) menggunakan karbon aktif dari sekam padi dengan aktivator H_3PO_4 yang efektif menurunkan kadar CO_2 sebesar 96,15%. Biomassa tersebut umumnya memiliki kemampuan adsorpsi yang baik karena kandungan karbon dan struktur porinya. Namun, sebagian besar biomassa tersebut memiliki nilai ekonomi yang relatif tinggi atau telah dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan lain, seperti bahan bakar, media tanam, maupun bahan baku industri. Selain itu, ketersediaannya bergantung pada kondisi geografis sehingga tidak selalu mudah diperoleh di setiap daerah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan pengembangan adsorben alternatif yang berasal dari limbah biomassa yang melimpah, murah, dan belum dimanfaatkan secara optimal.

Salah satu biomassa yang berpotensi dikembangkan adalah limbah kulit singkong. Singkong merupakan tanaman yang banyak dibudidayakan di berbagai wilayah Indonesia. Produksi singkong di Kalimantan pada tahun 2023 mencapai 308,82 ribu ton (Kementerian Pertanian,

2024). Jumlah produksi yang cukup tinggi mengakibatkan berkembangnya berbagai industri yang memanfaatkan singkong sebagai bahan baku utama, kondisi tersebut juga menyebabkan meningkatnya jumlah limbah kulit singkong yang dihasilkan. Limbah kulit singkong masih belum optimal dalam hal pemanfaatannya, umumnya dijadikan sebagai pakan ternak dan pupuk organik. Padahal limbah kulit singkong memiliki kandungan karbon sebesar 59,31% (Permatasari *et al.*, 2014; Suprabawati *et al.*, 2018), sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif.

Penelitian mengenai karbon aktif berbahan kulit singkong masih lebih banyak berfokus pada proses pembuatan dan karakteristik karbon aktif serta pengaplikasiannya pada pengolahan limbah cair. Kajian yang secara khusus mengevaluasi pemanfaatan karbon aktif kulit singkong sebagai adsorben untuk pemurnian biogas masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi pemanfaatan karbon aktif dari limbah kulit singkong sebagai adsorben untuk meningkatkan kadar CH₄ pada proses pemurnian biogas, serta menentukan waktu pemurnian yang optimal.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Pengujian rasio C/N dilakukan di Laboratorium Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Pengujian CH₄ dilakukan di Balai Pengujian Standar Instrumen Lingkungan Pertanian, Jln. Raya Jaken No. Km. 05, Area Sawah, Sidomukti, Kec. Jaken, Kabupaten Pati, Jawa Tengah.

Bahan utama produksi biogas adalah kotoran sapi bali yang diperoleh dari Peternakan CV. Sentra Sapi Kalimantan yang berlokasi di Jl. Girirejo, Kelurahan Lempake, Kecamatan Samarinda Utara. Kulit singkong yang digunakan sebagai bahan baku karbon aktif diperoleh dari UMKM Keripik Sulis yang berlokasi di Jl. Cendana Gang. 12, RT 32, No. 45, Teluk Lerong Ulu, Kecamatan Sungai Kunjang, Kota Samarinda, Kalimantan Timur.

Bahan tambahan yang diperlukan pada penelitian ini adalah air, larutan NaCl 5%, akuades (air suling), dan lem. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu drum plastik kapasitas 120 L, pipa PVC berbagai ukuran, corong, fitting pipa (*coupling/socket*), penutup pipa berbagai ukuran, katup atau keran, Y valve, klem besi, ram nyamuk, selang, extension selang kuningan, dan timbangan.

2.1. Persiapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan karbon aktif berbahan kulit singkong sebagai adsorben pada seluruh perlakuan. Variabel yang diuji adalah lama waktu pemurnian biogas. Penelitian disusun menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) satu faktor dengan empat taraf perlakuan, yaitu P0 (biogas tanpa pemurnian sebagai kontrol), P1 (pemurnian selama 10 menit), P2 (pemurnian selama 20 menit), dan P3 (pemurnian selama 30 menit). Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga

kali pada proses pemurnian biogas menggunakan karbon aktif kulit singkong yang baru pada setiap ulangan sehingga diperoleh 12 satuan percobaan. Sampel biogas hasil pemurnian dari setiap ulangan kemudian dianalisis untuk menentukan konsentrasi CH₄.

2.1.1. Perakitan Digester dan Kolom Adsorpsi

Tahap awal yang perlu dilakukan pada penelitian ini adalah merancang dan merakit digester. Digester dibuat dari drum plastik kapasitas 120 L, pada digester terdapat 3 bagian yaitu, bagian pengisian bahan baku organik (*inlet*), bagian pembuangan (*outlet*) sisa fermentasi (*slurry*), dan bagian keluarnya gas. Plastik sebagai penampung biogas serta peralatan penunjang aliran gas berupa selang dan keran untuk mengontrol aliran gas yang keluar.

Kolom adsorpsi dibuat dari pipa PVC berdiameter 2,5 inch. Kolom adsorpsi terdapat dua bagian, yaitu bagian saat biogas masuk dan bagian adsorpsi yang berisi adsorben. Kedua bagian tersebut akan dibatasi oleh ram nyamuk yang berfungsi sebagai penyanggah agar karbon aktif tidak jatuh ke bagian saat biogas masuk (Suprianti, 2016).

2.1.2. Pembuatan Karbon Aktif

(1) Pengeringan

Kulit singkong dicuci sampai bersih dan dipotong dengan ukuran 2 cm. Kemudian di oven pada suhu 100 °C selama 1 jam hingga bahan baku kering (kadar air hilang) (Suprabawati *et al.*, 2018).

(2) Karbonisasi

Kulit singkong yang telah kering dibakar menggunakan tanur selama 2 jam pada suhu 300 °C, setelah itu akan didapatkan sampel karbon aktif tanpa aktivator (Permatasari *et al.*, 2014).

(3) Aktivasi.

Karbon kulit singkong diaktivasi secara kimia menggunakan larutan aktivator NaCl 5% dengan perbandingan massa karbon terhadap volume larutan sebesar 1:2 (g:mL). Sebanyak 500 g karbon direndam dalam 1.000 mL larutan NaCl 5% selama 24 jam (Putrianda *et al.*, 2019). Penggunaan larutan NaCl berfungsi sebagai aktivator kimia untuk membersihkan pengotor yang masih menutupi pori-pori karbon, sehingga meningkatkan luas permukaan dan kemampuan adsorpsi karbon aktif. Penggunaan NaCl pada penelitian ini bukan merupakan faktor perlakuan, melainkan tahapan tetap dalam proses pembuatan karbon aktif. Setelah perendaman selesai karbon disaring dengan kertas saring, selanjutnya karbon dicuci menggunakan akuades hingga pH netral. Kemudian dikeringkan kembali dengan oven pada suhu 110 °C selama 24 jam (Febrianti *et al.*, 2023).

2.1.3. Pemurnian Biogas

Proses pemurnian biogas pada penelitian ini menggunakan metode adsorpsi, sehingga biogas mentah akan dialirkan melalui kolom adsorpsi yang telah diisi dengan 100% karbon aktif dari limbah kulit singkong. Proses pemurnian dilakukan sesuai perlakuan, yaitu selama 10 menit (P1), 20 menit (P2), dan 30 menit (P3), sedangkan P0 merupakan kontrol berupa biogas yang tidak melalui proses pemurnian. Pada setiap ulangan digunakan karbon aktif kulit singkong yang baru, kemudian diambil satu sampel biogas setelah proses pemurnian untuk dianalisis kandungan CH₄ menggunakan kromatografi gas (*Gas Chromatography*).

2.2. Rasio Karbon/Nitrogen (C/N)

Pada penelitian ini bahan organik yang digunakan untuk produksi biogas adalah feses sapi, sehingga feses sapi merupakan sampel yang diukur rasio C/N (Nurdin *et al.*, 2020). Setelah mendapatkan data kandungan karbon dan nitrogen, akan dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Rasio C/N} = \frac{\text{Kandungan Karbon (C)}}{\text{Kandungan Nitrogen (N)}} \quad (1)$$

2.3. Derajat Keasaman

Derajat keasaman (pH) diukur menggunakan pH meter digital, sampel yang diukur adalah cairan dalam digester. Pengukuran dilakukan dengan mengambil sampel cairan melalui outlet, kemudian elektroda pH meter dicelupkan ke dalam sampel hingga nilai yang ditampilkan stabil. pH diukur setiap sore selama 30 hari.

2.4. Suhu

Suhu diukur menggunakan termometer digital dan pengukuran suhu dilakukan pada dua lokasi, yaitu suhu di dalam digester dan suhu lingkungan. Pengukuran suhu dilakukan pada 3 waktu yaitu pukul 06.00, 12.00, dan 18.00. Suhu diukur setiap hari selama 30 hari.

2.5. Konsentrasi Gas Metana

Sampel diambil menggunakan syringe (sprit) kemudian dimasukkan ke dalam vial kaca kapasitas 10 mL yang berfungsi sebagai penampung sampel biogas. Sampel yang diambil adalah biogas sebelum dan setelah proses pemurnian pada setiap perlakuan, kemudian dianalisis menggunakan alat kromatografi gas untuk mengetahui konsentrasi gas metana (CH₄) dalam satuan ppm. Peningkatan konsentrasi CH₄ setelah proses pemurnian dihitung berdasarkan konsentrasi CH₄ sebelum dan sesudah pemurnian (Suprianti, 2016). Presentase peningkatan konsentrasi CH₄ dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\text{Peningkatan Konsentrasi CH}_4 = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

C₁ = Konsentrasi CH₄ sebelum proses pemurnian (ppm)

C_2 = Konsentrasi CH_4 setelah proses pemurnian (ppm)

2.6. Metode Analisis

Data hasil pengukuran pH dianalisis secara deskriptif. Data suhu lingkungan dan suhu di dalam digester dianalisis secara deskriptif serta dilakukan analisis regresi linier sederhana untuk mengetahui hubungan antara suhu lingkungan sebagai variabel bebas (X) dengan suhu di dalam digester sebagai variabel terikat (Y). Hubungan kedua variabel dievaluasi berdasarkan persamaan regresi dan nilai koefisien determinasi (R^2). Data konsentrasi CH_4 dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) satu arah pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Apabila terdapat perbedaan nyata, maka analisis dilanjutkan dengan uji jarak berganda Duncan (DMRT) pada taraf nyata 5%.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Rasio Karbon/Nitrogen (C/N)

Hasil analisis rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) dari bahan baku biogas adalah sebesar 15,49 yang artinya berada di bawah kisaran ideal untuk fermentasi anaerob, yaitu 20–30. Rasio C/N yang rendah menandakan bahwa kandungan nitrogen relatif tinggi dibandingkan karbon. Kondisi ini dapat berdampak negatif pada kinerja mikroorganisme metanogenik karena keseimbangan nutrisi yang kurang optimal (Zulkarnaen *et al.*, 2018).

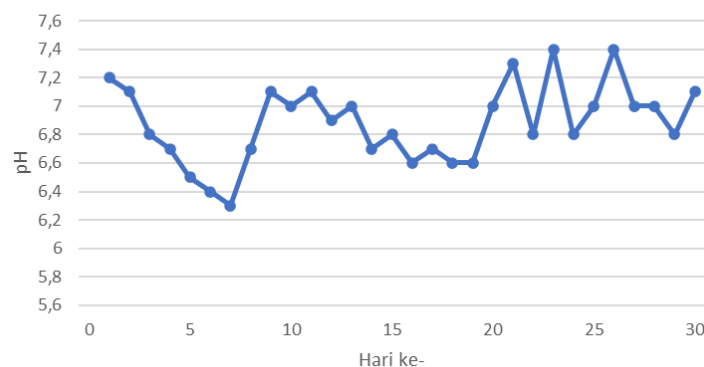
Rendahnya rasio C/N dapat disebabkan oleh komposisi pakan ternak yang diberikan, khususnya pakan dengan kandungan *Neutral Detergent Fiber* (NDF) yang tinggi. NDF merupakan komponen serat dalam pakan ternak yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang sulit dicerna oleh ternak. Menurut Uddin and Wattiaux (2021), tingginya kadar NDF dapat mengurangi retensi nitrogen di dalam sistem pencernaan, sehingga nitrogen yang tidak diserap akan lebih banyak diekskresikan melalui feses dan urin. Hal ini diperkuat oleh Truong and Thu (2022) yang menjelaskan bahwa penurunan retensi nitrogen tersebut secara langsung meningkatkan kandungan nitrogen pada feses ternak.

Tingginya kandungan nitrogen pada bahan baku biogas berpotensi menghasilkan amonia (NH_3) selama proses fermentasi. Amonia yang terbentuk dalam jumlah berlebih dapat menurunkan pH dan menghambat aktivitas bakteri metanogenik, sehingga berisiko menurunkan efisiensi produksi gas metana (Zulkarnaen *et al.*, 2018). Hal ini sejalan dengan penelitian Haryanto *et al.* (2019) yang juga menyatakan bahwa rasio C/N yang rendah dapat menurunkan produktivitas biogas. Meskipun demikian, pada penelitian ini proses fermentasi tetap berlangsung dan menghasilkan biogas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa mikroorganisme mampu beradaptasi terhadap kondisi rasio C/N yang rendah, dengan didukung oleh suhu digester yang relatif stabil pada kisaran mesofilik serta pH yang masih berada dalam rentang toleransi bakteri metanogenik.

3.2. Derajat Keasaman

Pengamatan nilai pH selama 30 hari menunjukkan bahwa pH digester berada pada rentang 6,3–7,4 ([Gambar 1](#)). Pada hari pertama, kondisi awal digester berada kisaran netral dengan nilai pH 7,2. Nilai tersebut kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai nilai terendah yaitu 6,3 pada hari ke-7. Penurunan ini merupakan hal yang umum terjadi pada fase awal fermentasi yang dikenal sebagai fase asidogenesis, di mana mikroorganisme menghasilkan asam-asam organik sebagai hasil pemecahan bahan organik. Penurunan nilai pH dari 7,2 menjadi 6,3 menunjukkan bahwa fase hidrolisis dan asidogenesis sedang berlangsung. Pada tahap ini, bahan organik kompleks diuraikan menjadi asam lemak volatil (*volatile fatty acids* /VFA) seperti asam asetat, propionat, dan butirrat. Akumulasi VFA dapat meningkatkan konsentrasi ion hidrogen yang menyebabkan pH menurun, penurunan pH wajar terjadi dalam proses pencernaan anaerob ([Soeprijanto et al., 2017](#)).

Peningkatan dan stabilisasi nilai pH terjadi saat memasuki hari ke-8 hingga ke-30. Nilai pH berfluktuasi di rentang 6,3–7,4, kondisi ini menandakan terjadinya perubahan tahap ke fase asetogenesis dan metanogenesis. Mikroorganisme asetogenik mengubah VFA menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti asam asetat, hidrogen (H_2), dan karbon dioksida (CO_2) yang kemudian dikonversi oleh mikroorganisme metanogen menjadi gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Aktivitas mikroorganisme metanogen sangat dipengaruhi oleh kondisi pH, umumnya pH optimal berada pada rentang 6,7–7,4 ([Soeprijanto et al., 2017](#)). Hal ini diperkuat oleh [Pambudi et al. \(2018\)](#) yang menyatakan bahwa rentang nilai pH yang baik bagi pertumbuhan bakteri pembentuk biogas yaitu pH 6,8–7,2. Nilai pH yang relatif stabil pada rentang yang tergolong optimal, menunjukkan bahwa kondisi dalam digester mendukung aktivitas mikroorganisme penghasil gas metana. Meskipun rasio C/N berada di bawah kisaran optimal, sistem fermentasi masih mampu mempertahankan stabilitas pH.

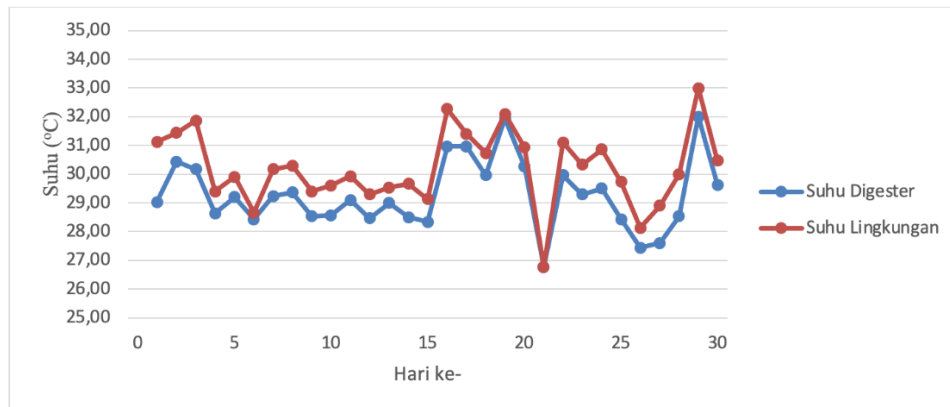


Gambar 1. pH digester selama 30 hari.

3.3. Suhu Lingkungan dan Suhu Digester

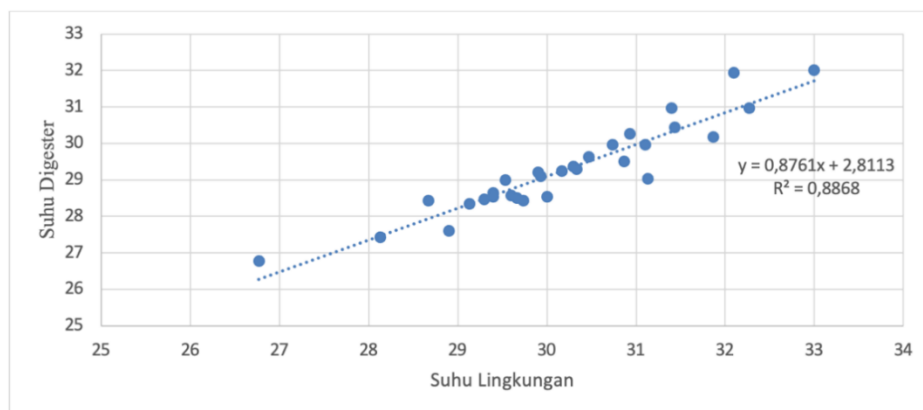
Berdasarkan hasil pengamatan harian, suhu lingkungan dan suhu di dalam digester menunjukkan pola fluktuasi yang relatif stabil. Suhu lingkungan berkisar antara 26,77–33 °C

dengan suhu rata-rata 30,17°C, sedangkan suhu digester berkisar antara 26,77–32 °C dengan suhu rata-rata 29,30°C. Suhu harian menunjukkan bahwa suhu lingkungan yang cukup tinggi dan stabil dapat membantu menjaga suhu dalam digester tetap berada pada kisaran mesofilik yaitu 25–40 °C, yang merupakan suhu optimal bagi aktivitas mikroorganisme anaerob terutama untuk bakteri metanogenik. Suhu mesofilik mendukung berbagai fase fermentasi seperti hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis yang berlangsung secara bertahap dalam proses pembentukan gas metana (Dharma & Bustomi, 2017).



Gambar 2. Suhu lingkungan dan suhu digester selama 30 hari.

Hubungan antara suhu lingkungan dan suhu digester cukup erat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 yang menunjukkan tren perubahan yang cenderung selaras antara keduanya, meskipun suhu digester sedikit lebih rendah karena adanya efek kapasitas panas dari campuran bahan organik dan air di dalam reaktor. Peningkatan suhu digester disebabkan oleh faktor suhu lingkungan, dengan dibuktikan nilai R^2 sebesar 0,8868 yang menandakan adanya keterkaitan sebesar 88,6% antara suhu digester dan suhu lingkungan. Suhu lingkungan memiliki korelasi yang kuat dengan perubahan suhu digester, dari hasil uji regresi dapat dilihat pada Gambar 3, diketahui terdapat kenaikan suhu digester sebesar 0,88 °C untuk setiap kenaikan suhu lingkungan sebesar 1 °C suhu lingkungan. Hal ini diperkuat dari hasil temuan Pham *et al.* (2014) yang menyatakan suhu lingkungan akan sangat berpengaruh terhadap suhu digester.

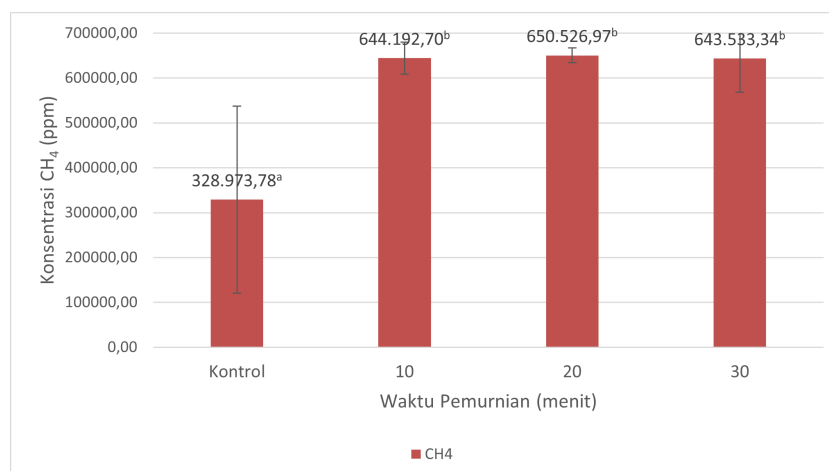


Gambar 3. Hasil uji Regresi.

Suhu yang stabil juga berperan penting dalam menjaga kestabilan pH yang selama proses fermentasi berada pada kisaran 6,3–7,4 dapat dilihat pada [Gambar 1](#), pH tersebut mendekati rentang optimal untuk metanogenesis yaitu 6,8–7,4. Hal ini penting karena bahan baku dalam produksi biogas memiliki rasio C/N tergolong rendah yang dapat menyebabkan penurunan pH dan menghambat kinerja bakteri penghasil metana. Berdasarkan hal tersebut, suhu lingkungan yang relatif stabil serta suhu digester yang berada dalam kisaran mesofilik berperan penting dalam menjaga kestabilan proses fermentasi. Kondisi ini memungkinkan proses produksi biogas tetap berjalan secara efisien meskipun terdapat ketidakseimbangan nutrisi akibat rasio C/N bahan baku yang tidak ideal.

3.4. Konsentrasi Kandungan Gas Metana

Pemurnian biogas menggunakan karbon aktif kulit singkong pada perlakuan P1, P2, dan P3 menghasilkan konsentrasi CH_4 yang lebih tinggi dan berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan kontrol (P0) ($P < 0,05$). Berdasarkan [Gambar 4](#), konsentrasi CH_4 pada biogas tanpa pemurnian (P0) sebesar $328.973,78 \pm 208.517,83$ ppm, kemudian meningkat menjadi $644.192,70 \pm 35.502,98$ ppm pada P1 (10 menit), $650.526,97 \pm 16.622,47$ ppm pada P2 (20 menit), dan $643.533,34 \pm 75.672,56$ ppm pada P3 (30 menit). Dibandingkan dengan kontrol, peningkatan konsentrasi CH_4 pada perlakuan P1, P2, dan P3 masing-masing sebesar 95,82%, 97,74%, dan 95,62%. Meskipun perlakuan P2 menghasilkan konsentrasi CH_4 tertinggi, hasil uji lanjut DMRT menunjukkan bahwa perlakuan P1, P2, dan P3 tidak berbeda nyata ($P > 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa waktu pemurnian selama 10 menit telah mampu meningkatkan konsentrasi CH_4 secara efektif, sedangkan penambahan waktu pemurnian hingga 20 dan 30 menit tidak memberikan peningkatan yang signifikan. Oleh karena itu, waktu pemurnian selama 10 menit lebih direkomendasikan karena lebih efisien dari segi waktu operasional.



Gambar 4. Konsentrasi CH_4 biogas sebelum dan setelah pemurnian menggunakan karbon aktif kulit singkong pada waktu pemurnian yang berbeda. Batang galat menunjukkan simpang baku (SD) dari tiga kali ulangan. Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf 5%.

Peningkatan konsentrasi CH_4 pada penelitian ini diduga berkaitan dengan mekanisme adsorpsi gas-gas pengotor oleh karbon aktif, karena karbon aktif memiliki luas permukaan dan struktur pori yang memungkinkan gas-gas seperti CO_2 dan H_2S lebih mudah teradsorpsi dibandingkan CH_4 (Peredo-mancilla *et al.*, 2019). Namun demikian, penelitian ini hanya mengukur perubahan konsentrasi CH_4 sebelum dan sesudah proses pemurnian, sehingga penurunan konsentrasi CO_2 dan H_2S tidak dapat dikonfirmasi secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang mengukur komposisi CO_2 dan H_2S untuk menjelaskan mekanisme pemurnian biogas secara lebih komprehensif.

Mekanisme adsorpsi dimulai dari perpindahan molekul pengotor, seperti karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S), menuju lapisan film tipis yang terbentuk di sekitar permukaan adsorben (*film diffusion*). Setelah itu, molekul-molekul pengotor tersebut bergerak masuk melalui jalur pori-pori yang terdapat pada struktur karbon aktif (*pore diffusion*). Proses ini berlanjut hingga molekul-molekul pengotor menempel dan terikat pada situs adsorpsi di permukaan karbon aktif, yaitu titik-titik tertentu yang memiliki energi permukaan cukup tinggi untuk menarik dan menahan molekul tersebut. Pada lokasi penyerapan inilah terjadi interaksi fisik maupun kimia antara adsorben dan adsorbat, yang memungkinkan molekul pengotor tertahan, sementara molekul metana (CH_4) tetap lolos, sehingga kemurnian biogas meningkat (Raganati *et al.*, 2021).

Hasil penelitian Sari *et al.* (2025) menunjukkan bahwa penggunaan karbon aktif mampu mengadsorpsi CO_2 dengan efisien, sehingga kenaikan konsentrasi CH_4 berada di angka 78%. Selain itu, penelitian Wibowo *et al.* (2020) melaporkan bahwa karbon aktif dari buah mangrove mampu mengadsorpsi H_2S hingga efisiensi 83,16%. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Balys *et al.* (2021) yang menguji berbagai adsorben berbasis karbon untuk pemisahan CH_4/CO_2 menggunakan kolom adsorpsi fixed-bed. Dalam penelitian tersebut, campuran kaya metana didefinisikan sebagai campuran gas dengan komposisi 75% CH_4 dan 25% CO_2 , sedangkan campuran kaya karbon dioksida memiliki komposisi kebalikannya, yaitu 25% CH_4 dan 75% CO_2 . Hasil pengujian menunjukkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa (AC) memiliki kinerja lebih baik dibandingkan material komersial *carbon molecular sieve* (CMS) dan *rubber tire pyrolysis char* (RPC) dalam proses pemurnian biogas, dengan kemampuan menghasilkan konsentrasi metana hingga sekitar 93% pada campuran kaya metana. Temuan-temuan tersebut memperkuat bahwa karbon aktif dari biomassa merupakan pilihan adsorben yang efektif untuk meningkatkan kemurnian biogas.

Variasi lama waktu pemurnian tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap konsentrasi CH_4 ($P > 0,05$) dapat dilihat pada Gambar 4, meskipun secara deskriptif terdapat fenomena penurunan konsentrasi CH_4 pada perlakuan waktu 30 menit, sehingga waktu optimal

ditetapkan selama 10 menit sebagai waktu yang paling efisien untuk proses adsorpsi, mengingat perpanjangan waktu tidak memberikan peningkatan yang signifikan. Peningkatan konsentrasi CH_4 hingga waktu pemurnian 20 menit menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan karbon aktif dari limbah kulit singkong berlangsung efektif dalam menghilangkan senyawa pengotor, seperti karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S), sehingga kandungan metana dalam biogas meningkat. Penurunan konsentrasi CH_4 pada menit ke-30 kemungkinan disebabkan oleh kejenuhan permukaan adsorben atau terjadinya desorpsi, yaitu proses kembalinya molekul pengotor seperti CO_2 dan H_2S yang sebelumnya telah terikat pada permukaan adsorben ke fase gas (Imawati & Adhitiyawarman, 2015).

Kejenuhan permukaan terjadi peningkatan keterisian situs adsorpsi pada karbon aktif oleh molekul pengotor, sehingga kemampuan adsorben menurun untuk menangkap senyawa tersebut. Selain itu, desorpsi dapat terjadi karena ketidakseimbangan tekanan parsial atau perubahan interaksi fisik maupun kimia antara adsorben dan molekul yang terikat, sehingga kembalinya senyawa pengotor yang telah terikat sebelumnya. Kondisi ini menandakan bahwa efektivitas adsorpsi tidak berlangsung terus-menerus, namun terdapat batas waktu optimal untuk setiap jenis adsorben (Imawati & Adhitiyawarman, 2015).

Penelitian ini menggunakan peningkatan konsentrasi CH_4 sebagai indikator keberhasilan proses pemurnian biogas. Namun demikian, penelitian ini belum menganalisis perubahan konsentrasi gas pengotor seperti CO_2 dan H_2S sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengukur komposisi CO_2 dan H_2S untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja karbon aktif kulit singkong dalam proses pemurnian biogas.

4. Kesimpulan

Produksi biogas menggunakan kotoran sapi Bali menghasilkan rasio C/N sebesar 15,49 yang berada di bawah kisaran ideal untuk fermentasi anaerob. Meskipun demikian, selama proses fermentasi nilai pH berada pada kisaran 6,3–7,4 dan suhu rata-rata lingkungan serta suhu di dalam digester masing-masing sebesar 30,17 °C dan 29,30 °C. Proses pemurnian biogas menggunakan karbon aktif berbahan kulit singkong mampu meningkatkan konsentrasi CH_4 sebesar 95,62–97,74% dibandingkan biogas tanpa pemurnian. Meskipun konsentrasi CH_4 tertinggi secara deskriptif diperoleh pada waktu pemurnian 20 menit, hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan waktu pemurnian 10, 20, dan 30 menit tidak berbeda nyata ($P > 0,05$). Oleh karena itu, waktu pemurnian selama 10 menit direkomendasikan secara praktis karena menghasilkan konsentrasi CH_4 yang tidak berbeda nyata dengan waktu pemurnian yang lebih lama, sehingga lebih efisien dari segi waktu operasional.

Singkatan yang Digunakan

-

Pernyataan Ketersediaan Data

Data akan tersedia berdasarkan permintaan.

Kontribusi Para Penulis

Yuliana: konseptualisasi, kurasi data, investigasi, penulisan draf artikel. **Nur Alfina Yanti:** kurasi data. **Aris Ismanto:** pengorganisasian penelitian, penyuntingan, pengawasan. **Muh. Ichsan Haris:** konseptualisasi, analisis data, metodologi. **Suhardi:** konseptualisasi, analisis data, metodologi.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis naskah ini menyatakan tidak ada konflik kepentingan atau kepentingan yang bersaing.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Abdullah, Javed, A., Ashraf, J., & Khan, T. (2020). The impact of renewable energy on GDP. *International Journal of Management and Sustainability*, 9(4), 239–250. <https://doi.org/10.18488/journal.11.2020.94.239.250>
- Afrian, C., Haryanto, A., Hasanudin, U., & Zulkarnain, I. (2017). Produksi Biogas Dari Campuran Kotoran Sapi Dengan Rumput Gajah (Pennisetum Purpureum). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 6(1), 23–30. <https://media.neliti.com/media/publications/142315-ID-produksi-biogas-dari-campuran-kotoran-sa.pdf>
- Afriyanti, Y., Sasana, H., & Jalunggono, G. (2018). Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Terbarukan Di Indonesia. *DINAMIC: Directory Journal of Economic*, 2(3), 865–884. <https://www.neliti.com/id/publications/372447/analisis-faktor-faktor-yang-mempengaruhi-konsumsi-energi-terbarukan-di-indonesia>
- Bałys, M., Brodawka, E., Jodłowski, G. S., Szczurowski, J., & Wójcik, M. (2021). Alternative materials for the enrichment of biogas with methane. *Materials*, 14(24), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma14247759>
- Dewi, R., Azhari, A., & Nofriadi, I. (2020). Aktivasi Karbon Dari Kulit Pinang Dengan Menggunakan Aktivator Kimia KOH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 9(2), 12–22. <https://doi.org/10.29103/jtku.v9i2.3351>
- Dharma, U. S., & Bustomi, H. (2017). Pengaruh Temperatur Digester Sistem Kontinyu Terhadap Produksi Biogas Berbahan Baku Blotong. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 6(2), 218–225. <https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo/article/view/640>
- Fidela, W., Ahda, Y., Zhafira, Febriani, Y., Azzahra, Y., Ningky, Y. P., ..., & Fajrina, S. (2024). Pemanfaatan Kotoran Sapi Menjadi Biogas Sebagai Upaya Pengendalian Limbah Peternakan. *Jurnal Ekologi, Masyarakat Dan Sains*, 5(2), 186–192. <https://doi.org/10.55448/0br55f55>
- Haryanto, A., Okfrianas, R., & Rahmawati, W. (2019). Pengaruh Komposisi Subtrat dari

- Campuran Kotoran Sapi dan Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*) terhadap Produktivitas Biogas pada Digester Semi Kontinu. *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(1), 47–56. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.41125>
- Zulkarnaen, I. R., Tira, H. S., & Padang, Y. A. (2018). Pengaruh Rasio Karbon Dan Nitrogen (C/N Ratio) Pada Kotoran Sapi Terhadap Produksi Biogas dari Proses Anaerob. *Dinamika Teknik Mesin*, 1–16. https://eprints.unram.ac.id/5823/1/Jurnal_Skripsi_Ilham.pdf
- Imawati, A., & Adhitiyawardman. (2015). Kapasitas Adsorpsi Maksimum Ion Pb(II) oleh Arang Aktif Ampas Kopi Teraktivasi HCl dan H₃PO₄. *Program Studi Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Tanjungpura*, 4(2)(12), 50–61. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jkkmipa/article/view/9716/9486>
- Pangesti, M. I., Dwityaningsih, R., & Satriawan, D. (2022). Efektivitas Karbon Aktif Dari Sekam Padi Dengan Aktivator H₃PO₄ Sebagai Media Filter Penjerapan CO₂ Dari Biogas. *Seminar Nasional Inovasi Dan Pengembangan Teknologi Terapan (SENOVTEK) Cilacap*, 100–107. <https://ejournal.pnc.ac.id/index.php/senovtek/article/view/1497>
- Iriani, P., & Heryadi, A. (2014). Pemurnian Biogas Melalui Kolom Beradsorben Karbon Aktif. *Sigma-Mu*, 6(2), 36–42. <https://doi.org/10.35313/sigmamu.v6i2.883>
- Kementerian Pertanian. (2024). Laporan Tahunan Direktorat Jenderal Tanaman Pangan Tahun 2023. In *Kementrian Pertanian Direktorat Jenderal Tanaman Pangan*. <https://id.scribd.com/document/818785978/LAPORAN-TAHUNAN-2023-Produksi-Ubi-Jalar>
- Kurniati, Y., Rahmat, A., Malianto, B. I., Nandayani, D., & Pratiwi, W. S. W. (2021). Review Analisa Kondisi Optimum Dalam Proses Pembuatan Biogas. *Rekayasa*, 14(2), 272–281. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v14i2.11305>
- Febrianti, N., Mauliana, V., & Yorika, R. (2023). Pemanfaatan Kulit Singkong sebagai Adsorben dalam Menurunkan Kadar BOD, COD di Air Waduk Manggar Kota Balikpapan. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 8(2), 101–107. <https://doi.org/10.29080/alard.v8i2.1743>
- Nurdin, I. A., Syauqi, A., & Laili, S. (2020). Pengukuran Rasio C/N pada Campuran Daun Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dan Feses Sapi (*Bos taurus* L.) dalam Fermentasi Biogas. *Jurnal SAINS ALAMI (Known Nature)*, 3(1), 29–36. <https://share.google/vu63ySVmEU6CdUBse>
- Pambudi, S., Kirom, M. R., Si, S., Si, M., Suhendi, E. A., Si, S., & Si, M. (2018). Pengaruh Kadar Keasaman (pH) terhadap Produksi Biogas dengan Menggunakan Campuran Kotoran Hewan dan Substrat Kentang Busuk pada Reaktor Anaerob. *E-Proceeding of Engineering*, 5(3), 5770–5776. <https://share.google/Ysr5dK05yIRubGmF0>
- Peredo-mancilla, D., Matei, C., Ho, B., Jeguirim, M., Hort, C., & Bessieres, D. (2019). Journal of Environmental Chemical Engineering Comparative study of the CH₄/CO₂ adsorption selectivity of activated carbons for biogas upgrading. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103368. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103368>
- Permatasari, A. R., Khasanah, L. U., & Widowati, E. (2014). Karakterisasi Karbon Aktif Kulit Singkong (Manihot utilissima) dengan Variasi Jenis Aktivator. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, 7(2), 70–75. <https://doi.org/10.20961/jthp.v0i0.13004>
- Pham, C. H., Vu, C. C., Sommer, S. G., & Bruun, S. (2014). Factors affecting process temperature and biogas production in small-scale rural biogas digesters in winter in northern vietnam. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(7), 1050–1056. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13534>
- Prameswara, A. M., Wahyudi, S., & Hidayati, N. A. (2019). Pengaruh Laju Aliran CH₄ dan CO₂ Terhadap Penyaringan CO₂ pada Biogas Menggunakan Serbuk Genteng Tanah Liat Sebagai Adsorben. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi III*, 99–107. <https://repository.ub.ac.id/id/eprint/173086/>
- Putrianda, D. C., Yuliana, L., & Budiastuti, H. (2019). Aktivasi Karbon Aktif Kulit Singkong Dengan Aktivator NaCl, ZnCl₂, dan Na₂CO₃ untuk Adsorben Pb²⁺. *Prosiding Seminar*

- Nasional Terapan Riset Inovatif*, September 2019, 274–281. https://www.researchgate.net/publication/348336211_AKTIVASI_KARBON_AKTIF_KU_LIT_SINGKONG_DENGAN_AKTIVATOR_NaCl_ZnCl_2_DAN_Na_2_CO_3_UNTU_K_ADSORBEN_Pb_2
- Raganati, F., Miccio, F., & Ammendola, P. (2021). Adsorption of Carbon Dioxide for Post-combustion Capture: A Review. *Energy and Fuels*, 35(16), 12845–12868. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01618>
- Sari, B. M., Prasajo, R. H., & Siswati, N. D. (2025). Pemurnian Biogas Menggunakan Proses Adsorpsi Dengan Karbon Aktif Sebagai Adsorben. *Jurnal Serambi Engineering*, X(2), 13438–13444. <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/901>
- Setyono, A. S., Mardiansjah, F. H., & Astuti, M. F. K. (2019). Potensi Pengembangan Energi Baru Dan Energi Terbarukan Di Kota Semarang. *Jurnal Riptek*, 13(2), 177–186. <https://ripteck.semarangkota.go.id/index.php/ripteck/article/view/68>
- Soeprijanto, Suprpto, Hari, D., Puspita, N. F., Pudjiastuti, L., Setiawan, B., ..., & Anzip, A. (2017). Pembuatan Biogas dari Kotoran Sapi Menggunakan Biodigester di Desa Jumpat Kabupaten Bojonegoro. *Sewagati*, 1(1), 17–25. <https://share.google/AFE2zlimLyqAehQM5>
- Suprabawati, A., Holiyah, N. W., & Jasmansyah, J. (2018). Kulit Singkong (Manihot esculenta Crantz) sebagai Karbon Aktif Dengan berbagai langkah pembuatan untuk Adsorpsi Logam Timbal (Pb^{2+}) dalam air. *Jurnal Kartika Kimia*, 1(1), 21–28. <https://doi.org/10.26874/jkk.v1i1.8>
- Suprianti, Y. (2016). Pemurnian Biogas untuk meningkatkan Nilai Kalor melalui Adsorpsi Dua Tahap Susunan Seri dengan Media Karbon Aktif. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 4(2), 185–196. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v4i2.185>
- Suryani, F., Ozkar Firdausi, H., & Basuki, M. (2018). Analisis pH dan Pengadukan Terhadap Produksi Biogas dari Limbah Cair Kelapa Sawit pH and Agitation Analisis of Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent. *Jurnal Riset Sains Dan Teknologi*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.30595/jrst.v2i1.1855>
- Taqiyuddin, M. F., Rosariawari, F., & Sitogasa, P. S. A. (2025). Peningkatan Kadar Metana Biogas dengan Adsorben Karbon Aktif Tempurung Kelapa dan Zeolit Alam pada Berbagai Laju Alir (Studi Kasus: Desa Carangwulung). *Jurnal Serambi Engineering*, X(3), 14456–14462. <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/1047>
- Trisnaliani, L., Effendy, S., & Syarif, A. (2018). Biogas Hasil Konversi Limbah Kotoran Sapi Sebagai Bahan Bakar Genset untuk Menghasilkan Energi Listrik Kapasitas 0,3 k Watt. *Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri*, 97–102. <https://ejournal.itn.ac.id/seniati/article/view/499>
- Truong, N. B., & Thu, N. Van. (2022). Effect of dietary neutral detergent fiber levels on nutrient intake , digestibility , rumen parameters and nitrogen retention of crossbred Wagyu cattle. *Journal of Animal Science and Technology*, 132(February), 27–35. <https://tapchivcn.vn/khcn/article/view/214>
- Uddin, M. E., & Wattiaux, M. A. (2021). Effect of source and level of forage in the diet on in vitro ammonia emission from manure of Holstein and Jersey dairy cows. *JDS Communications*, 2(1), 16–20. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2020-0012>
- Wibowo, W. A., Paryanto, P., Lutfiani, R. A., & Putra, R. M. (2020). Pemurnian Biogas Dari Gas H_2S Menggunakan Karbon Aktif Dari Buah Mangrove. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 5(1), 1–4. <https://doi.org/10.31942/inteka.v5i1.3393>