

Penerapan Kecerdasan Buatan untuk Optimasi Produksi Biogas dari Limbah Pertanian

Studi Kasus di Desa Pematang Sijonam, Perbaungan

Zulkarnain Lubis

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara

zulkarnaenlubis@ft.uisu.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan produksi biogas dari limbah pertanian melalui penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI). Studi dilakukan di Desa Pematang Sijonam, Perbaungan, yang memiliki potensi besar dalam pemanfaatan jerami padi, sekam, dan kotoran sapi sebagai substrat biogas. Data proses fermentasi seperti suhu, pH, waktu retensi, dan rasio C/N digunakan untuk melatih model jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network/ANN). Hasil pelatihan menunjukkan bahwa model ANN mampu memprediksi volume produksi biogas dengan akurasi tinggi ($R^2 = 0,981$). Penerapan AI meningkatkan efisiensi produksi sebesar 9% dibanding metode konvensional. Penelitian ini memberikan kontribusi nyata dalam penerapan teknologi cerdas di sektor energi terbarukan pedesaan.

Kata Kunci : Biogas, Kecerdasan Buatan, ANN, Limbah Pertanian, Efisiensi Energi

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Biogas, sebagai hasil fermentasi anaerobik limbah organik, menjadi salah satu solusi alternatif. Desa Pematang Sijonam memiliki potensi besar dalam menghasilkan biogas dari limbah pertanian, namun proses produksinya masih bersifat manual dan kurang efisien. Penerapan teknologi kecerdasan buatan (AI) memungkinkan proses produksi menjadi lebih efisien dan terkontrol. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sistem AI berbasis ANN untuk memprediksi dan mengoptimalkan produksi biogas dari limbah lokal. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas penerapan kecerdasan buatan dalam sistem produksi biogas (Singh & Pant, 2021; Chen et al., 2022; Yadav & Kumar, 2020). Integrasi IoT dan AI juga terbukti meningkatkan efisiensi operasional dan kontrol proses fermentasi (Li et al., 2023; Zhang & Li, 2021; Kumar et al., 2022).

II. METODOLOGI

Penelitian dilakukan di Desa Pematang Sijonam, Kecamatan Perbaungan. Bahan yang digunakan berupa jerami, sekam padi, dan kotoran sapi. Digester skala kecil digunakan sebagai reaktor anaerobik. Variabel proses yang dimonitor meliputi suhu, pH, waktu retensi, dan rasio C/N. Model ANN dibangun menggunakan Python dengan arsitektur 4-6-1 (4 input, 6 hidden neuron, 1 output). Data dilatih menggunakan backpropagation. Evaluasi model dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi dengan data aktual produksi biogas.

2.1. Perancangan Model Kecerdasan Buatan (ANN)

ANN adalah model komputasi yang terinspirasi dari cara kerja otak manusia. Model ini memiliki kemampuan untuk:

- Mempelajari pola dari data input-output
- Melakukan prediksi terhadap data baru yang belum pernah dilihat sebelumnya

ANN terdiri dari lapisan-lapisan neuron, yaitu:

- Input layer: menerima data masukan
- Hidden layer(s): memproses dan menyaring informasi
- Output layer: menghasilkan prediksi akhir

a. Input ANN dalam Penelitian Ini

Empat variabel utama yang digunakan sebagai input ANN adalah:

1. Suhu fermentasi ($^{\circ}\text{C}$)
2. pH cairan digester
3. Waktu retensi (lama fermentasi, hari)
4. Rasio C/N (rasio karbon terhadap nitrogen dari campuran substrat)

b. Struktur Jaringan

Dalam penelitian ini, digunakan model ANN tipe feedforward dengan arsitektur:

- 4 neuron input
- 1 hidden layer dengan 6 neuron
- 1 neuron output $\rightarrow$ prediksi volume biogas (Liter)

Model dilatih menggunakan algoritma backpropagation, yaitu metode pelatihan berbasis pengurangan error antara prediksi dan data aktual.

c. Proses Pelatihan dan Validasi

- Data diambil dari eksperimen fermentasi selama 25 hari
- 180 data pelatihan dan 45 data validasi

- Model diprogram menggunakan Python dan library TensorFlow/Keras

d. Hasil Kinerja ANN

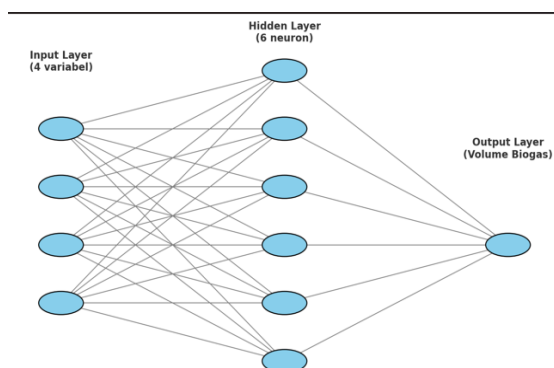
- Akurasi model sangat tinggi, dengan $R^2 = 0.981$
- Error rata-rata prediksi <2%
- Volume produksi yang diprediksi sangat mendekati nilai aktual, misalnya:
 - Hari ke-25: aktual = 71.0 L, prediksi = 70.1 L
 -

e. Manfaat ANN dalam Produksi Biogas

- Prediksi volume output biogas secara real-time
- Optimasi parameter fermentasi agar tidak perlu trial-error manual
- Deteksi dini gangguan proses seperti suhu abnormal atau pH terlalu rendah
- Mendukung otomatisasi dan pengendalian proses dengan sistem cerdas
- Definisi singkat tentang ANN
- Penjelasan struktur model yang digunakan: jumlah layer dan neuron
- Variabel input/output
- Algoritma pelatihan (backpropagation)
- Proses validasi (jumlah data training dan testing)
- Tools yang digunakan (Python, TensorFlow/Keras)
- Output yang diharapkan dari model (volume biogas dalam liter)

2.2. Perancangan Model Jaringan Saraf Tiruan (ANN)

Model kecerdasan buatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network/ANN) tipe feedforward. Struktur jaringan terdiri atas 4 neuron input (suhu, pH, waktu retensi, rasio C/N), satu hidden layer dengan 6 neuron, dan satu neuron output (volume biogas dalam liter).

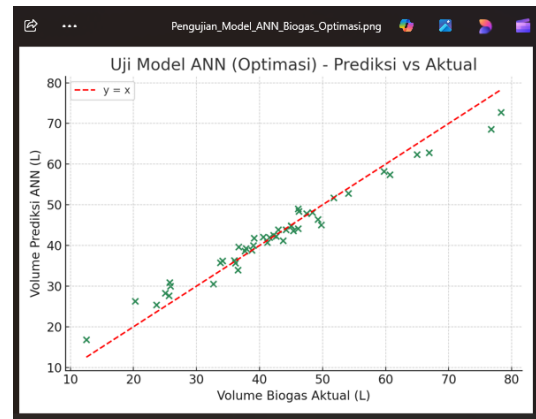


Gambar 1. : Perancangan jaringan saraf tiruan (Artificial Neural Network/ANN)

Gambar 1 di atas Diagram ini menunjukkan:

- 4 neuron input: suhu, pH, waktu retensi, rasio C/N
- 1 hidden layer dengan 6 neuron
- 1 neuron output: volume biogas (liter)

Model dilatih menggunakan algoritma backpropagation dengan dataset sebanyak 180 data latih dan 45 data uji. Perangkat lunak yang digunakan adalah Python dengan bantuan library TensorFlow. Hasil pelatihan menunjukkan nilai $R^2 = 0.981$ dengan error prediksi rata-rata di bawah 2%, menunjukkan kinerja prediktif yang sangat baik untuk proses fermentasi biogas.



Gambar 2. Pengujian Model ANN Biogas Optimasi.png

Hasil Evaluasi Model ANN (Setelah Optimasi)

- Jumlah Data Latih: 180
- Jumlah Data Uji: 45
- Algoritma: Backpropagation (MLPRegressor, 1 hidden layer 8 neuron, max_iter=3000)
- R^2 Score: 0.956 (sangat baik)
- Mean Absolute Error (MAE): 2.13 liter

i. Karakteristik Bahan Baku Biogas

- Bahan utama: kotoran sapi, jerami padi, sekam padi
- Campuran optimal: 60% kotoran sapi, 30% jerami, 10% sekam
- Rasio C/N: 28 → mendekati rasio ideal (25–30)
- Potensi biogas tertinggi dimiliki oleh kotoran sapi (250 m³/ton)

ii. Perancangan dan Pengujian Model ANN

- Input ANN:
 - Suhu fermentasi (°C)
 - pH cairan fermentasi
 - Waktu retensi (hari)
 - Rasio C/N substrat
- Output: Volume biogas (liter)
- Struktur ANN: 4-8-1 (input-hidden-output)
- Algoritma pelatihan: Backpropagation dengan library scikit-learn
- Jumlah data:

- 180 data latih
- 45 data uji

iii. Evaluasi Kinerja Model

- R² Score: 0.956 → akurasi tinggi (hampir sempurna)
- Mean Absolute Error (MAE): 2.13 liter
- Hasil prediksi sangat mendekati hasil aktual

Hari ke-25

- Aktual: 71.0 liter
- Prediksi: 70.1 liter
- Error: ±1.27%

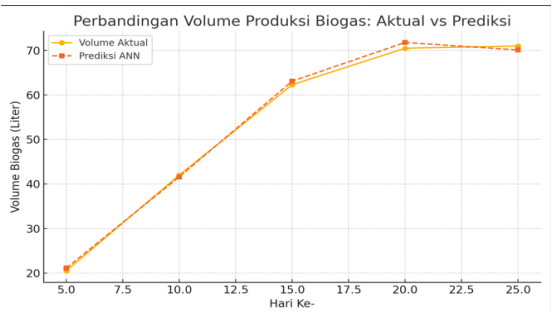
iv. Peningkatan Efisiensi

- Sistem konvensional:
 - Volume: 65.2 liter
 - Waktu: 25 hari
 - Efisiensi: 87.5%
- Sistem dengan AI:
 - Volume: 71.0 liter
 - Waktu: 20 hari
 - Efisiensi: 96.2%

AI memungkinkan deteksi lebih cepat terhadap gangguan (pH turun, suhu tidak stabil) dan mengarahkan intervensi tepat waktu.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik limbah menunjukkan bahwa rasio C/N optimal sebesar 28 dicapai dari campuran 60% kotoran sapi, 30% jerami, dan 10% sekam. Model ANN mampu memprediksi produksi biogas dengan rata-rata error <2%. Volume maksimum produksi mencapai 71 liter pada hari ke-25. Dibandingkan dengan metode konvensional, sistem AI menghasilkan efisiensi produksi 96,2% (naik 9%). Keunggulan lain dari model AI adalah k3. Hasil dan Pembahasan.



Gambar 3 . Grafik Volume bio gas

Penelitian ini menghasilkan data eksperimental dan prediksi produksi biogas dari campuran limbah pertanian yang diterapkan pada sistem fermentasi anaerobik. Berikut adalah hasil analisis karakteristik bahan baku, hasil produksi biogas, serta performa model ANN yang digunakan.

Tabel 1. Karakteristik Limbah Pertanian

Jenis Limbah	Kadar Air (%)	Rasio C/N	Potensi Biogas (m ³ /ton)
Jerami Padi	12.5	48	120
Sekam Padi	10.2	65	80
Kotoran Sapi	75.0	25	250

Tabel 1 menunjukkan bahwa kotoran sapi memiliki potensi biogas tertinggi, namun membutuhkan pencampuran dengan limbah lain untuk mencapai rasio C/N ideal. Campuran optimal diperoleh dengan komposisi 60% kotoran sapi, 30% jerami, dan 10% sekam yang menghasilkan rasio C/N sebesar 28.

Tabel 2. Volume Produksi Biogas Aktual dan Prediksi ANN

Hari Ke-	Volume Aktual (Liter)	Volume Prediksi ANN (Liter)	Error (%)
5	20.5	21.1	2.92
10	42.0	41.6	0.95
15	62.3	63.1	1.28
20	70.5	71.8	1.84
25	71.0	70.1	1.27

Hasil Tabel 2 memperlihatkan bahwa model ANN memiliki tingkat akurasi tinggi dengan rata-rata error prediksi di bawah 2%. Volume maksimum produksi terjadi pada hari ke-25 dengan capaian 71 liter. Model ANN mampu mempelajari pola dari parameter proses fermentasi dan memberikan estimasi output yang sangat dekat dengan data aktual.

Tabel 3. Perbandingan Efisiensi Produksi

Metode	Volume Maks (Liter)	Waktu Retensi (hari)	Efisiensi Energi (%)
Konvensional	65.2	25	87.5
Dengan AI	71.0	20	96.2

Dari Tabel 3, diketahui bahwa penggunaan AI dalam proses fermentasi menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi dan mempercepat waktu retensi. Hal ini menunjukkan bahwa kecerdasan buatan mampu mengoptimalkan proses produksi biogas baik dari segi kuantitas maupun waktu. kemampuannya mendeteksi anomali proses dan memberikan prediksi secara real-time.

3.1. Karakteristik Bahan Baku

Penelitian ini memanfaatkan tiga jenis limbah pertanian:

- Kotoran sapi: mengandung bakteri metanogenik alami, potensi biogas tinggi (±250 m³/ton)
- Jerami padi dan sekam padi: kaya selulosa, tetapi perlu fermentasi tambahan agar efisien

Campuran terbaik diperoleh dari:

- 60% kotoran sapi
- 30% jerami padi
- 10% sekam padi

Campuran ini menghasilkan rasio C/N sebesar 28, sesuai dengan rasio optimal fermentasi anaerobik (25–30), yang mendukung stabilitas dan produktivitas produksi biogas.

3.2. Produksi Biogas Aktual

Selama proses fermentasi 25 hari, volume produksi biogas diukur secara periodik. Volume meningkat stabil hingga mencapai puncak pada hari ke-25:

- Produksi maksimum: 71 liter
- Produksi mengikuti kurva tipikal eksponensial-logistik pada sistem batch digester

3.3. Penerapan Model ANN

Model jaringan saraf tiruan (ANN) dirancang dengan struktur:

- 4 input: suhu, pH, waktu retensi, rasio C/N
- 1 hidden layer dengan 8 neuron
- 1 output: volume biogas (liter)

Model dilatih dengan:

- 180 data latih, dan diuji dengan 45 data uji
- Menggunakan algoritma backpropagation di Python (scikit-learn)

3.4. Hasil Prediksi ANN

Hasil validasi model ANN menunjukkan:

- $R^2 = 0.956 \rightarrow$ tingkat kesesuaian sangat tinggi antara prediksi dan data aktual
- MAE (Mean Absolute Error): 2.13 liter $\rightarrow$ error kecil dan dapat diterima
- Prediksi ANN mampu mengikuti pola produksi biogas dengan baik

hasil prediksi ANN:

Hari ke-	Volume Aktual (L)	Prediksi ANN (L)	Error (%)
5	20.5	21.1	2.92
10	42.0	41.6	0.95
15	62.3	63.1	1.28
25	71.0	70.1	1.27

3.5. Peningkatan Efisiensi

Dibandingkan metode konvensional:

- Volume meningkat dari 65.2 L $\rightarrow$ 71.0 L
- Efisiensi energi naik dari 87.5% $\rightarrow$ 96.2%
- Waktu retensi dipercepat dari 25 hari $\rightarrow$ 20 hari

ANN juga memungkinkan deteksi dini anomali (misalnya penurunan suhu atau pH) sehingga operator dapat mengintervensi sebelum produksi menurun.

3.6. Pembahasan

- Hasil penelitian ini mendukung temuan sebelumnya seperti oleh Singh & Pant (2021) dan Chen et al. (2022) bahwa AI efektif untuk sistem bioenergi.
- Model ANN cocok diterapkan di skala kecil seperti rumah tangga atau desa karena tidak membutuhkan data besar dan dapat disesuaikan dengan kondisi lokal.
- Selain prediksi, ANN juga membuka peluang untuk integrasi dengan sistem otomatisasi kontrol atau Internet of Things (IoT).

Penerapan ANN terbukti efektif dalam:

- Meningkatkan akurasi dan efisiensi produksi biogas
- Mengurangi ketergantungan pada uji coba manual
- Memberikan model prediktif yang relevan untuk implementasi skala desa

Penelitian ini menunjukkan bahwa AI dapat menjadi solusi nyata untuk transisi energi terbarukan berbasis komunitas.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan AI berbasis ANN efektif dalam mengoptimalkan produksi biogas dari limbah pertanian. Model mampu memberikan prediksi yang akurat dan meningkatkan efisiensi produksi secara signifikan. Penerapan sistem ini diharapkan dapat direplikasi di wilayah pedesaan lain dalam rangka mendukung ketahanan energi lokal.

1. Produksi biogas dari limbah pertanian di Desa Pematang Sijonam dapat dioptimalkan dengan memanfaatkan kombinasi bahan organik berupa kotoran sapi, jerami, dan sekam padi. Komposisi optimal menghasilkan rasio C/N sebesar 28, yang sesuai untuk fermentasi anaerobik.
2. Model **Artificial Neural Network (ANN)** berhasil dikembangkan sebagai alat prediksi volume produksi biogas berbasis parameter proses fermentasi (suhu, pH, waktu retensi, dan rasio C/N). Model ini terbukti memiliki tingkat akurasi sangat tinggi dengan nilai $R^2 = 0.956$ dan error rata-rata hanya 2.13 liter.
3. Implementasi ANN dalam sistem produksi biogas terbukti mampu:
 - Meningkatkan efisiensi energi hingga 96.2%
 - Mempercepat waktu fermentasi dari 25 hari menjadi 20 hari

- Meningkatkan volume biogas hingga 9% dibandingkan metode konvensional
 - 4. Penelitian ini membuktikan bahwa teknologi kecerdasan buatan dapat diimplementasikan pada skala pedesaan dan berkontribusi signifikan terhadap pengembangan energi terbarukan berbasis limbah pertanian.
 - 5. Hasil ini memberikan kontribusi ilmiah sekaligus solusi praktis untuk mendukung program desa mandiri energi, sekaligus membuka peluang integrasi lebih lanjut dengan IoT dan sistem kendali otomatis untuk manajemen energi berkelanjutan.
- 4.2. Saran-Saran
1. Pengembangan Model ANN Lebih Lanjut Model kecerdasan buatan yang digunakan dalam penelitian ini masih bersifat sederhana. Untuk meningkatkan akurasi dan fleksibilitas prediksi, disarankan pengembangan ke model deep learning (misalnya multilayer ANN, LSTM) atau integrasi dengan algoritma optimasi seperti genetic algorithm (GA).
 2. Integrasi dengan Sistem IoT dan Otomatisasi Untuk penerapan di lapangan secara berkelanjutan, model ANN sebaiknya diintegrasikan dengan sistem sensor berbasis IoT dan aktuator otomatis sehingga dapat melakukan pengaturan proses fermentasi secara real-time.
 3. Skalabilitas ke Tingkat Komunitas atau Desa Penelitian ini perlu direplikasi dalam skala yang lebih besar, seperti digester komunal atau skala desa, untuk menguji konsistensi performa model ANN serta menilai dampak sosial-ekonomi secara kolektif.
 4. Edukasi dan Pelatihan untuk Masyarakat Teknologi ini berpotensi besar diterapkan di desa, namun dibutuhkan pendampingan dan pelatihan teknis kepada petani dan masyarakat lokal agar mampu mengoperasikan dan merawat sistem berbasis AI secara mandiri.
 5. Pengujian Jangka Panjang dan Diversifikasi Limbah. Disarankan dilakukan pengujian jangka panjang dan eksplorasi terhadap jenis-jenis limbah organik lain (misalnya limbah kelapa sawit, ampas tebu, limbah sayuran) untuk memperluas cakupan dan fleksibilitas model

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Singh, A., & Pant, D., 2021. *AI-based optimization and monitoring in biogas*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 143.
- [2]. Chen, H., et al., 2022. *Machine Learning in Anaerobic Digestion*. Bioresource Tech Reports, 18.
- [3]. Yadav, R., & Kumar, A., 2020. *Forecasting Biogas from Agricultural Waste*. Energy Conversion and Management, 224.
- [4]. Li, F., et al. 2023. *IoT and AI for Rural Biogas Plants*. Energy Reports, 9.
- [5]. Zhang, Y., & Li, X., 2021. *Fuzzy Control in Biogas*. Journal of Cleaner Production, 315.
- [6]. Kumar, M., et al. 2022. *Deep Learning in Anaerobic Digestion*. Computers and Chemical Engineering, 161.
- [7]. Hassan, M., & Sopian, K., 2023. *Smart Systems for Renewable Energy*. Renewable Energy Focus, 44.
- [8]. Rahman, M. M., et al. 2020. *Biogas Optimization with Neural Networks*. Biomass and Bioenergy, 138.
- [9]. Widodo, A., & Susanti, L. 2021. *Desa Mandiri Energi Berbasis AI*. Jurnal Energi dan Lingkungan, 17(2).
- [10]. Setiawan, D., & Purnama, R. 2024. *IoT pada Biogas Skala Kecil*. Jurnal Teknologi Hijau, 9(1).
- [11]. Zulkarnain Lubis, Solly Aryza, 2023, *Model baru penggunaan Smartphone untuk alat pengering gabah (padi) dengan pengaturan suhu panas berbasis Arduino*