

Aplikasi Statistical Process Control dalam Penjaminan Kualitas Logam Fe, Cr (IV), Cu dan Zn pada Input Biodigester di 15 Kecamatan di Kabupaten Kebumen

Ida Betanursanti*, Alifita Dicasani

Universitas Muhammadiyah Gombong, Indonesia

Email: idabetanursanti@unimugo.ac.id*, aliftadicasani@unimugo.ac.id

Abstract

Kualitas air merupakan faktor krusial dalam menentukan kinerja dan keberlanjutan sistem biodigester. Kandungan logam berat dalam air berpotensi mempengaruhi proses biologis pembentukan biogas serta berdampak pada kesehatan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas air sebagai input biodigester berdasarkan kandungan logam berat di 15 kecamatan di Kabupaten Kebumen dalam rangka mendukung pengembangan biogas sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung program SDGs desa berenergi bersih terbaharukan. Pengambilan sampel air dilakukan secara acak pada 15 kecamatan yang mewakili wilayah pegunungan, dataran, pesisir, dan perkotaan. Pengukuran konsentrasi logam berat dilakukan di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup, Kelautan dan Perikanan Kabupaten Kebumen. Parameter yang dianalisis meliputi kadar kromium (Cr) IV, besi (Fe), tembaga (Cu), dan seng (Zn). Data dianalisis menggunakan pendekatan *statistical process control* melalui peta kendali statistik untuk mengevaluasi variasi proses, serta analisis kapabilitas proses menggunakan indeks Pp dan Ppk untuk menilai kemampuan sumber air memenuhi batas spesifikasi baku mutu sebagai input biodigester. Hasil penelitian menunjukkan adanya variasi kandungan logam berat antar kecamatan. Konsentrasi kromium yang bersifat toksik dengan nilai $\geq 0,67$ mg/L teridentifikasi pada lima kecamatan, yaitu Klirong, Petanahan, Buluspesantren, Karanggayam dan Kebumen. Konsentrasi tembaga mendekati batas 0,02 mg/L yang berpotensi menghambat aktivitas enzim ditemukan pada Kecamatan Petanahan dan Kebumen. Berdasarkan analisis kapabilitas proses, satu kecamatan dikategorikan sangat baik, sembilan kecamatan dapat diterima, dan empat kecamatan dikategorikan buruk sebagai sumber air input biodigester. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan *statistical process control* mampu memberikan kerangka evaluasi kuantitatif terhadap konsistensi kualitas air pada skala wilayah untuk mendukung pengembangan biodigester berbasis energi terbaharukan.

Kata kunci: biodigester, logam berat, SPC, analisis kapabilitas proses,

Abstract

Water quality is a crucial factor in determining the performance and sustainability of the biodigester system. The content of heavy metals in water has the potential to affect the biological process of biogas formation as well as have an impact on environmental health. This study aims to analyze water quality as biodigester inputs based on heavy metal content in 15 sub-districts in Kebumen Regency in order to support the development of biogas as an alternative energy source to support the SDGs program of clean and renewable energy villages. Water sampling was carried out randomly in 15 sub-districts representing mountainous, plain, coastal, and urban areas. Heavy metal concentration measurements were carried out at the UPTD Environmental Laboratory of the Kebumen Regency Environment, Marine and Fisheries Office. The parameters analyzed included levels of chromium (Cr) IV, iron (Fe), copper (Cu), and zinc (Zn). Data was analyzed using a *statistical process control approach* through a statistical control map to evaluate process variations, as well as process capability analysis using Pp and Ppk indices to assess the ability of water sources to meet the quality standard specification limit as a biodigester input. The results of the study show that there is a variation in heavy metal content between sub-districts. Toxic chromium concentrations with a value of ≥ 0.67 mg/L were identified in five sub-districts, namely Klirong, Petanahan, Buluspesantren, Karanggayam and Kebumen. Copper concentrations close to the limit of 0.02 mg/L which have the potential to inhibit enzyme activity were found in Petanahan and Kebumen Districts. Based on the analysis of process capabilities, one sub-district was categorized as very good, nine sub-districts were acceptable, and four sub-districts were categorized as poor as biodigester input water sources. These results show that the

statistical process control approach is able to provide a quantitative evaluation framework for water quality consistency at the regional scale to support the development of renewable energy-based biodigesters.

Keywords: biodigester, heavy metals, SPC, process capability analysis,



PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan industrialisasi, sementara ketergantungan pada bahan bakar fosil telah menyebabkan degradasi lingkungan dan emisi gas rumah kaca yang signifikan (Ponsethuraman & Ethiraj, 2025). Dalam konteks ini, pengembangan energi terbarukan menjadi prioritas utama untuk mencapai keberlanjutan lingkungan dan ketahanan energi. Biogas, sebagai salah satu sumber energi terbarukan, menawarkan solusi yang menjanjikan karena dapat dihasilkan dari limbah organik, termasuk limbah ternak, sambil mengurangi beban pencemaran lingkungan (Andari, et al., 2025). Namun, keberhasilan implementasi teknologi biodigester sangat bergantung pada kualitas input, khususnya kualitas air yang digunakan sebagai media pencampur substrat organik. Pencemaran logam berat pada sumber air dapat menghambat proses fermentasi anaerob dan menurunkan efisiensi produksi biogas, sehingga evaluasi kualitas air menjadi tahap kritis yang sering diabaikan dalam perencanaan instalasi biodigester (Geng, Xu, Dai, & Yang, 2024). Untuk memastikan keberhasilan investasi biodigester dan keberlanjutan operasionalnya, diperlukan pendekatan sistematis dalam penjaminan kualitas air melalui metode statistik yang mampu mendeteksi variabilitas dan ketidaksesuaian terhadap standar baku mutu.

Kabupaten Kebumen memiliki potensi besar dalam pengembangan biogas sebagai sumber energi alternatif berbasis limbah ternak. Data Badan Pusat Statistik (BPS) dalam *Kebumen Dalam Angka* tahun 2023 dan 2024 menunjukkan peningkatan populasi ternak sapi sebesar 7,5% menjadi 65.110 ekor pada tahun 2024. Populasi kambing tercatat sebanyak 85.878 ekor pada tahun 2023 dan mengalami peningkatan lebih dari 20% pada tahun 2024, sementara populasi domba sejumlah 23.666 meningkat sebesar 5,4% pada periode yang sama. Peningkatan jumlah ternak ini menunjukkan ketersediaan bahan baku limbah organik yang berpotensi dikembangkan menjadi biogas sebagai energi terbarukan di tingkat wilayah (Ponsethuraman & Ethiraj, 2025).

Pengembangan biogas memerlukan perencanaan teknis yang matang agar instalasi biodigester beroperasi efektif dan berkelanjutan sesuai program *Sustainable Development Goals* (SDGs) Desa, yaitu menjadi energi alternatif yang mendukung Desa berenergi bersih dan terbaharukan (Andari, et al., 2025). Salah satu faktor penting dalam sistem biodigester adalah kualitas air yang digunakan sebagai media pencampur bahan organik (Abubakar, 2022). Kualitas air yang tidak sesuai, khususnya yang mengandung logam berat, dapat menghambat aktivitas mikroorganisme anaerob dan menurunkan kinerja produksi biogas (Geng, Xu, Dai, & Yang, 2024). Oleh karena itu, evaluasi kualitas air merupakan tahap awal yang krusial sebelum pengembangan instalasi biodigester.

Biodigester merupakan reaktor anaerob yang mengolah limbah organik melalui tahapan hidrolisis, asidogenesis, dan metanogenesis untuk menghasilkan biogas serta residu berupa *slurry* yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik (Raudhatunnisa & Gusri, 2025). Proses ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, termasuk ketersediaan air dan kandungan

unsur kimia di dalamnya (Afrianti, Irvan, Nur, & Delvian, 2023). Beberapa logam seperti Fe berperan sebagai mikronutrien yang mendukung stabilitas proses metanogenesis, sedangkan logam berat seperti Cr dan Cu pada konsentrasi tertentu bersifat toksik dan dapat menghambat aktivitas enzim mikroorganisme (Agustin, Sudarti, & Yushardi, 2023).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji dampak logam berat terhadap proses anaerob dan kualitas air, namun dengan fokus dan keterbatasan yang berbeda. Silva et al. (2022) menerapkan pendekatan Statistical Process Control (SPC) untuk memantau kualitas air Sungai Doce di Brasil pasca-bencana bendungan Fundão. Studi tersebut berhasil mengidentifikasi variasi temporal dan spasial parameter kualitas air menggunakan peta kendali, namun tidak secara khusus mengevaluasi kelayakan air sebagai input biodigester atau menggunakan indeks kapabilitas proses (Pp/Ppk) untuk penilaian kuantitatif. Guo et al. (2019) melakukan tinjauan literatur mengenai interaksi logam berat dengan komunitas mikroba dalam digester anaerob, menyimpulkan bahwa logam berat seperti Cu, Cr, dan Zn dapat menghambat produksi biogas pada konsentrasi tinggi, namun penelitian tersebut bersifat teoretis dan tidak menyajikan data empiris dari lokasi spesifik dengan karakteristik geografis beragam.

(Kipsang, Kibet, & Adongo, 2022) menggunakan Water Quality Index (WQI) untuk menilai kesesuaian air Sungai Molo di Kenya, namun pendekatan ini hanya memberikan indeks agregat tanpa evaluasi variabilitas proses atau analisis kapabilitas yang dapat mendeteksi inkonsistensi kualitas air secara statistik. Sementara itu, Zhai et al. (2018) mengkaji efek logam berat pada digesti anaerob sampah padat perkotaan, namun terbatas pada satu jenis substrat dan tidak mengintegrasikan pendekatan SPC untuk evaluasi kualitas input air pada skala wilayah. Dari keempat studi tersebut, belum ada yang mengintegrasikan metode SPC dengan analisis kapabilitas proses (Pp/Ppk) untuk mengevaluasi kualitas air sebagai input biodigester pada skala multi-lokasi dengan karakteristik geografis beragam (pegunungan, dataran, pesisir, dan perkotaan), sebagaimana yang dilakukan dalam penelitian ini.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk memastikan bahwa investasi dalam pengembangan biodigester di Kabupaten Kebumen tidak mengalami kegagalan teknis akibat kualitas air yang tidak memadai. Kegagalan biodigester tidak hanya menyebabkan kerugian ekonomi, tetapi juga menghambat pencapaian target SDGs Desa, khususnya dalam penyediaan energi bersih dan terbaharukan (Andari, et al., 2025). Penelitian ini memberikan kebaruan melalui tiga aspek utama: (1) penerapan pendekatan Statistical Process Control (SPC) yang belum banyak digunakan dalam evaluasi kualitas air untuk biodigester di Indonesia, (2) cakupan geografis yang luas meliputi 15 kecamatan dengan karakteristik berbeda (pegunungan, dataran, pesisir, dan perkotaan), yang memungkinkan identifikasi variasi spasial kandungan logam berat, dan (3) penggunaan analisis kapabilitas proses melalui indeks Pp dan Ppk untuk penilaian kelayakan sumber air secara kuantitatif dan objektif, yang memberikan basis data ilmiah untuk pengambilan keputusan dalam penempatan dan operasionalisasi biodigester di tingkat wilayah (Silva G. J., Borges, Moreira, & Rosa, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi logam Fe, Cu, Cr, dan Zn dalam air di 15 kecamatan di Kabupaten Kebumen, serta mengevaluasi kesesuaian kualitas air sebagai input biodigester menggunakan pendekatan SPC. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi kuantitatif mengenai kualitas air, menjadi dasar evaluasi teknis untuk menentukan kelayakan sumber air dalam pengembangan biodigester (Tangko, Sonong, S, & Salam, 2018), dan mendukung pengambilan keputusan dalam pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan di tingkat wilayah (Afrianti, Irvan, Nur, & Delvian, 2023).

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian dijabarkan secara rinci dalam sub-bagian berikut:

1. Lokasi dan periode penelitian

Penelitian dilakukan di Kabupaten Kebumen yang memiliki 26 kecamatan dengan luas wilayah 1.281,115 km² dan panjang pantai 57,5 km. Wilayah ini memiliki karakteristik geografis beragam, berupa perbukitan, pegunungan, dataran rendah, dan pesisir. Potensi unggulan Kabupaten Kebumen meliputi pertanian, kelautan, pariwisata, dan industri (Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen, 2025). Penelitian dilaksanakan pada bulan Juli hingga Agustus tahun 2025.

2. Pengambilan sampel air

Sampel air diambil secara acak dari sumber air yang digunakan masyarakat di 15 kecamatan, mewakili empat kategori lokasi: perkotaan, semi-perkotaan, perdesaan, dan pesisir. Setiap kecamatan diambil tiga titik sampel dengan volume 500 mL per titik. Sampel disimpan dalam botol steril dan dikonservasi menggunakan *cool box* sesuai prosedur standar (SNI 6989.84:2019).

Pemilihan lokasi instalasi biodigester mempertimbangkan sifat fisikokimia air (Stolecka & Rusin, 2021), struktur biodigester, jumlah substrat, kondisi proses, serta faktor ekonomi, sosial, lingkungan, dan rantai pasok (Jesus, Souza, Puglieri, Piekarski, & Francisco, 2021). Biodigester digunakan sebagai alat pengolah limbah organik menjadi biogas untuk selanjutnya dimanfaatkan sebagai sumber energi Listrik (Raymundo, et al., 2023) dan residu pupuk kompos (Afrianti, Irvan, Nur, & Delvian, 2023), yang membantu mengurangi polusi air, tanah, dan meningkatkan kualitas lingkungan (Wallace, et al., 2023).

3. Analisis Laboratorium

Konsentrasi logam berat (Fe, Cu, Cr, Zn) diukur secara kuantitatif menggunakan metode (misal AAS/ICP-OES) di Laboratorium Lingkungan Pemerintah Kabupaten Kebumen. Analisis dilakukan sesuai standar baku mutu air minum (SNI ...) dan hasil dicatat dalam satuan mg/L.

Logam berat seperti tembaga (Cu), nikel (Ni), seng (Zn), kadmium (Cd), kromium (Cr), dan timbal (Pb) dilaporkan bersifat menghambat, dan dalam kondisi tertentu toksik terhadap reaksi biokimia, tergantung pada konsentrasinya (Mudhoo & Kumar, 2013). Namun, keberadaan zat besi (Fe), tembaga (Cu), seng (Zn), magnesium (Mg), mangan (Mn), dan nikel (Ni) dapat meningkatkan produksi biogas ketika digunakan sebagai suplemen mikronutrien pada digester anaerobik (Mary, Swarnalatha, & Harishma, 2024).

Penambahan zat besi (Fe), nikel (Ni), dan seng (Zn) ke dalam sistem fermentasi yang mengandung tembaga (Cu) menghasilkan akumulasi biogas yang lebih tinggi, peningkatan konsentrasi nitrogen amonia (NH₄⁺-N), serta peningkatan aktivitas koenzim F420 (Tian, et al., 2019). Beberapa strategi telah diterapkan untuk meningkatkan produksi metana dan energi, termasuk penambahan unsur jejak (trace elements) seperti besi, kobalt, molibdenum, dan nikel (Salazar-Batres & Moreno-Andrade, 2025). Logam berat dalam jumlah trace dapat mendukung pencernaan anaerobik, namun penghambatan meningkat seiring bertambahnya konsentrasi (Kadam, Khanthong, Jang, Lee, & Park, 2022). Logam trace berperan sangat penting terhadap kinerja dan stabilitas digester biogas pertanian (Garuti, Langone, Fabbri, & Piccinini, 2018).

4. Analisis Data

Data hasil pengujian logam dianalisis menggunakan pendekatan *Statistical Process Control* (SPC) melalui peta kendali individu dan *moving range* untuk mengevaluasi variabilitas dan konsistensi konsentrasi logam berat (Silva & Borges, 2025). Analisis kapabilitas proses dilakukan menggunakan indeks *Process Potential* (Pp) dan *Process Performance Index* (Ppk),

dipilih karena data kualitas air memiliki variabilitas alami tinggi dan tidak selalu berada dalam kondisi statistical control, sehingga indeks jangka panjang ini lebih representatif untuk menilai kemampuan sumber air memenuhi batas baku mutu yang dipersyaratkan sebagai input biodigester (Montgomery, 2019). Analisis SPC dan kapabilitas proses dilakukan menggunakan Minitab versi 19.

HASIL DAN PEMBAHASAN

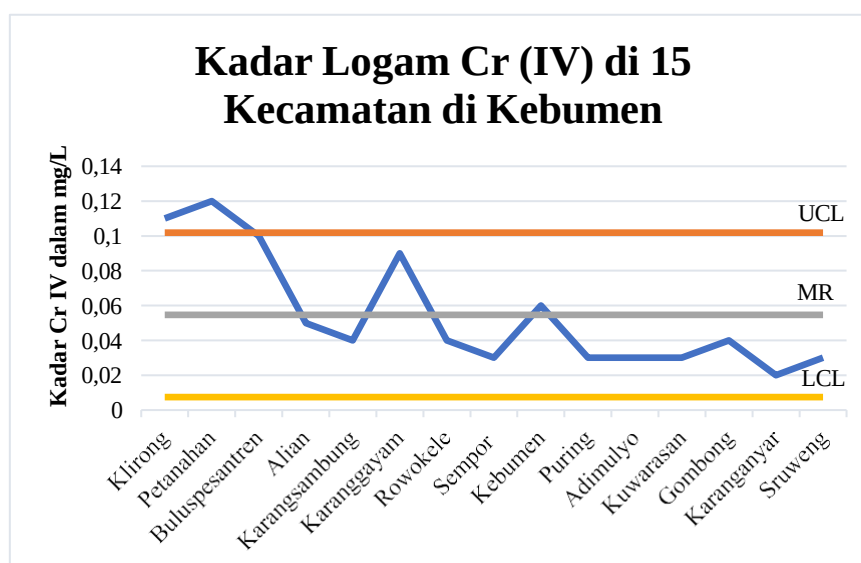
Konsentrasi logam berat (Fe, Cr IV, Cu, Zn) pada 15 kecamatan di Kabupaten Kebumen menunjukkan variasi signifikan antar lokasi. Analisis menggunakan SPC dan indeks kapabilitas proses (Pp, Ppk) diterapkan untuk mengevaluasi konsistensi kualitas air sebagai input biodigester (Puspita, Sari, & Pratama, 2025). Logam seperti Fe dan Zn berperan sebagai mikronutrien yang mendukung metabolisme anaerob, sedangkan Cr IV dan Cu pada konsentrasi tinggi dapat menghambat aktivitas mikroorganisme metanogen (Guo, et al., 2019).

Hasil berikut disajikan berdasarkan masing-masing parameter logam berat untuk menyoroti lokasi kritis, kondisi kapabel, dan rekomendasi tindakan.

1. Sebaran Konsentrasi Logam Berat

Air dari 15 Kecamatan diuji di UPTD Laboratorium Lingkungan, Dinas Lingkungan Hidup, Kelautan dan Perikanan Kabupaten Kebumen. Hasil pengujian disajikan dalam lampiran dengan nomor 660/KBM.021.AP/2024. Data dikelompokkan berdasarkan jenis logam dan asal sumber air, serta dianalisis menggunakan SPC untuk memantau sebaran kuantitas kadar logam dalam sumber air (Janah, Winati, & Febriani, 2023).

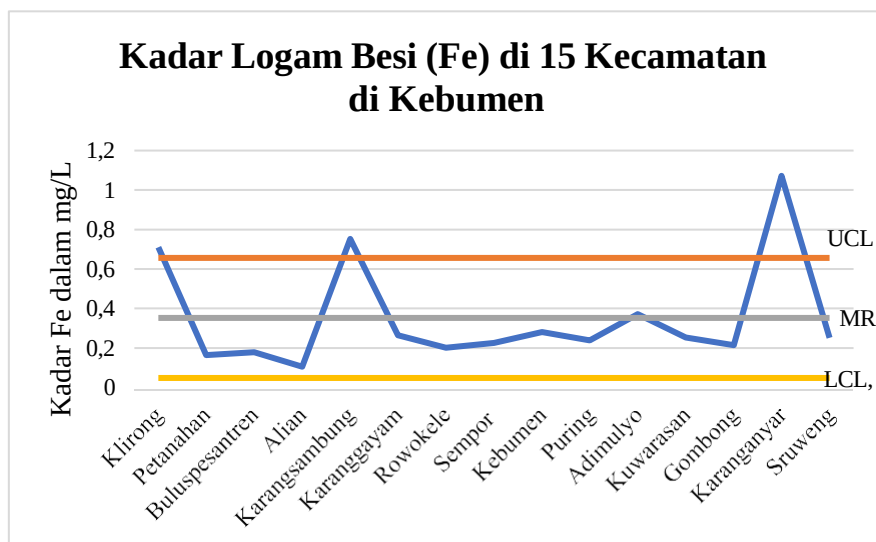
a. Kadar Logam Chromium (Cr) IV



Gambar 1. Sebaran Kadar Logam Cr (IV) di 15 Kecamatan di Kebumen

Gambar 1 menunjukkan sebaran kadar Cr IV di 15 Kecamatan. Dua Kecamatan (Klirong dan Petanahan) memiliki kadar melebihi batas aman untuk biodigester ($>0,67$ mg/L), bersifat toksik bagi mikroorganisme metanogen (Mudhoo & Kumar, 2013).

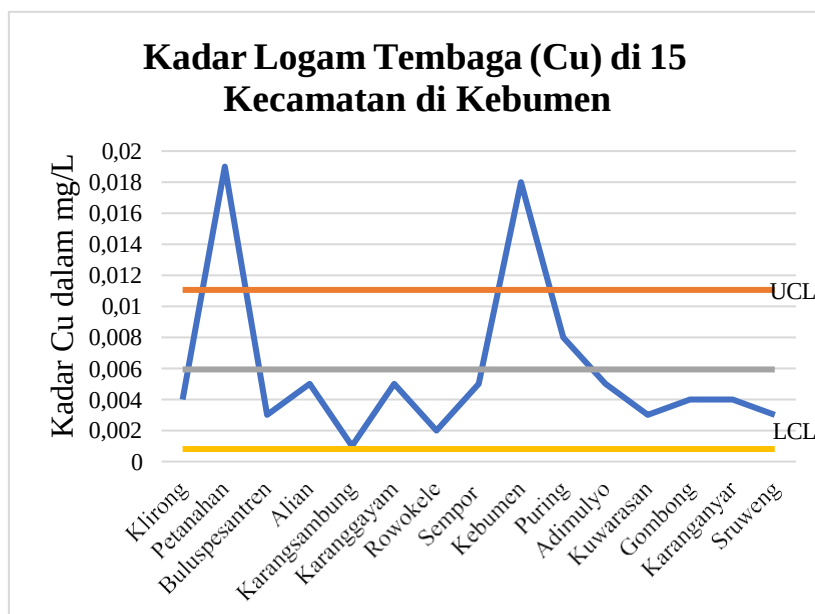
b. Kadar Logam Besi (Fe)



Gambar 2. Sebaran Kadar Logam Fe di 15 Kecamatan di Kebumen

Gambar 2 menunjukkan sumber air di tiga Kecamatan – Klirong, Karangsambung dan Karanganyar - mengandung kadar besi (Fe) melebihi standar aman. Meskipun Fe berperan sebagai kofaktor enzim, konsentrasi tinggi dapat mengganggu aktivitas metanogenesis dalam biodigester (Ariunbaatar, Esposito, Yeh, & Lens, 2016).

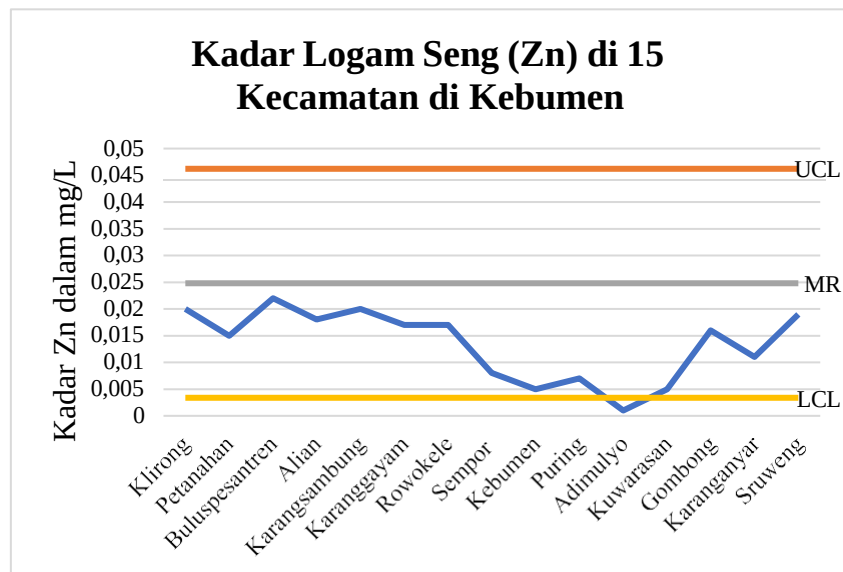
c. Kadar Logam Tembaga (Cu)



Gambar 3. Sebaran Kadar Logam Cu di 15 Kecamatan di Kebumen

Gambar 3 menunjukkan ada dua lokasi (Petanahan dan Kebumen) memiliki kadar logam tembaga (Cu) tinggi, beresiko menghambat aktivitas enzim mikroorganisme, sehingga tidak direkomendasikan sebagai sumber air dalam biodigester (Nguyen, et al., 2019).

d. Kadar Logam Seng (Zn)



Gambar 4. Sebaran Kadar Logam Zn di 15 Kecamatan di Kebumen

Gambar 4 menunjukkan bahwa kadar seng (Zn) pada semua kecamatan berada dalam batas aman sehingga aman digunakan sebagai bahan biodigester. Hanya Adimulyo yang memiliki kadar Zn kurang dari standar yang ditetapkan (Yu, et al., 2023).

2. Evaluasi Parameter Melalui Peta Kendali (*Control Chart*)

Berdasarkan pengolahan data, ditemukan variabilitas yang signifikan antar lokasi pengambilan sampel:

- Kromium (Cr IV): Peta kendali menunjukkan status di luar kendali. Lima kecamatan (Klirong, Petanahan, Buluspesantren, Karanggayam, dan Kebumen) menunjukkan konsentrasi tinggi $\geq 0,67$ mg/L yang bersifat racun bagi mikroorganisme (Mudhoo & Kumar, 2013).
- Zat Besi (Fe): Parameter ini berada dalam kondisi sangat buruk secara statistik. Lonjakan kadar Fe yang melebihi batas aman ditemukan di Klirong, Karangsambung, dan Karanganyar. Meskipun Fe adalah kofaktor enzim, konsentrasi yang ekstrem dapat menghambat aktivitas metanogenik (Zhang, Zhang, & Li, 2015).
- Tembaga (Cu): Menunjukkan variasi yang tidak kapabel di wilayah Petanahan dan Kebumen, di mana kadar yang mendekati 0,02 mg/L berisiko menghambat kerja enzim (Nguyen, et al., 2019).
- Seng (Zn): Merupakan satu-satunya parameter dengan status terkendali/baik. Sebaran data Zn di seluruh kecamatan berada dalam batas aman dan bersifat menguntungkan bagi proses biodigester (Huang, et al., 2024).

3. Analisis Kapabilitas Proses

Indeks kapabilitas digunakan untuk menentukan sejauh mana sumber air dapat memenuhi standar teknis biodigester secara konsisten (Janah, Winati, & Febriani, 2023). Berdasarkan nilai P_{pk} , logam dibagi menjadi dua kategori :

- Kapabel ($P_{pk} \geq 1,0$): Hanya logam Seng (Zn) yang memiliki nilai P_{pk} tinggi (1,568), menunjukkan kualitas air di Kebumen sangat mendukung fungsi Zn sebagai kofaktor metabolisme anaerob.
- Tidak Kapabel ($P_{pk} < 0,67$): Logam Cr IV (-0,052), Fe (0,015), dan Cu (0,389) dikategorikan tidak kapabel. Nilai P_{pk} negatif pada Cr IV mengindikasikan bahwa rata-rata proses telah keluar dari batas spesifikasi aman, sehingga sangat kritis bagi keberlangsungan bakteri metana.

Tabel berikut menyajikan indeks kapabilitas proses (Pp dan Ppk) untuk logam dalam biodigester:

Table 1. Hasil Analisis Kapabilitas Proses

Parameter	Pp	Ppk	Status SPC	Interpretasi Teknis
Cr (IV)	0.26	-0.052	Sangat Kritis	Proses di luar kendali dan sangat toksik.
Fe	0.253	0.015	Sangat Buruk	Perlu perbaikan segera pada sumber air.
Cu	0.575	0.389	Buruk	Variasi terlalu tinggi, risiko inhibisi enzim.
Zn	1.701	1.568	Baik	Kapabel dan mendukung proses anaerob.

Hasil menunjukkan bahwa kandungan Cr (IV) memiliki nilai P_{pk} negatif, menandakan rata-rata proses berada di luar spesifikasi dan sangat kritis bagi mikroba, sehingga pemantauan ketat diperlukan untuk mencegah gangguan pada pembentukan gas metana (Mudhoo & Kumar, 2013). Kandungan Fe menunjukkan konsentrasi tinggi yang berpotensi menghambat proses, meskipun secara teknis Fe tetap diperlukan sebagai kofaktor enzim agar reaksi biokimia berjalan optimal (Ariunbaatar, Esposito, Yeh, & Lens, 2016). Sementara itu, Cu masih berada dalam batas aman, tetapi variasinya cukup tinggi sehingga pengendalian perlu dilakukan untuk mengurangi risiko inhibisi enzim (Nguyen, et al., 2019). Sedangkan Zn stabil, berada dalam kondisi kapabel, dan mendukung metabolisme anaerobik dalam biodigester (Yu, et al., 2023).

4. Rekomendasi Tindakan

Berdasarkan hasil kapabilitas proses pada Tabel 1, tindakan korektif dirancang untuk menjaga kualitas air sebagai input biodigester. Tindakan ini difokuskan pada parameter logam berat yang berada di luar batas spesifikasi, berisiko menghambat aktivitas mikroorganisme, atau menunjukkan variasi yang tidak stabil. Rekomendasi berikut menyajikan langkah praktis, dampak regulasi, dan kecamatan sasaran:

Tabel 2. Rekomendasi dan Dampak

Parameter	Rekomendasi	Dampak Regulasi	Kecamatan Sasaran
Cr (IV)	Investigasi segera	Stop Operasi	Klirong, Petanahan, Buluspesantren, Karanggayam
Fe	Sangat buruk	Tidak kapabel perlu perbaikan segera	Klirong, Karangsambung, Adimulyo, Karanganyar
Cu	Buruk	Tidak kapabel perlu pengurangan variasi	Petanahan
Zn	Baik	Menguntungkan	Semua Kecamatan aman

Berdasarkan hasil kapabilitas proses, tindakan korektif disusun untuk masing-masing logam berat. Logam Cr (IV) memerlukan investigasi segera karena konsentrasinya melebihi batas aman bagi mikroorganisme metanogen, sehingga untuk kecamatan Klirong, Petanahan, Buluspesantren, dan Karanggayam disarankan penghentian operasi sementara. Fe menunjukkan kondisi sangat buruk di beberapa lokasi, sehingga tindakan perbaikan segera diperlukan di Klirong, Karangsambung, Adimulyo, dan Karanganyar untuk menurunkan kadar dan menstabilkan proses biodigester. Cu masih berada dalam batas aman, namun variasinya cukup tinggi sehingga pengurangan variasi dianjurkan, khususnya di Petanahan. Sementara itu, Zn berada dalam kondisi baik dan mendukung metabolisme anaerob, sehingga semua

kecamatan relatif aman, meskipun pemantauan tetap disarankan untuk menjaga konsistensi kualitas air.

5. Detail Analisis per Sampel

Guna memberikan panduan teknis yang lebih rinci, analisis setiap kecamatan disajikan dalam Tabel 3. Data mencakup kadar logam berat, status kendali SPC, kapabilitas, kesiapan hayati, dan tindakan yang direkomendasikan. Penyajian ini memudahkan evaluasi spesifik tiap lokasi, sehingga pengelola biodigester dapat menyesuaikan strategi pengolahan air sesuai kondisi masing-masing kecamatan.

Tabel 3. Detail SPC Analisis Biodigester per Sampel

No	Kecamatan	Kadar dalam mg/L				Status SPC		Assesmen Biodigester	
		Chromium (Cr IV)	Besi (Fe)	Tembaga (Cu)	Seng (Zn)	Status Kendali	Kapabilitas	Kesiapan Hayati	Tindakan
1	Klirong	0.11	0.711	0.004	0.02	Diluar kendali	Tidak mampu	Kritis	Proses perbaikan Perlu
2	Petanahan	0.12	0.164	0.019	0.015	Diluar kendali	Buruk	Buruk	perlakuan pendahuluan Perlu
3	Buluspesantren	0.1	0.178	0.003	0.022	Diluar kendali	Buruk	Buruk	pengendalian proses Dipantau
4	Alian	0.05	0.105	0.005	0.018	Potensi masalah	Dapat diterima	Bagus	dengan seksama
5	Karangsambung	0.04	0.752	0.001	0.02	Potensi masalah	Dapat diterima	Bagus	Dipantau dan dikendalikan
6	Karangayam	0.09	0.265	0.005	0.017	Diluar kendali	Buruk	Buruk	Perlu penyelidikan dan Perbaikan
7	Rowokele	0.04	0.201	0.002	0.017	Terkendali	Sangat baik	Sangat Baik	Proses kontinyu
8	Sempor	0.03	0.226	0.005	0.008	Dapat dikendalikan	Dapat diterima	Bagus	Praktik baik
9	Kebumen	0.06	0.281	0.018	0.005	Diluar kendali	Buruk	Buruk	Pengendalian ditingkatkan
10	Puring	0.03	0.238	0.008	0.007	Dapat dikendalikan	Dapat diterima	Bagus	Proses stabil
11	Adimulyo	0.03	0.371	0.005	0.001	Dapat dikendalikan	Dapat diterima	Bagus	Proses stabil
12	Kuwarasan	0.03	0.253	0.003	0.005	Dapat dikendalikan	Dapat diterima	Bagus	Proses stabil
13	Gombang	0.04	0.214	0.004	0.016	Dapat dikendalikan	Dapat diterima	Bagus	Proses stabil
14	Karanganyar	0.02	1.072	0.004	0.011	Potensi masalah	Dapat diterima	Bagus	Dipantau kadar Fe
15	Sruweng	0.03	0.251	0.003	0.19	Dapat dikendalikan	Dapat diterima	Bagus	Proses stabil

Analisis ini mengintegrasikan seluruh parameter logam untuk menilai stabilitas proses dan kesiapan hayati air sebagai input biodigester.

6. Sinkronisasi Hasil SPC dan Asesmen Biodigester

Setelah analisis per logam dan per kecamatan, hasil SPC dan indeks kapabilitas dikombinasikan untuk mengklasifikasikan kesiapan hayati air di setiap kecamatan. Klasifikasi ini mengelompokkan kecamatan menjadi tiga kategori: Sangat Baik, Dapat Diterima, dan Buruk/Kritis. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan operasional biodigester yang lebih tepat, termasuk identifikasi lokasi yang memerlukan pemantauan intensif atau tindakan *pretreatment*. Berdasarkan evaluasi ini:

- a. Kriteria Sangat Baik: Kecamatan Rowokele menjadi satu-satunya wilayah dengan status terkendali dan sangat baik pada semua parameter, sehingga direkomendasikan untuk proses kontinyu.
- b. Kriteria Dapat Diterima: Terdapat 8 kecamatan (Sempor, Gombong, Puring, Adimulyo, Kuwarasan, Karanganyar, Alian dan Sruweng) yang dinilai memiliki potensi namun tetap memerlukan pemantauan ketat, terutama pada kadar Fe.
- c. Kriteria Buruk/Kritis: Kecamatan Klirong, Petanahan, Buluspesantren, Karangsambung, Karanggayam, dan Kebumen memerlukan tindakan perbaikan atau perlakuan pendahuluan (*pretreatment*) sebelum air digunakan sebagai input biodigester.

7. Ringkasan Statistik

Statistik proses diukur menggunakan tingkat sigma dan kesiapan biodigester total. Hasil ini menunjukkan gambaran efisiensi pengendalian kualitas air secara keseluruhan serta parameter kritis yang perlu mendapat perhatian prioritas.

- a. Tingkat Sigma Proses: $3,2 \sigma$ – menunjukkan variabilitas proses sedang.
- b. Kesiapan Biodigester Total: 73% – sebagian besar kecamatan memenuhi syarat dasar untuk operasi.
- c. Parameter Kritis: 2 dari 4 (Fe dan Cr IV) – memerlukan pengendalian lebih ketat untuk menjaga stabilitas metabolisme anaerob.

Data ini membantu pengambil keputusan untuk prioritas pengelolaan kualitas air di wilayah penelitian.

KESIMPULAN

Berdasarkan penerapan Statistical Process Control (SPC) dan analisis kapabilitas proses (Pp/Ppk), penelitian ini menyimpulkan bahwa kualitas air sebagai input biodigester di 15 kecamatan di Kabupaten Kebumen menunjukkan variasi spasial yang signifikan, dengan kandungan logam berat Cr(IV) dan Fe pada beberapa lokasi (seperti Klirong, Petanahan, Karangsambung, dan Karanganyar) melebihi batas aman sehingga berpotensi menghambat proses anaerob dan menurunkan efisiensi produksi biogas. Hanya parameter Zn yang secara konsisten memenuhi kriteria kapabilitas dan mendukung metabolisme mikroba. Oleh karena itu, diperlukan tindakan segera berupa pemantauan rutin, *pretreatment* air pada lokasi kritis, serta penerapan SPC secara berkelanjutan untuk menjamin konsistensi kualitas air. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memperluas cakupan parameter logam berat lainnya (seperti Cd, Pb, dan Ni), mengintegrasikan analisis multivariat dan pemodelan kualitas air dengan faktor geokimia serta sumber pencemar, serta menguji efektivitas teknologi *pretreatment* spesifik dalam menurunkan kadar logam berat agar air layak digunakan sebagai input biodigester yang optimal dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abubakar, A. M. (2022). Biodigester and Feedstock Type: Characteristic, Selection, and Global Biogas Production. *Journal of Engineering Research and Sciences*, Vol. 1, Issue 3, Page 170-187. <https://doi.org/10.55708/js0103018>.
- Afrianti, S., Irvan, I., Nur, T. B., & Delvian, D. (2023). Model combination of biodigester and composter. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, Vol. 21, no. 1. pp. 151-159. <https://doi.org/10.22124/cjes.2023.6206>.
- Agustin, A. W., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Potensi Pemanfaatan Biogas Dari Sampah Organik Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Sains dan Teknologi*, Vol. 2 No. 6. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i6.2841>.

- Andari, M. Z., Hastuti, F. D., Risha, H. T., Ridoni, I., Arissa, P., Yunas, M. A., . . . Asroni, A. (2025). Pemanfaatan Biogas Sebagai Sumber Energi Terbarukan di Dusun Jambu. Prosiding Seminar Nasional Program Pengabdian Masyarakat-Rekonstruksi Pendidikan di Indonesia, 8(1). <https://doi.org/10.18196/ppm.81.1316>.
- Ariunbaatar, J., Esposito, G., Yeh, D. H., & Lens, P. (2016). Enhanced Anaerobic Digestion of Food Waste by Supplementing Trace Elements: Role of Selenium (VI) and Iron (II). *Frontiers in Environmental Science*, 4(8). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00008>.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen. (2023). Kabupaten Kebumen Dalam Angka 2023. Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen. (2024). Kabupaten Kebumen Dalam Angka 2024. Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen. (2025). Kabupaten Kebumen Dalam Angka 2025. Badan Pusat Statistik Kabupaten Kebumen.
- Garuti, M., Langone, M., Fabbri, C., & Piccinini, S. (2018). Methodological approach for trace elements supplementation in anaerobic digestion: Experience from full-scale agricultural biogas plants. *Journal of Environmental Management*, 348-357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.015>.
- Geng, H., Xu, Y., Dai, X., & Yang, D. (2024). Abiotic and biotic roles of metals in the anaerobic digestion of sewage sludge: A review. *Science of The Total Environment*, Vol. 912, 169313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169313>.
- Guo, Q., Majeed, S., Xu, R., Zhang, K., Kakade, A., Khan, A., . . . Li, X. (2019). Heavy metals interact with the microbial community and affect biogas production in anaerobic digestion: A review. *Journal of Environmental Management*, 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.104>.
- Huang, Z., Niu, Q., He, S., Li, X., Qian, C., He, Y., & Yang, C. (2024). Effects of long-term exposure to zinc on performances of anaerobic digesters for swine wastewater treatment under various organic loading rates. *Chemosphere*, Vol. 363. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142843>.
- Janah, A. N., Winati, F. D., & Febriani, A. (2023). Analisis Kapabilitas sebagai Evaluasi Pengolahan Limbah Cair dengan. Prosiding Seminar Nasional Teknik Industri (SENASTI), 251-260.
- Jesus, R. H., Souza, J. T., Puglieri, F. N., Piekarski, C. M., & Francisco, A. C. (2021). Biodigester location problems, its economic–environmental–social aspects and techniques: Areas yet to be explored. *Energy Reports*, Vol. 7, 3998-4008. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.090>.
- Kadam, R., Khanthong, K., Jang, H., Lee, J., & Park, J. (2022). Occurrence, Fate, and Implications of Heavy Metals during Anaerobic Digestion: A Review. *Energies*, 15(22), 8618. <https://doi.org/10.3390/en15228618>.
- Kipsang, N. K., Kibet, J., & Adongo, J. O. (2022). The use of water quality index and water pollution index in assessing the water quality and suitability of the river Molo water basin, Kenya. *East African Journal of Science, Technology and Innovation*, 3(4). <https://doi.org/10.37425/eajsti.v3i4.501>.
- Mary, C. T., Swarnalatha, K., & Harishma, S. J. (2024). Experimental analysis on the effects of trace metals as micronutrients in enhancing biomethane production. *Sustainable Energy Research*, Volume 11, no 3. <https://doi.org/10.1186/s40807-023-00093-w>.

- Montgomery, D. C. (2019). *Statistical Quality Control: A Modern Introduction*. 8th Edition. John Wiley & Sons.
- Nguyen, Q.-M., Bui, D.-C., Phuong, T., Doan, V.-H., Nguyen, T.-N., Nguyen, M.-V., . . . Do, Q.-T. (2019). Investigation of Heavy Metal Effects on the Anaerobic Co-Digestion Process of Waste Activated Sludge and Septic Tank Sludge. *International Journal of Chemical Engineering*, Issue 1. <https://doi.org/10.1155/2019/5138060>.
- Ponsethuraman, M., & Ethiraj, B. (2025). Comparison of biogas production from the anaerobic treatment of Cauliflower stem with Cow dung in biodigester. *Dalam Applications of Mathematics in Science and Technology*. 1st Edition (hal. 4). CRC Press.
- Puspita, A., Sari, S. P., & Pratama, A. P. (2025). Multivariate statistical process monitoring of reservoir water quality using MEWMA and MEWMV control charts. *Journal Industrial Servicess*, 11(2). <https://doi.org/10.62870/jiss.v11i2.35763>.
- Raudhatunnisa, S., & Gusri, L. (2025). Pemanfaatan Biogas Skala Rumah Tangga Sebagai Sumber Energi Alternatif Berkelanjutan. *Jurnal Ilmiah Nusantara* , Vol. 2 No. 3. <https://doi.org/10.61722/jinu.v2i3.6095>.
- Raymundo, V., Esenarro, D., Rodríguez, C., Davila, S., Prado, M., & Veliz, M. (2023). Biodigester Application to Generate Electricity and Improve the Quality of Life. *Proceedings of 7th ASRES International Conference on Intelligent Technologies* (hal. 29-42). https://doi.org/10.1007/978-981-99-1912-3_3.
- Salazar-Batres, K. J., & Moreno-Andrade, I. (2025). Review of the Effects of Trace Metal Concentrations on the Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste. *BioEnergy Research* , 18, 24. <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10826-y>.
- Silva, G. J., & Borges, A. C. (2025). Statistical Process Control in the Environmental Monitoring of Water Quality and Wastewaters: A Review. *Water*, 17, 1281. <https://doi.org/10.3390/w17091281>.
- Silva, G. J., Borges, A. C., Moreira, M. C., & Rosa, A. P. (2022). Statistical process control in assessing water quality in the Doce river basin after the collapse of the Fundão dam (Mariana, Brazil). *Journal of Environmental Management*, Vol 317, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115402>.
- Stolecka, K., & Rusin, A. (2021). Potential hazards posed by biogas plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Vol. 135(C). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110225>.
- Tangko, J., Sonong, S., S, M. A., & Salam, J. (2018). ANALISIS FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PRODUKSI BIOGAS DARI LIMBAH TERNAK DI KEC. BAROKO KAB. ENREKANG. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, Vol. 16 (1). <https://doi.org/10.31963/sinergi.v16i1.1203>.
- Tian, Y., Zhang, H., Zheng, L., Li, S., Hao, H., Yin, M., . . . Huang, H. (2019). Process Analysis of Anaerobic Fermentation Exposure to Metal Mixtures. *International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH)*, 16(14), 2458. <https://doi.org/10.3390/ijerph16142458>.
- Wallace, N., Mai, J., Mukherjee, U., Grant, B., Smith, W., & Basu, N. B. (2023). A circular solution to manure management: Can biodigesters improve water quality and reduce greenhouse gas emissions? *CSBE/SCGAB 2023 Annual Conference*. Winnipeg, Manitoba.

- Yu, L., Kim, D.-G., Ai, P., Yuan, H., Ma, J., Zhao, Q., & Chen, S. (2023). Effects of Metal and Metal Ion on Biomethane Productivity during Anaerobic Digestion of Dairy Manure. *Fermentation*, 9(3), 262. <https://doi.org/10.3390/fermentation9030262>.
- Zhang, W., Zhang, L., & Li, A. (2015). Enhanced anaerobic digestion of food waste by trace metal elements supplementation and reduced metals dosage by green chelating agent [S, S]-EDDS via improving metals bioavailability. *Water Research*, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.010>.



© 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).