Terbit *online* pada laman web jurnal :http://jurnaldampak.ft.unand.ac.id/

Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas

| ISSN (Print) 1829-6084 |ISSN (Online) 2597-5129|

Artikel Penelitian

Karakterisasi Air Limbah Industri Kecil dan Menengah (IKM) Tempe serta Estimasi Teoretis Potensi Pemulihan Energi Berbasis Metana di Kota Padang

Syawal Andika Putra, Fajrul Ikhsan, Dewi Yusnisa Putri, Alqadri Asri Putra[*)]

Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

*Koresponden: alqadriasriputra@eng.unand.ac.id

Diterima: 3 Mei 2026 Diperbaiki: 13 Juni 2026 Disetujui: 28 Juli 2026

ABSTRACT

Small and medium-sized tempe enterprises (SMEs) generate high-strength organic wastewater that can pollute the environment if discharged untreated, yet it also offers potential for renewable energy recovery through anaerobic treatment. This theoretical assessment combines a literature review on the characteristics and treatment technologies of tempe wastewater in Indonesia with direct measurements from two household-scale tempe SMEs in Padang City as reference data. The study aimed to analyze tempe wastewater characteristics and estimate its theoretical methane potential based on Chemical Oxygen Demand (COD). Grab samples were analyzed for pH, COD, Biochemical Oxygen Demand (BOD), and Total Suspended Solids (TSS), and methane potential was calculated using a conversion factor of 0.35 m^3 CH_4/kg COD removed. COD concentrations ranged from 26,076.70 to 26,617.44 mg/L, and BOD/COD ratios ranged from 0.13 to 0.47, indicating different biodegradability levels between the two samples. Theoretical methane potential was 9.13-9.32 m^3 CH_4/m^3 of wastewater. Under anaerobic treatment scenarios using literature-reported COD removal efficiencies and an assumed flow rate of 4.395 m^3/day, theoretical methane production was estimated at 24.51-29.22 m^3 CH_4/day, equivalent to a gross energy potential of up to 113.52 kWh/day or 22.40 kg LPG/day. These findings indicate considerable energy recovery potential from tempe SME wastewater. However, the results are theoretical estimates based on wastewater characteristics, literature data, and calculation assumptions, so further studies using actual operational data and pilot-scale reactor experiments are needed for validation.

Keyword: Anaerobic Treatment, Biogas, Chemical Oxygen Demand (COD), Tempe Production Wastewater, Theoretical Methane Potential.

ABSTRAK

Air limbah usaha kecil dan menengah (UKM) tempe berkadar organik tinggi sehingga berisiko mencemari lingkungan bila dibuang tanpa pengolahan, namun juga berpotensi dimanfaatkan sebagai energi terbarukan melalui pengolahan anaerobik. Studi ini merupakan kajian teoretis yang menggabungkan tinjauan pustaka tentang karakteristik dan teknologi pengolahan limbah tempe di Indonesia dengan pengukuran langsung pada dua UKM tempe skala rumah tangga di Kota Padang sebagai data acuan. Tujuannya adalah menganalisis karakteristik air limbah tempe dan memperkirakan potensi metana teoretisnya berdasarkan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Sampel diambil dengan metode grab sampling dan dianalisis untuk pH, COD, BOD, dan TSS. Potensi metana dihitung dengan faktor konversi 0,35 m^3 CH_4/kg COD tersisihkan. Hasil menunjukkan konsentrasi COD sebesar 26.076,70-26.617,44 mg/L dan rasio BOD/COD 0,13-0,47, yang menandakan tingkat biodegradabilitas berbeda antar kedua sampel. Potensi metana teoretis mencapai 9,13-9,32 m^3 CH_4/m^3 air limbah. Berdasarkan skenario pengolahan anaerobik dengan efisiensi penyisihan COD dari literatur dan debit asumsi 4,395 m^3/hari, produksi metana teoretis diperkirakan 24,51-29,22 m^3 CH_4/hari, setara potensi energi kotor hingga 113,52 kWh/hari atau 22,40 kg LPG/hari. Temuan ini menunjukkan air limbah UKM tempe berpotensi besar untuk pemulihan energi melalui pengolahan anaerobik. Namun, hasil ini merupakan estimasi teoretis berdasarkan karakteristik air limbah, data literatur, dan asumsi perhitungan, sehingga diperlukan studi lanjutan dengan data operasional aktual dan eksperimen reaktor skala pilot untuk validasi.

Kata Kunci: Pengolahan Anaerobik, Biogas, *Chemical Oxygen Demand* (COD), Air Limbah Produksi Tempe, Potensi Metana Teoretis

https://doi.org/10.25077/dampak.23.2.114-123.2026 Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International.

1. PENDAHULUAN

Industri kecil dan menengah (IKM) tempe merupakan salah satu sektor produksi pangan yang tersebar luas di berbagai daerah di Indonesia, termasuk Kota Padang. Meskipun proses produksinya umumnya berskala kecil, IKM tempe menghasilkan air limbah dengan kandungan bahan organik yang tinggi. Air limbah tersebut umumnya mengandung *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solid*s (TSS), senyawa nitrogen, serta minyak dan lemak. Apabila dibuang tanpa pengolahan yang memadai, air limbah tersebut berpotensi menurunkan kualitas badan air dan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan serta kesehatan masyarakat (Astuti et al., 2024) . Di sisi lain, kandungan bahan organik yang tinggi juga memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui proses biologis, seperti produksi biogas maupun bioelektrisitas (Preethi et al., 2019).

Potensi pemanfaatan tersebut telah ditunjukkan pada berbagai jenis air limbah IKM dengan konsentrasi organik tinggi. Putra et al. (2020), misalnya, melaporkan bahwa *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) mampu menyisihkan sekitar 98% COD dari air limbah industri *fishmeal* yang memiliki konsentrasi COD sangat tinggi (±140 g/L) dan menghasilkan biogas melalui aktivitas mikroba anaerob. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa meskipun limbah memiliki tantangan berupa tingginya kandungan minyak dan lemak serta komposisi bahan organik yang kompleks, proses anaerob tetap dapat berlangsung secara efektif apabila kondisi reaktor terjaga dengan baik. Penelitian oleh Musa et al. (2018) menunjukkan bahwa peningkatan *Organic Loading Rate* yang direpresentasikan oleh meningkatnya konsentrasi COD berkorelasi dengan peningkatan potensi produksi metana pada reaktor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). Temuan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik COD dapat digunakan sebagai salah satu dasar dalam mengestimasi potensi metana secara teoretis.

Berdasarkan hasil observasi awal pada lokasi penelitian, pengelolaan air limbah pada IKM tempe yang menjadi objek penelitian masih dilakukan secara sederhana dan belum dilengkapi dengan sistem pengolahan air limbah yang memadai. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya kajian karakteristik air limbah sebagai dasar dalam menentukan alternatif teknologi pengolahan yang sesuai. Data karakteristik air limbah yang representatif menjadi informasi penting dalam perencanaan sistem pengolahan maupun estimasi potensi pemulihan energi berbasis metana. Perancangan sistem pengolahan air limbah IKM tempe memerlukan data karakteristik air limbah yang valid dan representatif sebagai dasar pemilihan teknologi pengolahan yang sesuai. Berbagai penelitian telah melaporkan karakteristik air limbah IKM tempe di berbagai wilayah Indonesia serta mengevaluasi berbagai alternatif teknologi pengolahannya, baik pada skala laboratorium maupun skala yang lebih besar (Nurhayati et al., 2024).

Namun, karakteristik air limbah IKM tempe dipengaruhi oleh variasi bahan baku, penggunaan air, kapasitas produksi, penggunaan air proses, dan praktik operasional pada masing-masing industri, sehingga hasil penelitian dari suatu wilayah tidak dapat secara langsung dijadikan dasar dalam perancangan sistem pengolahan di wilayah lain. Oleh karena itu, karakterisasi air limbah IKM tempe di Kota Padang diperlukan untuk menyediakan data spesifik lokasi sebagai dasar pemilihan teknologi pengolahan serta estimasi teoretis potensi pemulihan energi berbasis metana. Informasi tersebut diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem pengolahan air limbah yang efektif, sesuai dengan karakteristik lokal, skala usaha, dan ketersediaan sumber daya pada IKM tempe. Dalam penelitian ini, potensi metana tidak diukur secara eksperimental melalui uji *Biochemical Methane Potential* (BMP) maupun pengoperasian reaktor anaerob, tetapi diestimasi secara teoretis berdasarkan karakteristik COD. Pendekatan ini digunakan sebagai tahap awal untuk menilai potensi pemulihan energi dari air limbah IKM tempe sebelum dilakukan pengujian eksperimental pada penelitian lanjutan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik air limbah IKM tempe di Kota Padang serta mengestimasi potensi metana teoretis berdasarkan karakteristik COD sebagai dasar untuk menilai potensi pemulihan energi. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kesesuaian alternatif teknologi pengolahan air limbah yang dapat diterapkan pada IKM tempe berdasarkan karakteristik air limbah, skala usaha, dan kondisi lokal.

2. METODOLOGI

2.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik air limbah IKM tempe serta teknologi pengolahan yang telah diterapkan di Indonesia sebagai dasar penyusunan penelitian ini. Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data Google Scholar, Scopus, dan Garuda terhadap publikasi periode 2011-2025 menggunakan kata kunci *tempe wastewater*, *tempe industry wastewater*, *air limbah tempe*, *wastewater treatment*, *anaerobic*

treatment, *biogas*, dan *Indonesia*. Kriteria inklusi meliputi publikasi yang membahas air limbah produksi tempe, menyajikan data karakteristik seperti COD, BOD, TSS, atau pH, dan/atau mengevaluasi teknologi pengolahan anaerob serta potensi metana. Publikasi yang tidak berkaitan dengan air limbah produksi tempe, tidak menyajikan data atau informasi yang relevan dengan tujuan kajian, dan tidak memiliki sumber yang dapat ditelusuri dikecualikan. Literatur yang dipilih meliputi artikel jurnal, prosiding ilmiah, serta dokumen teknis dari berbagai wilayah di Indonesia. Nilai efisiensi penyisihan COD dari penelitian terdahulu dan digunakan sebagai dasar skenario estimasi teoretis potensi metana. Hasil studi literatur digunakan sebagai dasar untuk membandingkan karakteristik air limbah penelitian ini dengan penelitian sebelumnya serta mengevaluasi alternatif teknologi pengolahan.

2.2. Observasi Lapangan dan Pengambilan Sampel

Observasi lapangan dilakukan pada dua IKM tempe skala rumah tangga di Kota Padang yang dipilih sebagai lokasi penelitian berdasarkan kesediaan pelaku usaha untuk berpartisipasi serta masih membuang air limbah langsung ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan (IKM A dan IKM B). Observasi dilakukan untuk mengidentifikasi proses produksi tempe, sumber pembentukan air limbah, serta kondisi eksisting pengelolaan air limbah pada masing-masing IKM. Pengambilan sampel air limbah dilakukan pada Sabtu, 9 Agustus 2025, menggunakan metode *grab sampling*, yaitu pengambilan sampel sesaat pada saat proses produksi berlangsung. Sampel diambil pada bagian pembuangan akhir sebelum air limbah dibuang ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan. Setiap IKM diwakili oleh satu sampel untuk analisis karakteristik awal. Setelah pengambilan sampel langsung dibawa ke Laboratorium Penelitian Departemen Teknik Lingkungan (DTL), Universitas Andalas (Unand) untuk dianalisis. Informasi kuantitatif mengenai kapasitas produksi masing-masing IKM juga tidak diperoleh dari pelaku usaha. Oleh karena itu, kapasitas produksi tidak digunakan sebagai data aktual kedua IKM. Data hasil pengujian digunakan sebagai data dasar (*baseline data*) pada lokasi penelitian sekaligus sebagai pembanding dan validasi terhadap karakteristik air limbah industri tempe yang telah dilaporkan pada berbagai penelitian di Indonesia. Penelitian ini merupakan studi pendahuluan sehingga hasil yang diperoleh hanya merepresentasikan dua IKM yang diamati dan tidak dimaksudkan untuk mewakili seluruh karakteristik air limbah IKM tempe di Kota Padang.

2.3. Uji Karakteristik Awal Air Limbah Produksi Tempe

Uji karakteristik air limbah produksi tempe dilakukan terhadap parameter pH (*Potential Hydrogen*), BOD, COD, dan TSS. Pengukuran pH dilakukan menggunakan multifunction pH-TDS-EC-temperature meter (EZ 9908, China) sesuai SNI 6989.11:2019. Analisis COD menggunakan metode refluks tertutup sesuai SNI 6989.02:2019, melalui oksidasi menggunakan kalium dikromat dalam suasana asam, kemudian konsentrasinyaditentukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-2600, Japan). Analisis BOD dilakukan berdasarkan SNI 6989.72:2009 tentang Air dan Air Limbah-Bagian 72: Metode Pengujian Kebutuhan Oksigen Biokimia (*Biochemical Oxygen Demand*/BOD). Sementara itu,analisis TSS dilakukan menggunakan metode gravimetri sesuai SNI 6989.3:2019, yang meliputi proses filtrasi, pengeringan pada suhu 103–105 °C menggunakan oven (Yamato DKN 401, Japan), dan penimbangan hingga berat konstan menggunakan neraca analitik (Shimadzu ATX224R, Japan). Untuk sampel dengan konsentrasi yang melampaui rentang pengukuran metode, pengenceran dilakukan sebelum analisis sesuai prosedur standar yang berlaku. Pengujian juga mencakup penggunaan blanko dan kalibrasi instrumen yang relevan sesuai dengan metode standar masing-masing parameter untuk mendukung keandalan hasil pengukuran.

2.4. Pengolahan Data dan Evaluasi

Data karakteristik air limbah yang diperoleh dari hasil analisis laboratorium dibandingkan dengan karakteristik air limbah IKM tempe yang dilaporkan pada penelitian terdahulu di berbagai wilayah Indonesia. Selanjutnya, dilakukan estimasi potensi metana teoretis (*Theoretical Methane Potential*, TMP) berdasarkan konsentrasi COD sebagai indikator kandungan bahan organik yang berpotensi dikonversi menjadi metana melalui proses pengolahan anaerob. Estimasi potensi metana teoretis dihitung menggunakan faktor konversi sebesar 0,35 m^3 CH_4/kg COD pada kondisi *Standard Temperature and Pressure* (STP), yang merupakan nilai teoretis maksimum konversi COD menjadi metana (Tchobanoglous et al., 2014). Perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan (1):

$$TMP = [COD] \times 0{,}35 \quad (1)$$

Keterangan:
TMP = estimasi potensi metana teoretis (m^3 CH_4/hari)
[COD] = konsentrasi COD (kg/m^3)

0,35 = faktor konversi teoretis COD menjadi metana pada kondisi STP (m^3 CH_4/kg COD)

Nilai debit air limbah (Q) pada penelitian ini tidak diukur secara langsung, tetapi diestimasi berdasarkan data yang dilaporkan pada penelitian terdahulu mengenai IKM tempe skala rumah tangga di Indonesia. Perhitungan dilakukan dengan asumsi bahwa seluruh COD yang dapat terdegradasi dikonversi menjadi metana, sedangkan fraksi COD yang digunakan untuk pembentukan biomassa serta kehilangan metana selama proses biologis diabaikan. Oleh karena itu, nilai yang diperoleh merupakan estimasi potensi metana teoretis dan bukan produksi metana aktual. Estimasi potensi metana teoretis digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi potensi pemulihan energi dari air limbah IKM tempe dan memberikan gambaran awal mengenai peluang penerapan teknologi pengolahan anaerob pada skala IKM. Pendekatan ini dimaksudkan sebagai evaluasi awal sehingga hasil yang diperoleh perlu divalidasi melalui pengukuran produksi metana secara eksperimental pada penelitian selanjutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Air Limbah Produksi Tempe

Data karakteristik air limbah produksi tempe diperoleh dari beberapa penelitian yang telah dilakukan di berbagai daerah di Indonesia serta hasil pengujian dua sampel air limbah produksi tempe pada IKM di Kota Padang. Perbandingan karakteristik awal air limbah tersebut disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Awal Air Limbah Industri Tempe Pada Berbagai Penelitian di Indonesia

Tahun	Lokasi	Status Sampel	pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	Teknologi Pengolahan yang Diterapkan	Referensi
2011	Sidoarjo	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,80	3.102	1.634	1.945	*Biofilter*	Nurhayati et al.
2017	Semarang	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,01	4.188,27	1.302,03	4.012	Filtrasi dan Fitoremediasi	Puspawati et al.
2018	Surabaya	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,62	32.000	17.021	1,275	Tidak diolah	Purwanti et al.
2018	Karawang	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	-	27.000	14.000	1.000	*Biogas Digester*	Puspawati & Soesilo
2022	Indonesia	Air limbah produksi (perebusan)	4,00-5,00	351,54	174,65	655,20	Tidak diolah	Praminingsih et al.
2022	Sidoarjo	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,36	90.597,	37.843	6.580	*Sand Filter*	Mulia & Syafiuddin
2023	Palembang	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	3,90	791,00	97,00	1.042	Zeolit Absorben	Cundari et al.
2024	Surabaya	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,14	24.715,45	11.333,33	601,67	*Vermifilter*	Nurhayati et al.
2024	Plaju Ulu	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	5,30	45.332,80	295,00	1.165	Tidak diolah	Destri et al.
2024	Semarang	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,30	28.000	369,00	0,91	Tidak diolah	Lestiyanto et al.
2025	Bangkalan	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,50-5,20	16.000,	13.000	-	*Anoxic reactor*	Hidayatullah & Hendrasarie
2025	Padang	Air limbah produksi	-	26.617,44	3.360,54	1.413,33	Tidak diolah	Penelitian ini

Tahun	Lokasi	Status Sampel	pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TSS (mg/L)	Teknologi Pengolahan yang Diterapkan	Referensi
	(IKM A)	(pencucian dan perebusan)						
2025	Padang (IKM B)	Air limbah produksi (pencucian dan perebusan)	4,48	26.076,70	12.208,70	3.760,00	Tidak diolah	Penelitian ini

Keterangan: Seluruh data yang disajikan merupakan karakteristik air limbah sebelum proses pengolahan sebagaimana dilaporkan pada masing-masing penelitian. Kolom "Teknologi Pengolahan yang Diterapkan" hanya memberikan informasi mengenai sistem pengolahan air limbah yang tersedia pada lokasi penelitian dan tidak menunjukkan bahwa parameter kualitas air merupakan hasil setelah proses pengolahan.

Berdasarkan **Tabel 1**, karakteristik air limbah produksi tempe menunjukkan variasi yang cukup besar antarpenelitian. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh perbedaan kapasitas produksi, penggunaan air, tahapan proses produksi, serta metode pengambilan sampel pada masing-masing penelitian. Oleh karena itu, data pada **Tabel 1** digunakan sebagai pembanding untuk menggambarkan kisaran karakteristik air limbah industri tempe di Indonesia, sedangkan hasil penelitian ini merepresentasikan karakteristik air limbah IKM tempe pada lokasi penelitian di Kota Padang. Nilai pH air limbah produksi tempe berada pada kisaran 3,90-5,30, menunjukkan bahwa air limbah umumnya bersifat asam akibat terbentuknya asam organik selama proses perendaman dan fermentasi kedelai. Kondisi pH yang rendah dapat memengaruhi aktivitas mikroorganisme pada proses pengolahan biologis anaerob. Oleh karena itu, pada penerapan sistem anaerob umumnya diperlukan kondisi pH yang mendekati netral agar proses biodegradasi berlangsung secara optimal (Ali et al., 2019).

Konsentrasi COD pada berbagai penelitian berkisar antara 791,00-90.597 mg/L, sedangkan BOD berada pada kisaran 97,00-37.843 mg/L. Secara umum, tingginya konsentrasi COD dan BOD mengindikasikan bahwa air limbah industri tempe mengandung bahan organik dalam jumlah besar sehingga berpotensi untuk diolah menggunakan proses biologis, khususnya proses anaerob. Konsentrasi TSS juga menunjukkan variasi yang cukup besar, yaitu 0,91-6.580 mg/L, yang mencerminkan perbedaan kandungan padatan tersuspensi selama proses produksi. Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa kualitas air limbah industri tempe bersifat spesifik terhadap masing-masing industri sehingga karakterisasi awal tetap diperlukan sebelum menentukan alternatif teknologi pengolahan yang sesuai.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa air limbah IKM tempe di Kota Padang memiliki konsentrasi COD sebesar 26.076,70-26.617,44 mg/L, BOD sebesar 3.360,54-12.208,70 mg/L, TSS sebesar 1.413,33-3.760 mg/L, dan pH IKM B sebesar 4,48. Nilai tersebut masih berada dalam kisaran karakteristik air limbah industri tempe yang telah dilaporkan pada berbagai penelitian di Indonesia. Selain konsentrasi COD dan BOD, rasio BOD/COD digunakan sebagai indikator tingkat biodegradabilitas air limbah. Rasio BOD/COD pada sampel IKM A dan IKM B masing-masing sebesar 0,13 dan 0,47. Rasio sebesar 0,47 menunjukkan bahwa fraksi bahan organik yang mudah terdegradasi secara biologis relatif lebih tinggi, sedangkan rasio 0,13 mengindikasikan dominasi fraksi organik yang lebih sukar terdegradasi (Tchobanoglous et al., 2014) . Perbedaan biodegradabilitas tersebut diduga dipengaruhi oleh variasi penggunaan air, proporsi air limbah dari setiap tahapan produksi, serta kondisi operasional pada masing-masing IKM. Meskipun demikian, kedua sampel memiliki konsentrasi COD yang tinggi (>26.000 mg/L), yang menunjukkan kandungan bahan organik yang besar dan berpotensi dimanfaatkan melalui proses pengolahan anaerob. Oleh karena itu, selain digunakan sebagai dasar dalam estimasi potensi metana teoretis berdasarkan konsentrasi COD, rasio BOD/COD juga menjadi parameter penting dalam mempertimbangkan penerapan sistem pengolahan biologis anaerob.

Informasi mengenai teknologi pengolahan yang diterapkan pada masing-masing lokasi juga disajikan pada **Tabel 1** sebagai konteks untuk menunjukkan alternatif pengelolaan air limbah yang telah diterapkan pada industri tempe di berbagai daerah. Namun, penelitian ini tidak mengevaluasi kinerja teknologi tersebut maupun mengukur produksi metana secara langsung. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya difokuskan pada estimasi potensi metana teoretis berdasarkan konsentrasi COD sebagai dasar dalam menilai potensi pemulihan energi dari air limbah industri tempe.

3.2. Estimasi Potensi Metana Teoretis Berdasarkan Konsentrasi COD

Air limbah produksi tempe memiliki kandungan bahan organik yang tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui proses pengolahan anaerob. Pada proses tersebut, senyawa organik didegradasi oleh mikroorganisme menjadi biogas yang terutama tersusun atas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2),

dengan sejumlah kecil gas lainnya (Tchobanoglous et al., 2014). Dalam penelitian ini, produksi metana tidak diukur secara langsung, melainkan diestimasi secara teoretis berdasarkan konsentrasi COD menggunakan Persamaan (1).

Sebagai contoh, estimasi potensi metana teoretis untuk sampel IKM A dihitung sebagai berikut:

Konsentrasi COD : 26.617,44 mg/L = 26,62 kg/m^3 air limbah
: 26,62 kg/m^3 air limbah × 0,35 m^3 CH_4/kg COD
: 9,32 m^3 CH_4/m^3 air limbah

Nilai TMP dihitung dengan asumsi bahwa seluruh bahan organik yang dinyatakan sebagai COD dapat terdegradasi secara sempurna melalui proses anaerob. Rekapitulasi hasil estimasi potensi metanateoretisberdasarkan konsentrasi COD pada berbagai penelitian disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Estimasi Potensi Metana Teoretis Berdasarkan Konsentrasi COD Air Limbah Industri Tempe

Tahun	Lokasi	COD (mg/L)	Estimasi TMP (m^3 CH_4/m^3 air limbah)	Referensi
2011	Sidoarjo	3.102,00	1,09	Nurhayati, et al.
2017	Semarang	4.188,27	1,47	Puspawati
2018	Surabaya	32.000,00	11,20	Purwanti, et al.
2018	Karawang	27.000,00	9,45	Puspawati & Soesilo
2022	Indonesia	351,54	0,12	Praminingsih, et al.
2022	Sidoarjo	90.597,00	31,71	Mulia & Syafiuddin
2023	Palembang	791,00	0,28	Cundari, et al.
2024	Surabaya	24.715,45	8,65	Nurhayati, et al.
2024	Plaju Ulu	45.332,80	15,87	Destri, et al.
2024	Semarang	28.000,00	9,80	Lestiyanto, et al.
2025	Bangkalan	16.000,00	5,60	Hidayatullah & Hendrasarie
2025	Padang (IKM A)	26.617,44	9,32	Penelitian ini
2025	Padang (IKM B)	26.076,70	9,13	Penelitian ini

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa estimasi TMP berkisar antara 0,12 hingga 31,71 m^3 CH_4/m^3 air limbah. Nilai TMP tertinggi diperoleh pada sampel dari Sidoarjo (Mulia & Syafiuddin, 2022), sedangkan nilai terendah terdapat pada penelitian Pramaningsih et al. (2022) . Hubungan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi COD, semakin besar pula jumlah bahan organik yang secara teoretis tersedia untuk dikonversi menjadi metana melalui proses pengolahan anaerob. Temuan ini sejalan dengan Musa et al. (2018) , yang menyatakan bahwa peningkatan beban organik akan meningkatkan potensi pembentukan metana karena tersedianya substrat yang lebih besar bagi mikroorganisme anaerob.

Berdasarkan hasil analisis pada penelitian ini, sampel IKM A dan IKM B memiliki konsentrasi COD masing-masing sebesar 26.617,44 mg/L dan 26.076,70 mg/L, yang menghasilkan estimasi TMP sebesar 9,32 dan 9,13 m^3 CH_4/m^3 air limbah. Nilai tersebut berada pada kisaran yang sebanding dengan beberapa penelitian terdahulu pada air limbah industri tempe yang memiliki konsentrasi COD serupa. Hasil ini menunjukkan bahwa air limbah IKM tempe di Kota Padang memiliki kandungan bahan organik yang tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai substrat pada sistem pengolahan anaerob untuk pemulihan energi dalam bentuk biogas.

Namun demikian, estimasi TMP yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan estimasi teoretis yang didasarkan pada konsentrasi COD dan belum memperhitungkan efisiensi penyisihan COD, aktivitas mikroorganisme, kondisi operasi reaktor, maupun kehilangan metana selama proses pengolahan. Oleh karena itu, produksi metana aktual dapat berbeda dari nilai teoretis yang dihitung. Pengujian *Biochemical Methane Potential* (BMP) atau pengukuran langsung pada reaktor anaerob diperlukan untuk memverifikasi besarnya produksi metana aktual dari air limbah produksi tempe di Kota Padang.

3.3. Potensi Pemanfaatan Gas Metana Sebagai Energi Alternatif

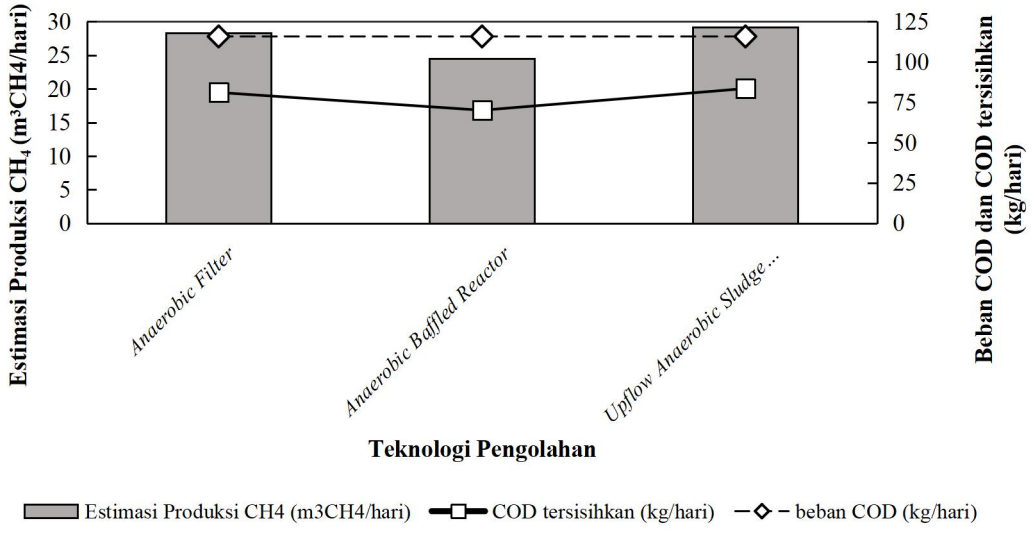
Air limbah produksi tempe yang memiliki kandungan bahan organik tinggi berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui proses pengolahan anaerob. Berdasarkan karakteristik air limbah yang diperoleh pada penelitian ini, dilakukan evaluasi awal terhadap beberapa alternatif teknologi pengolahan anaerob yang telah dilaporkan pada penelitian terdahulu, yaitu *Anaerobic Filter* (AF), ABR, dan UASB. Evaluasi dilakukan

melalui estimasi potensi metana teoretis menggunakan nilai efisiensi penyisihan COD yang dilaporkan dalam berbagai literatur. Perhitungan menggunakan konsentrasi COD rata-rata hasil penelitian sebesar 26,35 kg/m³ dan debit air limbah sebesar 4.395 L/hari (4,395 m³/hari) berdasarkan Rohmanna et al. (2025), karena debit aktual air limbah pada kedua IKM yang diteliti tidak diukur. Estimasi produksi metana dihitung menggunakan faktor konversi teoretis sebesar 0,35 m³ CH_4/kg COD yang tersisihkan (Tchobanoglous et al., 2014). Hasil estimasi potensi metana teoretis untuk masing-masing alternatif teknologi disajikan pada **Tabel 3**, sedangkan perbandingan antara efisiensi penyisihan COD dan estimasi produksi metana teoretis ditampilkan pada **Gambar 1**.

Tabel 3. Alternatif Pengolahan dan Estimasi Potensi Metana Teoretis Air Limbah Produksi Tempe

Teknologi Pengolahan	Referensi	Efisiensi Penyisihan COD (%)	Konsentrasi COD (kg/m³)	Debit air limbah (m³/hari)	Beban COD (kg/hari)	COD tersisihkan (kg/hari)	Estimasi Produksi CH_4 (m³CH_4/hari)
Anaerobic Filter (AF)	Cruz et al. (2013)	65-80 (digunakan 70)	26,35	4,395	115,82	81,07	28,37
Anaerobic Baffled Reactor (ABR)	Hastuti et al. (2017)	60,46				70,03	24,51
Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)	Abuzir et al. (2025)	72,1				83,5	29,22

Berdasarkan **Tabel 3** dan **Gambar 1**, ketiga teknologi anaerob menghasilkan estimasi potensi metana teoretis yang berbeda sebagai konsekuensi dari variasi efisiensi penyisihan COD yang dilaporkan dalam literatur. Dengan menggunakan karakteristik air limbah dan debit yang sama, estimasi produksi metana teoretis berkisar antara 24,51-29,22 m³ CH_4/hari. Skenario UASB menghasilkan estimasi tertinggi sebesar 29,22 m³ CH_4/hari, diikuti oleh AF sebesar 28,37 m³ CH_4/hari dan ABR sebesar 24,51 m³ CH_4/hari. Meskipun demikian, hasil tersebut tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan bahwa UASB merupakan teknologi yang paling sesuai untuk pengolahan air limbah produksi tempe. Nilai efisiensi penyisihan COD yang digunakan berasal dari penelitian dengan karakteristik air limbah, konfigurasi reaktor, kondisi operasi, dan skala pengolahan yang berbeda, sebagai contoh, efisiensi 72,1% pada skenario UASB yang merujuk pada Abuzir dkk. (2025) merupakan asumsi skenario berdasarkan pengolahan *blackwater*. Kinerja aktualnya dapat berbeda apabila diaplikasikan pada limbah tempe yang memiliki karakteristik spesifik seperti COD tinggi dan pH asam. Oleh karena itu, perbandingan pada penelitian ini hanya dimaksudkan sebagai estimasi potensi pemulihan energi berdasarkan data literatur dan belum menggambarkan kinerja aktual apabila teknologi tersebut diterapkan pada air limbah produksi tempe.



Gambar 1. Perbandingan Efisiensi Penyisihan COD dan Estimasi Potensi Metana Teoretis Pada Beberapa Alternatif Teknologi Pengolahan Anerob

Selanjutnya, estimasi produksi metana teoretispada skenario UASB digunakan sebagai dasar untuk menghitung potensi pemulihan energi. Dengan menggunakan *Higher Heating Value* (HHV) metana sebesar 11,1 kWh/m³ CH_4 (Delft University of Technology), dan efisiensi genset biogas sebesar 35% (Ciuła et al., 2023), diperoleh estimasi potensi energi listrik bruto sebesar:

$$E = 29{,}22\ m^3\ CH_4/hari \times 11{,}1\ kWh/m^3\ CH_4 \times 35\% = 113{,}52\ kWh/hari$$

Dengan tarif listrik pelanggan rumah tangga non-subsidi 1.300-2.200 VA PLN Triwulan III Tahun 2025 sebesar Rp1.444,70/kWh, maka estimasi potensi penghematan energi listrik bruto mencapai sekitar Rp164.002/hari atau sekitar Rp4.920.060/bulan.

Selain dimanfaatkan sebagai energi listrik, metana juga dapat dinyatakan dalam bentuk ekuivalensi LPG. Biogas hasil pengolahan anaerob umumnya mengandung sekitar 60-70% CH_4 (Tchobanoglous et al., 2014). Dalam penelitian ini digunakan asumsi kandungan metana sebesar 60%, sehingga estimasi produksi metana sebesar 29,22 m³ CH_4/hari ekuivalen dengan:

$$V_{biogas} = 29{,}22\ m^3\ CH_4/hari/60\% = 48{,}70\ m^3/hari$$

Berdasarkan faktor konversi 1 m³ biogas setara dengan 0,46 kg LPG (Mahiroh et al., 2025), maka diperoleh estimasi ekivalen sebesar:

$$48{,}70 \times 0{,}46 = 22{,}40\ kg\ LPG/hari$$

atau setara dengan sekitar 7 tabung LPG 3 kg per hari.

Perbandingan estimasi pemanfaatan metana sebagai energi listrik dan ekivalensi LPG dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Perbandingan Estimasi Pemanfaatan Metana Sebagai Energi Listrik dan Ekivalensi LPG

Aspek Perbandingan	Energi Listrik (Genset Biogas)	Ekivalensi LPG
Produksi metana teoretis	29,22 m³ CH_4/hari	
Asumsi kandungan CH_4 dalam biogas	-	60%
Estimasi volume biogas		48,70 m³/hari
Dasar konversi	HHV = 11,1 kWh/m³ CH_4*	1 m³ biogas = 0,46 kg LPG**
Efisiensi sistem	35% (genset biogas)	Tidak diterapkan (ekuivalensi bruto)
Estimasi potensi energi listrik bruto	113,52 kWh/hari	-
Estimasi ekuivalensi LPG bruto	-	22,40 kg LPG/hari
Setara produk komersial	-	±7 tabung LPG 3 kg/hari
Potensi penghematan energi bruto (/hari)	Rp164.002/hari	-
Potensi penghematan energi bruto (/bulan)	Rp4.920.060/bulan	-

**Delft University of Technology; **Mahiroh et al., 2025*

Tabel 4 menunjukkan bahwa produksi metana teoretis sebesar 29,22 m³ CH_4/hari berpotensi menghasilkan energi bruto sekitar 113,52 kWh/hari apabila dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik menggunakan genset biogas. Nilai tersebut setara dengan potensi penghematan energi bruto sekitar Rp164.002/hari atau Rp4.920.060/bulan berdasarkan tarif listrik PLN Triwulan III Tahun 2025. Apabila dinyatakan sebagai ekuivalensi bahan bakar, produksi metana tersebut setara dengan sekitar 48,70 m³ biogas/hari atau ekuivalensi LPG bruto sebesar 22,40 kg LPG/hari (±7 tabung LPG 3 kg per hari). Seluruh nilai tersebut merupakan estimasi teoretis berdasarkan karakteristik air limbah dan faktor konversi dari literatur, sehingga belum memperhitungkan efisiensi sistem, kehilangan gas, maupun aspek teknis dan ekonomi pada kondisi operasional nyata. Berdasarkan laporan penggunaan energi pada IKM tempe yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2020), proses pemasakan sekitar 450 kg kedelai memerlukan sekitar 9 tabung LPG 3 kg atau setara dengan 27 kg LPG dalam satu siklus produksi. Jika dibandingkan dengan hasil estimasi pada Tabel 4, energi yang dihasilkan dari pengolahan anaerob secara teoretis berpotensi ekuivalen dengan sekitar 22,40 kg LPG/hari, sehingga berpotensi mensubstitusi sekitar 82,96% kebutuhan LPG pada satu siklus pemasakan dengan kapasitas tersebut. Namun demikian, persentase tersebut merupakan estimasi teoretis yang belum mempertimbangkan efisiensi sistem produksi dan pemanfaatan biogas pada kondisi nyata.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa air limbah produksi tempe memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui proses pengolahan anaerob. Selain berpotensi mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, pemanfaatan biogas juga dapat mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca dari pembuangan air limbah organik tanpa pengolahan. Meskipun demikian, hasil yang disajikan pada penelitian ini masih berupa estimasi teoretis berdasarkan karakteristik air limbah dan faktor konversi dari literatur. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang mencakup pengukuran produksi biogas aktual, uji BMP, percobaan dengan reaktor skala laboratorium, hingga reaktor skala lapangan serta menganalisis tekno-ekonomi

diperlukan untuk memverifikasi potensi pemulihan energi dan kelayakan penerapan teknologi pengolahan anaerob pada IKM tempe di Kota Padang.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa dua sampel air limbah dari IKM tempe skala rumah tangga di Kota Padang memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dengan konsentrasi COD sebesar 26.076,70-26.617,44 mg/L, sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui proses pengolahan anaerob. Rasio BOD/COD sebesar 0,13 pada IKM A dan 0,47 pada IKM B menunjukkan perbedaan tingkat biodegradabilitas air limbah, yang mengindikasikan bahwa karakteristik air limbah dipengaruhi oleh kondisi proses produksi pada masing-masing IKM. Berdasarkan estimasi teoretis menggunakan faktor konversi 0,35 m^3 CH_4/kg COD yang tersisihkan, potensi metana teoretis diperkirakan sebesar 9,13-9,32 m^3 CH_4/m^3 air limbah. Evaluasi beberapa alternatif pengolahan anaerob menunjukkan estimasi produksi metana teoretis berkisar antara 24,51-29,22 m^3 CH_4/hari, yang secara teoretis setara dengan potensi energi bruto sekitar 113,52 kWh/hari atau 22,40 kg LPG/hari pada skenario dengan efisiensi penyisihan COD tertinggi. Namun demikian, hasil penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Karakterisasi air limbah hanya didasarkan pada dua sampel grab yang mewakili dua IKM, sehingga belum dapat menggambarkan variasi karakteristik air limbah IKM tempe secara umum. Selain itu, estimasi produksi metana menggunakan debit air limbah yang diadopsi dari literatur, asumsi efisiensi penyisihan COD dari penelitian terdahulu, serta faktor konversi teoretis tanpa dilakukan pengukuran produksi biogas atau analisis komposisi gas secara langsung. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan melalui pengukuran debit aktual, pengambilan sampel yang lebih representatif, pengujian BMP, serta uji reaktor skala pilot untuk memverifikasi potensi pemulihan energi dan mengevaluasi kelayakan penerapan teknologi pengolahan anaerob pada IKM tempe di Kota Padang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas Tahun Anggaran 2025.

DAFTAR PUSTAKA

Abuzir, S., Gren, L., Domini, M., Bertanza, G., Davidsson, Å., & Kjerstadius, H. (2025). Performance of a full-scale anaerobic UASB digester treating blackwater from an urban city district in Helsingborg, Sweden. Cleaner Water, 4, 100082. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2025.100082

Ali, S., Hua, B., Huang, J. J., Droste, R. L., Zhou, Q., Zhao, W., & Chen, L. (2019). Effect of different initial low pH conditions on biogas production, composition, and shift in the aceticlastic methanogenic population. Bioresource Technology, 289, 121579. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121579

Astuti, S., Saleh, M. I., Arita, S., & Legiran. (2024). Analysis of water pollution levels in Batang Masumai River, Merangin Regency, Jambi Province. Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability, 8(4), 172–183. https://doi.org/10.26554/ijems.2024.8.4.172-183

Ciuła, J., Kowalski, S., Generowicz, A., Barbusiński, K., Matuszak, Z., & Gaska, K. (2023). Analysis of energy generation efficiency and reliability of a cogeneration unit powered by biogas. Energies, 16(5), 2180. https://doi.org/10.3390/en16052180

Cundari, L., Sukandar, M. R., & Nurusman, F. (2023). Tempeh industry wastewater treatment using mix natural adsorbents (zeolite, bentonite, water hyacinth-activated carbon): effect of mass ratio and dosage of mix adsorbents on turbidity and pH. Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, 14, 41-52. https://doi.org/10.21771/jrtppi.2023.v14.no3.p41-52

Cruz, L. M. D. O., Stefanutti, R., Coraucci Filho, B., & Tonetti, A. L. (2013). Coconut shells as filling material for anaerobic filters. SpringerPlus, 2(1), 655. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-655

Delft University of Technology. (n.d.). Summary table with heating values and CO_2 emissions. TU Delft OpenCourseWare. https://ocw.tudelft.nl/course-readings/1-1-3useful-tables-and-graphs/summary_table_with_heating_values_and_co2_emissions

Destri, E., Rejo, A., & Hanum, L. (2024). Identification of Tempeh Wastewater Quality and Analysis of Producer Behavior towards Waste Management in Plaju Ulu. Sriwijaya Journal of Environment, 9(3), 178-185.https://doi.org/10.22135/sje.2024.9.3.178-185

Hastuti, E., Nuraeni, R., Darwati, S. (2017). Pengembangan proses pada sistem anaerobic baffled reactor untuk memenuhi baku mutu air limbah domestik. Jurnal Permukiman, 12(2), 70-79. https://doi.org/10.31815/jp.2017.12.70-79

Hidayatullah, N., & Hendrasarie, N. (2025). Pengolahan limbah cair tempe menggunakan teknologi hybrid anoxic reactor-sequencing batch reactor. Jurnal Serambi Engineering, 10(1). 11753-11765 https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/622

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2020, 4 Januari). GasMin dukung efisiensi IKM hingga lebih dari 50 persen [Siaran pers]. https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/gasmin-dukung-efisiensi-ikm-hingga-lebih-dari-50-persen-

Lestiyanto, Y., Anggraini, Y. D., Rizani, M. D., & Ikhwanudin, I. (2024). Design of WWTP anaerobic system at tempe factory. International Journal of Sustainable Building, Infrastructure and Environment (IJOSBIE), 5(1). https://doi.org/10.26877/ijosbie.v5i1.16337

Mahiroh, S. N. H., Dienullah, R. M. A., Karami, A. A., & Wibowo, S. (2025). Pemanfaatan model landgem untuk potensi gas metana di TPAS Sekoto menjadi sumber energi. Jurnal Serambi Engineering, 10(1). 12863-12874. https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/4986787

Mulia, M. I., & Syafiuddin, A. (2022). Kemampuan saringan pasir lambat dikombinasikan dengan karbon aktif sebagai alternatif pengolahan air limbah tempe. Jurnal Sosial dan Sains (SOSAINS), 2(8). https://doi.org/10.59188/jurnalsosains.v2i8.450

Musa, M. A., Idrus, S., Hasfalina, C. M., & Daud, N. N. N. (2018). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion performance of mesophilic (UASB) reactor using cattle slaughterhouse wastewater as substrate. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(10). https://doi.org/10.3390/ijerph15102220

Nurhayati, I., Asmoro, P., & Sugito, S. (2011). Pengolahan air limbah pabrik tempe dengan biofilter. Waktu: Jurnal Teknik UNIPA, 9(2). https://doi.org/10.36456/waktu.v9i2.917

Nurhayati, I., Maulidhani, N. D., Sutrisno, J., & Kholif, M. Al. (2024). Sustainable pre-treatment of tempeh industry wastewater: Efficiency of vermifiltration in pollutant mitigation and compost production. Desalination and Water Treatment, 320. https://doi.org/10.1016/J.DWT.2024.100820

Pramaningsih, V., Hansen, H., Praveena, S. M., & Styana, U. I. F. (2022). Wastewater quality and pollution load of each stage in tempeh production. Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology, 5(3), 209–222. https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v5i3.12838

Preethi, Usman, T. M. M., Rajesh Banu, J., Gunasekaran, M., & Kumar, G. (2019). Biohydrogen production from industrial wastewater: an overview. Bioresource Technology Reports, 7, 100287. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100287

Purwanti, I. F., Simamora, D., & Kurniawan, S. B. (2018). Toxicity test of tempe industrial wastewater on cyperus rotundus and scirpus grossus. Int. J. Civ. Eng. Technol, 9(4), 1162-1172. http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=4Puspawati, S. W. (2017). Alternatif pengolahan limbah industri tempe dengan kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi. In Seminar Nasional Teknologi Pengolahan Limbah XV 2017.

Puspawati, S. W., & Soesilo, T. E. B. (2018). Sustainable approach to tempeh industrial wastewater management in Karawang. E3S Web of Conferences, 74. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187409003

Putra, A. A., Watari, T., Maki, S., Hatamoto, M., & Yamaguchi, T. (2020). Anaerobic baffled reactor to treat fishmeal wastewater with high organic content. Environmental Technology & Innovation, 17, 100586. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100586

Ristianingsih, D., Dharmawan, A. H., & Putri, E. I. K. (2018). Analisis keberlanjutan biogas limbah tahu pedesaan (studi kasus di Desa Kalisari, Kabupaten Banyumas). Jurnal Ilmu Lingkungan, 16(2), 104. https://doi.org/10.14710/jil.16.2.104-112

Rohmanna, N. A., Syahnazia, N. K., Mawardani, A., Sabrina, N., Nisa, N. F., & Nurmala, S. (2025). Evaluasi penerapan produksi bersih pada UMKM tempe di Kelurahan Guntung Paikat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan. Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian, 19(2), 500-508. https://doi.org/10.21107/agrointek.v19i2.24465

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education