PEMANFAATAN AMPAS KOPI DAN *WHEY* TAHU SEBAGAI SUBSTRAT DALAM PRODUKSI BIOGAS MELALUI PROSES *ANAEROBIC DIGESTION*

Nabila Sahjana[1], Anerasari[2], Dilia Puspa[3]

[1,2,3]*Politeknik Negeri SriwijayaPalembang*
E-mail : nabilasahjana@gmail.com

ABSTRACT

Spent coffee grounds and tofu whey are organic wastes with high organic content, making them potential substrates for biogas production through anaerobic digestion. This study aimed to determine the effect of urea addition and fermentation time on the characteristics and volume of biogas produced from a mixture of spent coffee grounds and tofu whey. The research was conducted in two stages using a batch reactor. The first stage utilized 1 L of substrate with varying urea additions (0, 0.5, 1, 1.5, and 2 grams) to determine the optimum urea mass based on methane (CH_4) content. The second stage utilized 2 L of substrate with the optimum urea mass of 1.5 grams to evaluate the effect of fermentation durations (3, 6, 9, 12, and 15 days) on biogas characteristics. Analyzed parameters included the levels of CH_4, carbon dioxide (CO_2), hydrogen sulfide (H_2S), and biogas volume. Results from the first stage showed that the addition of 1.5 grams of urea yielded the highest CH_4 content—6,811 ppm (0.68%)—establishing it as the optimum condition. In the second stage, CH_4 content increased gradually from 6.8% on day 3 to 37.4% on day 15. Increases were also observed in CO_2 levels (from 4.0% to 29.3%) and H_2S levels (from 1,673 ppm to 3,701 ppm). Additionally, biogas volume rose from 48 mL on day 3 to 145 mL on day 15. These results indicate that adding 1.5 grams of urea provided optimum nutrients for anaerobic microorganisms, while a 15-day fermentation period offered the best conditions for the biogas formation process. Based on the research results, it can be concluded that the addition of 1.5 grams of urea and a fermentation period of 15 days represent the optimum conditions for producing biogas from a mixture of spent coffee grounds and tofu whey via anaerobic digestion.

Keywords : *Biogas, Spent coffee grounds, Tofu whey, Anaerobic digestion, Urea, Methane.*

ABSTRAK

Ampas kopi dan *whey* tahu merupakan limbah organik yang memiliki kandungan bahan organik tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai substrat dalam produksi biogas melalui proses *anaerobic digestion*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan urea dan waktu fermentasi terhadap karakteristik serta volume biogas yang dihasilkan dari campuran ampas kopi dan *whey* tahu. Penelitian dilakukan dalam dua tahap menggunakan reaktor *batch*. Tahap pertama menggunakan substrat 1 L dengan variasi penambahan urea sebesar 0; 0,5; 1; 1,5; dan 2 gram untuk menentukan massa urea optimum berdasarkan kadar metana (CH_4). Tahap kedua menggunakan substrat 2 L dengan massa urea optimum sebesar 1,5 gram untuk mengevaluasi pengaruh waktu fermentasi selama 3, 6, 9, 12, dan 15 hari terhadap karakteristik biogas. Parameter yang dianalisis meliputi kadar CH_4, karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan volume biogas. Hasil penelitian tahap pertama menunjukkan bahwa penambahan urea sebesar 1,5 gram menghasilkan kadar CH_4 tertinggi, yaitu sebesar 6.811 ppm (0,68%), sehingga ditetapkan sebagai kondisi optimum. Pada penelitian tahap kedua, kadar CH_4 meningkat secara bertahap dari 6,8% pada hari ke-3 menjadi 37,4% pada hari ke-15. Peningkatan juga terjadi pada kadar CO_2 dari 4,0% menjadi 29,3% dan kadar H_2S dari 1.673 ppm menjadi 3.701 ppm. Selain itu, volume biogas meningkat dari 48 mL pada hari ke-3 menjadi 145 mL pada hari ke-15. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan urea sebesar 1,5 gram mampu menyediakan nutrisi yang optimum bagi mikroorganisme anaerob, sedangkan waktu fermentasi selama 15 hari memberikan kondisi terbaik bagi proses pembentukan biogas. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penambahan urea sebesar 1,5 gram dan waktu fermentasi selama 15 hari merupakan kondisi optimum untuk menghasilkan biogas dari campuran ampas kopi dan *whey* tahu melalui proses *anaerobic digestion*.

Kata Kunci : *Biogas, Ampas Kopi, Whey tahu, Anaerobic Digestion, Urea, Metana.*

PENDAHULUAN

Limbah merupakan bahan buangan atau sisa dari suatu kegiatan manusia yang sudah tidak dimanfaatkan kembali, baik yang berasal dari aktivitas rumah tangga, industri, maupun pertambangan. Pada konsentrasi tertentu, keberadaan limbah dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan serta kesehatan manusia sehingga diperlukan pengelolaan dan penanganan yang tepat agar tidak menimbulkan pencemaran lingkungan (Sunarsih, 2014).

Biogas diproduksi dari bahan limbah organik kompleks yang diuraikan oleh mikroorganisme dalam proses *anaerobic digestion* (AD). Kemampuan ini telah dimanfaatkan selama berabad-abad dalam sistem buatan manusia (bioreaktor) untuk produksi energi (Bond dan Templeton, 2011). Biogas merupakan sumber energi berharga yang menghasilkan 5,5–7 kWh m^{-3}, dan kandungan energinya terkait langsung dengan kandungan metana. Perannya dalam skenario pasokan energi berkelanjutan di masa depan sangat berbeda dan fleksibel, karena dapat digunakan sebagai sumber listrik dan panas terbarukan sesuai kebutuhan, dan dapat disimpan. Hal ini akan membantu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan dengan demikian mengurangi emisi CO_2 .

Secara umum, komposisi biogas bervariasi tergantung pada bahan bakunya, dan variasi pembakaran menghasilkan konsentrasi karbon dioksida yang lebih tinggi dalam biogas yang memengaruhi daya tahan mesin. Tinjauan ini berfokus pada peran biogas dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan, dengan penekanan pada penggunaannya dalam mesin berbahan bakar gas yang menggunakan pengapian percikan. Kemajuan terkini dalam teknik produksi dan peningkatan biogas juga dibahas secara langsung. Tantangan yang berkaitan dengan stabilitas dan karakteristik mesin berbahan bakar biogas yang menggunakan pengapian percikan dapat diatasi dengan memodifikasi parameter fisik mesin atau dengan meningkatkan kualitas bahan bakar (meningkatkan ke *biomethane* atau mencampur dengan hidrogen) (Gupta, 2023).

Anaerobic digestion adalah suatu proses kompleks yang mengharuskan penguraian secara bersamaan dari semua substrat organik seperti karbohidrat dan protein oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob. Proses ini diatur oleh berbagai parameter sesuai dengan suhu, pH dan *Gas Analyzer* , dll. Keseimbangan nutrisi dan lingkungan yang stabil sangat dibutuhkan oleh pertumbuhan mikroba, Oleh karena itu, pemeliharaan parameter yang tepat dan sesuai sangat penting untuk meningkatkan fungsi pencernaan dalam jangka panjang (Zhang. 2014).

Limbah tahu cair mengandung kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD), *BioChemical Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solids* (TSS), *Total Dissolved Solids* (TDS) dan keasaman (pH) yang tinggi (Anggraini et al., 2015). Komposisi limbah cair tahu sebagian besar terdiri dari air (99,9%) dan sisanya terdiri dari partikel-partikel padat terlarut (*dissolved solid*) dan tidak terlarut (suspended solid) sebesar 0,1%. Partikelpartikel padat dari zat organik (± 70%) dan zat anorganik (± 30%). Zat-zat organik terdiri dari 1% karbohidrat (terutama *stachyose* dan sukrosa), 0,1-0,8% protein, 0,4-1,0% lemak, dan sek itar 0,4% mineral (Chua & Liu, 2019).

Air limbah industri tahu dengan kandungan bahan organik yang tinggi, maka proses pengolahan yang akan diterapkan adalah dengan menggunakan proses biologi dengan memanfaatkan mikroorganisme. Pemanfaatan mikroorganisme dalam mendegradasi senyawa organik dapat dilakukan dengan *biodigester aerob* (reaktor terbuka) dan biodigester anaerob (reaktor kedap udara). Proses secara anaerob memiliki kelebihan dibandingkan dengan proses pengolahan biologi secara anaerob

METODE

Pelaksanaan eksperimen bertempat di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik. Penelitian dilakukan dalam dua tahap menggunakan reaktor *batch*. Tahap pertama menggunakan substrat 1 L dengan variasi penambahan urea sebesar 0; 0,5; 1; 1,5; dan 2 gram untuk menentukan massa urea optimum berdasarkan kadar metana (CH_4). Tahap kedua menggunakan substrat 2 L dengan massa urea optimum sebesar 1,5 gram untuk mengevaluasi pengaruh waktu fermentasi selama 3, 6, 9, 12, dan 15 hari terhadap karakteristik biogas. Parameter yang dianalisis meliputi kadar CH_4, karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan volume biogas.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian, diperoleh data analisis gas yang tercantum pada tablel 3.1 – 3.4, yang merupakan hasil biogas terhadap cairan limbah tahu dan ampaskopi. Data yang didapatkan hasil dari pengukuran menggunakan alat *Multi Gas Detector Analyzer.* Melalui analisis ini, dapat diketahui pengaruh penambahan Urea dan waktu fermentasi selama proses biogas *anaerobic digestion* terhadap jumlah gas metana yang dihasilkan.

Tabel 1. Data Analisis *Syngas* substrat 2 L

Hari ke-	Massa Urea (gr)	% CO2	%H2S	%CH4
3	1,5	4	0,17	6,8
6	1,5	8,3	0,19	12,1
9	1,5	16,4	0,28	22,7
12	1,5	23,8	0,32	26,3
15	1,5	29,3	0,37	37,4

Tabel 2. Volume Biogas substrat 2 L

Hari ke-	Massa Urea (gr)	Volume (ml)
3	1,5	48
6	1,5	72
9	1,5	90
12	1,5	110
15	1,5	145

Pembahasan

Penelitian yang dilakukan memiliki tujuan untuk menganalisis pengaruh waktu fermentasi dan penambahan massa urea terhadap biogas yang dihasilkan dari limbah ampas kopi dan *whey* tahu menggunakan *starter* EM4

Pengaruh Penambahan Urea dan Waktu Fermentasi terhadap karakteristik Biogas

Pada penelitian pertama, dilakukan variasi penambahan urea sebesar 0; 0,5; 1; 1,5; dan 2 gram pada waktu fermentasi hari ke-12 dan hari ke-15. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan urea 1,5 gram menghasilkan kadar metana (CH_4) tertinggi yaitu 0.68%. Oleh karena itu, urea 1,5 gram dipilih sebagai kondisi optimum dan digunakan pada penelitian utama untuk mengevaluasi pengaruh waktu fermentasi terhadap karakteristik biogas.

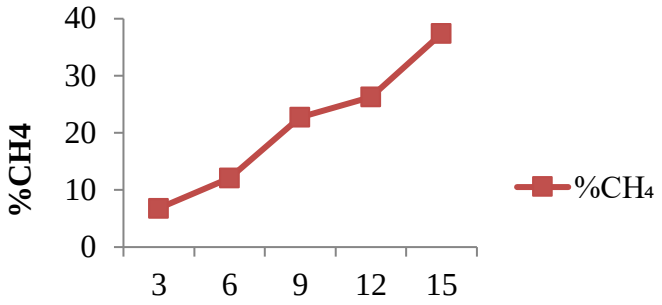
Pada penelitian selanjutnya dapat dilihat pada tabel 3.1, karakteristik biogas diamati pada hari ke-3, 6, 9, 12, dan 15 menggunakan dosis urea yang paling optimum pada penelitian terdahulu sebesar 1,5 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar CH_4 meningkat secara bertahap dari 6,8% pada hari ke-3, menjadi 12,1% pada hari ke-6, 22,7% pada hari ke-9, 26,3% pada hari ke-12, dan mencapai 37,4% pada hari ke-15. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin lama waktu fermentasi, semakin optimal aktivitas bakteri metanogen dalam mengonversi senyawa organik menjadi metana. Selama proses *anaerobic digestion* berlangsung, bahan organik mengalami tahapan *hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis,* dan *metanogenesis* sehingga pembentukan CH_4 meningkat seiring bertambahnya waktu fermentasi (Weiland, 2010; Khalid et al., 2011).

Pemilihan dosis urea 1,5 gram pada penelitian utama didasarkan pada hasil penelitian dengan (700 ml *whey* tahu, 200 ml ampas kopi, 50 ml EM4 dan 50 ml aquadest) 1 L substrat yang menunjukkan bahwa dosis tersebut memberikan kadar CH_4 tertinggi dibandingkan dosis 0; 0,5; 1; dan 2 gram. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan urea sebanyak 1,5 gram mampu menyediakan nitrogen yang cukup untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme anaerob dan memperbaiki rasio C/N substrat ampas kopi dan *whey* tahu. Sebaliknya, pada dosis 2 gram, kadar CH_4 menurun dimana mengindikasikan adanya kelebihan nitrogen sehingga berpotensi meningkatkan pembentukan amonia bebas (*free ammonia*) yang dapat menghambat aktivitas bakteri metanogen (Chen., 2008).

Hasil penelitian ini juga didukung oleh Wresta. (2021) yang melaporkan bahwa peningkatan waktu fermentasi pada limbah cair tahu dan ampas kopi menyebabkan produksi metana meningkat karena aktivitas bakteri metanogen menjadi lebih stabil pada fase akhir fermentasi. Selain itu, keseimbangan rasio C/N merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi keberhasilan proses fermentasi anaerob. Penambahan urea sebagai sumber nitrogen pada penelitian ini diduga membantu memenuhi kebutuhan nutrisi mikroorganisme sehingga proses degradasi bahan organik dan pembentukan biogas dapat berlangsung dengan baik. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu dan penelitian selanjutnya, dapat disimpulkan bahwa penambahan urea sebesar 1,5 gram merupakan dosis optimum, sedangkan waktu fermentasi selama 15 hari menghasilkan karakteristik biogas terbaik dengan kadar CH_4 tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi dosis urea yang optimum dan waktu fermentasi yang memadai berperan penting dalam meningkatkan kualitas biogas yang dihasilkan dari substrat campuran ampas kopi dan *whey* tahu.

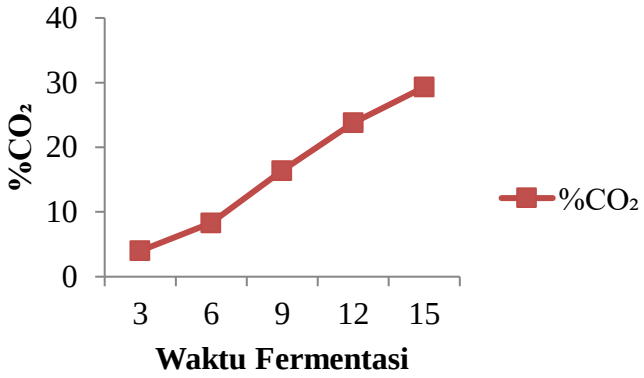
Karakteristik Biogas Selama Proses Fermentasi *Anaerobic Digestion*

Karakteristik biogas hasil fermentasi substrat campuran *whey* tahu dan ampas kopi dengan penambahan urea 1,5 gram diamati berdasarkan kadar metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen sulfida (H_2S) selama 15 hari fermentasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh parameter mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu fermentasi.



Gambar 1. Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Hasil Biogas %CH_4 Yang Dihasilkan Oleh Proses *Anaerobic Digestion*

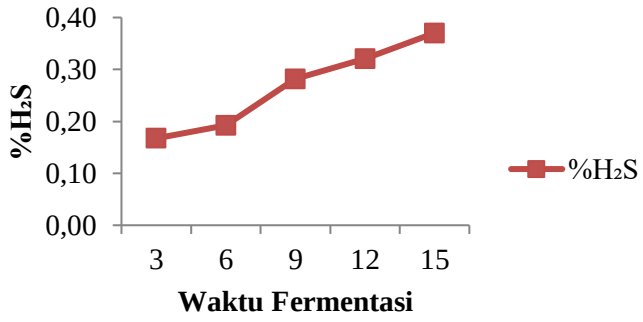
Berdasarkan Gambar 1, kadar CH_4 meningkat dari 6,8% pada hari ke-3 menjadi 37,4% pada hari ke-15. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses anaerobic digestion berlangsung dengan baik. Pada awal fermentasi (hari ke-3 hingga hari ke-6), mikroorganisme masih berada pada fase adaptasi sehingga sebagian besar senyawa organik masih mengalami proses hidrolisis dan asidogenesis. Akibatnya, pembentukan metana masih relatif rendah. Memasuki hari ke-9 hingga hari ke-15, bakteri metanogen mulai aktif mengubah asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida menjadi gas metana sehingga kadar CH_4 meningkat cukup signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi fermentasi semakin stabil dan aktivitas mikroorganisme penghasil metana semakin optimal. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Khalid 2011) yang menyatakan bahwa produksi metana meningkat seiring bertambahnya waktu fermentasi hingga bakteri metanogen mencapai fase optimum.



Gambar 2. Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Hasil Biogas %CO_2 Yang Dihasilkan Oleh Proses *Anaerobic Digestion*

Gambar 2 menunjukkan bahwa kadar CO_2 meningkat dari 4,0% pada hari ke-3 menjadi 29,3% pada hari ke-15. Peningkatan CO_2 merupakan hasil dari aktivitas mikroorganisme selama tahap hidrolisis, asidogenesis, dan asetogenesis yang menghasilkan karbon dioksida sebagai produk samping. Selain itu, pada tahap metanogenesis tidak seluruh CO_2 dikonversi menjadi CH_4 sehingga sebagian masih tetap berada di dalam biogas. Kenaikan CO_2 bersamaan dengan

meningkatnya CH_4 menunjukkan bahwa proses degradasi bahan organik masih berlangsung aktif selama fermentasi. Menurut Appels.(2008), komposisi utama biogas memang terdiri atas CH_4 dan CO_2 sehingga kedua gas tersebut umumnya meningkat selama proses pembentukan biogas.

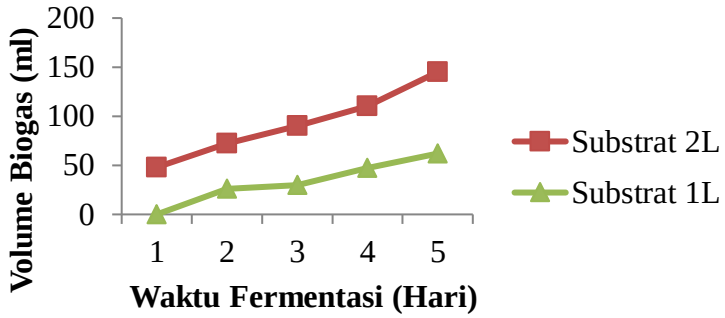


Gambar 3. Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Hasil Biogas H_2S Yang Dihasilkan Oleh Proses Anaerobic Digestion

Pada gambar 3 adalah hasil pengujian menunjukkan kadar H_2S meningkat dari 0.17% pada hari ke-3 menjadi 0.37% pada hari ke-15.Peningkatan H_2S disebabkan oleh aktivitas bakteri pereduksi sulfat dan penguraian senyawa protein yang mengandung sulfur pada substrat *whey* tahu maupun ampas kopi. Selama fermentasi berlangsung, semakin banyak senyawa sulfur yang terdegradasi sehingga konsentrasi H_2S juga meningkat. Meskipun H_2S merupakan komponen alami biogas, keberadaannya kurang diharapkan karena bersifat korosif terhadap peralatan dan dapat menurunkan kualitas biogas apabila kadarnya terlalu tinggi.Menurut Ryckebosch. (2011), kandungan H_2S dalam biogas dipengaruhi oleh kandungan sulfur pada substrat serta aktivitas bakteri pereduksi sulfat selama proses anaerob.

Peningkatan kadar CH_4, CO_2, dan H_2S secara bersamaan menunjukkan bahwa proses anaerobic digestion berlangsung aktif selama fermentasi. CH_4 meningkat sebagai indikator keberhasilan proses metanogenesis, CO_2 terbentuk sebagai hasil dekomposisi bahan organik, sedangkan H_2S berasal dari degradasi senyawa yang mengandung sulfur. Secara keseluruhan, fermentasi selama 15 hari menghasilkan karakteristik biogas terbaik dengan kadar CH_4 sebesar 37,4%, CO_2 sebesar 29,3%, dan H_2S sebesar 0.37%.

Hasil Nilai Volume Selama Fermentasi dengan Urea 1,5 gr substrat 1 liter dan substrat 2 L



Gambar 4. Pengaruh Waktu Fermentasi Terhadap Hasil Volume Biogas Dengan Penambahan 1,5 Gr Urea S Yang Dihasilkan Oleh Proses Anaerobic Digestion

Berdasarkan Gambar 3.4, volume biogas yang dihasilkan pada digester skala 2 L lebih tinggi dibandingkan digester skala 1 L selama proses fermentasi dengan penambahan urea 1,5 g. Pada kedua skala digester, volume biogas menunjukkan tren yang terus meningkat seiring bertambahnya waktu fermentasi dari hari ke-3 hingga hari ke-15. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya waktu fermentasi memberikan pengaruh terhadap aktivitas mikroorganisme anaerob dalam menguraikan bahan organik menjadi biogas. Peningkatan volume biogas selama fermentasi menunjukkan bahwa mikroorganisme anaerob mampu memanfaatkan bahan organik sebagai substrat untuk menghasilkan biogas secara bertahap. Menurut Weiland (2010), produksi biogas akan meningkat seiring berlangsungnya proses *anaerobic digestion* karena mikroorganisme memiliki waktu yang cukup untuk menguraikan senyawa organik kompleks menjadi senyawa sederhana yang selanjutnya dikonversi menjadi metana.

Lamanya waktu fermentasi merupakan salah satu faktor yang menentukan keberhasilan proses *anaerobic digestion*. Waktu fermentasi yang lebih panjang memberikan kesempatan bagi bakteri hidrolitik, asidogenik, asetogenik, dan metanogen untuk bekerja secara berurutan sehingga pembentukan biogas berlangsung lebih optimal (Khalid, Arshad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011).

Volume biogas yang lebih tinggi pada digester 2 L menunjukkan bahwa kapasitas reaktor dapat memengaruhi kestabilan proses fermentasi. Reaktor dengan volume yang lebih besar umumnya memiliki kondisi lingkungan yang lebih stabil sehingga mendukung pertumbuhan mikroorganisme anaerob dan meningkatkan efisiensi konversi bahan organik menjadi biogas (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa waktu fermentasi berpengaruh terhadap volume biogas yang dihasilkan. Semakin lama waktu fermentasi, semakin besar volume biogas yang terbentuk karena proses degradasi bahan organik berlangsung lebih optimal sehingga senyawa organik yang terkandung dalam campuran *whey* tahu dan ampas kopi semakin banyak dikonversi menjadi biogas. Peningkatan volume biogas menunjukkan bahwa aktivitas mikroorganisme anaerob, khususnya bakteri metanogen, masih berlangsung secara aktif hingga akhir fermentasi (Weiland, 2010; Khalid, 2011).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan urea dan waktu fermentasi terhadap karakteristik biogas dari campuran limbah cair tahu (*whey tahu*) dan ampas kopi melalui proses *anaerobic digestion*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penambahan urea berpengaruh terhadap pembentukan gas metana (CH_4) pada proses *anaerobic digestion*. Berdasarkan penelitian Pertama menggunakan substrat 1 L, dosis urea optimum diperoleh pada penambahan urea sebesar 1,5 gram dengan kadar CH_4 tertinggi sebesar 0,68% pada hari ke-15. Penambahan urea hingga dosis optimum mampu memperbaiki rasio C/N sehingga mendukung pertumbuhan mikroorganisme anaerob dan meningkatkan aktivitas bakteri metanogen. Namun, penambahan urea yang lebih tinggi, yaitu 2 gram, menyebabkan penurunan kadar CH_4 yang diduga akibat terbentuknya *free ammonia* yang menghambat aktivitas bakteri metanogen.
2. Waktu fermentasi berpengaruh terhadap karakteristik biogas yang dihasilkan. Pada penelitian utama menggunakan dosis urea optimum sebesar 1,5 gram, kadar CH_4 meningkat dari 6,8% pada hari ke-3 menjadi 37,4% pada hari ke-15. Seiring dengan

peningkatan CH_4, kadar CO_2 juga meningkat dari 4,0% menjadi 29,3%, sedangkan konsentrasi H_2S meningkat dari 1.673 ppm menjadi 3.701 ppm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fermentasi selama 15 hari menghasilkan karakteristik biogas terbaik karena proses *anaerobic digestion* telah berlangsung secara optimal sehingga aktivitas bakteri metanogen dalam mengonversi bahan organik menjadi metana semakin meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. Progress in Energy and Combustion Science, 34(6), 755–781. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002.

Asefa, S. K., Ancha, V. R., Habtu, N. G., & Binchebo, T. L. (2025). Enhancing biogas production from tannery wastewater via the incorporation of different quantities of spent coffee grounds. *Desalination and Water Treatment*, *323*, Artikel 101334.

Beschkov, VN; Angelov, IK Produksi Asam Lemak Volatil vs. Metana dan Hidrogen dalam Pencernaan Anaerobik. *Fermentasi* 2025 , *11* , 172.

Bond, T. , dan Templeton, MR (2011) Sejarah dan masa depan pembangkit biogas domestik di negara berkembang . Energy Sustain Dev 15 : 347 – 354

Budiman, I gusti S.,Kholisoh, Siti Diyar., Marsetyo, Muhammad Muflikh., Putranti, Mira 2010. *Pengaruh Jenis stater, volume pelarut, dan aditif terhadap pengolahan sampah organik rumah tangga menjadi kompos secara anaerob,* prosiding seminar nasional teknik kimia "kejuangan" pengembangan teknologi sumber daya alam manusia Indonesia, UPN veteran Yogyakarta

Campos-Vega, R.; Loarca-Piña, G.; Vergara-Castañeda, HA; Dave Oomah, B. Ampas Kopi Bekas: Tinjauan Penelitian Terkini dan Prospek Masa Depan. *Tren Ilmu Pangan dan Teknologi.* 2015 , *45* , 24–36

Copik, P.; Korus, A.; Szlęk, A.; Ditaranto, M. Studi Perbandingan Dekomposisi Termokimia Bahan Lignoselulosa untuk Pemulihan Energi dari Limbah: Pemantauan Gas yang Dihasilkan, Analisis

Hashemi, SE; Wijnsma, S.; Hillestad, M.; Austbø, B. Metanasi Biogas Langsung vs. Tidak Langsung untuk Produksi Biometana Cair: Evaluasi Konsep. *Fuel* 2024 , *371* , 131835

He, J. T., Yao, N., Sun, Z. Y., Li, F., Cai, H. Q., Jin, L. J., & Tang, Y. Q. (2023). Improved biogas production from tobacco processing waste via biochar-assisted thermophilic anaerobic digestion. *Industrial Crops and Products*, *202*, Artikel 117038. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117038

Horgan, FG; Floyd, D.; Mundaca, EA; Crisol-Martínez, E. Ampas Kopi Bekas yang Diterapkan sebagai Pupuk Permukaan atau Dicampur ke dalam Tanah Dapat Meningkatkan Pertumbuhan Tanaman Sekaligus Mengurangi Serangan Siput. *Pertanian* 2023 , *13* , 257

Induchoodan, T. G., Haq, I., & Kalamdhad, A. S. (2022). Factors affecting *anaerobic digestion for biogas production*: A review. Dalam C. Hussain & S. Hait (Eds.), *Advanced organic waste management* (hlm. 223–233).

Jin Cho, E.; Gyo Lee, Y.; Song, Y.; Nguyen, DT; Bae, HJ. Proses Terpadu untuk Konversi Ampas Kopi Menjadi Bahan Bernilai Tambah. *Bioresour. Technol.* 2022 , *346* , 126618

Kiiza, N., Aarakit, S. M., Katutsi, V. P., Murungi, H., Ssennono, V. F., Muwanga, R., Samanya, M., & Asingura, D. W. (2026). Analyzing biogas technology adoption in Ugandan

households: The role of remittances, ethnicity, and education. *Energy Policy*, *214*, Article 115236. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2026.115236

Lourenço, VA; Camargo, FP; Sakamoto, IK; Silva, EL; Varesche, MBA Pengaruh Proporsi dan Konsentrasi Substrat terhadap Komposisi dan Hasil Biogas dalam Ko-Digesti Limbah Padat dan Cair dari Peternakan Kopi dan Babi. *Energi Terbarukan* 2025 , *249* , 123191

Mahmoud, E.; Atabani, AE; Badruddin, IA. Pemanfaatan Ampas Kopi Bekas untuk Produksi Biogas: Pendekatan Bioekonomi Sirkular untuk Biorefinery. *Fuel* 2022 , *328* , 125296.

Manariotis ID, Grigoropoulos SG, Hung YT (2010) Pengolahan anaerobik air limbah berkonsentrasi rendah dengan reaktor biofilm. Dalam: Wang LK, Tay JH, Tay ST, Hung YT (eds) Buku Pegangan Teknik Lingkungan, vol 11. Humana Press, New York. doi: 10.1007/978-1-60327-031-1

Mathew AK, Bhui I, Banerjee SN, Goswami R, Shome A, Chakraborty AK, Balachandran S, Chaudhury S (2014) Produksi biogas dari gulma air lokal yang tersedia di Santiniketan melalui pencernaan anaerobik. Clean Technol Environ Policy. doi: 10.1007/s10098-014-0877-6

Novita, E., Rizki, K. F., & Pradana, H. A. (2025). Pemanfaatan slurry biogas dari penanganan air limbah agroindustri kopi sebagai pupuk cair [Utilization of biogas slurry from coffee agro-industrial wastewater treatment for liquid fertilizer]. *Teknotan: Jurnal Industri Teknologi Pertanian*, *19*(2), 145–152. https://doi.org/10.24198/jt.vol19n2.10

Oliva, A.; Tan, LC; Papirio, S.; Esposito, G.; Lens, PNL Pengaruh Perlakuan Awal Metanol-Organosolv pada Pencernaan Anaerobik Bahan Lignoselulosa. *Energi Terbarukan* 2021 , *169* , 1000–1012.

Roychand, R.; Kilmartin-Lynch, S.; Saberian, M.; Li, J.; Zhang, G.; Li, CQ. Mengubah Ampas Kopi Menjadi Sumber Daya Berharga untuk Peningkatan Kekuatan Beton. *J. Clean. Prod.* 2023 , *419* , 138205

Saleh, D. (2011). Sintesis dan Karakterisasi Selulosa Mikrobial dari *Whey* serta Pengaruh Iodium pada Sifat Mekanik, Listrik dan Absorpsi terhadap Limbah MgCl2, Mg(OH)2, dan HCl [Disertasi]. Universitas Indonesia.

Sappewali, Sukmawati, Tanri, C. S., & Aminah, S. (2024). Efektivitas instalasi pengolahan air limbah (IPAL) industri berdasarkan parameter chemical oxygen demand, total solid suspended dan derajat keasaman di Perusahaan X Kabupaten Gowa. *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*, *15*(1), 58–64

Sarker, S. A., Wang, S., Adnan, K. M. M., & Sattar, M. N. (2020). Economic feasibility and determinants of biogas technology adoption: Evidence from Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *123*, Article 109766. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109766

Vallero, D. A. (2014). Fundamentals of Air Pollution (5th ed.). Elsevier Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401733-7.01001-X

Vasmara, C.; Marchetti, R. Ampas Kopi Bekas dari Mesin Penjual Kopi sebagai Bahan Baku untuk Produksi Biogas. *Environ. Eng. Manag. J.* 2018 , *17* , 2401–2408.

Wardana, A., Kosjoko, & Mufarida, N. A. (2023). Pengaruh variasi starter kotoran sapi, kotoran kambing, limbah cair tahu dengan penambahan Effective Microorganisms-4 (EM-4) terhadap produksi gas metana. J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin, 8(1), 41–47.

Wresta, A., Sintawardani, N., Adisasmito, S., Kurniawan, T. A., & Setiadi, T. (2021). Characteristics of tofu *whey* degradation during self-sustaining batch anaerobic process for methane production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(6), Artikel 106359. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106359

Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). *Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review*. Process Biochemistry, 48(5–6), 901–911. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.04.012

Zhou, J., Ming, S., Zhang, Y., Liu, H., & Duan, N. (2025). Insights on anaerobic co-digestion of carbohydrate and protein at high load: Synergy evolution and inhibition transfer mechanism. *Chemical Engineering Journal*, *518*, Artikel 164535. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164535.