

Produksi Energi Terbarukan dari Serasah Daun Melalui *Anaerobic Digestion*: Studi Kasus Angsana dan Kerai Payung

Nopriandi¹, Salbina Amira Savilla², Ledis Heru Saryono Putro^{3*}

¹⁾ Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Raden Fatah Palembang, Palembang 30252, Indonesia

*e-mail: lherusp@radenfatah.ac.id

ABSTRAK

Populasi Indonesia yang terus bertumbuh dan laju urbanisasi tinggi menghasilkan timbunan sampah yang membebani tempat pembuangan akhir (TPA) serta menjadi sumber polutan bagi lingkungan hidup. Sampah organik, seperti sisa makanan, sampah daun, dan bahan organik lainnya, menjadi fraksi terbesar dari sampah. Sampah organik, tak terkecuali serasah daun yang berlimpah, menyimpan potensi besar sebagai sumber energi terbarukan melalui proses biokonversi. Teknologi seperti fermentasi, biodegradasi anaerobik, pirolisis, dan esterifikasi dapat mengubah serasah daun menjadi energi bersih, sekaligus mengurangi beban sampah di TPA. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi kombinasi serasah angsana (*Pterocarpus indicus*) dan serasah kerai payung (*Filicium decipiens*) untuk produksi biogas dengan menggunakan *anaerobic digestion* (AD). Produksi biogas dalam AD dari kombinasi serasah diselidiki dalam percobaan batch yang dioperasikan pada bioreactor 250 mL dengan rasio inokulum dan substrat (I/S) 2:1 selama 7 hari pada suhu mesofilik 37°C. Hasil penelitian menunjukkan produksi biogas dan metana kumulatif dari campuran serasah daun masing-masing 48,06 dan 25,52 mL, *specific methane potential* (SMP) dari kombinasi serasah adalah 0,0025 m³ CH₄/kg VS. Pada jumlah serasah 1000 kg maka potensi energi terbarukan (listrik) diproduksi 7,11 kWh(e). Dengan menggunakan metode biodegradasi anaerobik, maka kombinasi serasah dikonversi menjadi biogas-metana, dan selanjutnya dikonversi menjadi sumber energi listrik terbarukan.

Kata kunci: *Anaerobic digestion*, Biogas, Energi Terbarukan, Serasah Angsana dan Kerai Payung, *Specific Methane Potential*

ABSTRACT

Indonesia's growing population and high urbanization rate generate waste that overloads landfills and becomes a source of pollutants for the environment. Organic waste, such as food waste, leaf litter, and other organic materials, make up the largest fraction of waste. Organic waste, including abundant leaf litter, holds great potential as a renewable energy source through bioconversion processes. Technologies such as fermentation, anaerobic biodegradation, pyrolysis, and esterification can convert leaf litter into clean energy, while reducing the waste load in landfills. This study aims to evaluate the potential of a combination of angsana (*Pterocarpus indicus*) and umbrella (*Filicium decipiens*) leaf litter for biogas production using *anaerobic digestion* (AD). Biogas production in AD from litter

combinations was investigated in a batch experiment operated in a 250 mL bioreactor with an inoculum to substrate (I/S) ratio of 2:1 for 7 days at a mesophilic temperature of 37°C. The results showed that the cumulative biogas and methane production of the leaf litter mixture were 48.06 and 25.52 mL, respectively, the specific methane potential (SMP) of the litter combination was 0.0025 m³ CH₄/kg VS. At 1000 kg of litter, the potential renewable energy (electricity) produced was 7.11 kWh(e). Using anaerobic biodegradation method, the litter combination is converted into biogas-methane, and further converted into renewable electrical energy source.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Renewable Energy, Angsana litter and umbrella blades, Specific Methane Potential

PENDAHULUAN

Populasi Indonesia yang terus bertumbuh dan laju urbanisasi yang tinggi menghasilkan timbunan sampah yang luar biasa setiap harinya (Nisak *et al.*, 2019). Sampah organik, seperti sisa makanan dan sampah daun, menjadi fraksi terbesar dari total sampah yang dihasilkan. Ketidakmampuan dalam pengelolaan sampah secara berkelanjutan memicu berbagai permasalahan lingkungan yang serius, seperti pencemaran tanah, air, dan udara.

Di sisi lain, kebutuhan energi terus melonjak, yang berakibat pada konsumsi bahan bakar fosil yang tak henti-hentinya (Hermawan *et al.*, 2014). Hal ini menyebabkan cadangan minyak bumi menipis secara signifikan, dan emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor energi fosil menjadi salah satu kontributor utama perubahan iklim. Biokonversi serasah daun menawarkan solusi ramah lingkungan yang menjanjikan untuk mengatasi dua permasalahan ini sekaligus (Arfarita, 2023). Sampah organik, tak terkecuali serasah daun yang berlimpah, menyimpan potensi besar sebagai sumber energi terbarukan melalui proses biokonversi. Teknologi seperti fermentasi, anaerobic digestion, dan pirolisis dapat mengubah serasah daun menjadi biogas, yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi bersih untuk menggantikan bahan bakar fosil.

Konversi sampah organik menjadi energi terbarukan juga menawarkan solusi untuk mengurangi emisi metana dari tempat pembuangan akhir (TPA), yang merupakan salah satu gas rumah kaca paling berbahaya (Sukadaryati & Andini, 2021). Di samping itu, energi yang dihasilkan dapat dioptimalkan untuk kebutuhan lokal, sehingga menekan biaya energi dan meningkatkan kemandirian energi (Maya, 2022).

Pemanfaatan sampah organik melalui teknologi biokonversi juga membuka peluang terciptanya lapangan kerja baru dan memperkuat konsep ekonomi sirkular. Masyarakat dapat diberdayakan melalui program pengelolaan sampah berbasis komunitas, sedangkan sektor swasta berpeluang berinvestasi dalam teknologi pengolahan sampah dan energi terbarukan.

Namun, beberapa kendala perlu diatasi untuk mencapai pemanfaatan biokonversi serasah daun secara berkelanjutan dan ramah lingkungan (Arfarita, 2023). Rendahnya kesadaran dan partisipasi masyarakat, keterbatasan teknologi, dan hambatan pendanaan merupakan contoh utama. Solusi untuk mengatasi rintangan ini termasuk edukasi dan kampanye kesadaran publik, investasi dalam litbang teknologi, dan kebijakan yang mendukung pengelolaan sampah dan energi terbarukan. Upaya-upaya ini diharapkan dapat membuka jalan bagi pemanfaatan biokonversi serasah daun secara optimal dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Bahan Baku dan Inokulum

Serasah angkana dan serasah kerai payung diperoleh dari halaman kampus A UIN Raden Fatah Palembang. Inokulum merupakan kotoran sapi dari lokasi penggemukan sapi (sapi untuk hari raya Qurban) di Jln Panca Usaha Kec. Seberang Ulu I Kota Palembang.

Karakteristik Limbah dan Inokulum

Karakterisasi sampel tersebut meliputi kadar air (KA), kadar abu, padatan total (TS), dan padatan mudah menguap (VS). Inokulum (yaitu residu organik atau digestate) untuk uji *biochemical methane potential* (BMP) dikumpulkan dari penggemukan sapi (sapi untuk hari raya Qurban) di Jl. Panca Usaha Kec. Seberang Ulu I Kota Palembang. Karakterisasi inokulum dilakukan untuk parameter-parameter berikut: KA, Kadar abu, TS, dan VS.

Pengaturan Uji *Biochemical Methane Potential* (BMP)

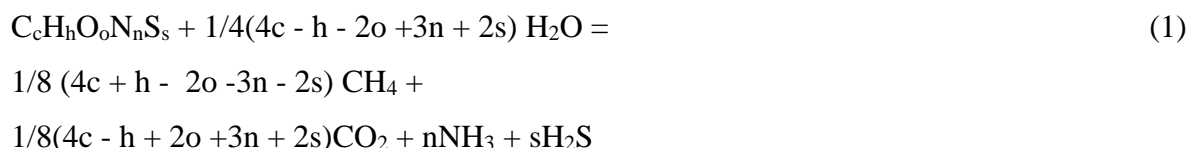
Sistem *biochemical methane potential* (BMP) manual menggunakan penangas air (37°C) digunakan untuk uji *biochemical methane potential* (BMP), yang dioperasikan selama 7 hari dalam kondisi batch. Sampel blanko kontrol disiapkan untuk mengukur produksi metana asli dari inokulum. Sampel angkana dan kerai payung disiapkan dalam rangkap tiga

dengan rasio inokulum terhadap substrat (rasio I/S) sebesar 2/1. Uji *biochemical methane potential* (BMP) dilakukan dengan menggunakan botol serum 250 mL dengan volume kerja 150 mL. Produksi biogas diukur dalam bentuk tekanan (kPa) menggunakan alat manometer merk SNDWAY tipe SW-512C setiap hari. ditambahkan dalam sampel blanko, dan mVS,ss mewakili massa substrat yang ditambahkan dalam reaktor.

Analisis Potensi Produksi Metana dan Energi Listrik dari Serasah

Potensi Metana dan Kalori Teoritis

Potensi metana dan kalori secara teoritis dapat dilakukan dengan menggunakan komposisi C, H, O, N yang telah diidentifikasi. Konsentrasi metana digunakan untuk menghitung *Specific methane potential* (SMP) adalah nilai yang diperoleh dari perhitungan menggunakan persamaan Buswell (Buswell & Muller, 1952), dengan asumsi bahwa 100% biomassa organik terdegradasi. persamaan Buswell dapat dilihat pada Persamaan 1 berikut:



Dimana:

C, H, O, N adalah fraksi berdasarkan padatan total (TS), langganan rumus molekul (c, h, o, n dan s) adalah proporsi molar dari fraksi massa unsur C, H, O, N dan S adalah jumlah mol

Analisa Pengukuran Volume Biogas

Perhitungan volume biogas yang terbentuk dilakukan dengan mengukur volume gas menggunakan manometer dan mengkonversi tekanan hasil pengukuran menggunakan persamaan (Suhartini *et al.*, 2019a).

$$\text{Volume Biogas (mL)} = \frac{P \times Vol \times Vm}{P_0} \quad (2)$$

$$(R \times T)$$

Keterangan:

P = Tekanan gas (kPa)

V_m = Volume molar gas ideal (22,414 L/mol)

Vol = volume headspace dalam botol (mL)

T = suhu (K)

R = Konstanta gas ideal (8,314 J/K mol)

Analisis *Specific Methane Potential* (SMP)

Specific methane potential (SMP) merupakan jumlah metana yang dihasilkan per kilogram VS. *Specific methane potential* (SMP) dapat dihitung menggunakan persamaan Buswell (Buswel & Muller, 1952), dengan asumsi 100% biomassa organik terdegradasi. *Specific methane potential* (SMP) dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Strömberg *et al.*, 2014; Suhartini *et al.*, 2019c):

$$SMP = \frac{V_s - V_b \frac{m_{IS}}{m_{IB}}}{m_{VS, sS}} \quad (3)$$

Keterangan :

V_s = Total volume biometana dari reaktor (mL)

m_{VS,sS} = Jumlah bahan organik yang terkandung dalam sampel (gram VS)

V_b = Jumlah biometana yang terkandung dalam sampel

m_{IS} = Jumlah total inokulum dalam sampel

m_{IB} = Jumlah total inokulum blank

Di mana, *Specific methane potential* (SMP) adalah volume metana yang dinormalisasi (m³ CH₄ / kg VS), VS dan VB menjadi gas metan dari limbah (serasah daun)

dengan 53,11 % dari biogas (Banks, 2009), sedangkan inokulum (kotoran sapi) sebesar 48,32% biogas (<https://phyllis.nl/Biomass/View/2782>).

$$\text{Volume metana (m}^3 \text{ CH}_4) = \text{SMP} \times \text{VS} \times \text{m} \quad (4)$$

Keterangan :

SMP = *Specific methane potential* (m³/kgVs)

VS = Total kandungan VS (gVS/kg berat basah)

m = Berat total substrat (kg berat basah)

Dapat diasumsikan bahwa energi yang dihasilkan dari setiap 1 m³ biogas yaitu sebesar 22 MJ (Suhartini *et al.*, 2019c). Perhitungan energi per hari (MJ/hari) yang dihasilkan dari total produksi biogas dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut (Kumar *et al.*, 2013):

$$\text{Energi/hari} = \text{Produksi gas harian (m}^3\text{/hari)} \times 22 \text{ MJ/m}^3 \quad (5)$$

Estimasi potensi listrik dapat diperkirakan dari hasil volume metana yang dihasilkan. Berdasarkan Setiap 1 m³ metana dapat menghasilkan energi sebesar 36 MJ atau setara dengan 10 kilowatt per jam (kWh). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Kumar *et al.*, 2013):

$$\text{Estimasi potensi listrik} = \text{Volume metana (CH}_4) \text{ (m}^3\text{CH}_4) \times 10 \text{ kWh/m}^3 \text{ CH}_4 \times 0,4 \quad (6)$$

SMP teoritis dibandingkan dengan *Specific methane potential* (SMP) terukur. Estimasi potensi listrik dihitung dengan asumsi 1 m³ biogas memiliki nilai kalor sebesar 22 MJ, dan 1 m³ CH₄ sama dengan 36 MJ. Dengan asumsi efisiensi konversi listrik sebesar 40% (Putro, 2022; Rahayu *et al.*, 2014), maka 1 m³ biogas akan menghasilkan 2,14 kWh (listrik) dan 1 m³ CH₄ akan menghasilkan 4 kWh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Substrat dan Inokulum

Nilai volatil solid (VS) menunjukkan jumlah total solid (TS) yang dikonversi menjadi gas selama proses pengasaman dan metanogenesis yang terjadi selama fermentasi (Simare *et*

al., 2022). Volatil solid (VS) merupakan indikator penting untuk menentukan potensi biogas yang dapat dihasilkan dari suatu bahan. Semakin tinggi nilai volatile solid, semakin tinggi pula potensi biogasnya. Kandungan volatil solid (VS) yang cukup besar akan mempengaruhi gas yang dihasilkan oleh proses *anaerobic digestion* (AD). Setiap bahan memiliki nilai volatile solid yang berbeda-beda. Seperti pada Tabel 1, serasah daun menunjukkan kandungan volatil solid (VS) sebesar 72,083% dari berat basah. Hasil volatil solid (VS) serasah daun menunjukkan angka yang mendekati dengan penelitian nilai yang ditemukan oleh Ruiz & Flotat (2016), dengan kadar volatil solid (VS) 96,7%. Bukti ini menunjukkan bahwa serasah daun masih mengandung sejumlah besar senyawa organik, terutama karbon (C-organik), selulosa (15-20%), hemiselulosa (80-85%), dan lignin (Anindyawati, 2010).

Kandungan serasah daun dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kandungan air yang telah menguap karena suhu dan sinar matahari, sehingga kandungan air yang tersimpan menjadi lebih sedikit, serta varietas pohon yang memiliki luas permukaan daun yang berbeda yang dapat mempengaruhi kandungan air, kandungan air yang tinggi dapat mempercepat proses dekomposisi serasah daun, sedangkan kandungan air yang rendah dapat memperlambat proses dekomposisi (Siarudin & Rachman, 2008).

Tabel 1. Karakteristik substrat dan inokulum

Parameter	Serasah	<i>Food waste</i> ^a	Inokulum (kotoran sapi)	Inokulum (kotoran sapi) ^b
KA (% WW)	24,08	74,31	81,40	0,59
TS (% WW)	75,92	25,69	18,60	2,41
VS (% WW)	72,083	24,83	15,28	1,82
VS/TS (% TS)	94,94	96,65	82,13	75,63
Abu (% WW)	3,84	1,70	3,32	97,59

WW: Wet weight

^a*Food waste* (Suhartini *et al.*, 2019c)

^bInokulum (kotoran sapi) (Suhartini *et al.*, 2019b)

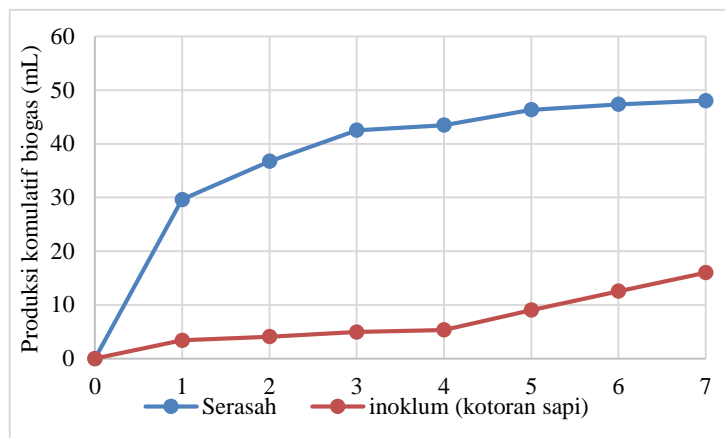
Berbeda dengan inokulum kotoran sapi yang dikombinasikan dengan bahan lain. Inokulum kotoran sapi memiliki konsentrasi volatil solid (VS) yang lebih rendah, yaitu hanya 15,28% dari berat basah. Namun, inokulum kotoran sapi mengandung beberapa mikroba anaerobik yang membantu proses penguraian. Beberapa mikroorganisme ini diklasifikasikan menurut penggunaannya, termasuk kelompok fermentatif seperti *Streptococci* sp., kelompok bakteri asetogenik seperti *Methanobacillus* sp., dan kelompok bakteri metana seperti *Methanobacterium* sp. (Mago *et al.*, 2020).

Interaksi serasah daun dengan inokulum kotoran sapi terjadi ketika bakteri metanogenik di dalam inokulum menerima energi ekstra dari bahan organik serasah daun. Hal ini akan mempengaruhi kandungan gas yang dihasilkan, sehingga menjadi lebih ideal (Perdana & Chalimah, 2013).

Hasil ini menunjukkan bahwa serasah daun cocok untuk digunakan sebagai bahan baku dalam proses *anaerobic digestion* (AD) untuk menghasilkan biogas. Menurut Xue *et al.* (2015), kandungan organik dalam bahan baku biomassa yang ditunjukkan oleh konsentrasi volatil solid (VS) dapat mempengaruhi produksi biogas dari suatu material organik. Kadar volatil solid (VS) yang tinggi suatu senyawa organik menjadi petunjuk bahwa memiliki kemampuan atau potensi sebagai sumber energi terbarukan.

Hasil Tes *Biochemical Methane Potential* (BMP)

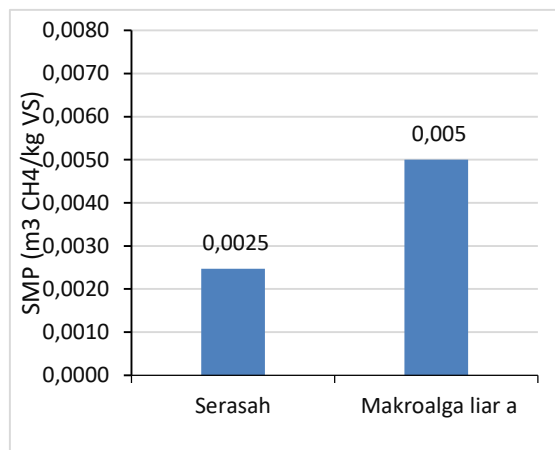
Volume biogas kumulatif dipantau setiap hari selama tujuh hari untuk membuat grafik produksi biogas. Berdasarkan hasil percobaan pada inokulum kotoran sapi, volume biogas kumulatif yang dihasilkan selama 7 hari adalah 15,98 mL, tetapi campuran inokulum dan serasah daun dengan rasio I/S 2:1 menghasilkan 48,057 mL dengan metana kumulatif 25,52 mL (gambar 1), dengan menggunakan konsentrasi metana teoritis dari persamaan Buswell, potensi metana kumulatif sebesar $0,0025 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$.



Gambar 1 Grafik produksi komulatif biogas serasah daun

Perlakuan inokulum kotoran sapi memiliki hasil yang lebih rendah karena tidak ada sumber energi tambahan untuk bakteri, sehingga menghasilkan produksi gas metana yang minimal. Kotoran sapi hanya mengandung serat dan protein, yang merupakan sumber energi utama bagi bakteri fermentasi asetogenik. Namun, bakteri metanogenik juga membutuhkan sumber karbon lain seperti asetat dan format untuk menghasilkan metana. Karena kurangnya bahan organik tambahan, bakteri fermentasi asetogenik menghasilkan asam volatil dan CO_2 , yang mengurangi bakteri metanogenik, sehingga produksi gas menjadi tidak optimal (Mago *et al.*, 2020).

Produksi metana spesifik (Gambar 2) menunjukkan bahwa Serasah mikro alga liara bahan baku pencernaan tunggal, kedua biomassa tersebut memiliki nilai *specific methane potential* (SMP) yang relatif berdekatan. Lebih lanjut, metana serasah daun sudah mulai terproduksi secara signifikan dari hari pertama masa inkubasi. Selama hari ke-0 hingga hari ke-1, produksi metana bernilai positif.



Gambar 2. Nilai rata-rata SMP Serasah daun

^a Makro alga liar (Suhartini *et al.*, 2020).

Hal ini berbeda dengan inokulum, karena mikroba anaerobik memiliki akses energi yang lebih banyak, maka jumlah gas yang dihasilkan dapat meningkat. Sehingga penguraian sampah organik menjadi biogas menjadi lebih efisien. Penambahan bahan substrat yang memiliki kandungan karbon atau nitrogen yang lebih besar dari bahan baku (kotoran sapi) dapat meningkatkan rasio I/S, sehingga rasio I/S yang tinggi (banyak inokulum) dapat meningkatkan laju dekomposisi substrat dan menghasilkan metana lebih banyak, namun sebaliknya rasio I/S yang rendah (sedikit inokulum) dapat menghambat proses dekomposisi dan menghasilkan metana lebih sedikit (Rajlakshmi *et al.*, 2023).

Beberapa faktor mempengaruhi efektivitas *anaerobic digestion* (AD) selama proses produksi gas. Jumlah gas yang dihasilkan ditentukan oleh beberapa parameter, termasuk komposisi bahan baku atau substrat, khususnya rasio I/S, pengadukan dalam sistem kerja, keasaman (pH), suhu, dan faktor lain seperti pengaturan digester, faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas *anaerobic digestion* (AD) dapat berdampak signifikan pada jumlah gas yang dihasilkan komposisi biogas, seperti kandungan metana dan karbon dioksida, juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor tersebut (Lubis *et al.*, 2017).

Estimasi Potensi Energi Terbarukan

Estimasi potensi energi terbarukan (listrik) dari 1000 kg serasah (substrat). Potensi energi tergantung pada *specific methane potential* (SMP) dari setiap bahan baku yang ditambahkan dalam proses *anaerobic digestion* (AD), di mana semakin tinggi SMP yang dihasilkan semakin tinggi pula volume metana yang dihasilkan sehingga semakin tinggi pula energi yang dihasilkan (Tabel 2.), estimasi potensi listrik dapat membantu untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dan lingkungan dari proyek *anaerobic digestion* (AD) serasah daun dandapat membantu untuk merancang sistem *anaerobic digestion* (AD) yang tepat, seperti kapasitas digester dan kebutuhan energi untuk pemanasan digester (Suhartini *et al.*, 2020).

Tabel 2. Potensi energi terbarukan (listrik)

Variabel	Nilai
Vol ch4 (m3 CH4)	1,78
Listrik (kWhe)	7,11
Ampas tahu ^a	87,37
Makroalga liar ^a	74,42

^aAmpas tahu ; Makroalga alga liar (Suhartini *et al.*, 2019c).

Penelitian ini menunjukkan bahwa Serasah juga dapat digunakan sebagai bahan baku pencernaan bersama dalam proses *anaerobic digestion* (AD). Sebagai bahan baku pencernaan tunggal, pra-perlakuan mungkin diperlukan untuk mengurangi kandungan salinitas serasah daun proses biodegradasi yang lebih stabil dan lebih cepat. Penggunaan serasah daun sebagai bahan baku *anaerobic digestion* (AD) dapat membantu mengurangi pencemaran lingkungan dengan mengubah limbah organik menjadi energi yang bermanfaat (Angelidaki & Sanders, 2009).

Selain itu, berdasarkan potensi listriknya, serasah juga memiliki potensi yang besar untuk bahan baku *anaerobic digestion* (AD). Serasah yang jatuh dari tanaman seperti daun, ranting, dan dahan, merupakan sumber daya alam yang berlimpah namun seringkali terabaikan. Di luar potensinya sebagai pupuk alami, serasah juga menyimpan potensi besar sebagai bahan baku *anaerobic digestion* (AD), sebuah proses biologi yang mengubah bahan organik menjadi biogas. Biogas ini kaya akan metana, yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Serasah daun mengandung berbagai macam senyawa organik, seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, dan protein. Senyawa-senyawa ini dapat diurai oleh mikroorganisme anaerobik dalam proses *anaerobic digestion* (AD) untuk menghasilkan metana. Hal ini mungkin disebabkan oleh kandungan volatil solid (VS) yang tinggi pada sampel serasah daun segar. Namun, diperlukan kajian yang mendalam dan komprehensif lebih lanjut diperlukan, termasuk neraca energi dan massa untuk mendapatkan energi bersih produksi energi bersih dari *anaerobic digestion* (AD) serasah daun baik secara tunggal maupun bersama dengan inokulum, atau mungkin yang lainnya.

SIMPULAN

Produksi biogas kumulatif dari campuran serasah daun uji BMP selama 7 hari yaitu 48,06 mL, *specific methane potential* (SMP) dari kombinasi serasah adalah 0,0025 m³ CH₄/kg VS. Pada jumlah serasah 1000 kg maka potensi energi terbarukan (listrik) sebesar 7,11 kWh(e). Biokonversi kombinasi serasah menggunakan metode biodegradasi anaerobik dihasilkan biogas-metana, sebagai sumber energi terbarukan. Upaya ini merupakan kontribusi untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dari limbah serasah daun serta dihasilkan energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2009). Deinking of recycled paper using an anaerobic digestion process. *Water Research*, 43(18), 4885-4890.
- Anindyawati, T. (2010). Potensi selulase dalam mendegradasi lignoselulosa limbah pertanian untuk pupuk organik. *Jurnal Selulosa*, 45(2), 70-77.
- Arfarita, N. (2023). *Biokonversi Limbah Biomassa Perkebunan dan Kehutanan*. UB Media.
- Banks, C. 2009. *Anaerobic digestion and energy*. University of Southamton

- Buswell, A.M., & Mueller, H.F. (1952). Mechanisms of methane fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44 (3), 550–552. <https://doi.org/10.1021/ie50507a033>
- Kumar, S., Jain, M. C., & Singh, R. P. (2013). Biogas production: An alternative energy source and its potential in india. *Renewable Energy Review*, 20(3), 347-358.
- Lubis, M., Diananto, D., & Triastanti, R. D. (2017). Analisis Potensi Jumlah Pembentukan Gas Metan Dari Limbah Ternak, Limbah Buah-Buahan, Dan Egeng Gondok. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 17(2), 5-14 . <https://doi.org/10.37412/jrl.v17i2.81>
- Mago, O. Y. T., Nirmalasari, M. Y., Kuki, A. D., Bunga, Y. N., & Misa, A. (2020). Pengaruh Jenis Limbah Organik dan Waktu Retensi terhadap Produksi Biogas dari Kotoran Sapi Effect of the Type of Organic Waste and Retention Time on Biogas Production from Cow Dung. *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 5(3), 155-162. <http://doi.org/10.24002/biota.v5i3.3682>
- Maya, S. (2022). *Analisis Penerapan Sistem Circular Economy Dalam Pengelolaan Daur Ulang Sampah Di Pusat Daur Ulang (Pdu) Kamandaka Bobosan* (Doctoral dissertation, UIN Prof. KH Saifuddin Zuhri)
- Nisak, F., Pratiwi, Y. I., & Gunawan, B. (2019). *Pemanfaatan biomas sampah organik*. Uwais Inspirasi Indonesia.
- Perdana, A. N. C., & Chalimah, S. (2013). *Pendayagunaan limbah serasah di universitas muhammadiyah surakarta menggunakan dua jenis feses untuk produksi biogas skala laboratorium* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Putro, L. H. S. (2022). Emissions of CH₄ and CO₂ from wastewater of palm oil mills: A real contribution to increase the greenhouse gas and its potential as renewable energy sources. *Environment and Natural resources journal*, 20(1), 61-72. <http://doi.org/10.32526/enrj/20/202100149>
- Rahayu AS, Karsiwulan D, Yuwono H, Paramita V. (2015). *Guide Book for Converting POME into Biogas: Project Development in Indonesia*. Jakarta, Indonesia: Winrock International.
- Rajlakshmi, D. A. Jadhav, S. Dutta, K. C. Sherpa, K. Jayaswal, S. Saravanabhupathy, , K. T. Mohanty, & R. C. Rajak. (2023). Codigestion processes of waste: Status and perspective. In *Bio-Based Materials and Waste for Energy Generation and Resource Management* (pp. 207-241). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91149-8.00010-7>

- Ruiz, B. & Flotats, X.. (2016). Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste. *Biochemical Engineering Journal*, 109, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.12.011>
- Siarudin, M., & Rachman, E. (2008). Biomassa lantai hutan dan jatuhan serasah di kawasan mangrove Blanakan, Subang, Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(4), 329-335.
- Simare, E., M., M. A. Sarah, & A. Husin. (2022). Analisis Produksi Biogas Terhadap Penambahan Kulit Singkong pada Variasi Campuran Limbah Cair Domestik dan Aquadest. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 11(2), 110-115. <https://doi.org/10.32734/jtk.v11i2.4997>
- Suhartini, S., Heaven, S., Zhang, Y., & Banks, C. J. (2019a). Antifoam, dilution and trace element addition as foaming control strategies in mesophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 145, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104812>
- Suhartini, S., Hidayat, N., & Nurika, I. (2019b). Evaluation of biogas potential from empty fruit oil palm bunches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 443(1), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012013>
- Suhartini, S., Lestari, Y. P., & Nurika, I. (2019c). Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230(1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012075>
- Suhartini, S., Nurika, I., Rahmah, N. L., Paul, R., & Melville, L. (2020). Potential of *Gracilaria* sp. As single-or co-digestion feedstock for biogas production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 460, No. 1, p. 012032). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/460/1/012032>
- Sukadaryati, S., & Andini, S. (2021). Upaya Pengelolaan Minim Sampah Rumah Tangga: Management Effort for Minimum Household Waste. *Jurnal Silva Tropika*, 5(2), 419-432. <https://doi.org/10.22437/jsilvtrop.v5i2.15415>
- Xue, Y., Liu, H., Chen, S., Dichtl, N., Dai, X., & Li, N. (2015). Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge. *Chemical Engineering Journal*, 264, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.005>