

Pemanfaatan Limbah Sayur untuk Produksi Biogas Ramah Lingkungan sebagai Media Pembelajaran IPA Berbasis Lingkungan

Anggel Permata Sari*, Sinta Bella, Mut'ah Miarti, Kartika Sari M, Helmi Susilawati

Program Studi Pendidikan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Negeri Fatmawati Sukarno Bengkulu, Indonesia

*Corresponding Author: angelajah032@gmail.com, sintabellasinta45@gmail.com, muthahmiarti@gmail.com, kartikasari120104@gmail.com, helmisusilawati562@gmail.com

Article History

Received : March 26th, 2026

Revised : April 13th, 2026

Accepted : April 27th, 2026

Abstract: Limbah sayur merupakan limbah organik yang terus meningkat akibat aktivitas rumah tangga dan pasar, serta berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi limbah sayur sebagai bahan baku biogas, menganalisis proses produksinya melalui fermentasi anaerob, serta menilai manfaat lingkungannya. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan pendekatan kuantitatif menggunakan digester sederhana selama 30 hari, dengan teknik pengumpulan data melalui observasi, pengukuran volume gas, dan dokumentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biogas mulai terbentuk pada hari ke-5 sebesar 10 ml, meningkat menjadi 45 ml pada hari ke-10, dan mencapai puncak pada hari ke-12 sebesar 60 ml, kemudian menurun pada hari ke-15. Proses ini dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme dalam tahapan hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis. Dengan demikian, limbah sayur efektif dimanfaatkan sebagai bahan baku biogas sekaligus menghasilkan residu yang dapat digunakan sebagai pupuk organik cair, sehingga menjadi solusi ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah dan pengembangan energi terbarukan.

Keywords: biogas, energi terbarukan, fermentasi anaerob, lingkungan, limbah sayur

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah limbah organik, khususnya limbah sayur, menjadi permasalahan yang semakin kompleks di berbagai daerah, baik di kawasan perkotaan maupun pedesaan. Aktivitas pasar tradisional, rumah tangga, serta sektor distribusi bahan pangan menghasilkan limbah sayur dalam jumlah besar setiap harinya. Limbah tersebut umumnya berupa sisa daun, batang, maupun sayuran yang tidak layak konsumsi. Apabila tidak dikelola secara optimal, limbah sayur akan mengalami pembusukan alami yang menimbulkan bau tidak sedap, mengundang vektor penyakit, serta mencemari lingkungan sekitar. Selain itu, proses dekomposisi limbah organik secara terbuka berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, terutama gas metana (CH₄), yang memiliki potensi pemanasan global jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida (CO₂) (Sari, 2023). Kondisi ini menunjukkan bahwa pengelolaan limbah sayur tidak hanya berkaitan dengan aspek kebersihan lingkungan, tetapi juga berhubungan erat dengan isu

perubahan iklim global yang semakin menjadi perhatian dalam kajian ilmu pengetahuan alam.

Permasalahan limbah organik yang tidak terkelola dengan baik sering kali disebabkan oleh rendahnya kesadaran masyarakat serta keterbatasan teknologi pengolahan limbah yang sederhana dan aplikatif. Sebagian besar limbah sayur masih dibuang ke tempat pembuangan akhir tanpa melalui proses pemanfaatan lebih lanjut. Padahal, limbah tersebut memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dan berpotensi untuk diolah menjadi produk bernilai guna, salah satunya adalah energi alternatif berupa biogas. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, pemanfaatan limbah organik menjadi energi terbarukan merupakan salah satu solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus menekan dampak negatif terhadap lingkungan (Rahmawati, 2022). Oleh karena itu, diperlukan upaya yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga edukatif, sehingga masyarakat memiliki pengetahuan dan keterampilan dalam mengelola limbah secara bijak.

Biogas merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang dihasilkan melalui proses fermentasi anaerob, yaitu proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen. Proses ini menghasilkan gas yang didominasi oleh metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), serta sejumlah kecil gas lainnya seperti hidrogen sulfida (H_2S) (Putra & Lestari, 2022). Metana sebagai komponen utama biogas memiliki nilai kalor yang cukup tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk memasak, penerangan, maupun pembangkit listrik skala kecil. Selain itu, teknologi biogas juga memiliki keunggulan dalam mengurangi volume limbah organik serta menghasilkan produk sampingan berupa slurry yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik (Yusuf, 2023). Konsep ini sangat relevan dalam pembelajaran IPA, khususnya pada materi energi terbarukan, perubahan energi, serta peran mikroorganisme dalam proses biokimia.

Pemanfaatan limbah sayur sebagai bahan baku biogas memiliki potensi yang sangat besar, terutama di Indonesia yang memiliki keanekaragaman sumber daya hayati serta aktivitas pertanian dan perdagangan yang tinggi. Limbah sayur umumnya memiliki kadar air yang tinggi serta kandungan karbohidrat, protein, dan serat yang mudah terurai oleh mikroorganisme, sehingga sangat mendukung proses fermentasi anaerob (Hidayat, 2024). Karakteristik ini menjadikan limbah sayur sebagai substrat yang ideal dalam produksi biogas dibandingkan dengan limbah organik lainnya yang memiliki struktur lebih kompleks. Selain itu, penggunaan limbah sayur sebagai bahan baku biogas juga dapat mengurangi biaya operasional karena bahan tersebut mudah diperoleh dan sering kali tidak memiliki nilai ekonomi jika tidak dimanfaatkan. Dalam konteks pendidikan, potensi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber belajar kontekstual yang memungkinkan peserta didik memahami konsep IPA melalui pengalaman langsung di lingkungan sekitar.

Pengembangan teknologi biogas berbasis limbah sayur juga sejalan dengan konsep ekonomi sirkular yang menekankan pada pemanfaatan kembali limbah menjadi sumber daya baru yang bernilai. Dalam konsep ini, limbah tidak lagi dipandang sebagai sesuatu yang harus dibuang, melainkan sebagai bahan baku yang dapat diolah menjadi produk lain yang bermanfaat. Dengan demikian, pemanfaatan limbah sayur untuk produksi biogas tidak hanya

memberikan manfaat dalam bentuk energi alternatif, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan pencemaran lingkungan dan peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya (Widodo, 2024). Hal ini menjadi sangat relevan dalam upaya mendukung target pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs), khususnya pada aspek energi bersih dan pengelolaan limbah. Dalam pembelajaran IPA, konsep ini dapat diintegrasikan sebagai bagian dari pendidikan lingkungan hidup yang bertujuan membentuk karakter peduli lingkungan pada peserta didik.

Meskipun memiliki potensi yang besar, pemanfaatan limbah sayur sebagai biogas masih menghadapi berbagai kendala, antara lain kurangnya pengetahuan masyarakat mengenai teknologi biogas, keterbatasan fasilitas pendukung, serta belum optimalnya dukungan kebijakan dari pemerintah daerah. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mampu memberikan gambaran empiris mengenai potensi limbah sayur sebagai bahan baku biogas serta proses produksi yang efektif dan efisien. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi dalam bidang teknologi energi terbarukan, tetapi juga dalam pengembangan media dan sumber belajar yang inovatif dalam pembelajaran IPA.

Selain itu, kajian mengenai produksi biogas dari limbah sayur juga penting untuk mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan proses fermentasi, seperti komposisi bahan, rasio campuran, suhu, pH, serta waktu fermentasi. Faktor-faktor tersebut sangat menentukan jumlah dan kualitas biogas yang dihasilkan. Dengan memahami faktor-faktor tersebut, proses produksi biogas dapat dioptimalkan sehingga menghasilkan energi yang lebih maksimal dan berkelanjutan (Putra & Lestari, 2022). Dalam konteks pendidikan, pemahaman terhadap faktor-faktor ini dapat melatih keterampilan proses sains peserta didik, seperti mengamati, mengukur, menganalisis, dan menarik kesimpulan berdasarkan data empiris.

Di sisi lain, pemanfaatan limbah sayur sebagai biogas juga memiliki nilai edukatif yang tinggi, karena dapat meningkatkan kesadaran masyarakat dan peserta didik tentang pentingnya pengelolaan limbah yang ramah lingkungan. Pembelajaran IPA yang mengintegrasikan praktik pemanfaatan limbah menjadi energi alternatif dapat mendorong siswa untuk berpikir kritis, kreatif, serta memiliki sikap ilmiah dalam

menghadapi permasalahan lingkungan. Dengan demikian, pembelajaran tidak hanya berorientasi pada penguasaan konsep, tetapi juga pada pembentukan karakter dan kepedulian terhadap lingkungan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan guna mengkaji secara lebih mendalam mengenai pemanfaatan limbah sayur dalam produksi biogas ramah lingkungan sekaligus sebagai media pembelajaran IPA berbasis lingkungan. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi limbah sayur dalam menghasilkan biogas, menganalisis proses produksi biogas melalui fermentasi anaerob, serta menilai manfaat lingkungan dan nilai edukatifnya dalam pembelajaran IPA. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan energi terbarukan, pengelolaan limbah organik yang berkelanjutan, serta inovasi pembelajaran IPA yang kontekstual, aplikatif, dan relevan dengan kehidupan sehari-hari.

METODE

Metode penelitian merupakan cara yang digunakan untuk memperoleh data serta menganalisis data tersebut secara sistematis. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk menguji potensi limbah sayur dalam menghasilkan biogas. Metode eksperimen dipilih karena mampu menjelaskan hubungan sebab-akibat secara langsung dalam kondisi terkontrol, sedangkan pendekatan kuantitatif digunakan untuk menghasilkan data berupa angka yang dapat diukur secara objektif (Hidayat, 2024; Widodo, 2024).

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 30 hari, mencakup tahap persiapan, pelaksanaan, dan pengamatan. Waktu tersebut dipilih karena proses fermentasi anaerob umumnya berlangsung optimal dalam rentang dua hingga empat minggu (Putra & Lestari, 2022). Penelitian dilakukan di lingkungan rumah tangga di Kota Bengkulu dengan pertimbangan kemudahan akses bahan serta relevansi penerapan teknologi biogas skala kecil dalam kehidupan sehari-hari (Rahmawati, 2023).

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh limbah organik rumah tangga yang berpotensi menghasilkan biogas. Sampel yang digunakan berupa limbah sayur yang terdiri atas kubis, bayam, dan wortel. Pemilihan sampel dilakukan secara purposive dengan mempertimbangkan kandungan air dan bahan organik yang tinggi sehingga mudah terurai oleh mikroorganisme (Yusuf, 2023).

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, limbah sayur dicacah menjadi ukuran kecil untuk mempercepat proses penguraian. Kedua, limbah sayur dicampur dengan air dengan perbandingan 1:1 untuk menciptakan kondisi substrat yang optimal. Ketiga, ditambahkan starter berupa EM4 atau kotoran ternak sebagai sumber mikroorganisme pengurai. Selanjutnya, campuran dimasukkan ke dalam digester sederhana, kemudian ditutup rapat untuk menciptakan kondisi anaerob. Proses fermentasi berlangsung selama 30 hari dengan pengamatan volume gas yang dihasilkan setiap hari. Tahapan fermentasi meliputi hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis yang berperan dalam pembentukan biogas (Widodo, 2024).

Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan teknik deskriptif kuantitatif. Analisis dilakukan dengan mengolah data volume biogas yang dihasilkan setiap hari, kemudian disajikan dalam bentuk tabel atau grafik untuk mempermudah interpretasi. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi pola produksi biogas serta menentukan titik produksi maksimum. Analisis deskriptif kuantitatif dinilai efektif dalam mengevaluasi efisiensi proses fermentasi dan potensi bahan baku biogas (Yusuf, 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan selama 30 hari, diperoleh data bahwa proses produksi biogas dari limbah sayur menunjukkan pola peningkatan yang bertahap sebelum akhirnya mengalami penurunan. Produksi gas tidak terjadi secara langsung pada hari pertama, melainkan melalui fase adaptasi mikroorganisme yang membutuhkan waktu untuk menyesuaikan diri dengan lingkungan

substrat dalam digester. Gas mulai terdeteksi pada hari ke-5, yang menunjukkan bahwa proses fermentasi anaerob telah memasuki tahap aktif.

Tabel 1. Data Produksi Biogas

No	Hari ke-	Volume Biogas (ml)	Keterangan
1	5	10	Awal terbentuk gas
2	10	45	Produksi meningkat
3	12	60	Produksi maksimal
4	15	-	Produksi mulai menurun

Pada hari ke-1 hingga hari ke-4, belum terlihat adanya produksi gas yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh fase hidrolisis dan asidogenesis, di mana bahan organik kompleks dalam limbah sayur mulai diuraikan menjadi senyawa yang lebih sederhana oleh mikroorganisme. Pada fase ini, aktivitas bakteri belum menghasilkan gas metana secara optimal, sehingga volume gas yang terbentuk masih sangat kecil dan belum terdeteksi secara jelas.

Memasuki hari ke-5, mulai terlihat adanya produksi gas sebesar 10 ml. Hal ini menunjukkan bahwa proses fermentasi telah memasuki tahap asetogenesis dan awal metanogenesis, di mana senyawa organik sederhana mulai diubah menjadi asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida yang kemudian dimanfaatkan oleh bakteri metanogen untuk menghasilkan metana. Produksi gas yang masih rendah pada tahap ini menunjukkan bahwa populasi bakteri metanogen masih dalam tahap perkembangan.

Pada hari ke-10, terjadi peningkatan produksi gas yang cukup signifikan, yaitu mencapai 45 ml. Peningkatan ini menunjukkan bahwa aktivitas mikroorganisme dalam digester telah mencapai kondisi yang lebih stabil dan optimal. Kondisi lingkungan dalam digester, seperti suhu, pH, serta ketersediaan substrat, berada pada kondisi yang mendukung proses fermentasi anaerob secara maksimal. Hal ini juga menunjukkan bahwa limbah sayur sebagai bahan baku memiliki kandungan nutrisi yang cukup untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme penghasil biogas.

Puncak produksi biogas terjadi pada hari ke-12 dengan volume gas mencapai 60 ml. Pada tahap ini, proses metanogenesis berlangsung secara optimal, di mana bakteri metanogen secara aktif mengubah senyawa organik menjadi gas metana. Tingginya produksi gas pada hari ke-12 menunjukkan bahwa kondisi dalam digester berada pada titik keseimbangan antara

ketersediaan substrat dan aktivitas mikroorganisme.

Namun, setelah hari ke-12, produksi biogas mulai mengalami penurunan, yang terlihat jelas pada hari ke-15. Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya jumlah bahan organik yang tersedia dalam digester sebagai substrat bagi mikroorganisme. Selain itu, akumulasi produk samping seperti asam organik juga dapat menghambat aktivitas bakteri metanogen jika tidak dikontrol dengan baik. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah sayur memiliki potensi yang cukup baik sebagai bahan baku dalam produksi biogas. Pola produksi yang dihasilkan menunjukkan karakteristik umum dari proses fermentasi anaerob, yaitu adanya fase adaptasi, fase pertumbuhan, fase puncak, dan fase penurunan.

Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah sayur efektif dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi biogas ramah lingkungan. Hal ini sejalan dengan karakteristik limbah sayur yang memiliki kandungan air tinggi serta senyawa organik yang mudah terurai, seperti karbohidrat, protein, dan serat. Kandungan tersebut menjadi sumber nutrisi utama bagi mikroorganisme dalam proses fermentasi anaerob. Keberadaan air dalam jumlah yang cukup juga membantu menciptakan kondisi lingkungan yang mendukung aktivitas bakteri, sehingga proses dekomposisi berlangsung lebih cepat dan efisien (Hidayat, 2024). Dalam konteks pendidikan, temuan ini sangat relevan untuk dijadikan sebagai materi pembelajaran IPA berbasis lingkungan, karena peserta didik dapat memahami secara langsung konsep daur materi, energi terbarukan, serta peran mikroorganisme dalam kehidupan sehari-hari.

Produksi biogas yang mulai terlihat pada hari ke-5 menunjukkan bahwa proses fermentasi memerlukan waktu adaptasi bagi mikroorganisme untuk berkembang. Fase awal ini dikenal sebagai fase lag, di mana bakteri mulai menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan dalam digester. Pada fase ini, aktivitas mikroorganisme masih terbatas, sehingga produksi gas belum optimal. Namun, setelah melewati fase adaptasi, jumlah mikroorganisme meningkat secara signifikan dan mulai menghasilkan gas dalam jumlah yang lebih besar. Hal ini sesuai dengan teori fermentasi anaerob yang menyatakan bahwa pertumbuhan

mikroorganisme mengikuti kurva pertumbuhan logaritmik sebelum mencapai fase stasioner (Widodo, 2024). Dalam pembelajaran IPA, konsep ini dapat diintegrasikan sebagai media praktikum sederhana yang membantu siswa memahami proses pertumbuhan mikroorganisme secara empiris, sehingga pembelajaran menjadi lebih kontekstual dan tidak hanya bersifat teoritis.

Peningkatan produksi biogas yang signifikan pada hari ke-10 hingga hari ke-12 menunjukkan bahwa proses fermentasi telah memasuki fase metanogenesis yang optimal. Pada fase ini, bakteri metanogen berperan aktif dalam mengubah asam asetat, hidrogen, dan karbon dioksida menjadi gas metana. Metana merupakan komponen utama biogas yang memiliki nilai energi tinggi, sehingga peningkatan produksi metana menunjukkan keberhasilan proses fermentasi (Putra & Lestari, 2022). Kondisi ini juga dipengaruhi oleh keseimbangan antara pH, suhu, dan ketersediaan substrat dalam digester. pH yang netral hingga sedikit asam serta suhu yang stabil sangat mendukung aktivitas bakteri metanogen dalam menghasilkan biogas secara optimal (Rahmawati, 2023). Dalam perspektif pendidikan, fenomena ini dapat dijadikan sebagai contoh nyata dalam pembelajaran konsep perubahan energi dan reaksi kimia dalam IPA, sehingga peserta didik mampu mengaitkan teori dengan praktik di lingkungan sekitar.

Penurunan produksi biogas setelah hari ke-12 menunjukkan bahwa ketersediaan substrat dalam digester mulai berkurang. Mikroorganisme tidak lagi mendapatkan nutrisi yang cukup untuk mempertahankan aktivitasnya, sehingga produksi gas menurun secara bertahap. Selain itu, akumulasi senyawa asam organik sebagai produk antara dalam proses fermentasi dapat menyebabkan penurunan pH, yang pada akhirnya menghambat aktivitas bakteri metanogen (Yusuf, 2023). Oleh karena itu, dalam praktiknya, diperlukan pengelolaan yang baik terhadap kondisi dalam digester, seperti penambahan bahan baku secara berkala atau pengontrolan pH, untuk menjaga stabilitas produksi biogas. Dalam pembelajaran IPA, hal ini dapat dijadikan sebagai bahan diskusi berbasis masalah (problem-based learning), di mana siswa dilatih untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi suatu proses ilmiah serta mencari solusi terhadap permasalahan yang terjadi.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa limbah sayur memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Pemanfaatan limbah sayur tidak hanya mengurangi volume limbah yang dibuang ke lingkungan, tetapi juga mengubahnya menjadi energi yang memiliki nilai ekonomis. Hal ini sejalan dengan konsep ekonomi sirkular yang menekankan pada pemanfaatan kembali limbah menjadi sumber daya yang bermanfaat (Widodo, 2024). Dalam konteks pendidikan IPA, konsep ini sangat penting untuk ditanamkan kepada peserta didik sebagai bagian dari pendidikan lingkungan hidup, sehingga mereka memiliki kesadaran dan tanggung jawab dalam menjaga kelestarian lingkungan sejak dini.

Selain menghasilkan biogas, proses fermentasi limbah sayur juga menghasilkan residu berupa slurry yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik cair. Residu ini mengandung unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman. Pemanfaatan residu ini memberikan nilai tambah dalam proses produksi biogas, karena tidak hanya menghasilkan energi, tetapi juga produk sampingan yang bermanfaat bagi sektor pertanian (Yusuf, 2023). Dalam pembelajaran IPA, hal ini dapat dijadikan sebagai proyek berbasis praktik (project-based learning) yang melibatkan siswa secara aktif dalam mengolah limbah menjadi produk yang bermanfaat, sehingga mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kreativitas siswa.

Dari sisi implementasi, teknologi biogas berbasis limbah sayur memiliki keunggulan karena relatif sederhana dan dapat diterapkan di tingkat rumah tangga. Penggunaan digester sederhana dari drum plastik menunjukkan bahwa teknologi ini tidak memerlukan biaya yang besar serta dapat dibuat dengan bahan yang mudah diperoleh. Hal ini sangat penting dalam mendorong partisipasi masyarakat dalam pengelolaan limbah organik secara mandiri. Selain itu, penerapan teknologi ini juga dapat meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pengelolaan limbah yang berkelanjutan (Hidayat, 2024). Dalam dunia pendidikan, hal ini dapat dijadikan sebagai inovasi media pembelajaran IPA berbasis lingkungan yang aplikatif dan mudah diterapkan di sekolah.

Namun demikian, terdapat beberapa kendala yang perlu diperhatikan dalam pengembangan teknologi ini. Salah satu kendala utama adalah kurangnya pengetahuan masyarakat mengenai cara pengelolaan biogas yang baik dan benar. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan pH juga dapat memengaruhi keberhasilan proses fermentasi. Oleh karena itu, diperlukan edukasi dan pendampingan kepada masyarakat agar teknologi ini dapat diterapkan secara optimal. Dukungan dari pemerintah dan lembaga terkait juga sangat diperlukan dalam bentuk pelatihan, penyediaan fasilitas, serta kebijakan yang mendukung pengembangan energi terbarukan (Rahmawati, 2023). Dalam konteks pendidikan, hal ini menunjukkan pentingnya peran sekolah sebagai agen perubahan dalam memberikan edukasi kepada masyarakat melalui pembelajaran IPA yang berbasis pada isu-isu lingkungan nyata.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah sayur memiliki potensi yang sangat baik untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku biogas. Proses fermentasi anaerob yang dilakukan menghasilkan biogas dengan volume yang cukup signifikan, terutama pada fase metanogenesis. Selain itu, pemanfaatan limbah sayur juga memberikan manfaat tambahan berupa pupuk organik yang dapat digunakan dalam kegiatan pertanian. Dengan demikian, pemanfaatan limbah sayur sebagai biogas tidak hanya memberikan solusi terhadap permasalahan limbah, tetapi juga berkontribusi terhadap pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Dalam perspektif pendidikan IPA, penelitian ini dapat dijadikan sebagai sumber belajar kontekstual, media praktikum, serta inovasi pembelajaran berbasis lingkungan yang mampu meningkatkan pemahaman konsep, keterampilan ilmiah, dan kesadaran ekologis peserta didik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa limbah sayur memiliki potensi yang sangat baik untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi biogas ramah lingkungan. Proses fermentasi anaerob yang berlangsung selama 30 hari menunjukkan bahwa produksi biogas terjadi secara bertahap melalui aktivitas mikroorganisme, dimulai dari fase adaptasi hingga fase metanogenesis. Gas mulai

terbentuk pada hari ke-5, meningkat secara signifikan pada hari ke-10, dan mencapai puncaknya pada hari ke-12, sebelum mengalami penurunan pada hari ke-15 akibat berkurangnya substrat organik. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas produksi biogas dipengaruhi oleh ketersediaan bahan baku, kondisi lingkungan dalam digester, serta aktivitas bakteri metanogen yang berperan dalam pembentukan gas metana. Selain itu, limbah sayur yang memiliki kandungan air dan nutrisi tinggi terbukti mampu mempercepat proses fermentasi serta meningkatkan produksi biogas sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan. Pemanfaatan limbah sayur tidak hanya memberikan solusi terhadap permasalahan pencemaran lingkungan, tetapi juga menghasilkan energi yang ekonomis dan berkelanjutan. Residu hasil fermentasi yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik cair juga memberikan nilai tambah secara ekologis dan ekonomis, sehingga mendukung konsep ekonomi sirkular dalam pengelolaan limbah. Dalam perspektif pendidikan, hasil penelitian ini memiliki implikasi yang signifikan terhadap pengembangan pembelajaran IPA berbasis lingkungan. Pemanfaatan limbah sayur untuk produksi biogas dapat dijadikan sebagai media pembelajaran kontekstual yang mampu menghubungkan konsep teori dengan praktik nyata di kehidupan sehari-hari. Melalui kegiatan ini, peserta didik tidak hanya memahami konsep energi terbarukan, daur materi, dan peran mikroorganisme, tetapi juga mengembangkan keterampilan ilmiah, berpikir kritis, serta kesadaran terhadap pentingnya menjaga lingkungan. Dengan demikian, teknologi biogas berbasis limbah sayur tidak hanya layak dikembangkan sebagai solusi pengelolaan limbah dan penyedia energi alternatif, tetapi juga sebagai inovasi pembelajaran IPA yang efektif, aplikatif, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan selama proses penelitian ini berlangsung, baik secara langsung maupun tidak langsung. Terima kasih juga disampaikan kepada keluarga dan rekan-rekan yang telah memberikan motivasi serta dukungan moral sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- Anderson, J. (2020). Renewable energy and environmental sustainability. *Journal of Energy Studies*, 12(2), 101–110.
- Arikunto, S. (2021). *Prosedur Penelitian: Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Creswell, J. W. (2021). *Research Design: Pendekatan Metode Kualitatif, Kuantitatif, dan Campuran*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Hidayat, A. (2024). *Teknologi Biogas Skala Rumah Tangga*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Kurniawan, B., & Saputra, H. (2023). Pemanfaatan limbah organik sebagai energi alternatif berbasis biogas. *Jurnal Teknologi Energi*, 7(1), 15–23.
- Lestari, D., & Putra, R. (2022). Produksi biogas dari limbah sayuran di lingkungan pasar tradisional. *Jurnal Energi Terbarukan*, 6(2), 45–52.
- Mulyani, S. (2023). Pengolahan limbah organik rumah tangga berbasis teknologi sederhana. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 8(1), 22–30.
- Nugroho, A. (2024). Analisis efisiensi produksi biogas dari limbah sayur. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 9(1), 10–18.
- Prasetyo, E. (2022). Fermentasi anaerob dalam produksi energi terbarukan. *Jurnal Bioteknologi Indonesia*, 5(2), 34–41.
- Putra, R., & Lestari, D. (2022). Pemanfaatan limbah organik sebagai energi alternatif biogas. *Jurnal Energi Terbarukan*, 6(2), 45–52.
- Rahmawati, S. (2022). Pengelolaan limbah organik berbasis masyarakat dalam mendukung lingkungan berkelanjutan. *Jurnal Lingkungan Hidup*, 5(1), 12–20.
- Rahmawati, S. (2023). Strategi pengelolaan limbah rumah tangga untuk mengurangi pencemaran lingkungan. *Jurnal Ekologi dan Lingkungan*, 7(2), 30–38.
- Sari, M. (2023). Dampak limbah organik terhadap emisi gas rumah kaca. *Jurnal Ekologi*, 7(1), 33–40.
- Setiawan, D. (2024). Potensi limbah sayur sebagai bahan baku energi alternatif. *Jurnal Inovasi Energi*, 6(1), 5–13.
- Sugiyono. (2022). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Wahyuni, R., & Hadi, S. (2023). Karakteristik limbah organik dalam produksi biogas. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 7(3), 40–48.
- Warschauer, M., & Matuchniak, T. (2019). New technology and digital worlds: Analyzing evidence of equity in access, use, and outcomes. *Review of Research in Education*, 43(1), 179–225.
- Widodo, T. (2024). Proses fermentasi anaerob dalam produksi biogas. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 8(1), 21–30.
- Yusuf, A. (2023). Komposisi dan manfaat biogas sebagai energi terbarukan. *Jurnal Sains Energi*, 6(3), 55–63.
- Zulkarnain, M. (2022). Pengembangan energi terbarukan berbasis limbah organik. *Jurnal Energi Nasional*, 5(2), 18–26.