

BAB II KAJIAN TEORI

A. Kajian Teori

1. Monograf

Monograf merupakan salah satu bentuk karya ilmiah yang memiliki kedudukan penting dalam dunia akademik. Secara etimologis, istilah monograf berasal dari bahasa Yunani yaitu "mono" dan "graph". Kata "mono" berarti satu atau tunggal, sedangkan "graph" berarti menulis. Jadi, monograf bisa diartikan sebagai menulis mengenai satu topik tertentu. Monograf adalah buku yang isinya membahas satu subbidang ilmu secara spesifik (Fatmawati, 2020).

Monograf merupakan bentuk publikasi ilmiah yang disusun berdasarkan hasil penelitian atau kajian ilmiah yang memiliki fokus dan kedalaman pada satu bidang tertentu. Ciri khas monograf terletak pada pembahasan yang terarah dan mendalam, berbeda dengan buku ajar yang cenderung lebih umum dan digunakan sebagai bahan pembelajaran dasar. Tujuan utama penulisan monograf adalah untuk menyebarluaskan hasil riset dan gagasan ilmiah sehingga dapat dimanfaatkan oleh kalangan akademisi dan masyarakat ilmiah secara luas. Hal ini menunjukkan bahwa monograf bukan hanya sekadar kumpulan tulisan, tetapi merupakan salah satu media dalam sistem komunikasi ilmiah yang menghubungkan penulis dengan pembaca (Khulzannah, 2018).

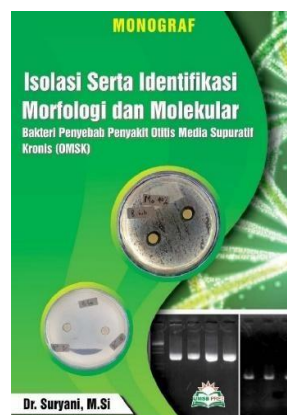
Menurut Nasution (2022) Monograf memiliki nilai akademik yang tinggi karena menggabungkan teori dan hasil penelitian dalam bidang

tertentu. Karya ini menunjukkan kemampuan penulis dan bertindak sebagai sarana berkomunikasi ilmiah antar peneliti. Dengan pendapat serupa, menekankan bahwa monograf penting untuk memperkaya ilmu pengetahuan dengan penyajian penelitian yang dalam, terstruktur dan berdasarkan temuan atau hasil penelitian yang baru.

Monograf memiliki struktur yang berbeda dari publikasi ilmiah lainnya. Dalam konteks penulisan ilmiah, monograf memiliki karakteristik struktural dan sistematis yang membedakannya. Umumnya, monograf disusun dengan tahapan yang jelas, mulai dari rumusan masalah, kajian teori, metode atau pendekatan, analisis, hingga simpulan dan daftar pustaka. Struktur ini memudahkan pembaca dalam memahami topik secara utuh dan berkesinambungan. Monograf biasanya diterbitkan sebagai buku tunggal dan tidak berseri, sehingga setiap edisi berdiri sendiri sebagai satu unit kajian ilmu pengetahuan (Mahelingga, 2020).

Keunggulan monograf terletak pada hasil penelitian yang disusun secara lengkap. Keunggulan ini terlihat dari adanya rumusan masalah yang mengandung kebaruan (*novelty*), yang didasarkan pada data atau landasan teori terbaru yang disajikan secara jelas. Selain itu, monograf biasanya disertai oleh ilustrasi, contoh atau kasus yang disusun berdasarkan hasil pengamatan literatur yang cukup. Di sisi lain, monograf juga memiliki beberapa keterbatasan. Pembahasan yang memiliki fokus secara mendalam dalam bidang atau topik tertentu membuat monograf tidak sesuai untuk pembaca yang memiliki

kebutuhan informasi dari sudut pandang atau bidang yang lebih luas. Selanjutnya, dengan adanya perkembangan waktu, isi dari monograf pun akan memiliki potensi untuk tidak relevan lagi, khususnya dalam bidang yang berkembang dengan cepat, yaitu bidang sains dan teknologi. Proses penerbitan buku ilmiah seperti monograf melibatkan rangkaian tahapan yang cukup panjang, mulai dari verifikasi naskah, penelaahan internal dan eksternal, penyuntingan substansi, tata letak, hingga proofread sehingga penyebarannya belum semasif dan secepat pengelolaan artikel pada jurnal ilmiah yang sistemnya sudah lebih mapan (Mahelingga, 2020)



Gambar 2.1 Tampilan monograf

Sumber: <http://eprints.umsb.ac.id/126/1/Monograf.pdf>

2. Monograf berbasis riset

Monograf berbasis riset adalah karya ilmiah yang di dalamnya memuat hasil penelitian yang telah dilakukan dan disusun dalam bentuk buku dengan satu tema tertentu. Tidak seperti buku ajar atau referensi umum yang biasanya membahas berbagai topik dalam satu bidang ilmu secara luas, monograf lebih menitikberatkan pada satu permasalahan.

buku ini bertujuan untuk mendokumentasikan, menyebarkan, serta memanfaatkan temuan penelitian agar dapat diakses secara lebih luas oleh masyarakat.

Monograf berperan sebagai sumber belajar yang disusun oleh peneliti untuk membantu meningkatkan kemampuan mahasiswa sekaligus mendukung ketercapaian standar pembelajaran, karena isinya disajikan berdasarkan data hasil penelitian (Sudaryani et al., 2024).

Monograf memiliki beberapa keunggulan, salah satunya adalah memberikan kesempatan bagi peserta didik untuk melatih keterampilan berpikir kritis, seperti melakukan pengamatan, merumuskan masalah, mengumpulkan serta menganalisis data, dan menarik kesimpulan berdasarkan bukti. Selain itu, konten dalam monograf berbasis riset memiliki kualitas yang lebih baik karena didasarkan pada hasil penelitian nyata, sehingga mampu meningkatkan keterlibatan peserta didik dalam proses pembelajaran (Arina et al., 2019)

Salah satu ciri utama dari monograf berbasis riset adalah adanya unsur kebaruan atau novelty. Menurut fatmawati (2020) sebuah monograf yang baik harus mampu menghadirkan temuan, pendekatan, atau sudut pandang baru terhadap masalah yang diteliti. Kebaruan tersebut bisa berupa lahirnya teori baru, model konseptual, hasil penelitian empiris, ataupun penerapan metode yang inovatif dalam menganalisis suatu fenomena. Unsur inilah yang menjadi nilai pembeda antara monograf berbasis riset dengan karya ilmiah lain yang hanya merangkum informasi yang sudah

ada.

Dalam lingkungan akademik, monograf berbasis riset memiliki peran penting sebagai salah satu bentuk publikasi ilmiah yang berkontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan. Perguruan tinggi mendorong para peneliti untuk menulis monograf sebagai wujud kemampuan mereka dalam merancang penelitian serta menyusun argumen ilmiah secara runtut dan logis. Lebih dari itu, monograf juga menjadi wujud tanggung jawab sosial seorang ilmuwan dalam menawarkan solusi ilmiah terhadap berbagai persoalan yang dihadapi masyarakat. Dengan demikian, monograf berbasis riset memiliki nilai tidak hanya secara akademik, tetapi juga sosial, karena menjadi media transfer pengetahuan yang menjembatani dunia ilmiah dengan kebutuhan nyata masyarakat.



Sumber :

https://www.researchgate.net/publication/380972005_Monograf_Isolasi_dan_Karakterisasi_Protease_Antitrombosis_Bakteri_dari_Bahan_Laut

3. Biogas dan *Anaerobic Digestion*

a. Biogas

Biogas adalah campuran gas-gas yang dihasilkan dari proses pembusukan bahan organik karena aktivitas mikroorganisme pada kondisi tanpa oksigen atau anaerobe. Proses ini biasanya terjadi melalui fermentasi limbah-limbah organik, seperti kotoran hewan, sisa-sisa pertanian, serta sampah rumah tangga, dan hasilnya adalah gas yang terdiri dari metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) elain itu, dapat pula mengandung sejumlah kecil gas-gas lain seperti hidrogen sulfida (H_2S), oksigen (O_2), karbon monoksida (CO), dan nitrogen (N_2). Menurut (Gede et al., 2023) biogas terdiri dari 55-75% metana (CH_4) dan 25-45% karbon dioksida (CO_2), serta gas pencemar lainnya seperti hidrogensulfida (H_2S) yang korosif. Komposisi metana menjadi faktor utama untuk menentukan nilai kalor biogas. Metana murni mempunyai nilai kalor sebesar 8.900 kkal/ m^3 sehingga biogas merupakan bahan bakar alternatif yang dapat menjadi andalan untuk menggantikan sumber energi dari bahan bakar fosil.

Biogas terdiri dari gas metana (CH_4) sekitar 50-70% dan karbon dioksida (CO_2) sekitar 25-45%, serta mengandung unsur hidrogen sulfida (H_2S) dan uap air (H_2O) yang membuat biogas bersifat sangat korosif. Komposisi metana menjadi faktor utama

yang menentukan nilai kalor biogas, sehingga biogas dapat menjadi bahan bakar alternatif yang mampu mendukung upaya menuju Net Zero Emission (NZE) di Indonesia (Negara et al., 2023).

Tabel 2.1 Komposisi Kandungan secara umum

No	Komponen	Presentase (%)
1	Metana (CH ₄)	50 – 75%
2	Karbon dioksida (CO ₂)	25-45%
3	Hydrogen (H ₂)	1-5%
4	Nitrogen (N ₂)	0-0,3%
5	Oksigen (O ₂)	0,1-0,5%
6	Hydrogen sulfida (H ₂ S)	1-5%

(Sumber : Pujiati et al., 2020)

Dari sisi karakteristik fisik, biogas memiliki massa jenis sekitar 20% lebih ringan dibandingkan udara, sehingga mudah menyebar dan aman digunakan selama sistem penyimpanannya tertutup rapat. Berdasarkan sifat tersebut, biogas dikategorikan sebagai energi terbarukan yang efisien, ekonomis, serta ramah lingkungan, dan berpotensi besar mendukung transisi menuju energi berkelanjutan.

b. *Anaerobic Digestion*

Anaerobic digestion merupakan proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme menjadi metana, karbon dioksida, dan hidrogen sulfida tanpa adanya oksigen. Biogas yang dihasilkan dari proses ini sebagian besar terdiri dari gas metana dan karbon dioksida sebagai dua produk utama. Teknologi ini banyak diminati karena mampu mengolah kembali limbah organik sekaligus menghasilkan energi alternatif yang dapat dimanfaatkan secara ekonomis (Trisakti, 2021).

Teknologi *anaerobic digestion* (biogas) memiliki dua fungsi penting, yaitu sebagai solusi energi terbarukan sekaligus sebagai sistem pengolahan limbah yang ramah lingkungan (Ramadhan et al., 2026). Bahan baku seperti kotoran ternak dapat dikonversi menjadi biogas yang dimanfaatkan untuk kebutuhan memasak rumah tangga. Selain itu, residu hasil fermentasi berupa *slurry* dapat dimanfaatkan kembali sebagai pupuk organik

Menurut (Siswatiana, 2025) bahwa keberhasilan sistem pencernaan anaerobik sebagian besar dipengaruhi oleh kondisi operasi, seperti suhu, keseimbangan pH, serta rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) yang sesuai. Kestabilan parameter tersebut menjadi kunci utama dalam menjaga

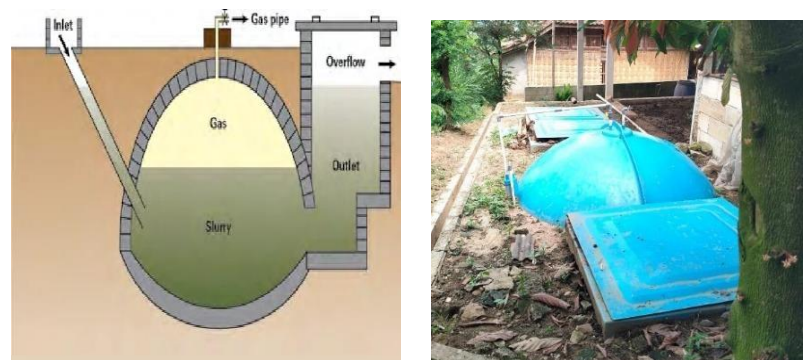
aktivitas mikroorganisme, khususnya bakteri dan archaea penghasil metana. Ketidakseimbangan faktor lingkungan tersebut tetap menjadi tantangan yang perlu diselesaikan agar produksi biogas dapat berlangsung optimal metode sistem *anaerobic digestion* dibedakan berdasarkan suhunya, yaitu mesofilik (35-37°C) dan termofilik (50-55°C). Sistem mesofilik cenderung lebih stabil, sedangkan sistem termofilik memberikan laju produksi biometana yang lebih tinggi dan reaksi yang lebih cepat, namun membutuhkan energi tambahan untuk pemanasan digester serta cenderung kurang stabil (Hu & Shen, 2024). Selain karakteristik teknisnya, anaerobic digestion juga berperan penting dari sudut pandang lingkungan, yaitu sebagai metode berkelanjutan untuk pengelolaan limbah dan pembangkitan energi terbarukan. Teknologi ini terbukti mampu mengurangi akumulasi limbah, memperkuat ketahanan energi, serta menurunkan emisi gas rumah kaca, sehingga menjadi solusi yang layak dalam kerangka ekonomi sirkular (Alengebawy et al., 2024).

4. Reaktor Biogas tipe *Fixed dome*

Reaktor tipe fixed dome merupakan salah satu jenis reaktor biogas dengan volume yang tetap yang banyak diaplikasikan di Indonesia maupun negara lain. Reaktor ini memiliki dua bagian utama: digester sebagai tempat pencernaan material biogas dan

rumah bagi bakteri, serta bagian kubah yang berfungsi sebagai pengumpul gas yang tidak bergerak (*fixed*). Gas yang dihasilkan dari campuran bahan organik pada digester akan mengalir dan disimpan pada bagian kubah. Karakter volume tetap ini menyebabkan terjadinya peningkatan tekanan (*pressure*) di dalam reaktor digester seiring berlangsungnya proses pembentukan biogas (Suwandi et al., 2021).

Bentuk dari reaktor *fixed dome* ini dapat dilihat pada gambar 2.3 sebagai berikut



Gambar 2.3 Reaktor biogas tipe kubah tetap

(Sumber: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-fixed-dome-digester_fig3_264727438 ; Dokumentasi pribadi)

Reaktor biogas tipe *fixed dome* memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Untuk tabel kelebihan dan kekurangan dapat dilihat pada gambar 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.2 kelebihan dan kekurangan reactor biogas *fixed dome*

Kelebihan	Kekurangan
Biaya konstruksi relatif rendah.	Tekanan gas dapat berfluktuasi tinggi
Desain sederhana tanpa bagian bergerak.	Risiko kebocoran gas jika konstruksi tidak kedap udara.
Umur pakai reaktor panjang.	Gas yang dihasilkan tidak terlihat langsung sehingga deteksi kebocoran sulit.
Pemasangan di bawah tanah hemat ruang.	
Lebih terlindungi dari perubahan suhu eksternal	

(Sumber :Oktria, 2024)

5. Slurry

Slurry adalah campuran kotoran hewan atau limbah organik dengan air yang mengalami proses digestion di dalam reaktor. Slurry mengalami proses degradasi oleh mikroba anaerob sehingga menghasilkan gas metana dan residu yang disebut digestate atau bio-slurry. Slurry tidak hanya menjadi medium fermentasi tetapi juga sumber produk samping yang berguna seperti pupuk organik, karena mengandung unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium (Davisca et al., 2022). Selama proses produksi biogas, parameter slurry seperti volume, pH, dan temperatur perlu dipantau karena mempengaruhi efisiensi biogas. Selain itu, slurry yang tersisa setelah proses fermentasi membutuhkan penanganan yang tepat agar tidak mencemari lingkungan. sisa slurry cair sering diproses lebih lanjut atau diolah

untuk pupuk cair, sementara bagian padat dapat menjadi kompos. Secara umum slurry biogas dibedakan menjadi 2 tipe yaitu slurry padat dan slurry cair (Muliandini & Rahmayanti, 2022). Slurry padat biasanya diolah menjadi pupuk padat sedangkan slurry cair dibuat menjadi pupuk cair (POC). Untuk gambar slurry padat dan cair dapat dilihat pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Bio slurry cair dan bio slurry padat

(Sumber: <https://www.academia.edu/download/106118999/12301.pdf>)

6. Tahapan proses pembuatan biogas

Proses produksi biogas terdiri atas empat tahapan utama yang berlangsung secara bertahap dan saling mendukung

a. Hidrolisis

Tahap merupakan fase awal dari proses pencernaan anaerobik (*anaerobic digestion*), di mana senyawa organik kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lemak diuraikan menjadi molekul yang lebih sederhana sehingga dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme pada tahapan berikutnya. Proses ini dikatalisis oleh aktivitas bakteri hidrolitik yang menghasilkan berbagai jenis enzim, antara lain selulase, lipase, dan protease, untuk memecah

polimer besar menjadi monomer yang larut dalam air seperti glukosa, asam amino, dan asam lemak (Kurniawan, 2024). Efisiensi tahap hidrolisis sangat menentukan laju keseluruhan proses fermentasi, karena semakin cepat bahan organik diubah menjadi senyawa sederhana, semakin tinggi pula produksi metana (CH_4) yang dihasilkan pada tahap akhir. Dengan demikian, hidrolisis berperan sebagai langkah kunci dalam memastikan keberhasilan konversi biomassa menjadi biogas.

b. Asidogenesis (Fermentasi)

Pada tahapan asidogenesis, senyawa hasil hidrolisis kemudian difermentasi oleh bakteri asidogenik menjadi berbagai produk metabolik seperti asam lemak volatil (VFA), alkohol, hidrogen (H_2), karbon dioksida (CO_2), serta sejumlah senyawa samping berupa amonia dan sulfida.

Produk-produk fermentasi ini berfungsi sebagai substrat bagi tahapan berikutnya. Namun, jika akumulasi VFA atau amonia terjadi dalam jumlah berlebihan, pH reaktor dapat menurun dan menyebabkan ketidakseimbangan proses. Oleh karena itu, stabilitas tahap asidogenesis sangat dipengaruhi oleh interaksi antara produksi VFA dan konsumsi VFA oleh mikroorganisme lain di tahap asetogenesis dan metanogenesis (Sasmita et al., 2022)

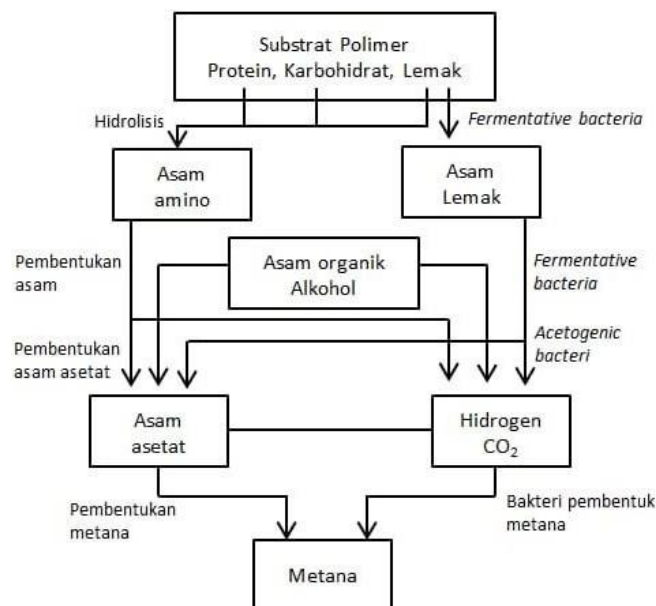
c. Asetogenesis

Tahap asetogenesis merupakan fase ketika asam lemak volatil rantai panjang seperti propionat dan butirat mengalami oksidasi lebih lanjut menjadi asetat, CO_2 , dan H_2 . Proses ini dilakukan oleh bakteri asetogenik, yang biasanya bekerja dalam hubungan *sytrophic* dengan mikroorganisme pengonsumsi hidrogen, terutama archaea metanogenik. Hubungan sintrofik ini sangat penting, karena reaksi asetogenesis hanya berlangsung optimal apabila tekanan parsial hidrogen berada pada level rendah. Apabila H_2 menumpuk, reaksi menjadi tidak menguntungkan secara termodinamika dan dapat menghambat keseluruhan proses asetogenesis (Kakuk et al., 2021). Dengan demikian, tahap ini berperan sebagai penghubung kritis antara fermentasi dan pembentukan metana.

d. Metanogenesis

Pada tahap ini, bakteri metanogen mulai menghasilkan gas metana secara bertahap dalam kondisi tanpa oksigen (anaerob). bakteri pembentuk metan seperti *Mathanobacterium*, *Mathanobacillus*, *Methanoscaria* dan *Methanococcus* berperan dalam menguraikan senyawa organik sederhana menjadi senyawa yang lebih kompleks Sebagai contoh, bakteri metanogen menggunakan hidrogen (H_2), karbon dioksida (CO_2), dan asam asetat untuk membentuk gas metana (CH_4) serta karbon dioksida (CO_2). Dalam

proses ini, terjadi kerja sama simbiosis antara bakteri penghasil asam dan bakteri penghasil metana. Bakteri penghasil asam menciptakan kondisi lingkungan yang sesuai bagi pertumbuhan bakteri metanogen. Proses pembentukan metana ini menghasilkan komposisi gas berupa 55–75% metana (CH_4), 25–45% karbon dioksida (CO_2), serta sejumlah kecil gas lain seperti hidrogen (H_2), nitrogen (N_2), oksigen (O_2), dan hidrogen sulfida (H_2S) (Dewantara et al., 2024).



Gambar 2.8 Pembentukan biogas

(Sumber: Kurniati et al 2021)

7. Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan bakteri pada slurry biogas

a. Suhu

Suhu merupakan faktor lingkungan yang cukup berpengaruh terhadap pertumbuhan dan aktivitas bakteri pada

biogas. Setiap kelompok bakteri memiliki kisaran suhu tertentu yang mendukung pertumbuhannya. Apabila suhu berada pada kondisi sesuai, bakteri akan berkembang dan melakukan aktivitas metabolisme dengan baik sehingga proses penguraian bahan organik berlangsung optimal. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat aktivitas bakteri dan menurunkan efektivitas proses fermentasi anaerob. Penelitian yang dilakukan oleh Rezeki et al (2021), perubahan suhu memberikan pengaruh khusus terhadap kecepatan reaksi dan jumlah gas yang dihasilkan selama proses fermentasi. Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian tersebut bahwa produksi biogas paling tinggi pada suhu 55°C dengan volume mencapai 7.350 mL. Sementara pada suhu 35°C dan 45°C volume gas yang dihasilkan lebih rendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi suhu yang sesuai dapat mendukung aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan bahan organik selama proses fermentasi.

Kondisi suhu yang lebih tinggi membuat aktivitas mikroorganisme menjadi lebih intensif, khususnya pada kelompok bakteri termofilik yang mampu berkembang biak dengan cepat. Hal ini menyebabkan proses penguraian bahan organik, terutama tahap hidrolisis dan asidifikasi,

berlangsung lebih efektif. Selain itu, suhu tinggi juga mempercepat laju reaksi kimia karena frekuensi tumbukan antar molekul meningkat, sehingga aktivitas enzim dalam menguraikan bahan organik menjadi gas metana berjalan lebih cepat dan efisien (Rezeki et al., 2021)

b. pH

pH adalah salah satu faktor kimia yang sangat berpengaruh dalam menjaga keseimbangan proses biologis selama pembentukan biogas tanpa oksigen. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Rezeki et al (2021), pH yang paling sesuai untuk menghasilkan biogas berkisar antara 6-8 dengan nilai terbaik berada di pH 7. Pada awal proses fermentasi, pH biasanya menurun karena terbentuknya asam lemak volatil dari hasil penguraian bahan organik. Namun, seiring bertambahnya jumlah bakteri penghasil metana (*metanogen*), pH akan perlahan naik dan mendekati kondisi netral, yang merupakan keadaan paling efektif untuk memproduksi gas metana. Dalam penelitian tersebut, limbah rumah makan yang digunakan memiliki pH awal yang cukup asam, sehingga dilakukan penyesuaian dengan menambahkan larutan NaOH agar pH menjadi netral. Kondisi pH yang stabil di sekitar angka 7 terbukti mampu mendukung pertumbuhan mikroorganisme dan mempercepat proses penguraian bahan organik menjadi gas

metana. Sebaliknya, pH yang terlalu rendah (kurang dari 6) dapat menghambat kerja bakteri metanogen, sementara pH yang terlalu tinggi (lebih dari 8) dapat menyebabkan terbentuknya amonia berlebih yang bersifat racun bagi mikroorganisme

c. Rasio C:N

Rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) merupakan faktor penting dalam menentukan keseimbangan nutrisi bagi mikroorganisme dalam proses pembentukan biogas. Karbon berperan sebagai sumber energi utama, sedangkan nitrogen digunakan dalam pembentukan protein dan pertumbuhan sel mikroba. Jika rasio C/N terlalu tinggi, mikroorganisme akan kekurangan nitrogen, sehingga proses degradasi berjalan lambat. Sebaliknya, jika rasio terlalu rendah, proses tersebut dapat mengalami hambatan. Rasio ideal untuk produksi biogas berkisar antara 20-30:1, karena pada rentang ini, aktivitas mikroorganisme berada dalam tingkat optimal untuk menghasilkan gas metana (Nwokolo et al., 2020).

Hasil penelitian Cahyono et al (2023) Menunjukkan bahwa kombinasi antara limbah sayur dan kotoran sapi dengan rasio 70:30 menghasilkan rasio C/N sebesar 21,39, yang termasuk dalam kisaran ideal untuk proses fermentasi anaerob. Komposisi ini terbukti mampu menghasilkan gas metana tertinggi, yaitu 93,78%, dibandingkan dengan rasio lainnya. Hal

ini membuktikan bahwa keseimbangan antara sumber karbon tinggi (limbah sayur) dan sumber nitrogen tinggi (kotoran sapi) sangat menentukan keberhasilan proses pencernaan anaerobik serta efisiensi produksi biogas.

d. Komposisi Substrat

Bahan baku atau substrat memiliki pengaruh besar terhadap jumlah dan kualitas biogas yang dihasilkan. Setiap jenis bahan memiliki kandungan nutrisi dan sifat kimia yang berbeda, seperti kadar karbon, nitrogen, dan serat, yang memengaruhi proses fermentasi anaerob. Bahan baku biogas biasanya berasal dari limbah organik seperti tinja hewan, limbah pertanian, sisa makanan, atau limbah rumah tangga. Menurut Cahyono et al (2023) kotoran sapi sering digunakan karena mengandung mikroorganisme alami yang membantu pembentukan gas metana. Untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal, bahan baku harus dikombinasikan dengan bahan yang kaya akan karbon, seperti limbah sayur atau jerami, untuk menyeimbangkan kandungan nutrisi.

Pencampuran berbagai jenis bahan organik dapat meningkatkan volume gas dan menjaga stabilitas proses fermentasi. Kombinasi bahan dengan rasio karbon dan nitrogen yang seimbang membantu menjaga pH tetap stabil serta mencegah penumpukan asam yang dapat menghambat

pembentukan metana. Dengan demikian, pemilihan dan pengaturan komposisi bahan baku menjadi kunci dalam meningkatkan efisiensi proses dan kualitas biogas yang dihasilkan (Nwokolo et al., 2020).

8. Mikroorganisme dalam pembentukan biogas

Pembentukan biogas merupakan proses penguraian bahan organik yang berlangsung secara anaerob atau tanpa adanya oksigen. Proses ini melibatkan berbagai jenis mikroorganisme yang bekerja secara bertahap dan saling mendukung dalam mengubah bahan organik menjadi biogas. Setiap kelompok bakteri memiliki peran yang berbeda pada setiap tahapan penguraian. Secara umum, bakteri yang terlibat dalam proses pembentukan biogas terdiri atas bakteri hidrolitik, bakteri asidogenik (fermentatif), bakteri asetogenik, dan bakteri metanogen. Berikut adalah uraian mengenai jenis bakteri dari masing-masing kelompok tersebut.

a. Bakteri hidrolitik

Bakteri hidrolitik berperan sangat penting di tahap awal fermentasi anaerob, yaitu bertugas memecah berbagai senyawa organik yang berukuran besar, rumit, dan tidak larut air seperti selulosa, protein, lemak, maupun pati, lalu mengubahnya menjadi molekul yang jauh lebih sederhana dan mudah larut dalam air. Proses pemecahan ini berjalan berkat enzim spesifik yang dikeluarkan bakteri ini, antara

lain selulase, protease, amilase, dan lipase. Ciri-ciri bakteri ini antara lain sifat metabolisme anaerob maupun anaerob fakultatif, bentuk selnya batang (basil), kadang tampak berantai atau bulat, sebagian besar bersifat Gram positif, mesti ada juga yang negatif, memiliki kemampuan spora, mampu tumbuh pada suhu kisaran 30–37 °C.

Beberapa jenis utama yang termasuk dalam kelompok ini antara lain *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Bacillus*, *Cellulomonas*, dan *Butyrivibrio*. Menurut Wibowo et al (2024, ciri utama bakteri hidrolitik adalah kemampuan menyekresi enzim ekstraseluler yang kuat, toleransi pH luas dan suhu fleksibel, serta daya adaptasi tinggi, menjadikannya pengurai kunci bahan organik padat dan penentu kecepatan awal fermentasi anaerob”.

Erlinawati et al (2023) menegaskan *Clostridium* dan *Ruminococcus* sebagai jenis paling dominan memiliki ciri Gram positif, bentuk batang, pembentuk spora, dan sangat efisien memecah serat tanaman, sehingga menjadi indikator keberhasilan pemanfaatan limbah pertanian dan kotoran ternak. berperan dalam pembentukan berbagai jenis asam organik (Eka et al., 2025).

b. Bakteri asetogenik

Bakteri asetogenik berperan sebagai penghubung penting antara tahap pembentukan asam dan tahap pembentukan metana dengan tugas utama mengubah asam organik rantai panjang dan alkohol yang dihasilkan oleh bakteri asidogenik menjadi senyawa yang lebih sederhana lagi, yaitu asam asetat, karbon dioksida (CO_2), dan hidrogen (H_2). Ciri-ciri bakteri ini antara lain bersifat anaerob dan sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan dengan pH netral 6,0-7,0. Bakteri asetogenik meliputi *Acetobacterium*, *Clostridium aceticum*, *Syntrophomonas*, dan *Syntrophobacter*. *Acetobacterium* berupa warna koloni putih pucat, sel batang pendek, lurus atau sedikit melengkung, bersifat Gram positif. Sedangkan *Clostridium aceticum* berbentuk batang panjang dan besar, sering berantai, juga Gram positif. *Syntrophomonas* memiliki bentuk sel batang agak melengkung menyerupai huruf S atau koma, warna koloni putih pucat/transparan, bersifat Gram negatif. *Syntrophobacter* berbentuk batang lurus kecil, tunggal, Gram negatif (Dhiah Novalina, 2024).

c. Bakteri Metanogen

Bakteri metanogen adalah kelompok paling penting dan menjadi kunci utama pembentukan biogas karena merekalah yang menghasilkan gas metana sebagai bahan bakarnya

(Kurniati et al., 2021). Secara ilmiah kelompok ini sebenarnya masuk dalam jenis Archaea, bukan bakteri sejati, namun sering disebut bakteri karena peran kerjanya. Mereka bekerja di tahap akhir dengan mengubah asam asetat, karbon dioksida, dan hidrogen dari proses sebelumnya menjadi gas metana dan air; sekitar 70% gas terbentuk dari asam asetat, sedangkan 30% sisanya dari reaksi gas hidrogen dan karbon dioksida. Menurut Dewantara et al (2024) Ciri utamanya adalah hidup tanpa oksigen sama sekali, bentuk selnya bervariasi (batang, bulat, spiral), hasil pewarnaan Gram bisa positif atau negatif, serta sangat sensitif lingkungan hanya mau tumbuh baik pada pH netral hingga agak basa (6,8–7,2) dan suhu stabil, bahkan berhenti bekerja total jika pH turun di bawah 6,5. jenis yang umum ditemukan antara lain *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanococcus*, *Methanosarcina*, dan *Methanosaeta*

Tabel 2.3 Keanekaragaman Bakteri yang Berperan dalam Pembentukan Biogas

Jenis Bakteri	Nama Genus	Ciri-ciri	Peran	Referensi
Hidrolitik	<i>Clostridium</i>	Anaerob, membentuk spora, berbentuk batang	Menghidrolisis polimer organik menjadi monomer sederhana	(Shitophyta et al., 2021)
	<i>Bacteroides</i>	Anaerob obligat, berbentuk batang	Mendegradasi selulosa dan hemiselulosa	
Asidogenik	<i>Lactobacillus</i>	Fakultatif anaerob, berbentuk batang	Menghasilkan asam organik dari gula sederhana	(Satrio et al., 2023)
	<i>Streptococcus</i>	Fakultatif anaerob, berbentuk kokus	Menghasilkan asam organik volatil	
Asetogenik	<i>Syntrophomonas</i>	Anaerob obligat, sintrofik	Mengoksidasi asam lemak menjadi asetat dan H ₂	(Iriani et al., 2017)
	<i>Syntrophobacter</i>	Anaerob obligat	Mengoksidasi propionat menjadi asetat, CO ₂ , dan H ₂	
Archaea Metanogenik	<i>Methanobacterium</i>	Archaea anaerob obligat berbentuk batang	Menghasilkan CH ₄ dari H ₂ dan CO ₂	(Syauqi et al., 2020)
	<i>Methanosarcina</i>	Archaea anaerob obligat berbentuk kokus	Menghasilkan CH ₄ dari asetat, metanol, dan H ₂ /CO ₂	
	<i>Methanosaeta</i>	Archaea anaerob obligat berbentuk filamen	Menghasilkan CH ₄ menggunakan asetat	
Sulfat-Pereduksi	<i>Desulfovibrio</i>	Anaerob obligat, berbentuk batang melengkung	Mereduksi sulfat menjadi H ₂ S	(Venata, 2017)

9. Karakteristik Morfologi Bakteri

a. Karakteristik morfologi bakteri

Karakteristik morfologi bakteri adalah salah satu aspek dalam ilmu mikrobiologi yang berperan penting untuk mengidentifikasi, mendeskripsikan, dan mengelompokkan bakteri berdasarkan ciri fisiknya. morfologi bakteri dapat dikenali melalui dua jenis, yaitu pada tingkat koloni (makrokopis) dan tingkat sel (mikrokopis). Pada tingkat koloni (makrokopis) bakteri juga bervariasi yaitu bentuk, tepi, elevasi, ukuran, penampilan, sifat optik, tekstur, serta pigmentasi. Bentuk koloni bervariasi, dapat berupa bulat (*circular*), tidak teratur (*irregular*), menyerupai akar (*rhizoid*), lonjong (*spindle*), atau berserabut (*filamentous*). Bagian tepi koloni dapat terlihat rata (*entire*), bergelombang (*undulate*), berlekuk (*lobate*), maupun bergerigi (*serrate*). Elevasi koloni menggambarkan tingkat ketinggian dari permukaan media, yang dapat tampak datar (*flat*), meninggi (*raised*), cembung (*convex*), berbentuk bantal (*pulvinate*), atau menonjol di bagian tengah (*umbonate*). Ukuran koloni umumnya digolongkan menjadi sangat kecil (*punctiform*), kecil, sedang, hingga besar. Permukaan koloni dapat berpenampilan mengkilap (*glossy*), kusam (*dull*), atau tampak berawan, sedangkan sifat optiknya bisa buram (*opaque*), tembus cahaya (*translucent*), atau transparan (*transparent*). Tekstur koloni menunjukkan konsistensi permukaannya, yang

dapat halus, kasar, mukoid, kering, atau rapuh. Selain itu, beberapa bakteri mampu menghasilkan pigmen dengan warna berbeda, seperti putih, kuning, merah, maupun ungu, di mana variasi warna tersebut dipengaruhi oleh faktor lingkungan serta umur koloni(Wulandhani, 2024) .

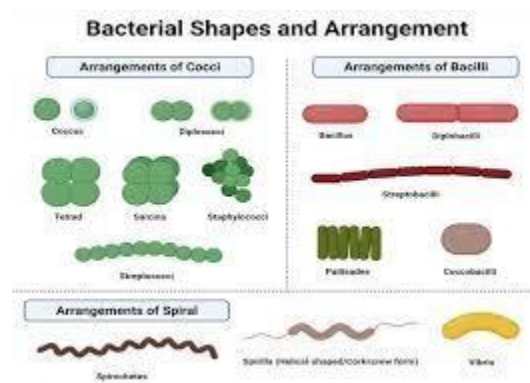
Gambar 2.10 Morfologi koloni bakteri

Shape						
	Filamentous	Spindle	Irregular	Circular	Rhizoid	
Margin						
	Entire	Undulate	Lobate	Curled	Rhizoid	Filamentous
Elevation						
	Flat	Raised	Convex	Pulvinate	Umbonate	
Size						
	Punctiform	Small	Moderate	Large		
Apperance	Glistening or dull					
Optical property	Transparent, translucent, or opaque.					
Texture	Rough, smooth, mucoid, butyrous, or dry					
Pigmentation	Nonpigmented (e.g. cream, white) Pigmented (e.g. yellow, blue, pink)					

(Sumber: Kurniawan S, 2019)

Pengamatan morfologi pada tingkat sel (mikrokopis), Menurut (Pratama et al., 2023), bakteri memiliki bentuk dasar yang beragam seperti kokus yang berbentuk bulat, basil yang menyerupai batang, serta spiril yang berbentuk spiral serta susunan sel yang sangat beragam seperti tunggal, berpasangan, berantai dan bergerombol (kelompok). Pengamatan

mikroskopis ini menggunakan mikroskop setelah melalui pewarnaan Gram untuk melihat bentuk, susunan sel dan warna Gram pada bakteri (Lolita & Putri, 2018).



Gambar 2.9 Bentuk koloni bakteri

(Sumber: Sapkota 2023)

Berdasarkan hasil pengamatan morfologi sel dan koloni, data yang diperoleh digunakan sebagai dasar awal untuk melakukan identifikasi bakteri hingga tingkat genus. Ciri-ciri morfologi sel secara mikroskopis, seperti bentuk dan susunan sel, serta karakteristik koloni secara makroskopis yang meliputi bentuk, tepi, elevasi, tekstur, dan warna koloni, dimanfaatkan sebagai petunjuk dalam pengelompokan bakteri ke dalam kelompok taksonomi tertentu. Identifikasi bakteri sampai tingkat genus dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan karakter morfologi yang diamati dengan literatur mikrobiologi serta kunci identifikasi bakteri yang relevan

B. Kajian penelitian yang relevan

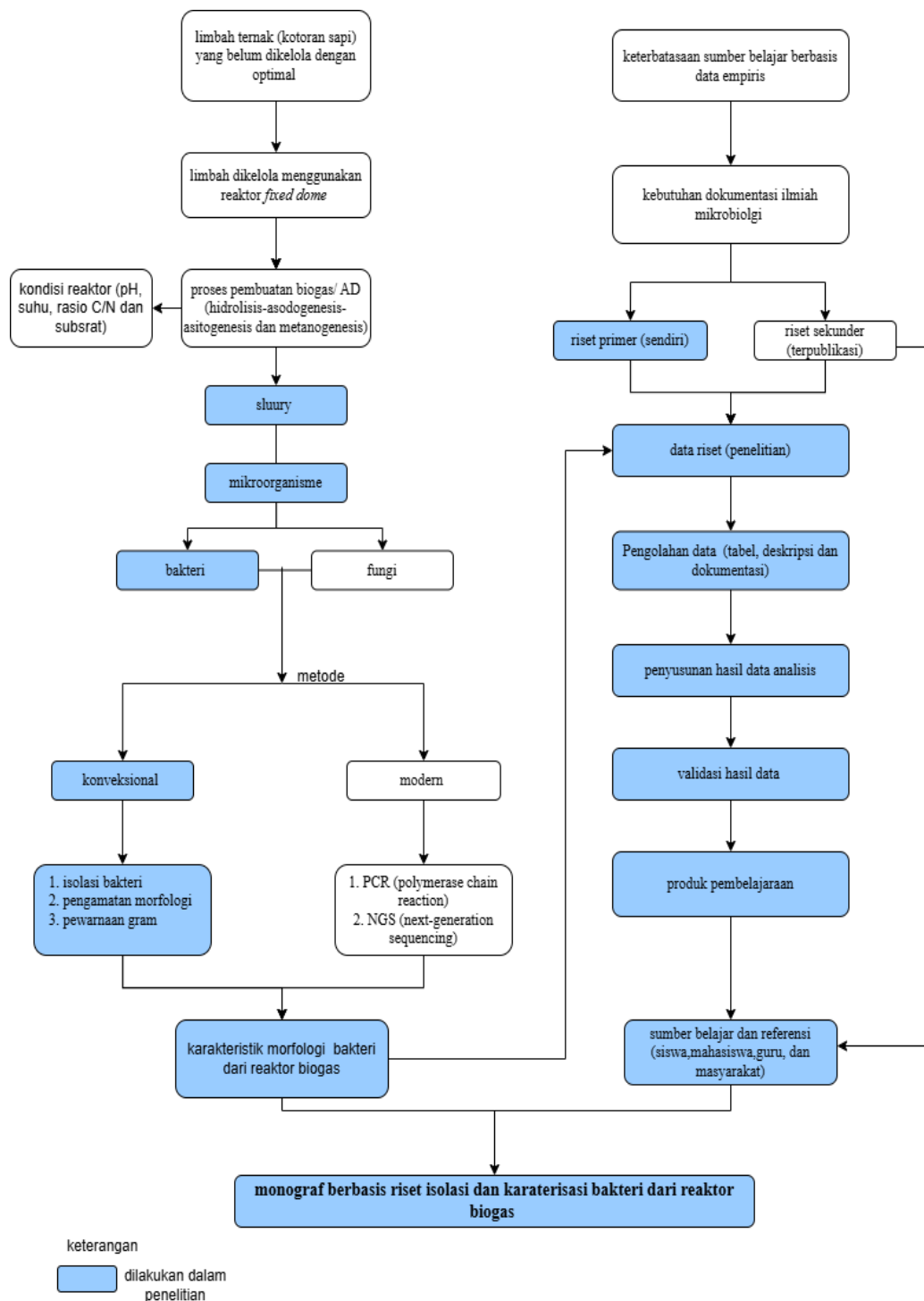
Penelitian tentang biodiversitas mikroorganisme khususnya bakteri, pada reactor biogas mengalami perkembangan dalam beberapa tahun terakhir. Bakteri fermentative dan metanoigenik memegang peran penting dalam menjaga kestabilan proses dan efisiensi produksi gas metana dalam system anaerobic digester. Kajian sebelumnya menjadikan panduan penting karena memberikan gambaran tentang keragaman serta peran mikroorganisme khususnya bakteri didalam sistem anaerob.

Tabel 2.4 Kajian Penelitian yang relevan

Nama Peneliti (Tahun)	Metode	Hasil Penelitian	Persamaan	Perbedaan
(Olufemi et al., 2019)	Ko-digesti pada reaktor biogas skala laboratorium; identifikasi mikroba secara kultur menggunakan media selektif.	Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Methanobacterium</i> , dan jamur <i>Aspergillus niger</i> berhasil diisolasi; semua kombinasi substrat berpotensi menghasilkan biogas.	Sama-sama meneliti komunitas mikroba pada sistem biogas dengan pendekatan kultur konvensional.	Menggunakan substrat kotoran ayam sebagai inokulum; tidak khusus pada reaktor <i>fixed dome</i> .
(Khan et al., 2021)	Sekuensing Illumina gen 16S rRNA pada tiga digester anaerobik skala penuh.	Komunitas bakteri didominasi Bacteroidetes (41,44%) dan Firmicutes (23,42%); genus dominan adalah <i>Acetobacteroides</i> ; keanekaragaman tinggi berhubungan dengan stabilitas proses.	Sama-sama membahas biodiversitas bakteri dalam proses anaerobic digestion menggunakan sekuensing 16S rRNA.	Objek penelitian bukan reaktor <i>fixed dome</i> ; lokasi di Dubai dengan kondisi iklim berbeda.
(Gede et al., 2023)	Sekuensing 16S rRNA metagenomik dengan skenario pergeseran suhu (42°C→48°C dan 55°C→45°C).	Pergeseran suhu menyebabkan penurunan produksi biogas; dominasi <i>Methanoculleus</i> pada skenario kenaikan suhu; <i>Methanosaeta</i> dominan pada penurunan suhu; perubahan suhu menggeser komposisi komunitas bakteri.	Sama-sama menganalisis perubahan struktur komunitas bakteri dan archaea dalam sistem biogas.	Fokus utama pada faktor suhu; tidak menggunakan reaktor <i>fixed dome</i> .
(Nwaojei, 2024)	Analisis komunitas mikroba dengan berbagai kondisi OLR, suhu, dan pH pada digester limbah makanan.	Genus bakteri seperti <i>Clostridium</i> dan <i>Bacteroides</i> berkorelasi dengan stabilitas reaktor dan produksi metana; keanekaragaman fungsional (functional redundancy) mendukung ketahanan proses.	Sama-sama mengkaji peran komunitas bakteri dalam proses anaerobic digestion dan hubungan biodiversitas dengan kinerja sistem biogas.	Tidak secara khusus meneliti reaktor tipe <i>fixed dome</i> dan tidak disusun dalam bentuk monograf berbasis riset.
(Delavega-quintero et al., 2025)	Tinjauan pustaka sistematis terhadap penelitian anaerobic digestion mencakup aspek teknologi, mikroba, dan kebijakan.	Keanekaragaman dan interaksi mikroba merupakan faktor kunci efisiensi produksi biogas; kondisi operasi (suhu mesofilik, pH 6,5–7,5) sangat memengaruhi aktivitas mikroba.	Menjadi dasar teoritis biodiversitas bakteri dan interaksi mikroba dalam sistem biogas.	Merupakan studi tinjauan (review), bukan penelitian eksperimen langsung pada reaktor <i>fixed dome</i> .

C. Kerangka Berpikir

Kerangka pemikiran penelitian ini menggambarkan keterkaitan konseptual antara kondisi reaktor biogas, faktor lingkungan, keberadaan mikroba, dan biodiversitas bakteri dalam sistem reaktor biogas *fixed dome*. Kondisi reaktor, seperti pH dan suhu, bersama dengan faktor lingkungan yang mencakup ketersediaan nutrisi dan kondisi fisik reaktor, secara konseptual membentuk lingkungan mikro yang memengaruhi aktivitas mikroorganisme di dalam slurry atau digestat reaktor.



Gambar 2.8 Alur Bagan Kerangka Berpikir