

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biogas

2.1.1 Pengertian biogas

Menurut Abbasi *et al.* (2012), pengertian biogas yaitu campuran beberapa gas yang dapat terbakar dan berasal dari bahan organik yang telah mengalami dekomposisi secara anaerobik. Menurut sudut pandang kimia, biogas adalah sumber energi alternatif berupa campuran gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Energi yang terkandung dalam biogas tergantung dari konsentrasi metana. Semakin tinggi kandungan metana, semakin besar nilai kalor pada biogas. Sebaliknya jika kandungan metana rendah, nilai kalor pada biogas tersebut juga rendah. Sedangkan dari sudut pandang biologi, biogas adalah sumber energi alternatif yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan organik oleh bakteri metanogen secara anaerob. Proses fermentasi tersebut harus dikontrol secara teliti karena bakteri metanogen sensitif terhadap perubahan mendadak pada kondisi fisis dan kimiawi (Gunawan, 2013).

Biogas dapat dihasilkan dari berbagai macam bahan organik yang terdekomposisi, misalnya limbah rumah tangga, limbah pertanian, limbah perkebunan, kotoran hewan, dan limbah industri. Hasil produksi biogas sebagian besar mengandung 40-70 % gas metana (Abbasi *et al.*, 2012). Hasil pembakaran dengan biogas tidak berbeda jauh jika dibandingkan dengan bahan bakar lainnya seperti LPG. Berikut kesetaraan nilai kalor biogas dibandingkan dengan bahan bakar lainnya yang disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kesetaraan nilai kalor biogas dengan bahan bakar lain

Biogas	Bahan Bakar Lain
1 m ³ biogas	LPG 0,46 kg
	Minyak tanah 0,62 liter
	Solar 0,52 liter
	Bensin 0,80 liter
	Kayu bakar 3,50 kg

Sumber : Wahyuni (2008)

2.1.2 Komponen penyusun biogas

Biogas memiliki nilai kalor yang cukup tinggi, tidak berbau, dan tidak berwarna. Jika gas yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik ini dapat terbakar, berarti mengandung sedikitnya 45% gas metana (Abbasi *et al.*, 2012). Gas metana murni (100 %) memiliki nilai kalor 8.900 kkal/m³ (Sutarno dan Feris, 2007). Berikut adalah komponen-komponen penyusun biogas disajikan pada

Tabel 2.2

Tabel 2.2 Komponen penyusun biogas

No.	Nama Gas	Jumlah (%)
1.	Metana	54-70
2.	Karbondioksida	27-45
3.	Nitrogen	3-5
4.	Hidrogen	1-2
5.	Karbon monoksida	0,1
6.	Oksigen	0,1
7.	Hidrogen sulfida	Sedikit

Sumber : Widarto dan Sudarto (1997)

2.2 Sistem Produksi Biogas

Berdasarkan cara pengisian bahan baku, sistem produksi biogas dapat dibedakan menjadi 3 (Andianto, 2011) :

1. Fermentasi sistem tertutup (*Batch*)

Pada digester tipe *batch*, bahan organik ditempatkan pada tangki tertutup dan diproses secara anaerob. Pada tipe ini tidak ada penambahan atau pengambilan hasil produksi.

2. Fermentasi sistem kontinyu (*Plug flow digester*)

Pengertian dari digester tipe kontinyu yaitu pengisian bahan baku ke dalam digester tanpa mengeluarkan bahan yang sudah dicerna. Bahan baku segar yang diisikan setiap hari akan mendorong bahan isian yang sudah dicerna keluar dari tangki pencerna melalui pipa pengeluaran.

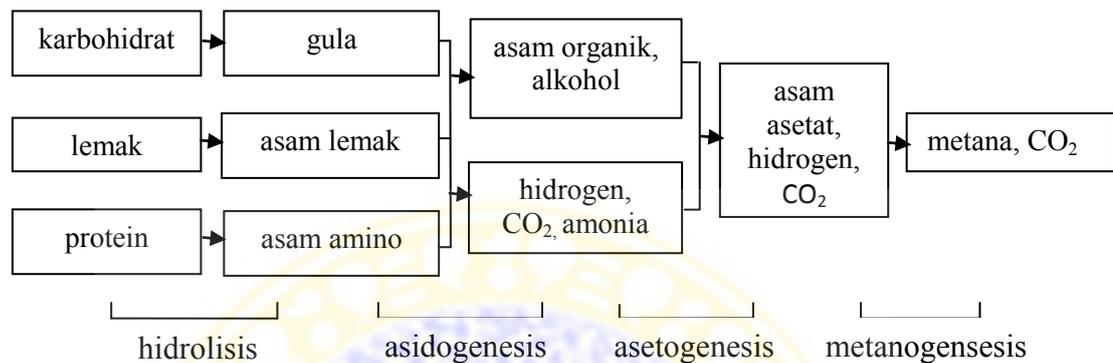
3. Fermentasi *feed batch*

Fermentasi *feed batch* merupakan proses fermentasi dengan penambahan nutrisi pada interval waktu tertentu dan tak ada media yang dipindahkan. Fermentasi ini berbeda dengan fermentasi kontinyu karena dilakukan penambahan *feed* secara terus-menerus serta produknya dipindahkan secara bersamaan (Rao dan Bapat, 2006 dalam Ivonny, 2014).

2.3 Tahapan Produksi Biogas

Proses produksi biogas melalui fermentasi anaerob dari bahan organik. Fermentasi anaerob adalah proses pengolahan senyawa-senyawa organik yang terkandung dalam limbah menjadi gas metana dan karbon dioksida tanpa

memerlukan oksigen (Manurung, 2004). Ada empat tahapan fermentasi anaerob yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis (Hendroko *et al.*, 2014). Tahapan pembentukan metana disajikan pada Gambar 2.3.

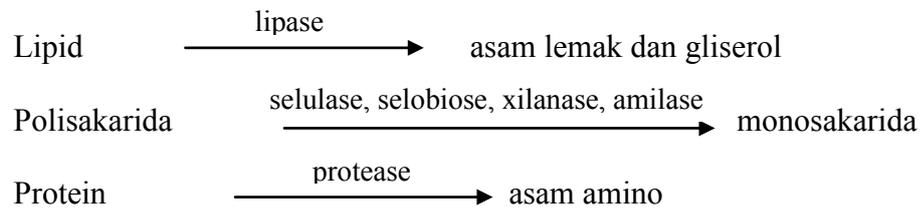


Gambar 2.1 Tahapan pembentukan metana (Al Saedi, 2008)

Penguraian dari empat tahapan tersebut sebagai berikut :

1. Hidrolisis

Hidrolisis merupakan langkah pertama dalam proses fermentasi anaerob, yaitu dengan mengubah senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Selama proses hidrolisis, polimer-polimer seperti karbohidrat, lemak, dan protein diubah menjadi glukosa, gliserol, dan asam amino (Al Saedi, 2008). Mikroba hidrolitik seperti *Cellulomonas* sp., *Cytophaga* sp., *Cellvibrio* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, dan *Lactobacillus plantarum* mampu mengeluarkan enzim hidrolase sehingga mengubah biopolimer menjadi senyawa yang lebih sederhana, berikut proses terjadinya pemecahan komponen polimer tersebut.



Proses penguraian karbohidrat oleh bakteri hidrolitik dilakukan dalam hitungan jam, sedangkan untuk penguraian protein dan lemak dilakukan dalam hitungan hari (Deublein dan Steinhauser, 2008).

2. Asidogenesis

Produk hasil hidrolisis difermentasi oleh bakteri asidogenesis seperti *Cytophaga* sp. Glukosa, asam amino, dan asam lemak didegradasi menjadi asam organik, alkohol, hidrogen dan amonia (Deublein dan Steinhauser, 2008). Selain itu, Romli (2010) menyatakan tahap asidogenesis merupakan tahap perombakan bahan organik hasil hidrolisis yang difermentasi menjadi berbagai produk akhir, meliputi asam-asam format, asetat, propionat, butirat, laktat, suksinat, etanol, dan juga senyawa mineral seperti karbondioksida, hidrogen, amonia, dan gas hidrogen sulfida. Tahap ini dilakukan oleh berbagai kelompok bakteri, mayoritasnya adalah bakteri obligat anaerob dan sebagian yang lain bakteri anaerob fakultatif. Contoh bakteri asidogenik (pembentuk asam) adalah *Clostridium* (Said, 2006).

3. Asetogenesis

Hasil metabolisme dari bakteri asidogenesis tidak dapat langsung dikonversi menjadi metana, tetapi melalui tahap asetogenesis terlebih dahulu. *Volatile fatty acid* (VFA) dan alkohol diubah oleh bakteri asetogenesis menjadi asam asetat, hidrogen, dan CO₂. Salah satu contoh bakteri asetogenesis yaitu

Acetobacter aceti. Peningkatan jumlah hidrogen dari hasil metabolisme tahap asidogenesis yang tidak diiringi dengan peningkatan jumlah bakteri metanogen dapat menghambat pertumbuhan bakteri asetogenesis (Al Saedi, 2008). Sehingga, hasil metabolisme dari bakteri asetogenesis bergantung terhadap tekanan hidrogen di dalam substrat. Pada saat tekanan hidrogen rendah, maka hasil metabolisme dari bakteri asetogenesis terdiri dari H₂, CO₂, dan asetat. Jika tekanan hidrogen tinggi, maka hasil metabolisme dari bakteri asetogenesis terdiri dari asam butirat, asam propionat, asam valerat, dan etanol. Namun, dari semua hasil metabolisme tersebut, bakteri metanogenesis hanya menggunakan asetat, CO₂, dan H₂ untuk produksi metana (Deublein dan Steinhauser, 2008). Selain itu, waktu generasi bakteri asetogenesis yaitu selama 84 jam. Reaksi dari perubahan asam organik menjadi asam asetat disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Reaksi perubahan asam organik menjadi asam asetat

Substrat	Reaksi
Asam propionate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
Asam butirat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Asam valerat	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Asam isovalerat	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2 + \text{H}^+$
Asam kapronik	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 5\text{H}_2$
Karbondioksida/hidrogen	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$
Gliserin	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$
Asam laktat	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$
Etanol	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$

Sumber : Deublein dan Steinhauser (2008)

4. Metanogenesis

Pada proses metanogenesis dihasilkan metana dan CO₂ oleh bakteri metanogen. Sebagian besar metana merupakan hasil perubahan asetat sebesar 70 % serta 30 % dari hidrogen dan CO₂. Pada tahap metanogenesis, terjadi

fermentasi metana secara dua tipe reaksi. Pertama *acetoclastic methanogenesis*, yaitu asetat diubah menjadi metana dan CO₂. Kedua *hydrogenotrophic methanogenesis* dengan mengubah CO₂ dan H₂ menjadi metana dan air (Werner *et al.*, 1989).

Acetoclastic methanogenesis :

Asam asetat $\xrightarrow{\text{Bakteri metanogen}}$ metana dan CO₂

Hydrogenotrophic methanogenesis :

Hidrogen dan CO₂ $\xrightarrow{\text{Bakteri metanogen}}$ metana dan air

2.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Produksi Biogas

Aktivitas metabolisme dari bakteri hidrolitik dan metanogen dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut :

1. Temperatur substrat

Temperatur sangat berpengaruh terhadap produksi gas. Hartono (2009) menyatakan bahwa berdasarkan temperatur operasinya, proses anaerob secara garis besar diklasifikasikan menjadi tiga yaitu *psycrophil*, *mesophil*, dan *thermophil*. Pada umumnya digester anaerob beroperasi pada temperatur *mesophil* yaitu 20-45°C. Selain itu, temperatur yang tinggi akan memberikan hasil biogas yang baik (Wiratmana *et al.*, 2013). Namun, pengaturan temperatur digester relatif sulit dilaksanakan (Damanhuri, 2008). Menurut Lazuardi (2008), temperatur yang baik untuk proses pembentukan biogas berada dalam kisaran 20-40°C. Sedangkan Deublein dan Steinhauser (2008) menyatakan bahwa temperatur ideal untuk proses pembentukan biogas berkisar 32-42°C, dengan demikian penggunaan

temperatur ruang dinilai relatif baik untuk menghasilkan biogas (Yenni *et al.*, 2012).

2. Lama waktu fermentasi

Lama waktu fermentasi yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencapai semua bahan organik selesai terdegradasi. Lama waktu fermentasi bergantung dari temperatur dan jenis substrat yang dipakai serta berkaitan erat dengan proses-proses pembentukan biogas. Proses-proses tersebut berlangsung pada saat fermentasi minggu pertama hingga minggu keempat fermentasi (Darisa, 2014). Waktu fermentasi yang lebih lama seperti lama waktu 2 minggu, 3 minggu, dan 4 minggu ini memungkinkan bakteri hidrolitik merombak bahan organik kompleks lebih banyak (Ivonny, 2014).

Noresta *et al.* (2013) berpendapat bahwa waktu fermentasi berpengaruh terhadap komposisi biogas, waktu optimum terbentuknya gas metana yaitu pada hari ke-15 dengan besar gas metana adalah 33,92 mg. Sedangkan menurut Monnet (2003) waktu yang dibutuhkan untuk fermentasi pada kondisi mesofilik berkisar antara 15-30 hari, sedangkan pada kondisi termofilik berkisar 12-14 hari. Selain itu, Hadi (1990) juga menyatakan bahwa biogas sudah terbentuk sekitar 10 hari setelah fermentasi yaitu sekitar 0,1-0,2 m³/kg dari berat bahan kering. Penambahan waktu fermentasi dari 10 hari hingga 30 hari akan meningkatkan produksi biogas sebesar 50 %.

3. Derajat keasaman (pH)

Derajat keasaman memiliki efek terhadap aktivitas biologi untuk kelangsungan metabolisme dari mikroba. Kebanyakan dari proses kehidupan

bakteri memiliki kisaran pH antara 5-9, sedangkan nilai pH yang dibutuhkan pada bioreaktor antara 7-8,5 (Andianto, 2011). Penurunan nilai pH yang terjadi setelah proses asidifikasi hingga pH 6 dapat menghambat aktivitas bakteri metana. Bila laju pembentukan asam melampaui laju pemecahannya menjadi metana, proses akan menjadi tidak seimbang karena pH akan menurun, maka produksi gas berkurang dan kandungan CO₂ pada gas naik. Dengan demikian dibutuhkan pengolahan pH untuk menjamin laju produksi metana (Moertinah, 2010).

4. Konsentrasi substrat

Menurut Moertinah (2010), sel mikroorganisme mengandung C, N, P, dan S dengan perbandingan 100:10:1:1. Untuk pertumbuhan mikroorganisme unsur-unsur di atas harus ada pada sumber makanan (substrat). Konsentrasi substrat dapat mempengaruhi proses kerja mikroorganisme. Kondisi optimum akan dicapai jika jumlah mikroorganisme sebanding dengan konsentrasi substrat. Berdasarkan hasil penelitian Rahmayanti *et al.* (2013), perbandingan jumlah sampah organik dan kotoran sapi yang optimal untuk produksi biogas yaitu 1 : 1.

5. Rasio C/N

Rasio C/N sangat penting dalam pembentukan biogas. Karbon digunakan sebagai sumber energi dan nitrogen dibutuhkan mikroorganisme sebagai sumber nutrisi untuk pembentukan sel-sel tubuhnya. Bila sampel terlalu banyak mengandung C, maka N akan habis terlebih dahulu. Hal ini akan menyebabkan proses pembentukan biogas berjalan lambat. Tetapi bila N terlalu banyak, maka C akan habis terlebih dahulu dan menyebabkan proses fermentasi terhenti. Namun, jika kadar C/N rendah maka menjadi racun bagi mikroba perombak karena

nitrogen akan terakumulasi menjadi amonia (Rahmayanti *et al.*, 2013). Dari uraian tersebut, maka kadar rasio C/N pada substrat harus seimbang sesuai dengan kebutuhan mikroba. Rasio C/N dari berbagai substrat disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Rasio C/N pada berbagai jenis bahan organik

Bahan Organik	Rasio C/N
Kotoran bebek	8
Kotoran manusia	8
Kotoran ayam	10
Kotoran kambing	12
Kotoran babi	18
Kotoran sapi	24
Kotoran kerbau	24
Enceng gondok	25
Kotoran gajah	43
Ampas jagung	60
Jerami padi	70
Jerami gandum	90
Serbuk gergaji	200

Sumber : Karki and Dixit (1984)

6. Keberadaan inhibitor

Terdapat beberapa unsur hara yang dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan mikroba. Unsur hara tersebut antara lain logam berat, antibiotik (basitrasin, flavomisin, lasalosid, monesin, spiramisin), dan ion mineral. Senyawa dan ion tertentu dalam substrat dapat bersifat racun, misalnya senyawa dengan konsentrasi berlebihan ion Na^+ dan $\text{Ca}^+ > 8000 \text{ mg/L}$, $\text{K}^+ > 12000 \text{ mg/L}$, Mg^{2+} dan $\text{NH}_4^+ > 3000 \text{ mg/L}$, sedangkan Cu, Cr, Ni, dan Zn dalam konsentrasi rendah dapat menjadi racun bagi kehidupan bakteri anaerob (Bitton 1999). Senyawa lain yang

dibutuhkan mikroba untuk tumbuh yaitu amonia. Namun, jika amonia dalam konsentrasi yang tinggi dapat menghambat proses pembentukan biogas (Andianto, 2011).

7. Pengadukan

Pengadukan bertujuan untuk homogenasi antara substrat dengan mikroba, jika pengadukan terlalu cepat, maka dapat mengganggu aktivitas mikroba. Namun, untuk substrat yang tidak teraduk dapat menghambat keluarnya biogas karena terbentuknya buih pada reaktor (Abbasi *et al.*, 2012). Hal ini menunjukkan bahwa pengadukan yang cukup memiliki pengaruh dalam proses anaerobik sehingga dapat menghasilkan biogas yang lebih banyak.

8. Kadar air

Bakteri sebagai salah satu mikroorganisme yang berperan dalam produksi biogas memiliki faktor-faktor pendukung tertentu untuk bertahan hidup, salah satunya adalah kadar air (Ivonny, 2014). Kandungan air yang tinggi akan memudahkan proses penguraian (Manurung, 2004). Kadar air yang terkandung dalam bioreaktor juga harus tepat, jika kadar air di dalam bioreaktor ini tidak tepat maka dapat menyebabkan produksi biogas menurun. Hal ini disebabkan bakteri metana tidak mendapatkan suplai nutrisi yang cukup, dapat juga disebabkan karena adanya bakteri lain yang berkembang dalam bioreaktor. Jika kadar air terlalu rendah, maka akan terjadi akumulasi asam-asam asetat yang menyebabkan terjadinya hambatan pada saat fermentasi berlangsung dan akhirnya mempengaruhi produksi biogas (Rahmayanti *et al.*, 2013). Pendapat Ratnaningsih

et al. (2009) menyatakan bahwa kadar air untuk pembentukan biogas yaitu berkisar 91-93 %.

9. Konsentrasi bakteri hidrolitik dan bakteri metanogen

Bakteri hidrolitik berperan pada tahap awal proses pembentukan biogas. Penambahan bakteri hidrolitik pada berbagai variasi konsentrasi memberikan beda nyata terhadap produksi biogas (Darisa, 2014). Penambahan konsorsium bakteri hidrolitik sebesar 10 % dapat membantu meningkatkan proses hidrolisis bahan organik kompleks dalam kotoran sapi (Ivonny, 2014). Menurut Forster *et al.* (2008) bahwa semakin banyak konsentrasi konsorsium bakteri yang diberikan maka produksi biogas semakin meningkat. Selain itu, penambahan bakteri metanogen berpengaruh juga terhadap produksi biogas. Untuk memperoleh bakteri metana sebaiknya digunakan substrat yang di dalamnya sudah dapat dipastikan mengandung mikroba metanogen (Coniwanti, 2009). Salah satu substrat yang sudah mengandung bakteri metanogen yaitu kotoran sapi. Sisa hasil pencernaan sapi (kotoran sapi) mengandung beberapa jenis bakteri. Salah satu bakteri rumen tersebut yaitu bakteri metanogen (Here, 2012).

10. Kandungan total solid (TS)

Kandungan total solid (TS) berpengaruh terhadap produksi biogas di dalam bioreaktor. Komposisi umpan atau *total solid* (TS) yang baik untuk produksi biogas berkisar 7-9 %. Kondisi ini dapat membuat proses digester anaerob berjalan dengan baik (Triyanto, 1992 *dalam* Ivonny, 2014).

12. Kandungan oksigen

Bakteri pembentuk asam merupakan bakteri anaerob fakultatif, sehingga ada atau tidak ada oksigen pada bioreaktor tidak mempengaruhi proses pembentukan asam. Sedangkan, bakteri metanogen yaitu bakteri anaerob obligat sehingga keberadaan oksigen dapat menghalangi proses pembentukan gas metana (Deublein dan Steinhauser, 2008). Oleh karena sifat tersebut, bakteri pembentuk asam akan bekerja pada tahap awal fermentasi disaat oksigen masih tersedia dan ketika oksigen pada bioreaktor telah habis, bakteri metana akan mulai bekerja menghasilkan gas metana.

2.5 Bahan Baku Kompos dalam Produksi Biogas

Kompos adalah pupuk alami (organik) yang terbuat dari bahan-bahan hijauan dan bahan organik lain yang sengaja ditambahkan untuk mempercepat proses pembusukan, misalnya kotoran ternak (Wied dan Hary, 2004 *dalam* Zubair dan Haeruddin, 2012). Sedangkan menurut Zubair dan Haeruddin (2012), kompos adalah hasil penguraian parsial atau tidak lengkap dari campuran bahan-bahan organik yang dapat dipercepat secara artifisial oleh populasi berbagai macam mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembap, aerobik atau anaerobik. Dari uraian di atas, maka dapat diketahui bahan baku kompos yaitu suatu bahan organik yang dapat digunakan sebagai bahan utama pembentukan kompos.

Menurut data Status Lingkungan Hidup Daerah Kota Surabaya (2011), rumah kompos di Surabaya menggunakan sampah organik yang berasal dari daun-daun, ranting pohon, sisa sayuran maupun buah-buahan untuk pembentukan

kompos. Jadi, pada prinsipnya semua bahan-bahan organik padat dapat digunakan sebagai bahan baku kompos, seperti limbah organik rumah tangga, sampah-sampah organik pasar atau kota, kertas, kotoran atau limbah peternakan, limbah-limbah pertanian, limbah-limbah agroindustri, limbah pabrik kertas, limbah pabrik gula, dan limbah pabrik kelapa sawit (Zubair dan Haeruddin, 2012). Pengolahan sampah menjadi bahan baku kompos disajikan pada Gambar 2.2.

Berikut skema pengolahan sampah menjadi bahan baku kompos :



Gambar 2.2 Skema pengolahan sampah
(Modifikasi dari NMC CSRRP Yogyakarta, 2011)

2.6 Kotoran Sapi dalam Produksi Biogas

2.6.1 Kotoran sapi sebagai sumber bakteri metanogen

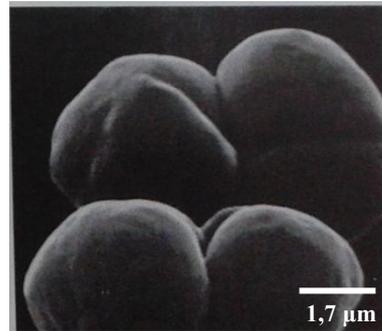
Kotoran sapi adalah limbah peternakan berupa sisa hasil pencernaan sapi (Gunawan, 2013). Sapi merupakan salah satu hewan ruminansia yang memiliki saluran pencernaan khusus yaitu rumen. Pemecahan pakan seperti selulosa dan polisakarida dilakukan oleh mikroba rumen yaitu bakteri, fungi, dan protozoa

(Madigan *et al.*, 2003). Menurut Ramadhani (2010), makanan yang telah tertelan masuk ke dalam rumen dan mengalami proses fermentasi oleh mikroorganisme di dalam rumen. Sisa hasil pencernaan sapi (kotoran sapi) juga mengandung beberapa jenis bakteri. Salah satu bakteri rumen dan bakteri yang terkandung di dalam kotoran sapi yaitu bakteri metanogen (Here, 2012).

Bakteri metanogen adalah bakteri yang terdapat pada bahan-bahan organik dan menghasilkan metana secara anaerob (Gunawan, 2013). Bakteri metanogen menggunakan senyawa karbon dan energi untuk melakukan proses metanogenesis. Senyawa karbon yang digunakan misalnya campuran senyawa H₂ dan CO₂, formiat, methanol, metilamin, dan asetat. Bakteri metanogen juga berperan penting terhadap perputaran H₂ pada lingkungan yang anaerob (Adnany dan Mohammad, 2000). Kebanyakan bakteri metanogen bersifat mesofilik dengan kisaran suhu optimum 20-40°C, namun bakteri metanogen juga dapat ditemui pada suhu termofilik (Wise, 1987 dalam Moo-Young, 1997).

Empat genera bakteri anaerob yang diketahui memproduksi metana (Price dan Cheremisinoff, 1981) :

1. *Methanobacterium*, bakteri berbentuk batang dan tidak membentuk spora.
2. *Methanobacillus*, bakteri berbentuk batang dan membentuk spora.
3. *Methanococcus*, bakteri berbentuk kokus dan tidak membentuk spora.
4. *Methanosarcina*, bakteri berbentuk delapan kokus yang bergerombol dan tidak membentuk spora.



Gambar 2.3 *Methanosarcina* (Madigan *et al.*, 2006)

Menurut Holt *et al.* (2004), bakteri *Methanobacterium* bersifat non motil, anaerob, temperatur optimum 37-45°C untuk bakteri mesofilik dan 55°C untuk yang termofilik, energi diperoleh melalui metabolisme CO₂ menjadi CH₄, menggunakan amonia sebagai sumber nitrogen, dan sulfida sebagai sumber sulfur. *Methanococcus* bersifat non motil, Gram negatif, tumbuh pada kisaran suhu 30-35°C, pH 7-7,5, mereduksi metilamin menjadi CH₄, CO₂, dan NH₃. *Methanosarcina* bersifat Gram variabel, non motil, anaerob, suhu optimum untuk tumbuh berkisar 30-40°C untuk bakteri mesofilik dan 50-55°C untuk yang termofilik, energi didapatkan dengan mereduksi metilamin atau methanol menjadi CO₂, CH₄, H₂, dan asetat.

2.6.2 Komposisi kotoran sapi

Ternak ruminansia mempunyai sistem pencernaan khusus yang menggunakan mikroorganisme dalam sistem pencernaannya untuk mencerna selulosa dan lignin dari rumput atau hijauan berserat tinggi (Sutarno dan Feris, 2007). Oleh karena itu, pada kotoran ternak ruminansia, khususnya sapi mempunyai kandungan selulosa yang cukup tinggi.

Kotoran sapi mengandung beberapa bahan organik seperti 22,59 % selulosa; 18,32 % hemiselulosa; 10,20 % lignin; 34,72 % total karbon organik; 1,26 % total nitrogen; 27,56:1 ratio C:N; 0,73 % P; dan 0,68 % K (Lingaiah dan Rajasekaran, 1986 *dalam* Sutarno dan Feris, 2007).

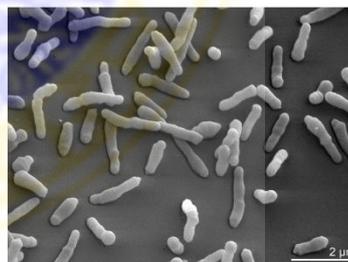
Kadar air pada kotoran sapi juga dapat menyatakan susunan kotoran sapi, karena kadar air pada kotoran sapi digunakan untuk menentukan berapa banyak air yang harus ditambahkan untuk menghidrolisis kotoran sapi tersebut (Gunawan, 2013).

2.7 Bakteri-bakteri dalam Konsorsium Bakteri Hidrolitik

2.7.1 *Cellulomonas* sp.

Menurut Garrity *et al.* (2004), klasifikasi *Cellulomonas* sp. adalah sebagai berikut :

Kingdom : Bacteria
 Filum : Actinobacteria
 Kelas : Actinobacteria
 Ordo : Actinomycetales
 Famili : Cellulomonadaceae
 Genus : *Cellulomonas*
 Spesies : *Cellulomonas* sp.



Gambar 2.4 *Cellulomonas* sp.
(Abt *et al.*, 2010)

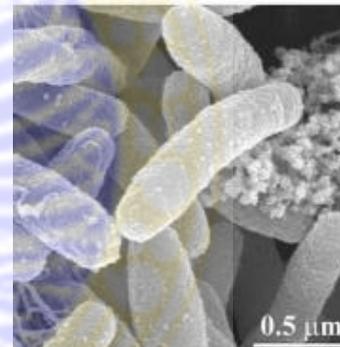
Bakteri *Cellulomonas* sp. merupakan bakteri selulolitik dengan distribusi yang luas karena dapat ditemui diberbagai jenis tanah maupun limbah organik. Ukuran sel 0,5-0,6 μm x 2,0-5,0 μm , Gram positif, dan memiliki motilitas dengan

satu atau sedikit flagela (Holt *et al.*, 2004). Bersifat fakultatif anaerob dan tidak membentuk spora. Metabolisme dengan respirasi dan fermentasi, membentuk asam dari glukosa, bersifat kemoorganotrop dan katalase positif. Bakteri ini mampu mengubah nitrat menjadi nitrit, suhu optimum untuk pertumbuhan yaitu 30°C, mampu mensekresikan enzim selulase, yakni suatu enzim ekstraseluler yang menghasilkan selulobiosa pada hidrolisis selulosa (Pelczar dan Chan, 1986).

2.7.2 *Cellvibrio* sp.

Berdasarkan klasifikasi oleh Garrity *et al.* (2004), *Cellvibrio* sp. dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: Bacteria
Filum	: Proteobacteria
Kelas	: Gammaproteobacteria
Ordo	: Pseudomonadales
Famili	: Pseudomonadaceae
Genus	: <i>Cellvibrio</i>
Spesies	: <i>Cellvibrio</i> sp.



Gambar 2.5 *Cellvibrio* sp.
(Young Joon *et al.*, 2010)

Menurut Holt *et al.* (2004), *Cellvibrio* sp. merupakan bakteri Gram negatif, motil, memiliki flagella yang bersifat polar, berbentuk batang agak melengkung dengan bagian akhir bulat, dan berukuran 0,2-0,5 μm x 1,0-1,3 μm . *Cellvibrio* sp. merupakan bakteri yang bersifat aerobik dan bersifat positif pada uji katalase, dapat mengoksidasi glukosa, dan menghidrolisis selulosa.

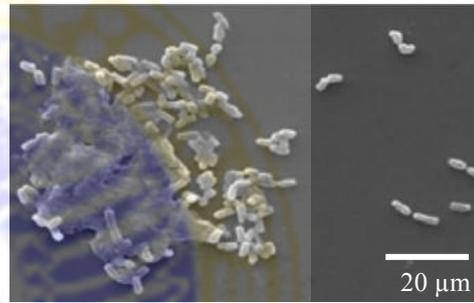
Asam organik tidak dapat dimanfaatkan sebagai sumber karbon, karena tidak dibutuhkan pada faktor pertumbuhan. Mampu tumbuh pada medium sukrosa

agar dengan warna koloni putih hingga krem, permukaan halus, elevasi konvex. Pada medium mineral garam dan selulosa berwarna putih, halus, berbentuk bulat, tepian rata, dan di bagian tepi terdapat zona bening yang mengindikasikan bahwa bakteri ini mampu menghidrolisis selulosa.

2.7.3 *Bacillus subtilis*

Menurut Garrity *et al.* (2004), *Bacillus subtilis* dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: Bacteria
Filum	: Firmicutes
Kelas	: Bacilli
Ordo	: Bacillales
Famili	: Bacillaceae
Genus	: <i>Bacillus</i>
Spesies	: <i>Bacillus subtilis</i>



Gambar 2.6 *Bacillus subtilis*
(Mangaiyarkarasi *et al.*, 2011)

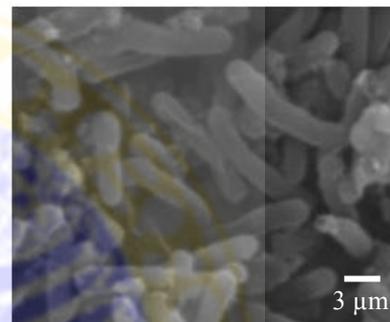
Bacillus subtilis merupakan bakteri Gram positif dan motilitas positif. Bakteri ini membentuk endospora dengan bentuk endospora bulat atau silinder dan sangat resisten terhadap kondisi yang merugikan (Holt *et al.*, 2004). Saat sporulasi, spora ditebarkan ke udara, struktur spora tidak akan terjadi jika sel sedang berada pada fase pembelahan secara eksponensial, tetapi akan dibentuk terutama pada kondisi nutrisi terbatas misalnya jumlah karbon dan nitrogen sedikit (Madigan *et al.*, 2003). Bakteri ini bersifat aerob atau anaerob fakultatif, kemoorganotrop, respirasi secara aerob atau anaerob (fermentasi), katalase positif, dan dapat ditemukan pada berbagai jenis habitat. *Bacillus subtilis* menghasilkan

berbagai jenis enzim seperti alfa-amilase, beta-glukanase, glutaminase, maltogenik amilase, protease, pullulanase, dan xilanase (Pariza and Johnson, 2001).

2.7.4. *Bacillus licheniformis*

Menurut Garrity *et al.* (2004), klasifikasi *Bacillus licheniformis* adalah sebagai berikut :

Kingdom : Bacteria
 Filum : Firmicutes
 Kelas : Bacilli
 Ordo : Bacillales
 Famili : Bacillaceae
 Genus : *Bacillus*
 Spesies : *Bacillus licheniformis*



Gambar 2.7 *Bacillus licheniformis*
 (Swaathy *et al.*, 2014)

Bacillus licheniformis merupakan bakteri aerob atau anaerob fakultatif, Gram positif, dan motilitas positif. Bakteri ini membentuk endospora dengan bentuk endospora bulat atau silinder, dan sangat resisten terhadap kondisi yang merugikan. Saat sporulasi, spora ditebarkan ke udara, tahan terhadap panas, perubahan pH dan salinitas. Selain itu, bakteri ini bersifat kemoorganotrop dan katalase positif (Holt *et al.*, 2004). Bakteri ini mampu tumbuh diberbagai jenis substrat, menghasilkan enzim hidrolitik, menggunakan asetat dan 2,3 butanodiol sebagai sumber karbon (Pinto, 2012). Bakteri ini mampu menghasilkan enzim ekstraseluller seperti α -amilase, glucoamilase, protease, pektinase dan selulase,

tumbuh pada kisaran suhu 30°C sampai 55°C dan pada pH 3-11 (Ghani *et al.*, 2013).

2.7.5 *Pseudomonas* sp.

Menurut Garrity *et al.* (2004), klasifikasi *Pseudomonas* sp. adalah sebagai berikut :

Kingdom : Bacteria
 Filum : Proteobacteria
 Kelas : Gammaproteobacteria
 Ordo : Pseudomonadales
 Famili : Pseudomonadaceae
 Genus : *Pseudomonas*
 Spesies : *Pseudomonas* sp.



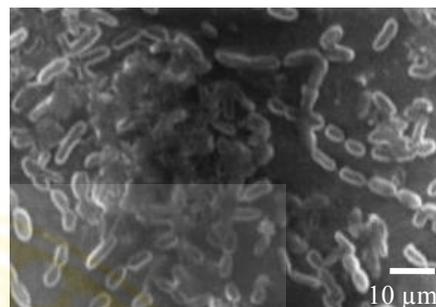
Gambar 2.8 *Pseudomonas* sp.
(Pelczar *et al.*, 1993)

Pseudomonas sp. umumnya berukuran 0,5-1,0 x 1,5-4,0 μm , sel tunggal, batang lurus atau melengkung, tetapi tidak berbentuk heliks. *Pseudomonas* sp. merupakan bakteri Gram negatif, motil dengan flagella terikat diujung sel (flagella monotrikus atau lofotrikus), kemoorganotrop, katalase positif, metabolisme dengan respirasi dan fermentasi. Beberapa kelompok bakteri merupakan kemolitotrop fakultatif, dapat menggunakan H_2 atau CO sebagai sumber energi, aerobik sejati, kecuali spesies-spesies yang dapat menggunakan denitrifikasi sebagai cara respirasi anaerobik (Holt *et al.*, 2004). Menurut Rao (2007), *Pseudomonas* sp. merupakan bakteri yang dapat menghidrolisis selulosa.

2.7.6 *Acetobacter aceti*

Menurut Garrity *et al.* (2004), klasifikasi *Acetobacter aceti* adalah sebagai berikut :

Kingdom	: Bacteria
Filum	: Proteobacteria
Kelas	: Alphaproteobacteria
Ordo	: Rhodospirillales
Famili	: Acetobacteraceae
Genus	: <i>Acetobacter</i>
Spesies	: <i>Acetobacter aceti</i>



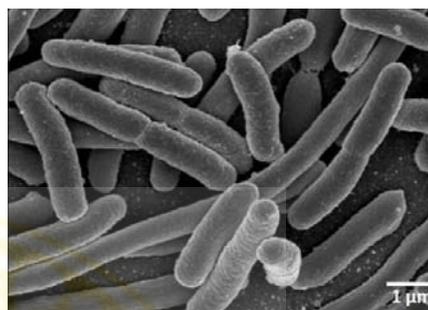
Gambar 2.9 *Acetobacter aceti*
(Karthikeyan *et al.*, 2009)

Acetobacter aceti berbentuk elips hingga batang, berukuran mikroskopis yaitu $0,6-0,8 \mu\text{m} \times 1,0-1,4 \mu\text{m}$, sel tunggal, berpasangan ataupun membentuk suatu rantai, motil dengan flagella peritrikus, tidak membentuk endospora, dan Gram negatif. Bakteri ini bersifat aerob obligat sehingga metabolisme selalu dengan respirasi. Katalase positif, memproduksi indol dan H_2S . Mampu mengoksidasi etanol menjadi asam asetat, kemudian asam asetat dan asam laktat diubah menjadi C_2O dan H_2O . Sumber karbon yang baik digunakan untuk pertumbuhan yaitu gliserol, etanol dan laktat. Bersifat kemoorganotrop, suhu optimal untuk tumbuh berkisar $25-30^\circ\text{C}$, dan pH optimum $5,4-6,3$ (Holt *et al.*, 2004).

2.7.7 *Lactobacillus plantarum*

Menurut Garrity *et al.* (2004), klasifikasi *Lactobacillus plantarum* adalah sebagai berikut :

Kingdom	: Bacteria
Filum	: Firmicutes
Kelas	: Bacilli
Ordo	: Lactobacillales
Famili	: Lactobacillaceae
Genus	: <i>Lactobacillus</i>
Spesies	: <i>Lactobacillus plantarum</i>



Gambar 2.10 *Lactobacillus plantarum*
(Ji, 2013)

Lactobacillus plantarum merupakan salah satu jenis bakteri asam laktat (BAL), bersifat heterofermentatif fakultatif, dapat tumbuh diberbagai jenis substrat seperti susu, daging, dan fermentasi sayuran (Smetankova *et al.*, 2012). Menurut Pelczar dan Chan (1988), genus *Lactobacillus* adalah bakteri amilolitik. *Lactobacillus plantarum* mampu menghidrolisis pati menjadi gula dan menggunakan gula tersebut untuk pertumbuhannya (Kusnadi dan Tety, 2012). *Lactobacillus plantarum* tumbuh pada suhu 15- 37°C, pH 3,0-4,6, dan ciri-ciri sel berbentuk batang pendek (Holt *et al.*, 2004).

2.7.8 *Cytophaga* sp.

Menurut *Garrity et al.* (2004), klasifikasi *Cytophaga* sp. adalah sebagai berikut :

Kingdom	: Bacteria
Filum	: Bacteroides
Kelas	: Sphingobacteria
Ordo	: Sphingobacteriales
Famili	: Flexibacteraceae
Genus	: <i>Cytophaga</i>
Spesies	: <i>Cytophaga</i> sp.



Gambar 2.11 *Cytophaga* sp.
(Madigan *et al.*, 2000)

Cytophaga sp. merupakan bakteri berbentuk batang yang sangat pendek hingga sedang yakni antara 0,3-0,8 μm x 1,5-15 μm , hanya beberapa yang berukuran lebih panjang dengan ujung yang tajam atau runcing. Panjang batangnya bersifat fleksibel, motil dengan cara meluncur, dan merupakan bakteri Gram negatif. Pada media padat dengan kandungan nutrisi yang rendah, koloni berbentuk menjalar, sedangkan pada media dengan kandungan nutrisi yang tinggi, koloni bakteri ini secara mikroskopik biasanya bersifat kompak, cembung, dengan tepi rata atau bergelombang, terkadang pula berbentuk cekung, tenggelam atau terendam ke dalam agar. Biomassa sel mengandung pigmen dengan warna kuning, orange atau merah karena mengandung karetonoid, flexirubin atau mengandung keduanya. Bakteri ini bersifat aerob atau anaerob fakultatif, kemoorganotrop, metabolisme secara respirasi atau fermentasi. Mampu mengubah bahan organik menjadi asetat, propionate, dan suksinat serta mendekomposisi

bahan-bahan makromolekul seperti protein, polisakarida, selulosa, kitin, pektin dan amilum. Suhu optimum untuk tumbuh 20-35°C dan pH optimum 7 (Holt *et al.*, 2004).

