

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biogas

2.1.1 Pengertian biogas

Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dapat dijadikan bahan bakar alternatif untuk menggantikan bahan bakar yang berasal dari fosil seperti minyak tanah dan gas alam (Haryati, 2006). Biogas adalah gas yang mudah terbakar dan dihasilkan melalui proses anaerob atau fermentasi dari bahan-bahan organik diantaranya: kotoran manusia dan hewan, limbah domestik (rumah tangga), sampah atau limbah organik yang *biodegradable* dalam kondisi anaerobik (Sunaryo, 2014). Definisi lain menyebutkan bahwa biogas adalah campuran beberapa gas yang tergolong bahan bakar hasil fermentasi dari bahan organik dalam kondisi anaerob dan gas yang dominan adalah metana (CH_4) dan karbondioksida (CO_2) (Simamora *et al.*, 2006). Biogas dapat digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan sifat gas alam. Kesetaraan biogas dengan sumber energi lain, yaitu 1 m^3 biogas setara dengan; elpiji 0,46 Kg, 0,62 liter minyak tanah, 0,52 liter minyak solar, 0,80 liter minyak bensin, $1,50 \text{ m}^3$ gas kota dan 3,50 Kg kayu bakar.

Komponen biogas yang dihasilkan dari proses fermentasi berupa gas metana (CH_4) sekitar 54 - 70 %, gas karbondioksida (CO_2) sekitar 27 - 45 %, nitrogen (N_2) 3 - 5 %, hidrogen (H_2) sebesar 1 %, karbonmonoksida (CO) sebesar 0,1 %, oksigen (O_2) sebesar 0,1 % dan sedikit hidrogen sulfida (H_2S). Gas metana

(CH₄) adalah hidrokarbon paling sederhana yang merupakan komponen utama biogas. Pada umumnya apabila gas metana dibakar maka akan berwarna biru dan menghasilkan banyak energi panas (Pambudi, 2008). Menurut Hammad (1996), biogas dapat terbakar apabila terdapat kadar metana minimal 57 %. Sedangkan menurut Hessami *et al.* (1996), biogas dapat terbakar jika kandungan metana minimal 60 %. Metana digunakan sebagai bahan bakar karena mempunyai nilai kalor yang cukup tinggi, yaitu sekitar 4.800 sampai 6.700 kkal/m³, sedangkan gas metana murni mengandung energi 8.900 kkal/m³. Karena nilai kalor yang cukup tinggi itulah biogas dapat dipergunakan untuk keperluan penerangan, memasak, menggerakkan mesin dan sebagainya (Sunaryo, 2014). Energi yang terkandung dalam biogas tergantung dari kadar metana (CH₄). Semakin tinggi kandungan metana maka semakin besar kandungan energi (nilai kalor) pada biogas, dan sebaliknya semakin kecil kandungan metana (CH₄) semakin kecil nilai kalor (Murjito, 2008).

2.1.2 Tahap pembentukan biogas

Produksi biogas dimulai dengan memasukkan bahan organik ke dalam reaktor, sehingga bakteri anaerob akan membusukkan bahan organik tersebut dan menghasilkan gas yang disebut biogas. Proses pembentukan biogas dilakukan secara anaerob (Fauziah, 1998). Lettinga (1994) menyatakan bahwa terdapat empat tahap proses transformasi bahan organik pada sistem anaerobik, yaitu:

1. Hidrolisis

Menurut Adrianto *et al.* (2001), proses hidrolisis merupakan salah satu tahap proses yang sangat penting agar tidak terjadi kegagalan proses pada biodegradasi anaerob. Pada tahapan hidrolisis, bakteri hidrolitik mendegradasi senyawa organik kompleks yang berupa polimer menjadi monomernya yang berupa senyawa terlarut dengan berat molekul yang lebih ringan. Lipida berubah menjadi asam lemak rantai panjang dan gliserin, polisakarida menjadi gula (monosakarida dan disakarida), protein menjadi asam amino dan asam nukleat menjadi purin dan pirimidin. Proses hidrolisis membutuhkan mediasi eksoenzim yang disekresi oleh bakteri fermentatif. Hidrolisis molekul kompleks dikatalisasi oleh enzim ekstraseluler seperti selulase, protease, dan lipase (Sa'id, 2006). Sejumlah besar bakteri dalam proses hidrolisis dan fermentasi senyawa organik antara lain *Cellulomonas* sp., *Cytophaga* sp., *Cellvibrio* sp., *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas* sp. dan *Lactobacillus plantarum*.

2. Asidogenesis.

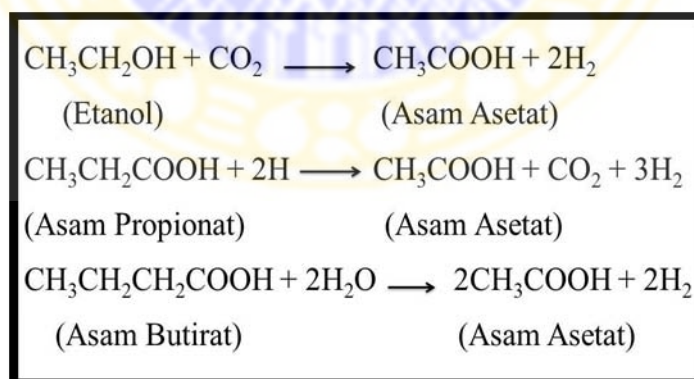
Monomer-monomer hasil hidrolisis dikonversi menjadi senyawa organik sederhana seperti asam lemak volatil, alkohol, asam laktat, senyawa mineral seperti karbondioksida, hidrogen, amonia dan gas hidrogen sulfida. Tahap ini dilakukan oleh berbagai kelompok bakteri, mayoritas adalah bakteri obligat anaerob dan sebagian yang lain bakteri anaerob fakultatif. Contoh bakteri asidogenik (pembentuk asam) adalah seperti *Clostridium* sp. (Sa'id, 2006).

Menurut Deublein dan Steinhauser (2008), produk terpenting dalam tahapan asidogenesis adalah asam propionat, asam butirat, H₂ dan CO₂. Selain itu dihasilkan sejumlah kecil asam formiat, asam laktat, asam valerat, metanol, etanol, butadienol dan aseton.

3. Asetogenesis

Hasil asidogenesis dikonversi menjadi asetat, hidrogen, dan karbondioksida. Sekitar 70 % bahan diubah menjadi asam asetat. Pembentukan asam asetat kadang-kadang disertai dengan pembentukan karbondioksida atau hidrogen, tergantung kondisi oksidasi dari bahan organik aslinya. Etanol, asam propionat, dan asam butirat diubah menjadi asam asetat oleh bakteri asetogenik (bakteri yang memproduksi asetat dan H₂). Salah satu bakteri yang berperan dalam proses asetogenesis adalah *Acetobacter aceti*.

Reaksi perubahan etanol, asam propionat, dan asam butirat menjadi asam asetat oleh bakteri asetogenik disajikan pada Gambar 2.1.

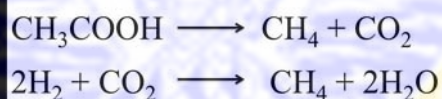


Gambar 2.1 Reaksi perubahan etanol, asam propionat, dan asam butirat menjadi asam asetat oleh bakteri asetogenik (Sa'id, 2006)

4. Metanogenesis

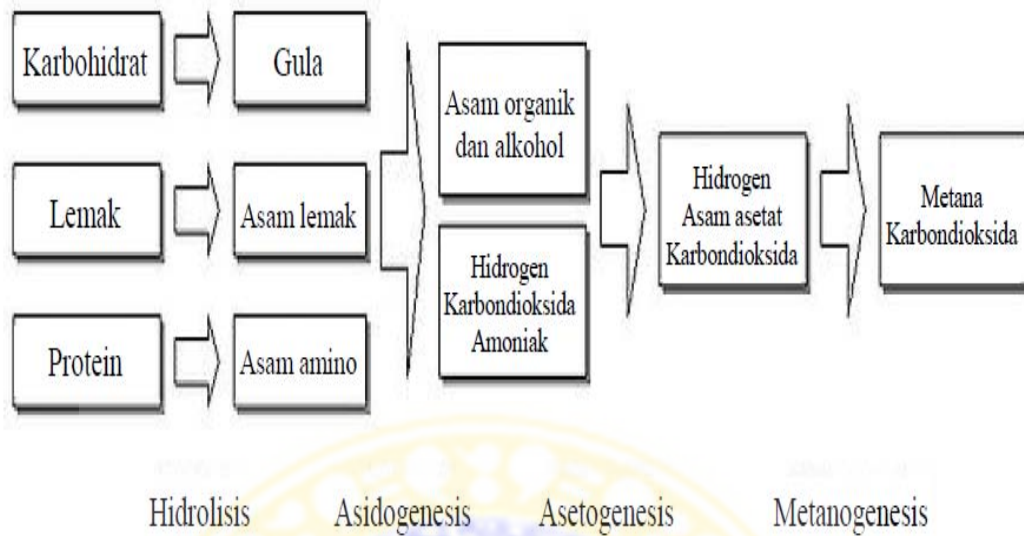
Pada tahap metanogenesis, terbentuk metana dan karbondioksida. Metana dihasilkan dari asetat atau dari reduksi karbondioksida oleh bakteri asetotropik dan hidrogenotropik dengan menggunakan hidrogen. Pada keadaan normal, asetat merupakan prekursor yang membentuk 70 % metana di dalam *digester*, sedangkan 30 % metana dihasilkan dari hidrogen dan karbondioksida (Gashaw dan Abile, 2014). Bakteri yang terlibat pada proses ini yaitu bakteri metanogen dari subdivisi *acetoclastic methane bacteria* yang terdiri atas *Methanobacterium* sp., *Methanosarcina* sp., dan *Methanococcus* sp. (Darisa, 2014).

Reaksi *acetoclastic methanogenesis* dan *hydrogenotrophic methanogenesis* disajikan dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Reaksi *acetoclastic methanogenesis* dan *hydrogenotrophic methanogenesis* (Sa'id, 2006)

Tiga tahap pertama di atas disebut sebagai fermentasi asam sedangkan tahap keempat disebut fermentasi metanogenik (Lettinga, 1994). Tahap asetogenesis terkadang ditulis sebagai bagian dari tahap asidogenesis. Empat tahapan fermentasi anaerob tersebut ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tahapan pembentukan metana (Ivonny, 2014)

2.1.3 Faktor yang mempengaruhi produksi biogas

Proses perombakan anaerob bahan organik untuk pembentukan biogas dipengaruhi oleh dua faktor yaitu biotik dan abiotik. Faktor biotik berupa mikroorganisme dan jasad yang aktif di dalam proses produksi biogas. Faktor abiotik meliputi substrat, kelembapan, rasio C/N dalam substrat, suhu, kehadiran bahan toksik, pH, ukuran partikel substrat dan pengadukan (Indarto, 2010). Selain itu waktu fermentasi juga berpengaruh terhadap biogas yang dihasilkan.

1. Starter

Penambahan *starter* sangat penting karena fermentasi anaerob dilakukan oleh bakteri-bakteri hidrolitik, asidogenik, asetogenik dan metanogenik. Terdapat beberapa jenis inokulum menurut Darisa (2014) yaitu *starter* alami berupa lumpur aktif, timbunan kotoran dan timbunan sampah organik; *starter* semi-buatan dan *starter* buatan yaitu suatu inokulum bakteri yang dibiakkan secara laboratorium dengan media buatan.

2. Suhu

Bakteri metana pada umumnya adalah bakteri golongan mesofil yaitu bakteri yang dapat hidup dengan baik pada sekitar suhu kamar. Oleh karena itu, pembentukan biogas harus disesuaikan dengan suhu kehidupan bakteri metana. Suhu pembentukan biogas antara 20 - 40° C. Dengan suhu optimum yaitu 27 - 30° C (Amaru, 2004). Menurut Haryati (2006), jika suhu turun menjadi 10° C, produksi gas akan terhenti. Produksi gas akan optimal jika berada pada daerah mesofilik. Biogas yang dihasilkan pada kondisi di luar suhu tersebut mempunyai kandungan CO₂ yang lebih tinggi. Sedangkan menurut Fry (1974), pada suhu yang rendah 15° C laju aktivitas mikroorganisme sekitar setengahnya dari laju aktivitas pada suhu 35° C. Apabila mikroorganisme bekerja pada suhu 40° C produksi gas akan berjalan dengan cepat hanya beberapa jam dan untuk selanjutnya hanya akan diproduksi gas yang sedikit.

3. Derajat keasaman (pH)

Faktor pH sangat berperan pada dekomposisi anaerob. Apabila pH tidak sesuai, maka bakteri tidak dapat tumbuh dengan maksimal bahkan dapat menyebabkan kematian yang menghambat perolehan gas metana. Nilai pH yang dibutuhkan untuk *digester* adalah antara 6,2 - 8 (Amaru, 2004). pH yang ideal dalam proses perombakan adalah antara 6 - 8 dengan tingkat masih diterima adalah pH 5 (minimum) dan pH 12 (maksimum).

4. Kelembapan

Kelembapan sangat dibutuhkan oleh semua bakteri. Kelembapan substrat sebesar 60 - 99 % dapat meningkatkan produksi gas. Menurut Ratnaningsih

(2009), penambahan air pada substrat biasanya dilakukan untuk dapat memenuhi kadar air yang disyaratkan untuk pembentukan biogas, yaitu 91 - 93 %. Kelembapan substrat juga berhubungan dengan kadar air yang terkandung di dalam substrat tersebut. Apabila substrat memiliki kandungan air yang sedikit maka bisa ditambahkan air supaya pembentukan biogas bisa optimal. Tetapi beberapa fakta juga menunjukkan bahwa jika kelembapan terlalu tinggi maka dapat menghambat metanogenesis. Teori ini didasarkan bahwa air memiliki substansi oksigen sehingga jika terlalu banyak kadar airnya maka dapat bersifat toksik bagi organisme anaerob (Price dan Cheremisinoff, 1981).

5. Rasio C/N

Bakteri anaerob membutuhkan nutrisi sebagai sumber energi. Apabila terjadi kekurangan nutrisi akan menjadi penghambat bagi pertumbuhan bakteri. Karbon dan nitrogen adalah sumber makanan utama bagi bakteri anaerob, sehingga pertumbuhan optimum bakteri sangat dipengaruhi unsur ini, karbon dibutuhkan untuk mensuplai energi dan nitrogen dibutuhkan untuk membentuk struktur sel bakteri. Nitrogen amonia pada konsentrasi yang tinggi dapat menghambat proses fermentasi anaerob. Konsentrasi yang baik berkisar 200 - 1.500 mg/L dan bila melebihi 3.000 mg/L akan bersifat toksik.

Produksi gas metana sangat tergantung pada rasio C/N dari substrat. Menurut Hartono (2009), rentang rasio C/N antara 25 - 30 merupakan rentang optimum untuk proses penguraian anaerob. Jika rasio C/N terlalu tinggi, maka nitrogen akan dikonsumsi sangat cepat oleh bakteri-bakteri metanogen untuk memenuhi kebutuhan protein dan tidak akan lagi bereaksi dengan sisa karbonnya.

Sebagai hasilnya produksi gas akan rendah. Di sisi lain, jika rasio C/N sangat rendah, nitrogen akan dibebaskan dan terkumpul dalam bentuk NH_4OH (Windyasmara *et al.*, 2012). Keadaan tersebut mengakibatkan pH naik menjadi 8,5 dan bersifat toksik bagi bakteri metanogen. Proses fermentasi anaerob akan berlangsung optimum bila rasio C/N bernilai 30/1, dimana jumlah karbon 30 kali dari jumlah nitrogen. Pada bahan yang memiliki jumlah karbon 15 kali dari jumlah nitrogen akan memiliki rasio C/N 15 berbanding 1, rasio C/N dengan nilai 30 ($\text{C/N} = 30/1$ atau karbon 30 kali dari jumlah nitrogen). Dengan kondisi tersebut maka bakteri dapat memanfaatkan substratnya dengan optimal, bila kondisi yang lain juga mendukung. Agar tercapai rasio C/N yang optimum maka bahan yang memiliki rasio C/N tinggi dapat dicampurkan dengan bahan yang memiliki rasio C/N rendah. Misalnya dengan mencampurkan bahan organik padat dengan kotoran hewan (Gashaw dan Abile, 2014).

6. Pengadukan

Pengadukan sangat bermanfaat bagi bahan yang berada di dalam reaktor karena memberikan peluang material tetap tercampur dengan bakteri dan suhu terjaga merata di seluruh bagian. Dengan pengadukan potensi material mengendap di dasar reaktor semakin kecil, konsentrasi merata, dan memberikan kemungkinan seluruh material mengalami proses fermentasi anaerob secara merata.

7. Bahan toksik

Bahan toksik sebenarnya termasuk golongan unsur hara yang terkandung dalam substrat. Keberadaan bahan toksik masih dapat ditoleransi dalam batas ambang tertentu (Wahyuni, 2013). Semua kation dapat beracun pada organisme

anaerob apabila konsentrasinya terlalu tinggi. Senyawa dan ion tertentu dalam substrat dapat bersifat racun, misalnya senyawa dengan konsentrasi berlebihan ion Na^+ dan Ca^{2+} >8.000 mg/L, K^+ >12.000 mg/L, Mg^{2+} dan NH_4^+ >3.000 mg/L, sedangkan Cu, Cr, Ni dan Zn dalam konsentrasi rendah dapat menjadi racun bagi kehidupan bakteri anaerob (Bitton, 1999).

8. Ukuran partikel substrat

Ukuran partikel substrat yang besar akan menghasilkan penggumpalan di dalam *digester* sehingga mempersulit bakteri untuk melaksanakan fungsi degradasi. Reaksi hidrolisis biasanya terjadi pada permukaan substrat. Dengan demikian, ukuran partikel substrat yang kecil dapat meningkatkan tingkat hidrolisis dan mempersingkat waktu fermentasi (Huy, 2008).

9. Waktu fermentasi

Waktu fermentasi adalah jumlah hari proses *digesting* pada reaktor dihitung saat pemasukan bahan organik sampai terbentuknya biogas (Wahyuni, 2013). Lamanya waktu fermentasi sangat tergantung dari jenis bahan organik dan perlakuan terhadap bahan organik (*feedstock substrate*) sebelum dilakukan proses fermentasi. Beberapa jenis bahan kimia juga dapat ditambahkan untuk mempersingkat waktu dan menghasilkan gas metana lebih banyak. Waktu fermentasi biasanya berkisar 29 - 60 hari, tergantung pada jenis bahan organik yang digunakan. Selain itu, waktu fermentasi tersebut juga dipengaruhi oleh suhu. Apabila proses fermentasi berlangsung pada suhu mesofilik maka waktu yang dibutuhkan sekitar 15 - 30 hari, sedangkan apabila proses fermentasi berlangsung pada suhu termofilik maka waktu yang dibutuhkan sekitar 12 - 14 hari. Menurut

Hadi (1981), biogas sudah terbentuk sekitar 10 hari setelah fermentasi yaitu sekitar 0,1 - 0,2 m³/Kg dari berat bahan kering dan penambahan waktu fermentasi dari 10 hari hingga 30 hari akan meningkatkan produksi biogas sebesar 50 %. Arthur dan Abeeku (2010) juga menjelaskan bahwa semakin lama waktu fermentasi maka semakin banyak biogas yang dihasilkan. Waktu tercepat untuk produksi biogas adalah 10 - 20 hari, tetapi biogas yang dihasilkan hanya sedikit.

2.1.4 Reaktor biogas

Proses produksi biogas memerlukan alat yaitu reaktor biogas yang bekerja dengan prinsip menciptakan suatu tempat penampungan bahan organik yang pada waktu tertentu akan berkondisi anaerob sehingga bahan organik dapat terlebih dahulu dihidrolisis oleh bakteri hidrolitik dan pada akhirnya akan difermentasi oleh bakteri metanogen untuk menghasilkan biogas. Biogas yang dihasilkan kemudian dialirkan ke tempat penampungan biogas, sedangkan lumpur sisa aktivitas fermentasi dikeluarkan lalu dijadikan pupuk alami yang dapat dimanfaatkan untuk usaha pertanian maupun perkebunan (Sunaryo, 2014). Menurut Syamsudin dan Iskandar (2005), beberapa tahun terakhir ini dikembangkan jenis reaktor balon yang banyak digunakan sebagai reaktor sederhana dalam skala kecil. Reaktor ini merupakan jenis reaktor yang banyak digunakan pada skala rumah tangga yang menggunakan bahan plastik sehingga lebih efisien dalam penanganan dan perubahan tempat biogas. Reaktor ini terdiri atas satu bagian yang berfungsi sebagai *digester* dan penyimpan gas masing masing bercampur dalam satu ruangan tanpa sekat. Material organik terletak di

bagian bawah karena memiliki berat yang lebih besar dibandingkan gas yang akan mengisi pada rongga atas.

2.1.5 Sistem fermentasi biogas

Terdapat beberapa sistem untuk fermentasi biogas yang dibedakan berdasarkan pada cara pengisian bahan bakunya. Sistem fermentasi tersebut adalah *batch fermentation*, *fed-batch fermentation*, dan *continuous fermentation*.

1. *Batch fermentation*

Menurut Iman (2008), *batch fermentation* adalah proses fermentasi dengan cara memasukkan media dan inokulum secara bersamaan ke dalam bioreaktor dan pengambilan produk dilakukan pada akhir fermentasi. Pada prinsipnya sistem fermentasi *batch* merupakan sistem tertutup dimana tidak ada penambahan media baru.

2. *Fed-batch fermentation*

Menurut Rao dan Bapat (2006), *fed-batch fermentation* adalah proses fermentasi dengan penambahan nutrisi pada interval waktu tertentu dan tidak ada media yang dipindahkan. Sistem *fed-batch* adalah suatu sistem yang menambahkan media baru secara teratur pada kultur tertutup, tanpa mengeluarkan sisa substrat yang ada di dalam *fermentor* sehingga volume kultur makin lama makin bertambah (Widjaja *et al.*, 2010).

3. *Continuous fermentation*

Menurut Rao dan Bapat (2006), *continuous fermentation* adalah proses fermentasi dimana dilakukan penambahan nutrisi secara terus-menerus serta

produknya dipindahkan secara bersamaan. Bahan baku segar atau nutrien yang diisikan terus-menerus akan mendorong bahan isian yang sudah diproses keluar dari tangki pencerna melalui pipa pengeluaran.

2.2 Bahan Baku Kompos

Pemanfaatan sampah organik dilakukan melalui teknik 3-R (*Reduce, Reuse* dan *Recycle*). Sampah organik dapat dimanfaatkan menjadi kompos melalui proses pengomposan. Kompos adalah hasil dari pengolahan sampah organik yang umumnya dihasilkan dari dapur rumah tangga atau sisa kebun atau kotoran ternak, yang kemudian dimanfaatkan sebagai pupuk. Sumber bahan pupuk kompos antara lain berasal dari limbah organik seperti sisa-sisa tanaman (jerami, batang, dahan), sisa buah dan sayuran, sampah rumah tangga, kotoran ternak (sapi, kambing, ayam, itik), arang sekam, abu dapur dan lain-lain. Bahan baku kompos tersebut mengandung berbagai unsur hara, baik mikro maupun makro yang cukup komplit seperti N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, B dan S (Soenarno dan Sri, 2011). Karakter dan jenis bahan baku untuk kompos adalah material organik atau bahan hijauan yang mempunyai perbandingan C/N tinggi, kadar air 40 - 50 %, dan pH sekitar 6 - 8. Material organik kemudian dicacah dan diberi perlakuan hingga mencapai karakteristik yang sesuai. Pencacahan ini dilakukan karena semakin kecil ukuran partikel, semakin mudah dicerna oleh mikroorganisme pengurai sampah, sehingga akan mempercepat proses dekomposisi (Harianto, 2007).

2.3 Kotoran Sapi

Permasalahan limbah ternak dapat diatasi dengan memanfaatkan menjadi bahan yang memiliki nilai yang lebih tinggi. Salah satu bentuk pengolahan yang dapat dilakukan adalah menggunakan limbah tersebut sebagai bahan masukan untuk menghasilkan bahan bakar biogas. Kotoran ternak ruminansia sangat baik untuk digunakan sebagai bahan dasar pembuatan biogas. Ternak ruminansia mempunyai sistem pencernaan khusus yang menggunakan mikroorganisme dalam sistem pencernaannya yang berfungsi untuk mencerna selulosa dan lignin dari rumput berserat tinggi. Oleh karena itu pada tinja ternak ruminansia, khususnya sapi mempunyai kandungan selulosa yang cukup tinggi. Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa kotoran sapi mengandung 22,59 % selulosa, 18,32 % hemiselulosa, 10,20 % lignin, 34,72 % total karbon organik, 1,26 % total nitrogen, 27,56/1 rasio C/N, 0,73 % P dan 0,68 % K (Lingaiah dan Rajasekaran, 1986).

Selain itu, pada kotoran sapi telah mengandung bakteri penghasil gas metana yang terbentuk dalam perut ruminansia. Bakteri penghasil gas metana tersebut membantu dalam proses fermentasi sehingga mempercepat proses pembentukan biogas (Sufyandi, 2001).

2.4 Bakteri Hidrolitik

Kelompok bakteri hidrolitik akan memecah bahan organik menjadi senyawa yang lebih kecil. Bahan organik kompleks umumnya adalah polimer, hasil pecahannya adalah monomer-monomer. Hasil pemecahan bahan organik kompleks tersebut antara lain glukosa, asam amino, dan asam lemak. Proses

hidrolisis ini terjadi karena senyawa kompleks organik tidak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh bakteri di dalam proses metabolismenya karena membran sel bakteri hanya dapat dilewati oleh senyawa organik sederhana seperti glukosa, asam amino, dan asam lemak volatil (Indarto, 2010).

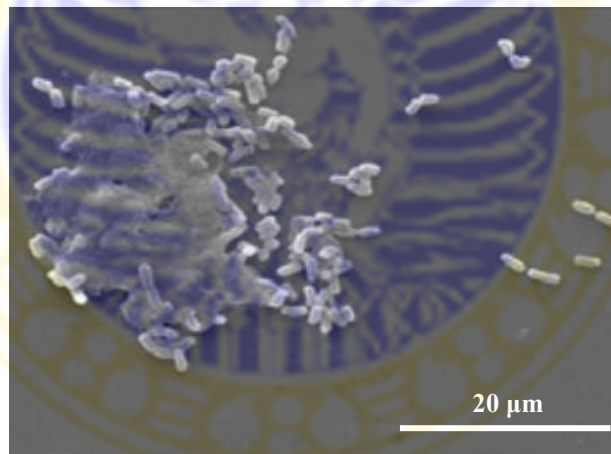
Kemampuan bakteri hidrolitik dalam menghidrolisis substrat bahan organik yang kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana, sangat menentukan keberlangsungan proses selanjutnya. Senyawa hasil hidrolisis yang berupa monomer akan dimanfaatkan oleh bakteri lain pada tahap asidogenik, asetogenik, dan metanogen untuk membentuk gas metana. Penambahan bakteri hidrolitik yang paling baik untuk produksi biogas adalah 10 % (Darisa, 2014).

Enzim yang dimiliki oleh bakteri hidrolitik diantaranya adalah amilase, protease, lipase, gelatinase, selulase (Cappuccino dan Sherman, 2005). Bakteri yang juga berperan dalam tahap hidrolisis ini adalah sekelompok bakteri anaerobik, seperti *Bacteroides* sp. dan *Clostridium* sp. maupun anaerobik fakultatif, seperti *Streptococcus* sp. (Yadvika *et al.*, 2004). Genus bakteri yang termasuk bakteri amilolitik yang cukup dikenal luas ialah *Bacillus*, *Clostridium*, *Bacteriodes*, *Lactobacillus* dan *Micrococcus* (Pelczar dan Chan, 1988). Genus bakteri selulolitik yang berperan dalam hidrolisis selulosa antara lain *Bacillus*, *Bacteriodes*, *Cellafalcicula*, *Cellulomonas*, *Cellvibrio*, *Clostridium*, *Chromobacterium*, *Corynebacterium*, *Cythopaga*, *Polyangum* dan *Pseudomonas* (Rao, 2007). Bakteri proteolitik antara lain *Bacillus*, *Pseudomonas* dan *Proteus* (Schlegel, 1994). Sedangkan bakteri lipolitik contohnya adalah *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus subtilis* (Chumaidi, 2009).

2.4.1 *Bacillus subtilis*

Klasifikasi *Bacillus subtilis* menurut Holt *et al.* (2005) adalah sebagai berikut.

Kingdom : Bacteria
Phylum : Firmicutes
Class : Schizomycetes
Order : Bacillales
Family : Bacillaceae
Genus : *Bacillus*
Species : *Bacillus subtilis*



Gambar 2.4 *Bacillus subtilis* (Mangaiyarkarasi, 2011)

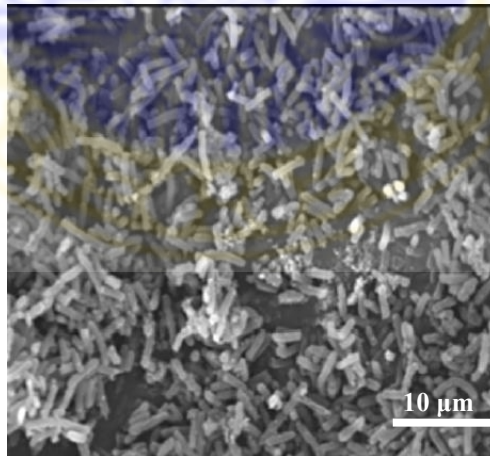
Bakteri *Bacillus subtilis* memiliki karakter koloni yaitu besar, elevasi datar dan tidak mengkilat (Forbes *et al.*, 2002). Bakteri *Bacillus* merupakan kelompok bakteri Gram positif, motilitas positif, sifat katalase positif dan dapat membentuk endospora (Holt *et al.*, 2005). Bakteri ini bersifat aerobik sejati atau anaerobik fakultatif. Metabolismenya dengan respirasi sejati, fermentasi sejati atau keduanya

(Pelzcar dan Chan, 1998). Menurut Sutiamiharjo dan Nurhalijah (2008), karakteristik *Bacillus* ini adalah selulolitik, proteolitik, lipolitik dan amilolitik.

2.4.2 *Bacillus licheniformis*

Klasifikasi *Bacillus licheniformis* menurut Holt *et al.* (2005) adalah sebagai berikut.

Kingdom : Bacteria
Phylum : Firmicutes
Class : Schizomycetes
Order : Bacillales
Family : Bacillaceae
Genus : *Bacillus*
Species : *Bacillus licheniformis*



Gambar 2.5 *Bacillus licheniformis* (Swaathy *et al.*, 2014)

Bakteri *Bacillus licheniformis* memiliki karakter koloni yaitu besar, elevasi konveks, tepian rata dan lembap, sedangkan karakter lainnya yaitu bersifat non hemolitik (Forbes *et al.*, 2002). Bakteri *Bacillus* merupakan kelompok bakteri

Gram positif, motilitas positif, sifat katalase positif dan dapat membentuk endospora. Bakteri ini bersifat aerobik sejati atau anaerobik fakultatif (Pelczar dan Chan, 1998). Bakteri ini juga mempunyai aktivitas selulolitik, proteolitik, lipolitik dan amilolitik.

2.4.3 *Pseudomonas* sp.

Menurut Holt *et al.* (2005) bahwa klasifikasi *Pseudomonas* sp. adalah sebagai berikut.

Kingdom : Bacteria
Phylum : Proteobacteria
Class : Zymobacteria
Order : Pseudomonales
Family : Pseudomonadaceae
Genus : *Pseudomonas*
Species : *Pseudomonas* sp.



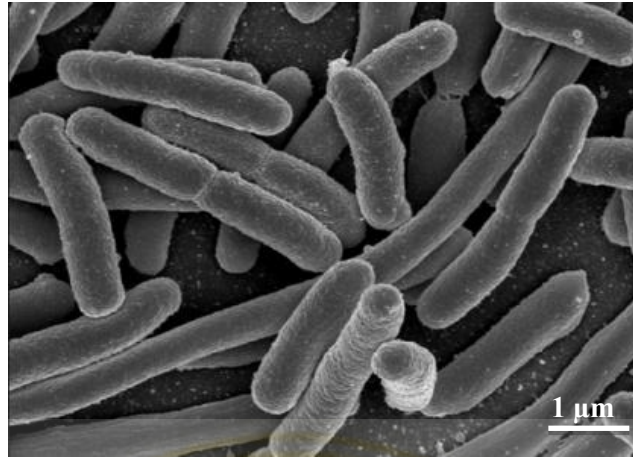
Gambar 2.6 *Pseudomonas* sp. (Pelczar *et al.*, 2012)

Bakteri genus *Pseudomonas* merupakan bakteri Gram negatif, berbentuk batang lurus atau melengkung, namun tidak berbentuk heliks, motil dengan satu atau beberapa flagela dan bersifat aerob. Bakteri ini berukuran 0,5 - 1,0 x 1,5 - 4,0 μm (Holt *et al.*, 2005). Genus *Pseudomonas* termasuk golongan bakteri mesofil, bakteri tersebut dapat tumbuh pada kisaran suhu 25 - 30° C dengan suhu optimum 40° C. *Pseudomonas* sp. merupakan bakteri yang dapat menghidrolisis selulosa (Rao dan Bapat, 2006). Bakteri ini juga memiliki aktivitas proteolitik (Schlegel, 1994).

2.4.4 *Lactobacillus plantarum*

Klasifikasi *Lactobacillus plantarum* menurut Holt *et al.* (2005) adalah sebagai berikut.

<i>Kingdom</i>	: Bacteria
<i>Phylum</i>	: Firmicutes
<i>Class</i>	: Bacilli
<i>Order</i>	: Lactobacillales
<i>Family</i>	: Lactobacillaceae
<i>Genus</i>	: <i>Lactobacillus</i>
<i>Species</i>	: <i>Lactobacillus plantarum</i>



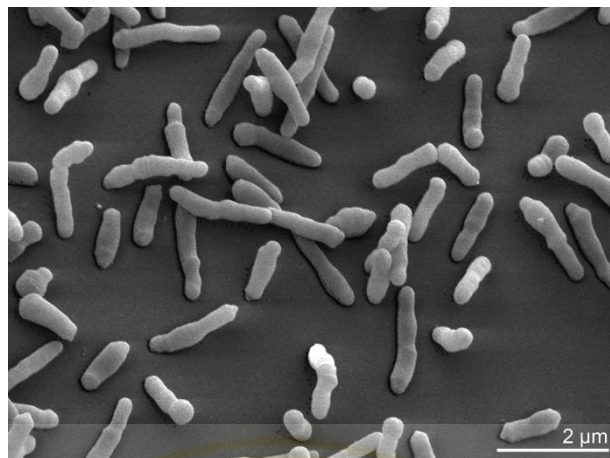
Gambar 2.7 *Lactobacillus plantarum* (Ji, 2013)

Lactobacillus plantarum adalah genus bakteri Gram positif, anaerobik fakultatif. Bakteri ini merupakan sel non motil berbentuk batang dengan ujung bulat, lurus, berukuran 0,9 - 1,2 x 3 - 8 μm . Menurut Pelczar dan Chan (1998), genus *Lactobacillus* adalah bakteri amilolitik. Bakteri ini tidak membentuk spora, metabolismenya fermentatif. Suhu optimum untuk genus ini biasanya 30 - 40° C.

2.4.5 *Cellulomonas* sp.

Klasifikasi *Cellulomonas* sp. berdasarkan Holt *et al.* (2005) adalah sebagai berikut.

<i>Kingdom</i>	: Bacteria
<i>Phylum</i>	: Firmicutes
<i>Class</i>	: Actinobacteria
<i>Order</i>	: Actinomycetales
<i>Family</i>	: Cellulomonadaceae
<i>Genus</i>	: <i>Cellulomonas</i>
<i>Species</i>	: <i>Cellulomonas</i> sp.



Gambar 2.8 *Cellulomonas* sp. (Abt *et al.*, 2010)

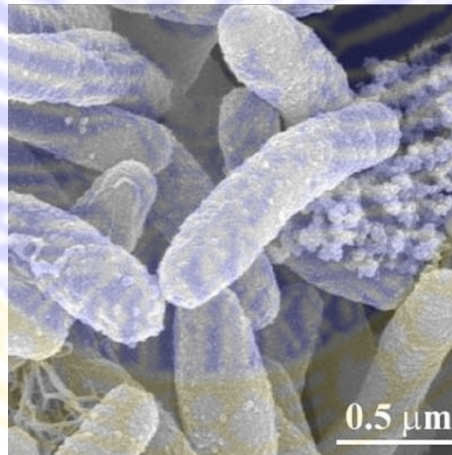
Bakteri *Cellulomonas* sp. ini merupakan bakteri Gram positif, biasanya motil dengan sedikit flagela, tidak berspora, selulolitik, katalase positif, dapat mereduksi nitrat menjadi nitrit. Pada kultur muda bakteri ini berukuran 0,5 - 0,6 x 2,0 - 5,0 μm , berbentuk lurus atau bengkokan ramping, terkadang bakteri berbentuk batang ini berpasangan di sudutnya sehingga membentuk V. Pada kultur tua, biasanya berbentuk batang pendek dan sedikit yang berbentuk kokus. Suhu optimal pertumbuhannya adalah 30° C (Holt *et al.*, 2005).

Bakteri *Cellulomonas* sp. merupakan bakteri selulolitik yang berdistribusi secara luas di dalam tanah yang mampu mensekresikan enzim selulase, yakni suatu enzim ekstraseluler, yang menghasilkan selulobiosa pada hidrolisis selulosa (Pelczar dan Chan, 2010). Menurut Wahyudi (2010), enzim selulase dari bakteri *Cellulomonas* akan mempercepat berlangsungnya proses pembusukan bahan organik.

2.4.6 *Cellvibrio* sp.

Klasifikasi *Cellvibrio* sp. berdasarkan Holt *et al.* (2005) adalah sebagai berikut.

Kingdom : Bacteria
Phylum : Proteobacteria
Class : Zymobacteria
Order : Pseudomonales
Family : Pseudomonadaceae
Genus : *Cellvibrio*
Species : *Cellvibrio* sp.



Gambar 2.9 *Cellvibrio* sp. (Rhee *et al.*, 2010)

Bakteri genus *Cellvibrio* merupakan bakteri Gram negatif, berbentuk batang agak melengkung dengan bagian akhir bulat, berukuran 0,2 - 0,5 x 1,0 - 1,3 μm , motil. Bakteri ini bersifat aerob, katalase positif, dapat mengoksidasi glukosa dan dapat menghidrolisis selulosa (Holt *et al.*, 2005).

2.4.7 *Cytophaga* sp.

Klasifikasi *Cytophaga* sp. menurut Holt *et al.* (2005) adalah sebagai berikut.

Kingdom : Bacteria
Phylum : Bacteroides
Class : Sphingobacteria
Order : Sphingobacteriales
Family : Flexibacteraceae
Genus : *Cytophaga*
Species : *Cytophaga* sp.



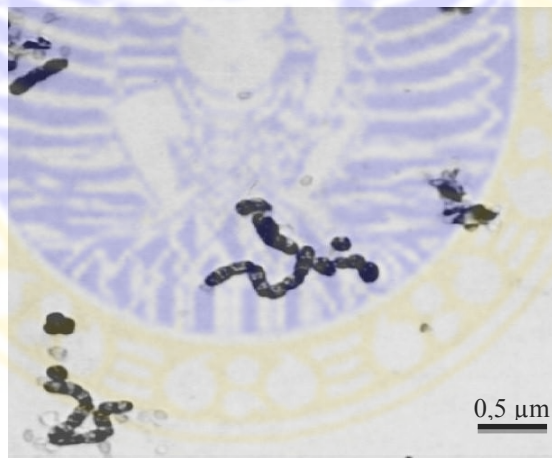
Gambar 2.10 *Cytophaga* sp. (Madigan *et al.*, 2000)

Bakteri *Cytophaga* sp. berbentuk batang yang sangat pendek hingga sedang yakni antara 0,3 - 0,8 x 1,5 - 15 μm dan merupakan bakteri Gram negatif. Jenis bakteri ini ada yang aerob atau anaerob fakultatif (Holt *et al.*, 2005). Genus *Cytophaga* terkenal karena kemampuannya dalam memecahkan selulosa secara aerob. Beberapa jenis bersifat anaerob fakultatif dan meragikan glukosa membentuk asam-asam organik (Pelzcar dan Chan, 1998).

2.4.8 *Acetobacter aceti*

Klasifikasi *Acetobacter aceti* menurut Adams dan Moss (1995) adalah sebagai berikut.

- Kingdom* : Bacteria
Phylum : Proteobacteria
Class : Alphaproteobacteria
Order : Rhodospirilia
Family : Pseudomonadaceae
Genus : *Acetobacter*
Species : *Acetobacter aceti*



Gambar 2.11 *Acetobacter aceti* (Zahoor *et al.*, 2006)

Menurut Pelczar dan Chan (1988), bakteri *Acetobacter* berbentuk bulat panjang sampai batang, lurus atau agak bengkok dengan ukuran 0,6 - 0,8 x 1,0 - 3,0 μm . Bakteri ini tidak memiliki endospora, Gram negatif, bersifat aerobik sejati, dapat mengoksidasi etanol menjadi asam asetat, asetat dan asam laktat dioksidasi menjadi CO_2 dan H_2 . Suhu optimum bakteri ini adalah 25 - 30° C.

2.5 Bakteri Metanogen

Menurut Holt *et al.* (2005), bakteri metanogen berbeda dari semua bakteri lain dan biasanya ditemukan di tempat ekstrem. Bakteri metanogen merupakan kelompok khusus yang berbeda dari bakteri lainnya tidak hanya dalam jenis metabolismenya tetapi juga oleh beberapa ciri yang menyangkut komponen selnya. Bakteri ini adalah bakteri anaerob obligat, adanya oksigen dapat mematikan bakteri ini. Hampir semua bentuk bakteri dijumpai pada bakteri metanogen. Contohnya antara lain *Methanococcus vannielli* yang berbentuk kokus, *Methanobacterium formicicum* yang berbentuk batang, *Methanobrevibacter ruminantium* dan *M. Arboriphilicus* yang berbentuk batang pendek, *Methanospirillum hungatei* berbentuk spiral, *Methanotrrix soehngenii* berbentuk filamen dan *Methanoplanus limocila* dengan bentuk seperti piringan tipis. Metana terbentuk pada penguraian anaerob dari bahan organik. Awalnya bahan-bahan organik diragikan dahulu melalui beberapa tahap antara, menjadi asetat, CO₂, dan molekul hidrogen. Produk-produk ini yang akan digunakan oleh bakteri-bakteri metanogen (Schlegel, 1994). Karena bahan sel dapat dibentuk dari CO₂ sebagai satu-satunya sumber karbon, maka cara hidupnya dapat dipandang kemoautotrof.

Beberapa bakteri metanogen telah diklasifikasi secara taksonomi dan diketahui substratnya (donor-H) untuk menghasilkan metana. Bakteri-bakteri dan substratnya (donor-H) tersebut disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Bakteri metanogen dan substrat (donor-H) (Schlegel, 1994)

Jenis	Substrat (donor-H)
<i>Methanobacterium thermoautotrophicum</i>	H ₂
<i>Methanobacterium aboriphilicum</i>	H ₂
<i>Methanobacterium formicicum</i>	H ₂ atau format
<i>Methanobacterium ruminantium</i>	H ₂ atau format
<i>Methanobacterium mobile</i>	H ₂ atau format
<i>Methanococcus vanniellii</i>	H ₂ atau format
<i>Methanosarcina barkeri</i>	H ₂ , metanol, asetat, mono-, di-, trimetilamina
<i>Methanosarcina mazei</i>	H ₂ , metanol atau asetat
<i>Methanospirillum hungatii</i>	H ₂ atau format
<i>Methanotherix soehngeni</i>	Asetat

