

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Limbah Industri Minyak Kelapa sawit (*Palm Oil Mill Effluent*)

Palm Oil Mill Effluent (POME) merupakan limbah terbesar yang dihasilkan dari proses produksi minyak kelapa sawit (Apriani, 2004). Rata-rata pabrik minyak kelapa sawit mengolah setiap ton tandan buah segar (TBS) menjadi 200-250 kg minyak mentah, 230-250 kg tandan kosong kelapa sawit (TKKS), 130-150 kg serat, 60-65 kg cangkang, 55-60 kg kernel, dan air limbah 0,7 m³ (Yuliasari dkk., 2001). Air limbah industri minyak kelapa sawit yang terdiri dari *sludge*, air kondensat, air cucian pabrik, air *hydroclone*, dan sebagainya yang berasal dari stasiun perebusan/sterilisasi dan klarifikasi yang dialirkan ke *fat pit/sludge recovery tank* untuk pengutipan minyak (Kardila, 2011).

POME memiliki konsentrasi yang tinggi dan berwarna coklat pekat serta sering menimbulkan polusi. Berikut karakteristik POME.

Tabel 1. Karakteristik *Palm Oil Mill Effluent* yang Masuk ke Kolam Pengendalian Limbah

No.	Parameter	Satuan	Kisaran
1.	BOD	mg/l (ppm)	20.000 – 30.000
2.	COD	mg/l (ppm)	40.000 – 60.000
3.	<i>Suspended solid</i>	mg/l (ppm)	15.000 – 40.000
4.	<i>Total solid</i>	mg/l (ppm)	30.000 – 70.000
5.	Minyak dan lemak	mg/l (ppm)	5.000 – 7.000
6.	N – NH ₃	mg/l (ppm)	30 – 40
7.	Total N	mg/l (ppm)	500 – 800
8.	pH	-	4 – 5
9.	Suhu	°C	90 – 140

(Sumber : RISPA, 1990 dalam Manurung, 2004)

Tabel 1. menunjukkan bahwa air limbah industri minyak kelapa sawit mengandung bahan organik yang sangat tinggi yaitu BOD 20.000 – 30.000 mg/l dan COD 40.000 – 60.000 mg/l, sehingga kadar bahan pencemaran akan semakin tinggi. Oleh sebab itu, untuk menurunkan kandungan kadar bahan pencemaran diperlukan degradasi bahan organik. Secara umum dampak yang

ditimbulkan oleh air limbah industri kelapa sawit adalah tercemarnya badan air penerima yang umumnya sungai karena hampir setiap industri minyak kelapa sawit berlokasi didekat sungai. Air limbah industri kelapa sawit bila dibiarkan tanpa diolah lebih lanjut akan terbentuk ammonia, hal ini disebabkan oleh bahan organik yang terkandung dalam limbah cair tersebut terurai dan membentuk ammonia. Terbentuk ammonia ini akan mempengaruhi kehidupan biota air dan dapat menimbulkan bau busuk (Adrianto, 2011).

Air limbah dari pabrik minyak kelapa sawit ini bersuhu tinggi, yaitu 90 – 140 °C, berwarna kecoklatan, mengandung padatan terlarut dan tersuspensi berupa koloid serta residu minyak dengan *biological oxygen demand* (BOD) dan *chemical oxygen demand* (COD) yang tinggi. Apabila air limbah ini langsung dibuang ke perairan dapat mencemari lingkungan, karena akan mengendap, terurai secara perlahan, mengkonsumsi oksigen terlarut, menimbulkan kekeruhan, mengeluarkan bau yang tajam dan dapat merusak ekosistem perairan. Sebelum air limbah ini dapat dibuang ke lingkungan terlebih dahulu harus diolah agar sesuai dengan baku mutu limbah yang telah ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah yang berlaku (Kep. MENLH NO. Kep-51/MENLH/10/1995 tanggal 23 Oktober 1995) yang disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Baku Mutu Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit

No.	Parameter	Kadar Maksimum (mg/l)	Badan Pencemaran Maksimum kg/ton
1	B O D	250	1,5
2	C O D	500	3,0
3	T S S	300	1,8
4	Minyak dan lemak	30	0,18
5	Amoniak Total (NH ₃)	20	0,12
6	pH	6,0 – 9,0	
7	Debit limbah maksimum	2,5 m ³ /ton produk minyak (CPO)	

Sumber: Kep. MENLH NO. Kep-51/MENLH/10/1995

Air limbah industri minyak kelapa sawit dapat menyebabkan pemanasan global jika tidak dikelola dengan baik, karena melepaskan gas metan (CH₄) dan CO₂. Hal ini karena air limbah tersebut merupakan nutrisi yang kaya akan senyawa organik dan karbon, dekomposisi dari senyawa-senyawa organik oleh

bakteri anaerob dapat menghasilkan biogas. Gas metan merupakan penyumbang gas rumah kaca terbesar dan 21 kali lebih berbahaya dari CO₂ (Sumirat dan Solehudin, 2009).

2.1.1. Sistem Pengolahan Limbah Cair

Proses pengolahan limbah cair secara umum dapat dilakukan dalam beberapa metode atau sistem antara lain :

1. Sistem Aplikasi Lahan (*Land Application*)

Sistem ini hanya menggunakan kolam limbah cair untuk proses pengolahannya, selanjutnya hasil akhir dimanfaatkan ke areal tanaman yang dapat dijadikan sebagai system pemupukan kedalam lahan-lahan tanaman yang telah dibuat sedemikian rupa dalam bentuk sistem distribusinya limbah cair. Pada prinsipnya konsep pembuangan limbah cair yang dapat berfungsi sebagai pupuk sehingga dapat menghemat dalam pemupukan terhadap tanaman kelapa sawit dari aspek ekonomis metode ini sangat menguntungkan tetapi tetap harus memperhatikan aspek kesehatan lingkungan dengan berpegang pada baku mutu sebelum dialirkan ke parit-parit didalam kebun, tidak dibenarkan pembuangan atau mengalirkan tanpa memperhatikan ketentuan yang berlaku dalam pengelolaan limbah cair dari hasil produksi kelapa sawit. Pemanfaatan metode ini meliputi pengawasan terhadap pemakaian limbah di areal, agar diperoleh keuntungan dari segi agronomis dan tidak menimbulkan dampak yang merugikan (Dirjen PHP, 2006). Pemilihan teknik aplikasi yang sesuai untuk tanaman kelapa sawit sangat tergantung kepada kondisi maupun faktor berikut :

- a Jenis dan volume limbah cair, topografi lahan yang akan dialiri
- b Jenis tanah dan kedalaman permukaan air tanah, umur tanaman kelapa sawit
- c Luas lahan yang tersedia dan jaraknya dari pabrik, dekat tidaknya dengan air sungai atau pemukiman penduduk.

2. Sistem kolam (*Ponding System*)

Pengolahan limbah cair dengan menggunakan sistem kolam ini merupakan sistem yang lazimnya digunakan oleh sejumlah pabrik kelapa sawit di Indonesia. Penggunaan sistem ini bertujuan untuk menanggulangi masalah limbah cair pada unit pengolahan limbah cair, pengolahan limbah cair buangan pabrik kelapa sawit yang menggunakan sistem kolam (*ponding system*) secara umum membutuhkan lahan yang cukup luas untuk proses tahapan sehingga dapat menghasilkan limbah cair akhir yang sesuai dengan nilai baku mutu air limbah yang direkomendasikan. Berikut merupakan diagram alir kolam pengolahan limbah cair kelapa sawit pada industri PT Perkebunan Mitra Ogan. Kolam Pengolahan Limbah pada PT Perkebunan Mitra Ogan dapat dilihat pada gambar 1.

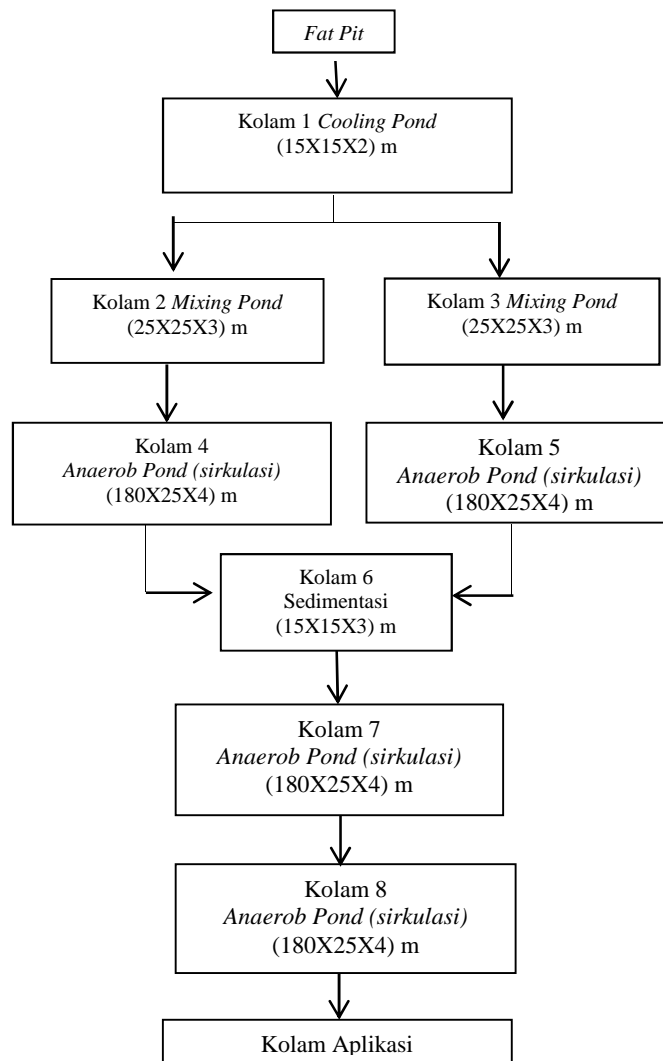
Adapun fungsi dari setiap kolam pengolahan limbah pada pabrik kelapa sawit, yaitu:

A. *Fat fit* (Kolam Pengumpulan Losis Minyak)

Pada kolam ini masih terdapat minyak dan terikut pada limbah cair hasil proses klarifikasi dapat diambil kembali. Kolam *fat pit* digunakan untuk menampung cairan – cairan yang masih mengandung minyak yang berasal dari air kondensat dan stasiun klarifikasi. Pada *fat pit* ini terjadi pemanasan dengan menggunakan steam dengan suhu 60-80 °C. Pemanasan ini diperlukan untuk memudahkan pemisahan minyak dengan *sludge*, sebab pada *fat pit* ini masih dimungkinkan untuk melakukan pengutipan minyak dengan menggunakan *skimmer*. Limbah dari *fat pit* ini kemudian dialirkan ke kolam *cooling pond* yang berguna untuk mendinginkan limbah yang telah dipanaskan (Wibisono, 2013).

B. *Sludge Recovery Ponds* (Kolam Pengendapan Lumpur)

Lumpur yang berasal dari pabrik kelapa sawit yaitu serat halus dari tandan buah segar ikut serta dalam limbah cair, maka perlu dilakukan pengendapan



Gambar 1. Kolam Pengolahan Limbah pada PT Perkebunan Mitra Ogan

C. Cooling Tower

Menara ini diperlukan untuk mendinginkan limbah cair buangan agar proses selanjutnya lebih mudah dilakukan, dan jika masih ada sisa minyak didalamnya, dapat diambil kembali pada kolam pendingin dan juga untuk proses pada kolam anaerob limbah cair yang masih panas.

D. Cooling Pond (Kolam Pendingin)

Limbah cair yang telah dikutip minyaknya pada *oil trap* (*fatpit*) mempunyai karakteristik pH 4 – 4,5 dengan suhu 60 – 80 °C sebelum limbah dialirkan ke

kolam pengasaman (*acidifaction pond*) suhunya diturunkan menjadi 40 – 45 °C agar bakteri *mesophilik* dapat berkembang dengan baik. Kolam ini merupakan lanjut proses pendinginan dari menara pendingin, proses ini dilakukan agar menghasilkan suhu yang sesuai untuk proses anaerobik dengan memanfaatkan bakteri

E. *Mixing Pond* (Kolam Pencampur)

Air limbah pada kolam ini mengalami asidifikasi, sehingga air limbah yang mengandung bahan organik lebih mudah mengalami biodegradasi dalam suasana anaerobik. Pada kolam ini, limbah akan dirombak menjadi *volatile fatty acid* (VFA). Setelah hidrolisis sempurna, pH air limbah dinetralkan dan kemudian diteruskan pada proses selanjutnya

F. *Primary anaerobic* (Kolam Anaerobik Awal)

Pada kolam ini limbah cair buangan pabrik kelapa sawit yang mengandung senyawa organik kompleks seperti lemak, karbohidrat dan protein akan dirombak oleh bakteri anaerobik menjadi asam organik dan selanjutnya menjadi gas metana karbohidrat dan air.

G. *Secondary anaerobic pond* (Kolam Penyempurnaan Anaerobik)

Pada kolam ini proses anaerobik yang belum sempurna dari kolam anaerobik primer dilakukan penyempurnaan. bakteri anaerobik yang aktif akan membentuk asam organik dan CO₂. Selanjutnya bakteri metana (*Methanogenic Bacteria*) akan merubah asam organik menjadi methane dan CO₂. BOD limbah pada kolam anaerobik primer masih cukup tinggi, maka limbah harus diproses lebih lanjut pada kolam anaerobik sekunder, dimana kolam ini dapat dikatakan beroperasi dengan baik apabila nilai parameter utamanya berada pada tetapan sebagai berikut:

pH	6 - 8
<i>Volatile fatty acid</i> (VFA)	< 300 mg/l
Alkalinitas	< 2000 mg/l

BOD limbah setelah keluar dari kolam anaerobik sekunder maksimal ialah 3000 mg/l dengan pH minimal 6,0.

H. *Facultative Pond* (Kolam Peralihan)

Kolam ini merupakan kolam peralihan dari kolam anaerobic ke kolam aerobik. Pada kolam ini proses anaerobik masih tetap berlanjut, yaitu menyelesaikan proses yang belum terselesaikan pada *an aerobic*. Proses peralihan ini dilakukan di dalam kolam sedimentasi.

Kolam ini adalah kolam peralihan dari kolam anaerobik menjadi aerobik atau dapat disebut proses penon-aktifan bakteri *anaerob* dan pra kondisi dari proses *aerobic*. Karakteristik limbah pada kolam fakultatif yaitu pH 7,6 – 7,8. *Biological Oxygen Demand* (BOD) 600-800 ppm, *Chemical Oxygen Demand* (COD) 1250-1750 ppm. Aktivitas ini dapat diketahui dengan indikasi pada permukaan kolam yang tidak dijumpai scum dan cairan tampak kehijau-hijauan.

I. *Aerobic Pond* (Kolam Aerobik)

Pada kolam ini cairan limbah cair sudah dibuang ke badan air, tetapi sebelumnya di stabilisasi baik sifat fisik maupun sifat kimianya. Proses yang terjadi pada kolam aerobik adalah proses *aerobic*. Pada kolam ini, telah tumbuh ganggang dan mikroba heterotrof yang berbentuk *flocs*. Hal ini merupakan proses penyediaan oksigen yang dibutuhkan oleh mikroba dalam kolam. Kolam ini juga dapat digunakan sebagai kolam penangkaran ikan.

2.2 Kotoran Sapi

Kotoran ternak merupakan bahan baku yang potensial dalam proses produksi biogas karena mengandung pati dan lignoselulosa. Biasanya, kotoran ternak dimanfaatkan sebagai pupuk dan sisanya digunakan untuk memproduksi gas metana menggunakan proses anaerob. Salah satu ternak yang kotorannya biasa dimanfaatkan sebagai pupuk dan bahan baku biogas adalah sapi (Agustine, 2014).

Kotoran sapi adalah biomassa yang mengandung karbohidrat, protein, dan lemak. Biomassa yang mengandung karbohidrat tinggi akan menghasilkan gas metana yang rendah dan CO₂ yang tinggi, jika dibandingkan dengan

biomassa yang mengandung protein dan lemak dalam jumlah yang tinggi. Secara teori, produksi metana yang dihasilkan dari karbohidrat, protein, dan lemak secara berturut-turut adalah 0,37 , 1,0 dan 0,58 m³ CH₄/kg bahan kering organik. Kotoran sapi mengandung ketiga unsur bahan organik tersebut sehingga dinilai lebih efektif untuk dikonversi menjadi gas metana.

Kegiatan peternakan sapi dapat memberikan dampak positif terhadap pembangunan, yaitu berupa peningkatan pendapatan peternak, perluasan kesempatan kerja, peningkatan ketersediaan pangan dan lainnya. Namun, tanpa dilakukan pengolahan limbah yang tepat, kegiatan ini menimbulkan permasalahan lingkungan antara lain kotoran sapi. Oleh karena itu, perlunya teknologi pemanfaatan kotoran sapi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi dengan sistem biogas. Biogas merupakan campuran dari berbagai macam gas, antara lain ± 60 % gas CH₄ (metana), ± 35 % gas CO₂ (karbon dioksida) serta ± 5 % campuran gas N₂, O₂, H₂ dan H₂S. Campuran gas ini mudah terbakar apabila kandungan CH₄ (metana) melebihi 50 %, itulah sebabnya mengapa biogas dianggap sebagai bahan bakar alternatif.

Sumber energi biogas yang utama yaitu dapat diperoleh dari air buangan rumah tangga, sampah organik dari pasar, serta terdapat pada kotoran ternak sapi, kerbau, kuda dan lainnya bahkan dari kotoran manusia dan campurannya. Dengan mengolah limbah dari kotoran hewan ternak untuk menghasilkan biogas, maka diperoleh sejumlah limbah sisa kotoran ternak yang telah hilang gasnya (*slurry*), dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik yang sangat kaya nutrisi yang dibutuhkan oleh tanaman. Berikut ini adalah Tabel 3 yang menjelaskan komposisi biogas yang berasal dari kotoran sapi dan campuran kotoran sisa pertanian

Tabel 3. Komposisi Biogas Kotoran Sapi dan Campuran Kotoran Sisa Pertanian

No	Jenis Gas Biogas	Kotoran Sapi (%)	Kotoran Sapi + Sisa Pertanian (%)
1	Metana (CH ₄)	65.7	54 – 70
2	Karbon Dioksida (CO ₂)	27.0	45 – 57
3	Nitrogen (N ₂)	2.3	0.5 – 3.0
4	Karbon Monoksida	0	0.1

	(CO)		
5	Oksigen (O ₂)	0.1	6.0
6	Propena (C ₃ H ₈)	0.7	-
7	Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	-	sedikit

Sumber : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2011)

Biogas yang berasal dari kotoran sapi sebagian besar banyak mengandung gas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), dan beberapa kandungan yang jumlahnya kecil diantaranya hydrogen sulfida (H₂S) dan ammonia (NH₃) serta hydrogen dan (H₂), nitrogen yang kandungannya sangat kecil.

2.3 Biogas

Biogas adalah energi bersih dan terbarukan yang dapat dijadikan alternatif dari sumber energi konvensional yang dapat menyebabkan masalah bagi lingkungan dan meningkatkan laju penipisan energi dalam waktu yang lama. Biogas adalah gas yang mudah terbakar yang dihasilkan dari proses anaerobik pada temperatur rendah dan tanpa oksigen (Agustine, 2011).

Biogas merupakan produk akhir dari degradasi anaerobik bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerobik dalam lingkungan dengan sedikit oksigen. Komponen terbesar yang terkandung dalam biogas adalah metana 55 – 70 % dan karbon dioksida 30 – 45 % serta sejumlah kecil, nitrogen dan hidrogen sulfida (Deublein dan Steinhauster, 2008). Tapi metana (CH₄) yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Apabila kandungan metan dalam biogas lebih dari 50% maka biogas tersebut telah layak digunakan sebagai bahan bakar. Seperti menurut Smirat dan Solehudin (2009), Biogas dapat terbakar apabila terdapat kadar metana minimal 57%. Sedangkan menurut Deublein dan Steinhauster (2008) biogas dapat terbakar jika kandungan metana minimal 60%. Biogas dengan kandungan metana 65-70% memiliki nilai kalor sama dengan 5200-5900 Kkal/m³ energi panas yang setara 1,25 KWJ listrik. Sedangkan untuk gas metana murni (100%) mempunyai nilai kalor 8900 Kkal/m³ Namun, secara umum komposisi biogas adalah sebagai berikut. Berikut ini adalah Tabel 4 yang menjelaskan komposisi biogas secara umum. Komposisi yang paling banyak

yaitu gas metana sebanyak 55 – 70%

Tabel 4 Komposisi Biogas Secara Umum

No	Komposisi biogas	Jumlah
1	Metana	55-70%
2	Karbon dioksida	30-45%
3	Nitrogen	0-0,3%
4	Hidrogen sulfida	1-5%

Sumber : (Deublein dan Steinhauster, 2008)

Komposisi biogas bervariasi tergantung dengan asal proses anaerobik yang terjadi. Komposisi biogas secara umum terdiri dari 55% – 70% metana (CH_4) dan 30% – 45% karbon dioksida (CO_2), dan 0-0,3 % Nitrogen (N_2), 1 - 5 % H_2S . Tabel 5 menunjukkan beberapa komponen dalam biogas yang dapat mempengaruhi sifat biogas tersebut.

Kandungan yang terdapat dalam biogas dapat mempengaruhi sifat dan kualitas biogas sebagai bahan bakar. Kandungan yang terdapat dalam biogas merupakan hasil dari proses metabolisme mikroorganisme. Biogas yang kandungan metana nya lebih dari 45% bersifat mudah terbakar dan merupakan bahan bakar yang cukup baik karena memiliki nilai kalor bakar yang tinggi. Tetapi jika kandungan CO_2 dalam biogas sebesar 25 – 50 % maka dapat mengurangi nilai kalor bakar dari biogas tersebut. Sedangkan kandungan H_2S dalam biogas dapat menyebabkan korosi pada peralatan dan perpipaan dan nitrogen dalam biogas juga dapat mengurangi nilai kalor bakar biogas tersebut. Selain itu juga terdapat uap air yang juga dapat menyebabkan kerusakan pada pembangkit yang digunakan. (Deublein dan Steinhauster, 2008).

Tabel 5 Komponen Biogas

Komponen	Jumlah	Pengaruh terhadap biogas
CO ₂	25-50% per volume	Menurunkan nilai kalor bakar Meningkatkan metane number Menyebabkan korosi Menyebababn kerusakan pada sel bahan bakar alkali
H ₂ S	0-0,5% per volume	Menyebabkan orosif pada peralatan dan system perpipaan
NH ₃	0-0,05% per volume	Menyebablan emisi SO ₂ bila dibakar Merusak katalis yang digunakan pada reaksi Menyebabkan emisi NO ₂ Setelah pembakaran
Uap Air	1-5% per volume	Dapat merusak sel bahan bakar Menyebabkan korosif pada peralatan Kondesatnya dapat menyebabkan kerusaan pada peralatan pembangkitiy Terdapat resiko pembekuan pada system perpipaan
N ₂	0-0,5% per volume	Menurunkan nilai kalor Meningkatkan sifat anti knocking pada mesin
Siloxane	0-50 mg / m ³	Menyebabkan kerusakan pada mesin

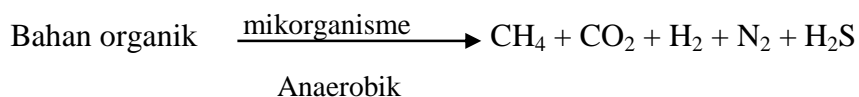
Sumber : (Deublein dan Steinhauster, 2008)

2.4 Proses Fermentasi Anaerobik

Fermentasi bahan organik dapat terjadi dalam keadaan aerobik dan anaerobik. Fermentasi aerobik akan menghasilkan gas-gas amoniak (NH₃) dan karbondioksida (CO₂). Sedangkan fermentasi anaerobik akan menghasilkan biogas (Sahidu, 1983).

Fermentasi anaerobik adalah proses pengolahan senyawa-senyawa organik yang terkandung dalam limbah menjadi gas metana dan karbon dioksida tanpa memerlukan oksigen (Manurung, 2004). Pada kondisi anaerobik, ruangan harus dalam keadaan tertutup dan tidak memerlukan oksigen. Hal ini dikarenakan pada fermentasi anaerobik digunakan bakteri *metanogen* yang pertumbuhannya akan terganggu apabila terdapat oksigen terlarut sebanyak 0,01 mg/l (Stafford dkk, 1980). Bakteri yang dimaksud adalah bakteri anaerobik seperti *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcinae*, dan *Desulfovibrio*.

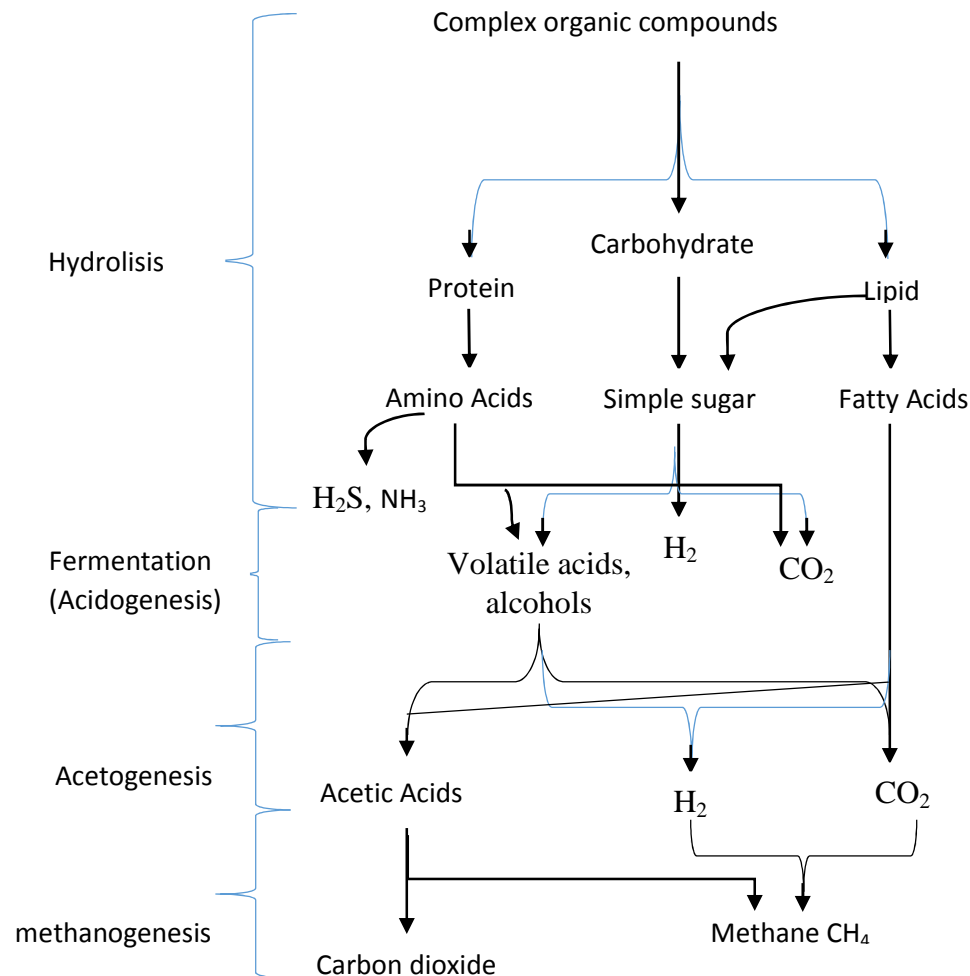
Keseluruhan reaksi yang terjadi sering disederhanakan sebagai berikut :



Reaksi pembentukan gas metana melalui fermentasi anaerobik dilakukan oleh berbagai aktivitas mikroorganisme. Reaksi fermentasi ini memiliki jalur metabolik yang cukup kompleks, terutama pada tahap asidogenesis.

Hasilnya biomassa menjadi dapat larut dalam air dan mempunyai bentuk yang lebih sederhana. Proses *asidogenesis* merupakan proses perombakan monomer dan oligomer menjadi asam asetat, CO₂, dan asam lemak rantai pendek, serta alkohol. Proses *asetogenesis* menghasilkan asam asetat, CO₂, dan H₂. Sementara proses *methanogenesis* merupakan perubahan senyawa-senyawa menjadi gas metana yang dilakukan oleh bakteri methanogenik (Gijzen, 1987). Skema reaksi fermentasi anaerobik disederhanakan pada Gambar 7.

Tahap fermentasi anaerobik dapat digolongkan menjadi empat tahapan reaksi, yaitu tahap hidrolisis, tahap pembentukan asam (*asidogenesis*), tahap pembentukan asetat (*asetogenesis*) dan tahap pembentukan gas metana (*methanogenesis*). Proses hidrolisis berupa proses dekomposisi biomassa kompleks menjadi glukosa sederhana memakai enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme sebagai katalis.



Gambar 2. Skema reaksi fermentasi anaerobik (Drapcho, 2008)

2.4.1 Tahap Hidrolisis

Pada tahap hidrolisis, bahan organik padat maupun yang mudah larut berupa molekul besar dihancurkan menjadi molekul kecil agar molekul-molekul tersebut larut dalam air. Proses yang terjadi merupakan pemecahan enzimatik dari bahan-bahan yang tidak mudah larut seperti lemak, karbohidrat, protein, dan lain-lain menjadi bahan yang mudah larut, seperti asam amino, gula sederhana, asam lemak berantai pendek (Yani dan Darwis, 1990).

Menurut Drapcho (2008), molekul-molekul kompleks tersebut terlalu besar untuk dapat ditransportasikan melewati membran sel bakteri sehingga perlu diuraikan oleh enzim khusus yang dilepaskan oleh bakteri. Pemecahan molekul-molekul kompleks tersebut dilakukan oleh dua tipe enzim, endoenzim disintesis dalam sel bakteri dan mendegradasi molekul bersamaan dalam sel dan eksoenzim yang juga disintesis dalam sel dan dilepaskan ke lingkungan sekitar bakteri. Saat menyentuh molekul kompleks, enzim akan melarutkan partikel dan substrat koloidal, kemudian substrat ini masuk ke dalam sel dan didegradasi oleh endoenzim (Gerardi, 2003).

Polisakarida dihidrolisis menjadi glukosa oleh enzim selulase dan hemiselulase, protein dan lemak dihidrolisis menjadi asam amino dan asam lemak rantai panjang oleh protease dan lipase (Drapcho, 2008).

Bakteri yang berperan dalam tahap hidrolisis ini adalah sekelompok bakteri anaerobik, seperti *Bactericides* dan *Clostridia* maupun anaerobik fakultatif, seperti *Streptococci sp* (Yadvika dkk, 2004).

2.4.2 Tahap Pembentuk Asam (*Asidogenesis*)

Pada tahap *asidogenesis*, terjadi fermentasi hasil hidrolisis oleh bakteri pembentuk asam menjadi senyawa organik sederhana terutama asam lemak volatil (VFA), gas-gas CO₂ dan H₂, beberapa asam laktat dan etanol. Proses ini merupakan sumber energi populasi *non-metanogenik* (Werner dkk, 1989).

Reaksi ini dimulai dengan konversi monomer gula menjadi piruvat (C₃H₄O₃), ATP, dan elektron pembawa molekul NADH melalui jalur metabolik pusat. Selanjutnya, piruvat dan asam amino difermentasi menjadi asam lemak rantai pendek – seperti asetat, propionat, butirat, suksinat – alkohol, CO₂, dan H₂. Proses fermentasi ini akan menghasilkan berbagai asam lemak rantai pendek, sehingga disebut sebagai tahap pembentukan asam (Drapcho, 2008).

Kadar pH yang terlalu rendah akan mempengaruhi pertumbuhan bakteri *metanogen*, karena kondisi fermentasi akan terhenti pada pH dibawah 5 (Yani dan Darwis, 1990). Kondisi pH menjadi faktor yang penting dalam

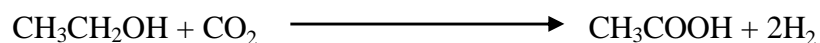
pertumbuhan bakteri anaerobik, sehingga penambahan larutan penyangga diperlukan untuk mengoptimalkan pertumbuhan bakteri metanogen.

Bakteri pembentuk asam mempunyai kemampuan lebih baik untuk bertahan terhadap perubahan lingkungan dibandingkan bakteri penghasil metana. Bakteri yang bekerja dalam tahap *asidogenesis* adalah bakteri asidogenesis seperti *Syntrophoma nas wolfei* (Bryant, 1987).

2.4.3 Tahap Pembentukan Asetat (*Asetogenesis*)

Pada tahap *asetogenesis*, sebagian besar hasil fermentasi asam harus dioksidasi di bawah kondisi anaerobik menjadi asam asetat, CO₂, dan hidrogen yang akan menjadi substrat bakteri *metanogen* (Werner dkk, 1989). Bakteri pembentuk oksidasi ini adalah bakteri *syntrofik* atau bakteri *asetogen* atau mikroba obligat pereduksi proton (Werner dkk. 1989).

Salah satunya adalah asam propionat akan dioksidasi oleh bakteri *Syntrophobacter wolinii* menjadi produk yang digunakan oleh bakteri *metanogen* dalam pembentukan gas metana (Weismann, 1991). Selain itu etanol perlu dioksidasi menjadi asetat dan hidrogen oleh bakteri *asetogen*, agar dapat digunakan sebagai substrat bakteri *metanogen*.

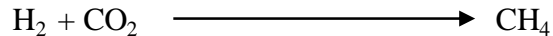


Saat bakteri *asetogen* memproduksi asetat, hidrogen akan ikut terbentuk. Jika terjadi akumulasi pembentukan hidrogen dan tekanan hidrogen, hal ini akan mengganggu aktivitas bakteri *asetogen* dan kehilangan produksi asetat dalam jumlah besar. Oleh karena itu, bakteri *asetogen* mempunyai hubungan simbiosis dengan bakteri pembentuk metana yang menggunakan hidrogen untuk memproduksi metana. Hubungan simbiosis ini akan mempertahankan konsentrasi hidrogen pada tahap ini tetap rendah, sehingga bakteri *asetogen* dapat bertahan (Gerardi, 2003).

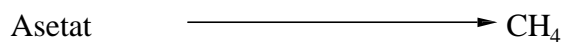
2.4.4 Tahap Pembentukan Gas Metana (*Methanogenesis*)

Tahap ini merupakan akhir dari keseluruhan proses konversi anaerobik dari bahan organik menjadi gas metana dan karbon dioksida. Bakteri yang bekerja pada tahap ini adalah bakteri *metanogen*, misalnya *Methanobacterium omelianski*, *Methanobacterium ruminantium*, *Methanosarcina*, dan *Methanococcus* (Yani dan Darwis, 1990). Pada tahap *metanogenesis*, terjadi fermentasi metana secara dua tipe reaksi. *Hydrogenotrophic methanogenesis*, yaitu CO₂ dan H₂ diubah menjadi metana dan air dan kedua *acetoclastic methanogenesis*, yaitu asetat diubah menjadi metana dan CO₂ (Werner dkk, 1989). Sedangkan menurut Gerardi (2003), terdapat satu tipe reaksi tambahan, yaitu *methyltrophic methanogenesis* yang terjadi pada substrat yang mengandung grup methyl (-CH₃), misalnya methanol (CH₃OH) dan methylamines [(CH₃)₃-N].

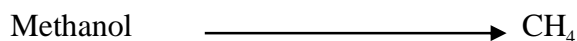
- Produksi metana : *hydrogenotrophic methanogenesis*



- Produksi metana : *acetoclastic methanogenesis*

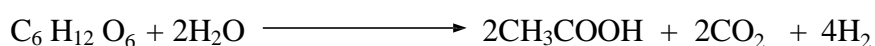


- Produksi metana : *methyltrophic methanogenesis*

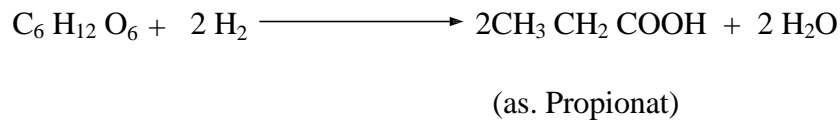
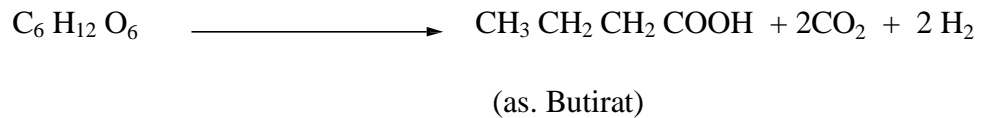


Selain bakteri *metanogen*, terdapat kelompok bakteri *Desulfovibrio* yang memanfaatkan unsur sulfur (S) dan membentuk gas H₂S. Menurut Mosey (1983), yang menggunakan glukosa sebagai sampel untuk menjelaskan bagaimana peranan keempat tahapan serta bakteri tersebut dalam menguraikan senyawa ini menjadi gas metana dan karbon trioksida sebagai berikut :

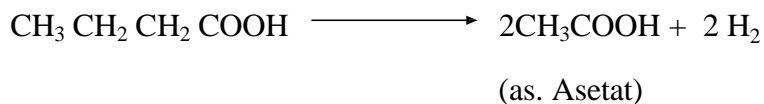
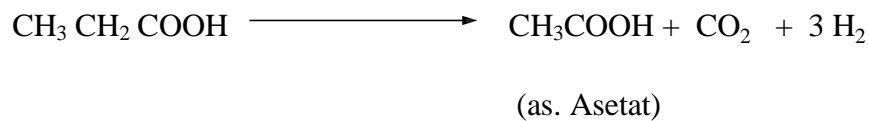
- *Acid forming bacteria* menguraikan senyawa glukosa menjadi :



(as. Asetat)



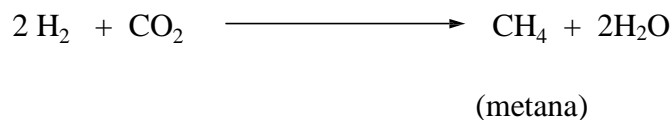
- *Acetogenic bacteria* menguraikan asam propionat dan asam butirat menjadi



- *Acetoclastic methane* menguraikan asam asetat menjadi :



- *Hydrogenotrophic methane* menguraikan hidrogen dan karbon dioksida menjadi:



2.5 Faktor Yang Mempengaruhi Proses Anaerobik

Faktor-faktor yang mempengaruhi produksi biogas antara lain : karakteristik substrat, mikroorganisme, keberadaan oksigen, pH, suhu, pengadukan, keberadaan sulfur.

2.5.1. Karakteristik substrat

Mikroorganisme membutuhkan nutrisi untuk melakukan proses fermentasi anaerobik. Nutrisi terdiri dari unsur makro seperti seperti karbon, nitrogen, fosfor, sulfur, dan lain-lain serta unsur mikro seperti natrium, kalsium, magnesium,

cobalt, zinkum, besi dan lain-lain. Nutrisi berupa sumber karbon dan sumber nitrogen sangat dibutuhkan mikroorganisme untuk tumbuh dan berkembang, khususnya oleh mikroorganisme yang bekerja dalam proses anaerobik. Apabila ketersediaan nitrogen tidak mencukupi, bakteri tidak dapat memproduksi enzim yang dibutuhkan untuk mensintesis senyawa (substrat) yang mengandung karbon. Sebaliknya ketersediaan nitrogen yang terlalu melimpah akan menghambat pertumbuhan bakteri, dalam hal ini terutama bahan yang kandungan amoniaknya sangat tinggi (Yani dan Darwis, 1990).

Imbangan karbon (C) dan nitrogen (N) yang terkandung dalam bahan organik sangat menentukan kehidupan dan aktivitas mikroorganisme. Imbangan C/N yang optimum bagi mikroorganisme perombak adalah 20-25. Feses (feses dan urine) sapi perah mempunyai kandungan C/N sebesar 18. Karena itu, perlu ditambah dengan limbah pertanian lain yang mempunyai imbangan C/N yang tinggi (lebih dari 30) (Simamora *et al.* 2006). Kebutuhan unsur karbon dapat dipenuhi dari karbohidrat, lemak, dan asam-asam organik, sedangkan kebutuhan nitrogen dipenuhi dari protein, amoniak dan nitrat. Perbandingan C/N substrat akan mempengaruhi aktivitas mikroba dalam memproduksi biogas (Fry, 1974).

2.5.2. Mikroorganisme

Bakteri yang berperan dalam pembentukan biogas adalah bakteri pendegradasi, bakteri pembentuk asam, bakteri *asetogen* dan bakteri pembentuk gas metana. Bakteri pendegradasi terdiri atas bakteri selulolitik, bakteri proteolitik, dan lipolitik. Bakteri-bakteri ini akan mengubah protein, selulosa, dan lemak menjadi asam amino, glukosa, dan asam lemak. Bakteri pembentuk asam akan

berperan dalam fermentasi hasil hidrolisis menjadi asam-asam lemak volatil, seperti asam butirat, propionat, laktat, asetat, dan alkohol. Bakteri *asetogen* berperan dalam mengoksidasi hasil fermentasi asam menjadi asam asetat, CO₂, dan hidrogen yang menjadi substrat bakteri metana. Bakteri pembentuk gas metana berperan dalam merombak asam asetat menjadi metan dan CO₂ oleh kelompok

bakteri metanogen asetatotrofik, serta hidrogen dan CO₂ menjadi metana dan air oleh kelompok bakteri *metanogen hidrogenotrofik* (Bitton, 1999).

2.5.3. Keberadaan Oksigen

Sebagian besar bakteri pembentuk asam adalah fakultatif anaerobik, sehingga keberadaan oksigen tidak terlalu mempengaruhi aktivitas mikroba. Namun bakteri pembentuk metana adalah obligatori anaerobik, sehingga keberadaan oksigen sebanyak 0,01 mg/L akan menghambat pertumbuhan bakteri pembentuk metana. Kondisi anaerobik ini dapat dicapai dengan menggunakan reaktor tertutup, dengan keberadaan sejumlah kecil oksigen akan dikonsumsi dengan segera oleh bakteri pembentuk asam (Deublein, 2008)

2.5.4. Derajat keasaman (pH)

Derajat keasaman (pH) adalah ukuran keasaman atau kebasaan dari suatu bahan. Bakteri metanogen sangat sensitif terhadap perubahan pH lingkungan. Nilai pH terbaik dalam memproduksi biogas berkisar antara 7,0. Apabila nilai pH di bawah 6,5, aktivitas bakteri metanogen akan menurun dan pH di bawah 5,0, aktivitas fermentasi akan terhenti (Yani dan Darwis, 1990). Oleh karena itu, untuk mempertahankan pH berkisar antara 6,8-8,5 perlu ditambahkan kapasitas penyangga (*buffer capacity*) seperti ammonium hidroksida, larutan kapur, natrium karbonat, dan lain-lain (Bitton, 1999).

2.5.5. Suhu

Pengklasifikasian bakteri berdasarkan suhu dalam fermentasi anaerobik terbagi menjadi tiga, yaitu *psychrophilic* (10-20°C), *mesophilic* (20-40°C), dan *thermophilic* (40-60°C) (Drapcho, 2008). Menurut Sahidu (1983), suhu optimum pertumbuhan bakteri anaerobik berkisar antara 30-35°C, sedangkan menurut Kadir (1987), suhu yang baik untuk proses fermentasi anaerobik berkisar antara 30°-55°C. Namun, sebagian bakteri mampu untuk memproduksi metana pada tingkat suhu yang sangat rendah (0,6-1,2°C). Pada umumnya suhu terendah

dimana mikroorganisme tumbuh adalah -11°C , dibawah -25°C aktivitas enzim akan terhenti (Deublein, 2008).

Produksi biogas lebih cepat pada suhu *thermophilic* dibandingkan dengan *mesophilic*, tetapi tidak boleh terjadi perubahan suhu secara mendadak. Fluktuasi suhu pada digester harus sekecil mungkin, $<1^{\circ}\text{C}$ per hari untuk *thermophilic* dan $<2-3^{\circ}\text{C}$ per hari untuk *mesophilic*. Fluktuasi suhu akan berpengaruh terhadap aktivitas dari bakteri pembentuk metana (Gerardi, 2003).

2.5.6. Pengadukan

Pengadukan bertujuan untuk mendistribusikan bakteri, substrat, dan nutrient agar menyebar secara merata di dalam digester. Peningkatan produksi metana dipengaruhi oleh pengadukan, karena aktivitas metabolisme dari bakteri pembentuk asetat dan bakteri pembentuk metana membutuhkan jarak yang saling berdekatan. Selain itu, pengadukan dapat mengurangi terjadinya pemisahan sludge dan terbentuknya *scum* (Gerardi, 2003).

2.5.7. Keberadaan Sulfur

Konsentrasi sulfur dapat ditemukan pada suatu limbah dalam jumlah yang besar. Sulfat menjadi suatu masalah, karena H_2S terbentuk sebelum tahap pembentukan metan. H_2S dapat menghambat proses pembentukan metan. Peningkatan H_2S dalam suatu digester dapat diatasi dengan meningkatkan nilai pH, menambah garam besi, dan menggunakan digester dua tahap. Penghilangan komponen sulfur dapat dicapai dengan mudah pada digester tahap satu (Deublin, 2008).

2.6 Potensi Limbah Cair Kelapa Sawit Menjadi Biogas

Inovasi teknologi telah dicoba dikembangkan dan diaplikasikan untuk mengolah POME. Pendekatan proses biologi merupakan metode yang paling banyak digunakan mengingat POME kaya akan kandungan bahan organik yang dapat dengan mudah diuraikan oleh mikroorganisme. Lebih dari 85% industri pengolahan kelapa sawit menggunakan sistem kolam biasa (*ponding system*)

karena biayanya rendah. Akan tetapi, pengolahan limbah cair sistem kolam memiliki kelemahan antara lain membutuhkan areal kolam yang cukup luas, perlu pemeliharaan dan penanganan lumpur dalam kolam, padatan tersuspensi dari lumpur ini tidak/sedikit didegradasi sehingga konsentrasinya akan semakin meningkat dan mengendap di dasar kolam, terjadinya pendangkalan kolam akibat adanya endapan lumpur, terjadinya pengurangan jumlah nutrisi, terjadinya pencemaran sungai, terjadinya polusi udara yang dapat menyebabkan efek rumah kaca akibat terbuangnya gas metan yang dihasilkan dari proses penguraian anaerobik bahan organik. Sementara itu hanya sedikit sekali industri yang dilengkapi dengan sistem pengolahan limbah cair menjadi biogas. Padahal teknik ini memberikan keuntungan antara lain tidak memerlukan lahan yang cukup luas, menghasilkan gas yang berpotensi untuk dijadikan bahan bakar yang dapat digunakan untuk menggerakkan generator di industri setempat, mampu menghasilkan gas hingga 28 m³ per ton limbah yang diolah, dan menghasilkan hasil samping yang baik untuk dimanfaatkan sebagai pupuk (Ditjen PPHP-Deptan, 2006).

Penelitian yang dilakukan oleh Siti Musjadlipa dkk (2014) mengenai pengaruh waktu fermentasi terhadap produksi biogas dengan menggunakan digester dua tahap pada berbagai konsentrasi *palm oil mill effluent* dan lumpur aktif. Pada penelitian ini digunakan variasi bahan baku POME sebesar 90, 80, dan 70% dan lumpur aktif sebesar 10, 20, dan 30%. Bahan baku diumpankan ke dalam digester dua tahap dengan laju alir 0,35 L/hari selama 40 hari. Berikut ini Hasil penelitian produksi gas dari limbah cair pabrik minyak kelapa sawit dan lumpur aktif menggunakan digester dua tahap sistem kontinyu

Tabel 6. Data Hasil Penelitian

Kombinasi Pome : Lumpur aktif	Waktu (hari)	Digester tahap		Total Volume (liter)	Peningkatan Produksi (%)
		I	II		
90 : 10	40	4	7,35	11,35	83,75

80 : 20	40	1,08	2,39	3,47	121,29
70 : 30	40	1,77	2,57	4,34	45,19

Produksi gas kombinasi 90:10 pada digester tahap I (D1) menghasilkan biogas sebanyak 4 liter. Waktu fermentasi berpengaruh nyata terhadap produksi gas. Volume gas selama 40 hari fermentasi mengalami peningkatan. Digester tahap II menghasilkan biogas sebanyak 7,35 liter. Volume gas meningkat dengan bertambahnya waktu fermentasi. Semakin panjang waktu fermentasi maka semakin meningkat aktivitas mikroorganisme untuk menggunakan substrat sehingga hal ini akan mempengaruhi produk yang dihasilkan (Suryani, 2013).

Ada beberapa hal yang masih menjadi kekurangan pada penelitian ini antara lain tidak adanya proses pengadukan dan juga pengendalian suhu pada digester. Proses pengadukan berperan penting dalam mengontrol pH dan menjaga lingkungan di dalam digester tetap seragam. Pengendalian suhu juga diperlukan untuk menjaga agar suhu pada digester tidak berfluktuasi karena Metana dapat diproduksi pada suhu rendah tetapi untuk produksi yang optimal, suhu di dalam digester harus dijaga di atas 20° C. Tingkat produksi metana akan naik sekitar dua kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10° C dalam rentang suhu mesofilik (25°C-40°C).

